

La Acústica del Piano

Juan José Burred Sendino

Convocatoria a Premio Extraordinario de Acústica
Octubre 1999

Conservatorio Profesional de Música *Arturo Soria*, Madrid

Versión revisada en Septiembre de 2004

Índice general

1. Introducción	1
2. Origen y evolución tecnológica del piano	2
3. El mecanismo	5
3.1. Influencia de la articulación y el tacto en la calidad del sonido . . .	5
4. Interacción entre el martillo y la cuerda	12
4.1. No-linealidad del martillo	12
4.2. Tiempo de contacto	14
4.3. Otros factores a considerar	17
5. Las cuerdas	18
5.1. Disposición de las cuerdas	18
5.2. Factor de encordado	19
5.3. Inarmonía	22
5.4. Doble caída	25
5.5. Consecuencias sobre el espectro	31
5.6. Los pedales	35
6. La tabla armónica	37
Bibliografía	39

Capítulo 1

Introducción

Las innovaciones tecnológicas introducidas en el piano a lo largo de su historia han sido, hasta entrado el siglo XX, fruto de la experimentación y la intuición, y no del estudio científico previo. Esta afirmación es válida en general para cualquier instrumento musical acústico. En realidad, el piano es uno de los instrumentos musicales más complejos que existen, y su estudio físico riguroso es una difícil tarea que no pudo ser abordada con éxito antes del planteamiento de una teoría acústica avanzada, como la desarrollada por Helmholtz a finales del siglo XIX. Cuestiones como la interacción entre el martillo y la cuerda, la comprensión mecánica completa del mecanismo de percusión o la explicación de algunas características tímbricas del piano no han sido aún resueltas de manera satisfactoria, y constituyen uno de los campos de investigación de mayor interés de la acústica musical. Sólo en los últimos años, y con la ayuda de potentes equipos informáticos, se están formulando modelos físicos completos y reales (no simplificados) del piano [1], que permitirán, desde una mejor comprensión del instrumento, proponer nuevas mejoras en la fabricación, así como aportar ideas de cara a la concepción de nuevos instrumentos.

En este trabajo se pretende realizar una panorámica completa pero resumida sobre los cuatro temas en los que se divide normalmente el estudio del piano, estos son: el mecanismo, la interacción martillo-cuerda, las cuerdas y la tabla armónica. Al principio se incluye una pequeña introducción histórica. En ningún momento se entrará en discusiones físicas o matemáticas complejas, sino que se tratará de destacar de manera intuitiva aquellos aspectos del comportamiento físico del piano que influyen de forma relevante en el sonido del instrumento. Se dejará de lado, por ejemplo, la explicación detallada del complicadísimo mecanismo de percusión, aspecto poco interesante desde el punto de vista acústico. Sin embargo, se hará especial énfasis en explicar las vibraciones de las cuerdas. Por otro lado, tampoco se tratarán los aspectos de análisis y síntesis, puesto que el objetivo de este trabajo no es describir y evaluar el sonido del piano, sino explicar el porqué de sus peculiares características.

Capítulo 2

Origen y evolución tecnológica del piano

Los instrumentos de cuerda con teclado, cuyos principales exponentes son el clavicordio, el clavicémbalo y el piano, son una invención relativamente reciente. Si bien se desconoce con exactitud cuándo se aplicó por primera vez un mecanismo de acción indirecta sobre las cuerdas, no fue hasta el siglo XV cuando se desarrolló con éxito el primer instrumento de este tipo: el clavicordio. Anteriormente, el teclado y los cordófonos habían evolucionado de manera independiente. Los primeros cordófonos consistían en una o varias cuerdas tensadas sobre una vara o sobre una tabla. Las liras de la Antigüedad y el salterio, citado repetidas veces en la Biblia, poseían ya cajas de resonancia. En el siglo VI a.C., Pitágoras, en sus experimentos para obtener las proporciones matemáticas de los intervalos, usó el monocordio, que consistía en una sola cuerda tensada a lo largo de una caja de madera con un puente deslizante, que modificaba la longitud de vibración libre de la cuerda, y por lo tanto la frecuencia.

Por otro lado, los teclados surgieron como solución lógica para accionar el mecanismo que dirigía las corrientes de aire a través de los tubos de los órganos. El arquitecto Vitruvio (S. I a.C.) escribió acerca de teclas rudimentarias usadas en los órganos de su época. En el siglo II d.C., Herón de Alejandría construyó un órgano con teclas provistas de muelles, que las devolvía a su posición inicial. Durante la Edad Media se dotó al monocordio de Pitágoras de un teclado, de tal forma que cada tecla era en realidad una palanca en uno de cuyos extremos tenía fijado un pequeño puente (llamado *tangente*), que al golpear la cuerda la dividía en la proporción adecuada y la hacía sonar (fig. 2.1). En este instrumento, la ejecución polifónica era obviamente imposible. Más tarde pasó a tener varias cuerdas, pero aún no tantas como teclas, permitiendo tocar únicamente ciertos intervalos armónicos. Esta versión recibe el nombre de policordio o clavicordio ligado, y fue muy usado hasta bien entrado el Barroco. Siguiendo este desarrollo, se llegó al clavicordio independiente, con una relación de una cuerda por nota, o incluso de dos cuerdas unísonas por nota. La forma definitiva de clavicordio

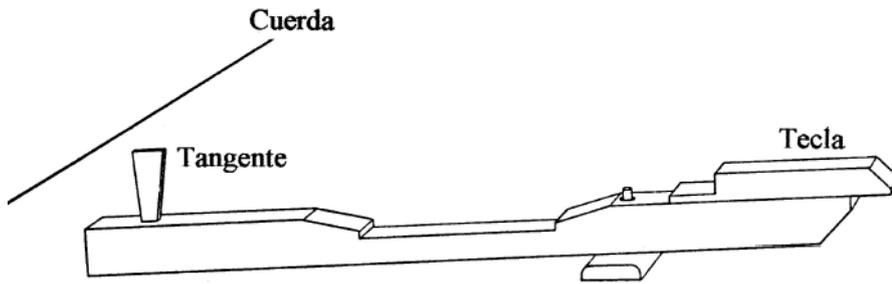


Figura 2.1: Mecanismo de tangente (fuente: [2]).

tuvo especial aceptación en el Estilo Sentimental (mediados del siglo XVIII), con compositores como Carl Philipp Emanuel Bach.

El gran inconveniente del mecanismo del clavicordio era que producía un sonido muy débil. Por contra, ofrecía al intérprete un gran control sobre la dinámica, permitiéndole incluso realizar vibratos, ya que la tangente permanece en contacto con la cuerda hasta que se suelta la tecla. En la búsqueda de una mayor potencia sonora se desarrollaron, en el siglo XV, la espineta y el virginal, con cuerdas más largas. Se vio que el método de la tangente era inadecuado para percudir cuerdas mayores, por lo que se intentó imitar la pulsación de las cuerdas con el dedo o con un plectro, interacción que puede producir un mayor volumen sonoro. De esta forma se llegó al llamado mecanismo de *cañón de plumas*, que consiste en un pequeño plectro que pulsa la cuerda, y en un apagador que ate-

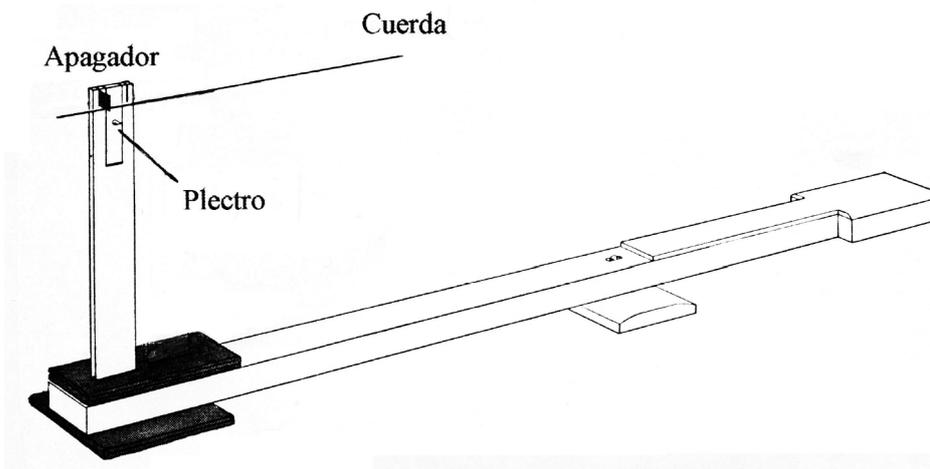


Figura 2.2: Mecanismo de cañón de plumas (fuente: [2]).

núa la vibración al liberar la tecla (fig. 2.2). En el siglo XVI se experimentó con cuerdas aún más largas y se perfeccionó el método de pulsación, lo que dio lugar al clavicémbalo, o clave. Al igual que en el clavicordio, se incluyeron en algunos casos varias cuerdas unísonas por nota para aumentar el volumen.

Sin embargo, el clave permite muy pocas alteraciones dinámicas al intérprete. Esto se intenta suplir en algunos casos con la implementación de diferentes registros de cuerdas, accionados mediante pulsadores o tiradores especiales, pedales o teclados múltiples. Además, es un instrumento que necesita ser afinado constantemente, y los frágiles plectros han de ser reemplazados a menudo.

El fabricante de claves florentino Bartolommeo Cristofori intentó solventar en un nuevo instrumento los problemas del clavicordio (bajo volumen) y del clave (escasa dinámica, rápida desafinación y notas poco sostenidas). En 1709 inventó lo que él llamó *Gravicembalo col piano e forte*, es decir, clavicémbalo con sonido débil y fuerte, que más tarde se llamaría *pianoforte* o, más corto, piano. En él introdujo características de sus predecesores, como la naturaleza percusiva del clavicordio, lo que permitía la dinámica, o la forma alada y los apagadores del clave, pero ideó un sistema de percusión nuevo, por medio de pequeños martillos. Un antecedente que tal vez sirviera de inspiración a Cristofori es el dulcemele; se trata de una cítara de tabla en la que se percuten las cuerdas con macillos sostenidos por el intérprete. Todos los mecanismos que se han ideado posteriormente no son más que sucesivas mejoras del ingenioso diseño inicial de Cristofori, cuyos rasgos esenciales se han mantenido hasta hoy. De entre éstos, el más importante es el del escape: el martillo retrocede inmediatamente después de haber golpeado la cuerda, aún si se sigue manteniendo la tecla. Esto alarga notablemente la duración de las notas. En 1783, el fabricante inglés Broadwood añadió el *pedal fuerte* o de resonancia, que levanta todos los apagadores.

A pesar de sus ventajas, el piano tardó unos cien años en imponerse al clavicémbalo. A partir de 1800, se sucedieron las mejoras en su construcción. Cabe destacar la invención del mecanismo de doble escape o de repetición por Erard en 1821, que permite la rápida sucesión de las notas, sin el cual no hubiese sido posible la escritura virtuosística de muchos compositores románticos. Las cajas de los instrumentos, todavía de madera, tenían que soportar tensiones cada vez mayores de las cuerdas. La introducción del marco de hierro en 1825 en Estados Unidos permitió aumentar enormemente la tensión, y por consiguiente la potencia sonora. En 1855, Henry Steinway, fabricante estadounidense de origen alemán, diseñó un piano de cola con marco de hierro colado, que ha servido como modelo a la práctica totalidad de instrumentos posteriores. Desde entonces, salvo pequeñas mejoras, no ha habido cambios sustanciales en la construcción de los pianos.

Capítulo 3

El mecanismo

Las figuras 3.1 y 3.2 muestran de manera muy simplificada el mecanismo de los pianos de cola y vertical, respectivamente. En el primero se percute la cuerda en dirección vertical y es básicamente el mecanismo de Cristofori. Se observa que el martillo no está directamente fijado a la tecla, como era el caso de la tangente de los clavicordios. Según se puede intuir observando la figura, el martillo recibe el impulso de la tecla a través de la palanca de escape. Después, el martillo se separa de ésta y sigue su curso libremente hasta alcanzar la cuerda. De esto se concluye que el martillo no está en contacto con la tecla en el momento en que golpea la cuerda, hecho crucial del que se derivan las características interpretativas del piano. El martillo, al rebotar tras percutir la cuerda, retrocede hasta una posición intermedia regulada por el soporte posterior, dejando a la cuerda vibrar libremente. Al soltar la tecla, tanto el soporte posterior como el martillo, apoyado en él, así como el apagador, retroceden a su posición original por el sólo efecto de la gravedad. En el caso del piano vertical, el retroceso sólo puede ser conseguido con resortes (ver figura), razón por la cual se considera este segundo mecanismo menos natural y de inferior calidad. El mecanismo de repetición no ha sido incluido en estos esquemas.

3.1. Influencia de la articulación y el tacto en la calidad del sonido

El hecho de que el martillo esté desconectado del resto del mecanismo en el momento del impacto implica, en principio, que el sonido producido sólo puede verse afectado por la velocidad con la que el martillo llega a la cuerda, o lo que es equivalente, por la mayor o menor fuerza con que se pulsa la tecla (más adelante se verá que esto no sólo modifica la potencia sonora, sino también el contenido tímbrico). Es en este punto donde se plantea la mayor polémica relacionada con el estudio acústico del piano: además de la fuerza de pulsación, ¿influye la articulación de los dedos, el *toque* propio de cada intérprete, u otros factores in-

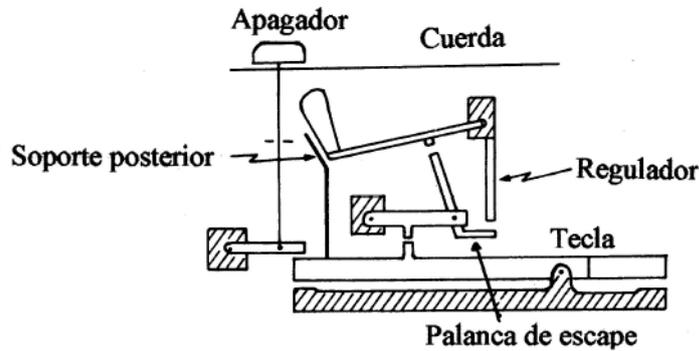


Figura 3.1: Mecanismo simplificado de un piano de cola (fuente: [3]).

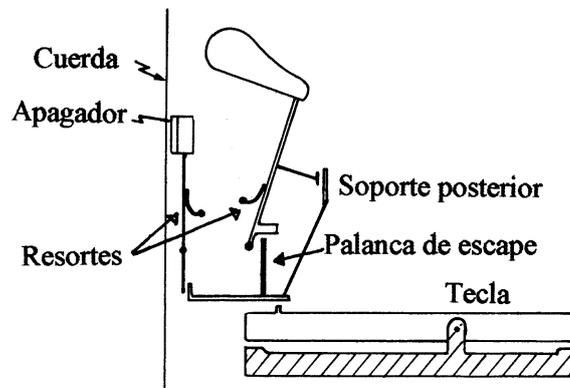


Figura 3.2: Mecanismo simplificado de un piano vertical (fuente: [3]).

terpretativos como la posición del brazo, muñeca, etc. en el resultado sonoro? Sobre esta cuestión se han realizado numerosos estudios. Recuérdese que en todo momento nos referimos a la pulsación de teclas sueltas, es decir, la pregunta anterior equivale a preguntarse si una nota tocada por un pianista de prestigio sonaría igual que la misma nota tocada con la misma fuerza en el mismo piano por un principiante. A continuación se comentan algunas conclusiones recientes al respecto [3, 4, 5].

En primer lugar, considérese el esquema de la figura 3.3, que constituye una simplificación aún mayor del mecanismo de acción vertical. En la figura se supone que se pulsa la tecla a una distancia de 18 cm. del punto de apoyo con una fuerza K . La longitud s es la distancia que recorre el extremo de la tecla hasta que toca el fondo (suele ser de 1 cm. aproximadamente), y se ha estimado que el recorrido que realiza el martillo es igual a 5.5 veces esta distancia. Esto implica que, si V_S es la velocidad de la tecla y V_0 es la velocidad del martillo, entonces $V_0 = 5.5V_S$.

Estudiando este modelo se obtuvieron las siguientes relaciones entre la fuerza

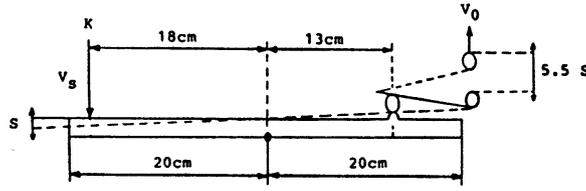


Figura 3.3: Modelo simplificado del mecanismo (fuente: [4]).

K , la velocidad del martillo V_0 y el tiempo T_L que tarda la tecla en recorrer s :

$$V_0 = 5.5 \sqrt{\frac{2s(K - K_S)}{M_A}} \quad (3.1)$$

$$T_L = \sqrt{\frac{2M_A s}{K - K_S}} \quad (3.2)$$

donde K_S es la fuerza estática necesaria para mover la tecla (es decir, la mínima fuerza que hay que ejercer sobre ella para que se mueva) y M_A es la masa aparente que percibe el dedo en el punto de contacto supuesto. En la figura 3.4 se representan estas ecuaciones (V_0 y T_L en función de K), suponiendo $K_S = 0.45$ N (Newtons) y $M_A = 0.3$ kg. Por tanto, para mover la tecla, K ha de ser mayor que 0.45 N, como se ve en la gráfica. Para una fuerza de unos 0.8 N, el martillo adquiere una velocidad de 70 cm/s (2.52 km/h), y tarda alrededor de 150 milisegundos en tocar el fondo del teclado. Aplicando 35 N, obtenemos una velocidad de 700 cm/s (25.6 km/h) y un tiempo de 1.2 milisegundos.

A pesar de la excesiva simplificación del modelo utilizado para estos cálculos, propuesto en 1965 [6], medidas experimentales posteriores confirmaron que los valores obtenidos arriba son una muy buena aproximación del caso real. Más tarde se perfeccionó el modelo y se fue acercando a la realidad, para lo cual se hizo imprescindible el uso de simulaciones por ordenador que permitieron realizar la enorme cantidad de cálculos que requería el estudio más realista. En 1985 se lograron establecer, con ayuda de estos modelos, los tiempos de contacto entre las diferentes piezas del mecanismo de una tecla, a lo largo de una pulsación [5]. Se descubrió la existencia de un factor que se pensaba podría estar relacionado con el tacto. Se trata del llamado *retardo de fondo de tecla*. La figura 3.5 muestra el diagrama de tiempos de contacto entre el martillo y la cuerda, y entre la tecla y el fondo del teclado para diferentes fuerzas de pulsación: f (*forte*), mf (*mezzoforte*), p (*piano*). Para realizar estas medidas se supuso que la tecla siempre llega hasta el fondo, tanto en *forte* como en *piano*, hecho que evidentemente no se cumple en la interpretación real. Como origen de tiempos se ha escogido el momento en el que el macillo golpea a la cuerda.

Como puede observarse, al tocar *forte*, la tecla llega al final de su recorrido

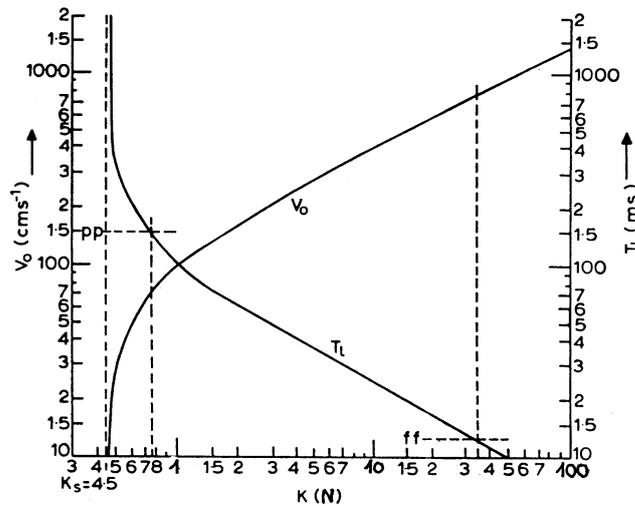


Figura 3.4: Velocidad del martillo y tiempo de recorrido de la tecla (fuente: [4]).

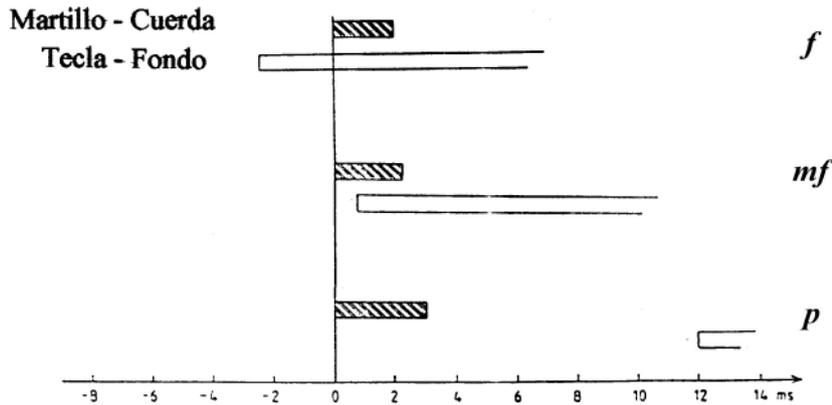


Figura 3.5: Tiempos de contacto (fuente: [5]).

unos 2 milisegundos antes de la percusión. Al tocar *piano*, primero se produce la percusión y, decenas de milisegundos después, el contacto de la tecla con el fondo (en este caso se midieron 12 milisegundos). El *retardo de fondo de tecla* es este intervalo entre el contacto de la tecla con el fondo y la percusión, y se considera negativo si aquél precede a ésta. La idea de que este retardo fuera de alguna manera consecuencia de la diferente manera de tocar una tecla (no ya de la diferente fuerza) se descartó al hacer una comparativa entre cómo tocaban diferentes teclas sueltas personas sin conocimientos musicales y pianistas profesionales. En cada caso se midió el mencionado retardo, y el resultado se muestra en la figura 3.6:

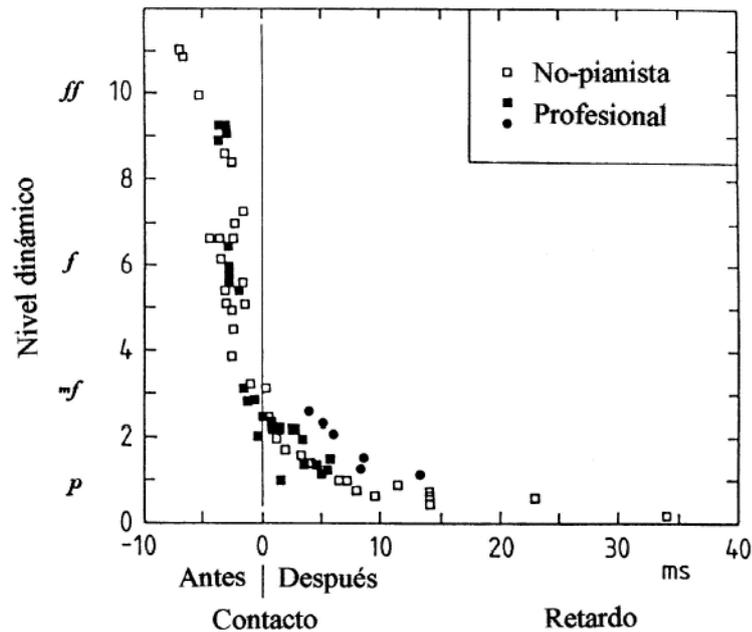


Figura 3.6: Relación entre nivel dinámico y retardo de fondo de tecla (fuente: [5]).

no existe una diferencia significativa entre pianistas y no-pianistas.

El hecho comprobado experimentalmente es que las diferentes articulaciones (*staccato*, *legato*, etc.), sí influyen en el movimiento de la tecla y del mecanismo, como muestra la figura 3.7. Es más, se constató que incluso los aspectos fisiológicos de la manera de tocar alteran la evolución del recorrido y la velocidad del mecanismo y, por ende, del martillo. Esto último se puede comprobar en la figura 3.8, donde se ha medido la velocidad de un martillo para una tecla atacada con la misma fuerza pero, en la figura 10a, con un movimiento sólo del dedo, en la fig. 10b, con un movimiento conjunto del brazo y del dedo, con el dedo relajado, y en la fig. 10c, con un movimiento conjunto del brazo y el dedo, con el dedo rígido. En cualquiera de los tres casos se observa, sin embargo, que el martillo tiene la misma velocidad en el momento en que llega a la cuerda, lo cual significa que el sonido producido será el mismo siempre. Lo mismo ocurre en el caso anterior de la articulación, tal y como se desprende de la referencia [5] (obsérvese que, mientras que la fig. 3.8 muestra la velocidad del martillo, la fig. 3.7 muestra la velocidad de la tecla).

Todos los resultados anteriores permiten afirmar que, efectivamente, la calidad de notas sueltas tocadas por un virtuoso no difiere de la calidad que pueda producir alguien no experimentado. Esta afirmación no es válida para la gran mayoría de instrumentos musicales, en los que el sonido es producido por el intérprete de una manera más directa. Conseguir una nota agradable puede significar un logro

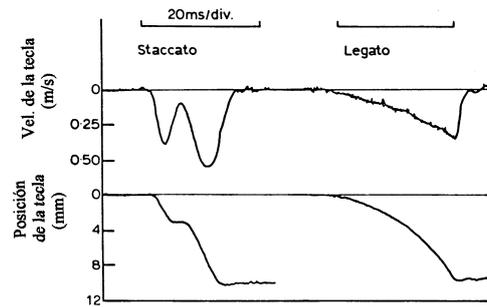


Figura 3.7: Influencia de la articulación en el movimiento de la tecla (fuente: [5]).

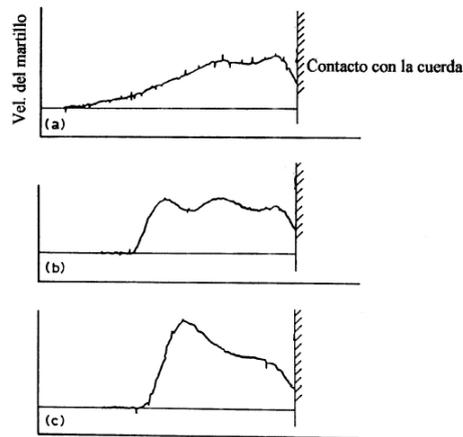


Figura 3.8: Influencia del tacto en el movimiento del martillo (fuente: [5]).

importante para el principiante de violín, por ejemplo.

Evidentemente, la enorme versatilidad y capacidad expresiva del piano tiene su origen en la manera de combinar varias notas. Un acorde *sí* puede sonar a concertista, o a principiante. La dificultad interpretativa reside en saber repartir adecuadamente las duraciones y volúmenes relativos de las notas simultáneas o sucesivas. Por otro lado, en toda la discusión anterior no se han tenido en cuenta los efectos de los apagadores, cuyo hábil manejo, bien sea por la manera en que se liberan las teclas, o por el uso del pedal derecho, multiplica las posibilidades interpretativas y los registros expresivos, a la vez que aumenta la dificultad.

Tampoco se ha hablado hasta ahora de los llamados *sonidos parásitos*. Estos son: el ruido que produce el mecanismo al moverse y detenerse, el ruido que produce el dedo al golpear las teclas, llamado *ruido de tecla superior*, y el ruido que produce la tecla al impactar contra el fondo del teclado, llamado *ruido de tecla inferior*. Estos ruidos contribuyen al efecto sonoro final, y han de ser considerados

dentro de las características tímbricas del piano. Con mucho, la contribución más importante es la del *ruido de tecla superior*. Es evidente que éste es controlado directamente por el intérprete y depende totalmente de la articulación y de su forma de tocar. Por ejemplo, en los pasajes *staccato* está muy presente, incluso puede contribuir a acentuar la articulación, mientras que en los pasajes ligados será casi inexistente.

Capítulo 4

Interacción entre el martillo y la cuerda

Este aspecto de la física del piano ha sido uno de los más estudiados a lo largo de este siglo, y es el que más ha avanzado en los últimos 15 o 20 años. La no-linealidad del sistema constituido por el martillo y la cuerda lo convierten en uno de los puntos más intrigantes y más complejos para el investigador. Queda aún por alcanzarse un modelo real y definitivo que proporcione una solución completa a este problema físico. En este apartado se muestran resumidamente los resultados de algunas investigaciones, y se explica qué influencia tienen algunos aspectos de la interacción sobre el sonido final.

4.1. No-linealidad del martillo

En los primeros pianos, los martillos estaban recubiertos de cuero, normalmente de piel de ciervo. El cuero perdía muy pronto su elasticidad, por lo que alrededor de 1830 fue sustituido por fieltro, que es una mezcla de algodón, seda y pelo. El ajuste de la dureza, la textura y el espesor del fieltro, así como de la masa y el tamaño de los martillos, parámetros todos ellos que varían a lo largo de la tesitura, es vital para un correcto balance sonoro entre diferentes notas, y es una de las tareas que más cuidado requieren en la fabricación. Todo ello, como se verá, influirá en mayor o menor grado en el sonido. En la figura 3.5 se mostraba que el tiempo de contacto entre el martillo y la cuerda duraba alrededor de 2 milisegundos. A lo largo de este tiempo, la fuerza que ejerce aquél sobre ésta no es constante, sino que vendrá determinada por los procesos de deformación que tienen lugar, así como por la reacción de la cuerda. En general, podemos dividir el tiempo de contacto entre un primer período de empuje, en el cual predomina la fuerza que el martillo ejerce sobre la cuerda, y un periodo de retroceso, en el cual la cuerda, que actúa como un muelle, reacciona y ejerce una fuerza sobre el martillo, que lo hará rebotar. Visto de otro modo, en el empuje, el martillo

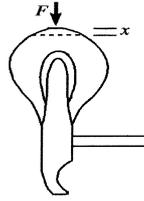


Figura 4.1: Medida de la no-linealidad del martillo (fuente: [7]).



Figura 4.2: Deformación del fieltro en función de la presión de impacto (fuente: [8]).

cederá energía cinética a la cuerda, y a la inversa en el retroceso. En el empuje, el fieltro se comprimirá, y en el retroceso, se expandirá.

La figura 4.2 muestra la deformación del martillo en milímetros en función de la presión del impacto, para los martillos correspondientes a las notas núm. 1, 37 y 73 (LA_0 , LA_3 y LA_6). En cada martillo se han considerado tres grados de dureza diferentes. Nótese que en los correspondientes a las notas más graves, la deformación del martillo es mayor, rozando el milímetro. Las gráficas muestran la no-linealidad que se mencionaba arriba: si el fieltro se comportara de manera lineal, lo que facilitaría enormemente el estudio teórico, la relación entre la fuerza F aplicada al fieltro y su deformación δ sería del tipo $F = k\delta$, y las gráficas serían líneas rectas. También muestran lo que se llama un *ciclo de histéresis*: la deformación para un determinado valor de presión durante el período de empuje no coincide con la deformación para el mismo valor de presión durante el período de retroceso. Esto se debe a que la velocidad de expansión del fieltro durante el retroceso es menor que la velocidad del martillo. Esto, a su vez, implica que en el momento en que cesa el contacto, el fieltro aún permanece deformado durante algunos milisegundos. La histéresis aporta una nueva complicación al análisis del sistema.

4.2. Tiempo de contacto

Mediante sofisticados sensores se consiguió [8] medir la fuerza ejercida sobre la cuerda a lo largo del tiempo de contacto. Los resultados se muestran en la figura 4.3. Para cada nota, la gráfica continua representa la fuerza, y la línea de puntos la deformación del fieltro. En la gráfica correspondiente al LA_0 se observa un hecho interesante: durante un tiempo de alrededor de un milisegundo no se ejerce fuerza sobre la cuerda, o lo que es lo mismo, hay una pérdida de contacto momentánea.

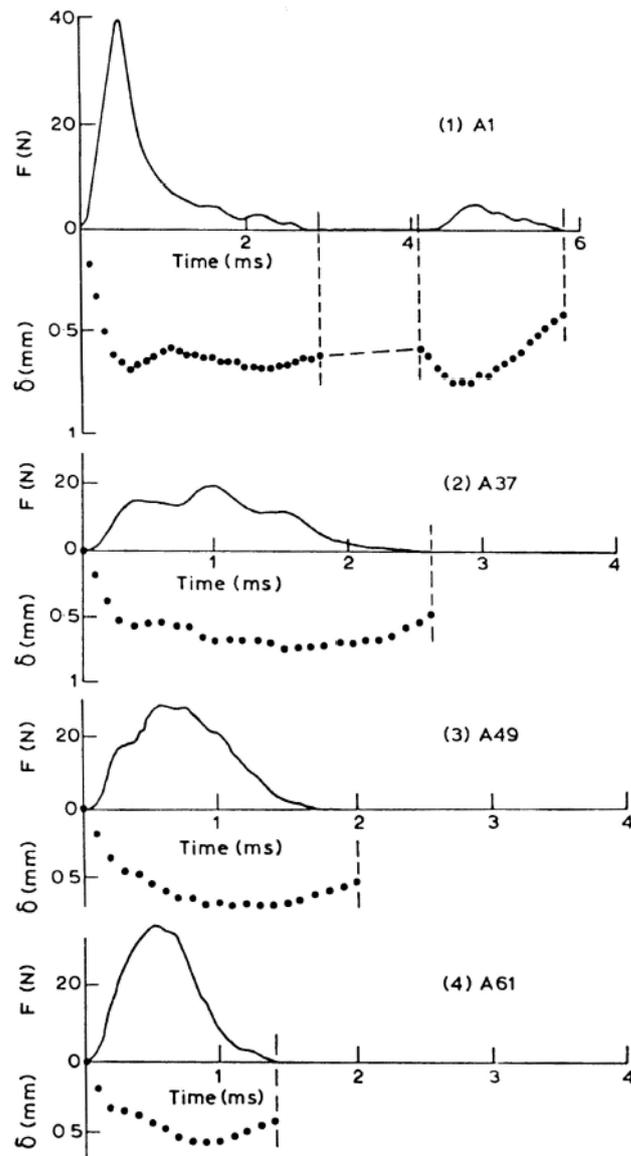


Figura 4.3: Deformación y fuerza durante el tiempo de contacto (fuente: [4]).

En este tiempo, el fieltro puede expandirse libremente, lo que se indica con la línea discontinua en la gráfica de la deformación. La pérdida de contacto momentánea es consecuencia de las primeras reflexiones de la onda que acaba de ser inducida en la cuerda por el martillo, que regresan al punto de contacto antes de que el martillo se haya retirado. Hasta hoy no se sabe exactamente hasta qué punto la pérdida de contacto influye en el sonido.

En la figura 3.5 se vio que el tiempo de contacto es menor cuanto mayor es la fuerza con la que se pulsa la tecla. Por otro lado, la figura 4.3 indica que también será menor cuanto más aguda sea la nota, es decir, cuanto menor sea la masa del martillo. Los tiempos de contacto para todas las teclas, supuestas tocadas con la misma fuerza, están dados en la figura 4.4, para los casos de un piano vertical pequeño, un piano vertical grande, y un piano de media cola. Las discontinuidades e irregularidades de las curvas se deben de nuevo a complicados procesos de reflexión de las ondas en las cuerdas. Generalmente se cumple en todos los pianos que el tiempo de contacto es aproximadamente igual a la mitad del período de vibración de la cuerda para la nota DO_4 . La frecuencia del DO_4 es de unos 262 Hz, con lo que el período será su inverso, 0.0038 s, y la mitad del período, 0.0019, es decir, unos 2 milisegundos. Como se puede comprobar, la figura anterior está de acuerdo con esto: para la nota DO_4 , que es la número 40, los tiempos de contacto de los tres tipos de piano están muy próximos a los 2 milisegundos. Pero veamos qué consecuencias tímbricas tiene la duración del contacto. Para ello, hay que considerar primero otro factor: la posición de contacto. En la siguiente discusión se considerará que los modos de vibración de una cuerda de piano son armónicos, aunque en el apartado siguiente se verá que no es así.

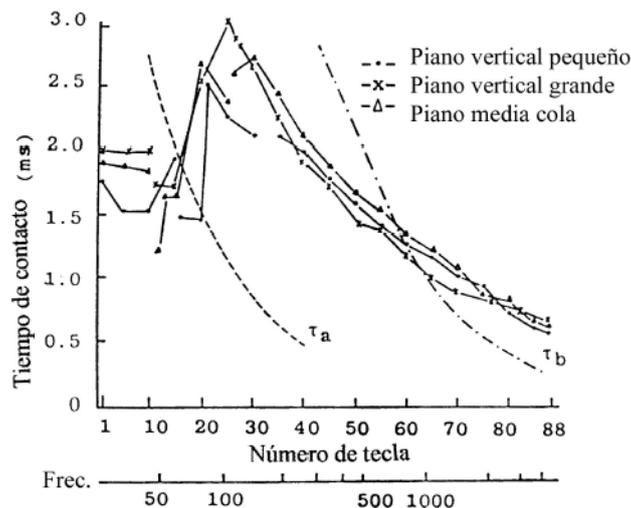


Figura 4.4: Tiempos de contacto a lo largo de la tesitura (fuente: [4]).

Tras numerosas pruebas a lo largo de la historia del piano, se ha determinado que la posición idónea para la percusión es entre un séptimo y un octavo de la longitud de la cuerda. En general se puede afirmar que si el punto en el que una cuerda es *pulsada* (no percutida) coincide con un punto nodal de un modo cualquiera de vibración de la cuerda, éste modo no será excitado. El caso más intuitivo es el del modo fundamental de vibración de una cuerda fija en ambos extremos. Sus nodos coinciden con los extremos, por lo que la máxima excitación de la frecuencia fundamental tendrá lugar si pulsamos la cuerda exactamente en su centro, es decir, en la posición antinodal del primer modo. A medida que pulsemos más lejos del centro, la cuerda vibrará menos, y será imposible hacerla vibrar pulsándola justo en los extremos. De la misma forma, si pulsamos una cuerda a un séptimo de su longitud, el modo séptimo no será excitado, como tampoco lo serán sus múltiplos enteros: el 14º, 21º... En la música, esto podría suponer una ventaja, ya que el séptimo armónico de una nota se aleja bastante de la séptima menor temperada. Este hecho se ha utilizado como justificación para la elección del punto de contacto en el piano, y así sigue constando en algunos artículos y libros relativamente recientes [9, 10, 11].

Sin embargo, se ha demostrado que este argumento no es del todo válido. En el piano, la cuerda no es pulsada, sino percutida, por lo que no podemos suponer que la interacción que origina la vibración sea instantánea. La percusión tiene lugar a lo largo del tiempo de contacto, breve pero lo suficientemente largo como para permitir la formación de ondas estacionarias armónicas en la fracción más corta de la cuerda (ver figura 4.5). Suponiendo que el punto de contacto es exactamente un séptimo de la cuerda, las ondas estacionarias constituirán la serie armónica de una nota de frecuencia siete veces superior a la de la cuerda total, que son precisamente los armónicos supuestamente eliminados (7,14,21...). Al separarse el martillo, todos ellos se propagarán al resto de la cuerda, y el resultado final será que todos los modos de vibración estarán presentes en la cuerda.

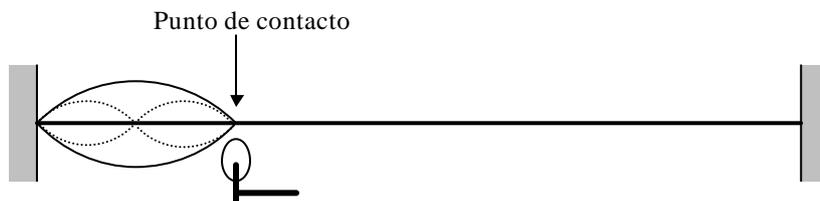


Figura 4.5: Ondas estacionarias producidas en el tiempo de contacto.

Es en este punto donde juega un papel importante el tiempo de contacto: cuanto mayor sea éste, menor serán las amplitudes de los armónicos múltiplos de

7, ya que las ondas estacionarias en la parte corta de la cuerda habrán perdido más energía antes de propagarse. Es así como el tiempo de contacto influye en el timbre. También influye, de manera indirecta, la masa del martillo, ya que, cuanto mayor sea ésta, más durará el contacto.

4.3. Otros factores a considerar

Otro parámetro importante a considerar es la longitud de la superficie del martillo que está en contacto con la cuerda. Si ésta es superior a la longitud de onda de un modo particular, este modo se verá fuertemente atenuado. Esto sólo afecta a los parciales agudos, los de menor longitud de onda. Por tanto, los martillos pequeños y finos del registro agudo producirán un sonido más rico en parciales superiores que los martillos de los graves.

De manera similar, los martillos de mayor dureza excitan en mayor medida los modos superiores que los más blandos. La compresión del fieltro durante el contacto hace que el martillo aumente momentáneamente en dureza. Como consecuencia, cuanto más velocidad adquiera el martillo, más se comprimirá y mayor será la excitación de los parciales superiores. Por esta razón, las notas *fortissimo* son mucho más ricas en la parte alta del espectro que las *pianissimo*, como se puede ver en la figura 4.6.

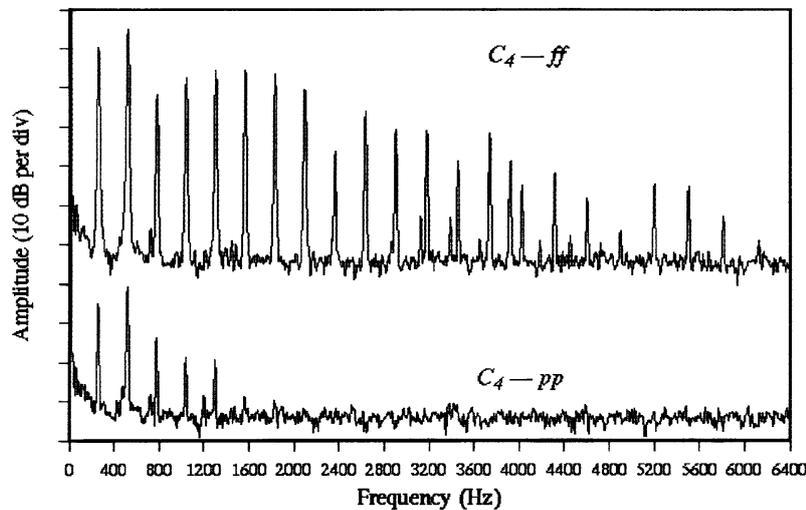


Figura 4.6: Espectros del DO_4 tocado *ff* y *pp* (fuente: [7]).

Capítulo 5

Las cuerdas

5.1. Disposición de las cuerdas

Desde el punto de vista estructural, podemos considerar al piano como una cítara accionada con teclado. También es habitual referirse a él como un arpa con teclado, pero esta comparación es menos afortunada, ya que, mientras que en el arpa las cuerdas están sujetas entre una barra (el *cuello*) y la caja de resonancia, penetrando en ella en dirección oblicua, en el piano están tensadas en paralelo al cuerpo resonador, como es el caso de las cítaras. Por otro lado, el cuerpo resonador del piano no es una caja, sino una tabla de resonancia, o *tabla armónica*. La vibración de las cuerdas se transmite hacia ella a través del puente, situado cerca del extremo contrario a la parte de la percusión. La configuración esquematizada de las cuerdas se muestra en la figura 5.1. La longitud efectiva de la cuerda, es decir, la que determina su frecuencia, se mide entre la llamada barra *Capo d'astro* y el puente. La cuerda continúa en ambos extremos hasta las clavijas de afinación y de sujeción, fuertemente ancladas en el marco de hierro.

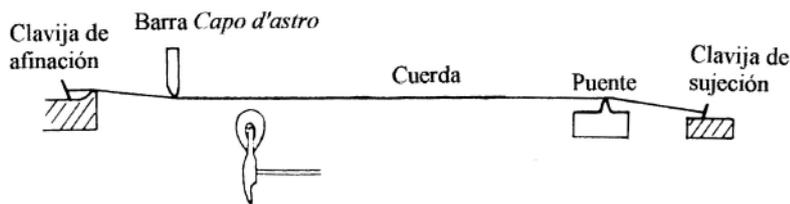


Figura 5.1: Montaje de las cuerdas (fuente: [3]).

En el piano moderno, las cuerdas son de acero. Este material permitió, en la constante búsqueda histórica de potencia sonora, una mayor tensión, y por tanto, un mayor volumen. En conjunto, la tensión de las cuerdas de un piano

de cola puede llegar a ser de 30 toneladas, y en uno vertical de 14 toneladas. A aumentar el volumen contribuyen también las dobles y triples cuerdas aunque, como se verá, también tienen un efecto inesperado sobre el timbre. En general, las cuerdas simples y las dobles, que constituyen el registro grave, están envueltas en cobre. Este entorchado es tanto más grueso cuanto más grave es la cuerda, llegando incluso al doble entorchado en las notas más bajas. Otra característica importante en la disposición de las cuerdas es el *sobreencordado*, que consiste en el cruce de las cuerdas más graves por encima de las cuerdas del registro medio. Esto supone que las cuerdas graves, por un lado, y las medias y agudas por otro, tendrán puentes independientes. Todas las características mencionadas sobre la disposición de las cuerdas se pueden observar en la figura 5.2. A lo largo de este apartado y del siguiente se irán justificando cada una de ellas.

5.2. Factor de encordado

Conviene aquí recordar la fórmula que da la frecuencia de una cuerda sujeta entre dos extremos fijos, en función de su tensión, su masa y su longitud:

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{T}{\lambda}} \quad (5.1)$$

donde l es la longitud de la cuerda, T la tensión y λ la densidad lineal de la cuerda (masa por unidad de longitud). De esta fórmula se deduce que, si queremos obtener una cuerda que, con la misma tensión y con la misma densidad (mismo material), vibre a la mitad de frecuencia, es decir, una octava más grave, tendremos que tomar el doble de longitud. En ningún instrumento de cuerda se mantiene la misma tensión y la misma densidad en toda la tesitura, sino que se varían de forma que no haya que doblar la longitud en cada octava. En el violín o la guitarra, por ejemplo, todas las cuerdas son de la misma longitud, y su diferente altura viene determinada por su diferente densidad (a mayor grosor, mayor densidad lineal) y tensión. En el arpa o el piano, las cuerdas sí tienen un aumento gradual de la longitud, pero no en un factor dos, que haría que las cuerdas más graves alcanzaran los casi cinco metros en el caso del piano. El *factor de encordado* es la proporción entre las longitudes de las cuerdas de las octavas sucesivas. Esta proporción dependerá a su vez de la proporción entre las densidades y las tensiones entre octavas sucesivas.

Si f_2 es la frecuencia de una nota una octava más alta que una nota de frecuencia f_1 , entonces, usando la ec. 5.1:

$$\frac{f_2}{f_1} = 2 = \frac{l_1}{l_2} \sqrt{\frac{T_2 \lambda_1}{T_1 \lambda_2}} \quad (5.2)$$

Por otro lado, la densidad lineal es igual a la densidad específica del material (densidad por unidad de volumen) multiplicada por el área de una sección de

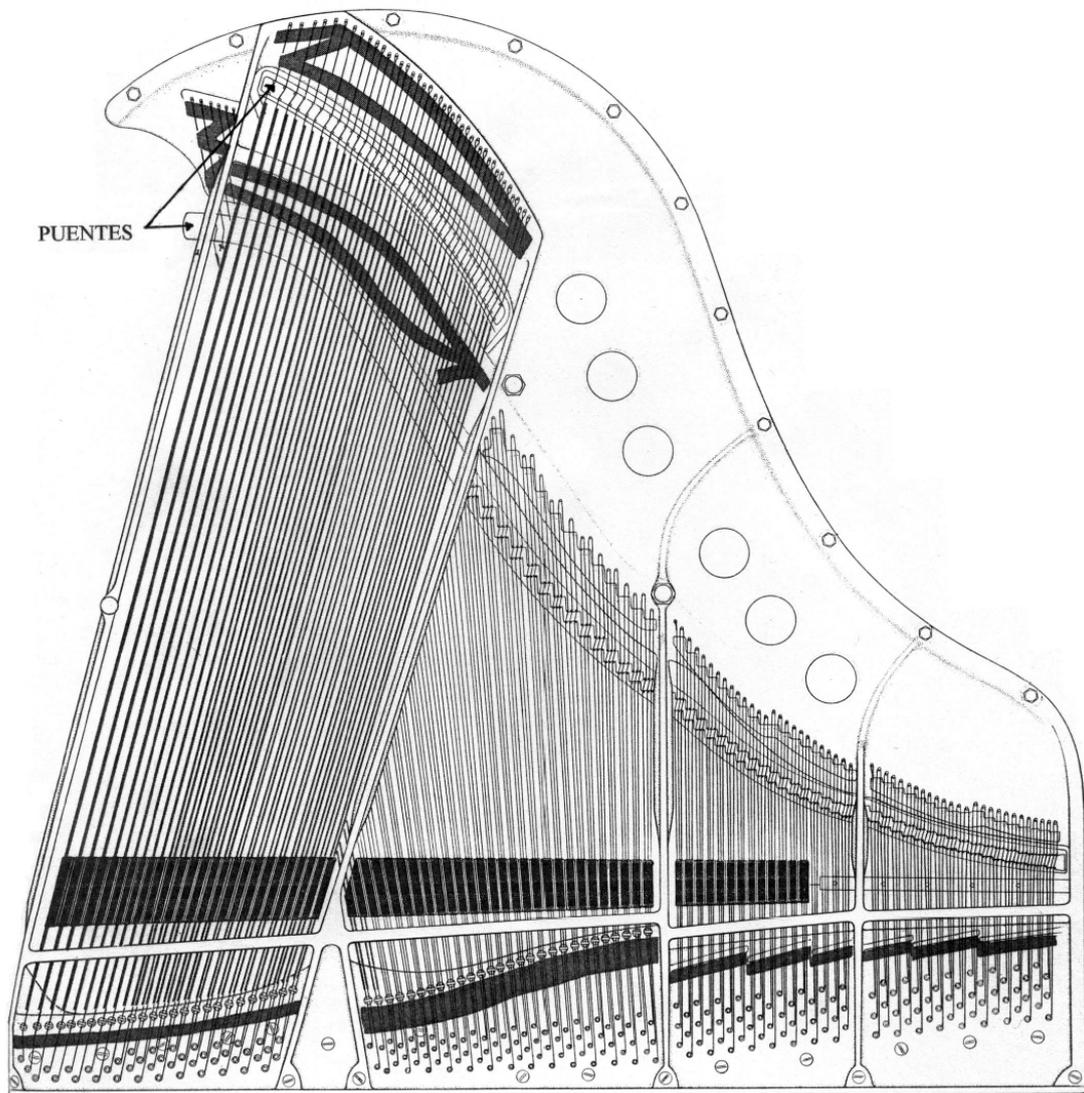


Figura 5.2: Disposición general de las cuerdas (fuente: [2]).

cuerda, que supondremos perfectamente circular. Es decir,

$$\lambda = \rho \pi r^2 = \frac{\rho \pi}{4} d^2 \quad (5.3)$$

donde ρ es la densidad específica y $d = 2r$ es el diámetro de la cuerda. Sustituyendo en la ec. 5.2, y suponiendo que las dos cuerdas son del mismo material, es decir, $\rho_1 = \rho_2$, queda:

$$2 = \frac{l_1}{l_2} \sqrt{\frac{T_2}{T_1} \frac{d_1}{d_2}} \quad (5.4)$$

donde $\frac{l_1}{l_2}$ es el factor de encordado (FE), $\frac{T_1}{T_2}$ es el factor de tensión (FT) y $\frac{d_1}{d_2}$ es el factor de diámetro (FD), proporcional, como se deduce de la ec. 5.3, a la raíz cuadrada del factor de densidad. Despejando FE :

$$FE = 2 \frac{\sqrt{FT}}{FD} \quad (5.5)$$

$$l_1 = FE l_2 \quad (5.6)$$

En el piano, $FT \approx 1,2$ y $FD \approx 1,15$, con lo que se obtiene $FE \approx 1,9$. Se considera que la longitud óptima para la cuerda del DO_4 es de entre 60 y 65 cm. Con todo esto, se obtiene la siguiente relación entre la frecuencia en octavas y la longitud de las cuerdas en metros:

$$l = FE^{4-oct} l_{DO_4} \quad (5.7)$$

donde oct es el número de octava y l_{DO_4} es la longitud del DO_4 . Aplicar esta ecuación daría como resultado una longitud de unos cuatro metros y medio para el DO_1 , como indica la fig. 5.3. Para evitar estas longitudes impracticables, en la zona de los graves se busca reducir gradualmente el factor de encordado, lo que le da al piano su característica forma alada. La ec. 5.5 sugiere que esto se puede conseguir aumentando gradualmente FD , es decir, aumentando el diámetro al bajar la frecuencia. Esto se lleva a cabo mediante el entorchado en cobre. El grado de modificación del FE depende del tipo y tamaño del piano. En un piano de gran cola, por ejemplo, la cuerda más baja no mide más de dos metros.

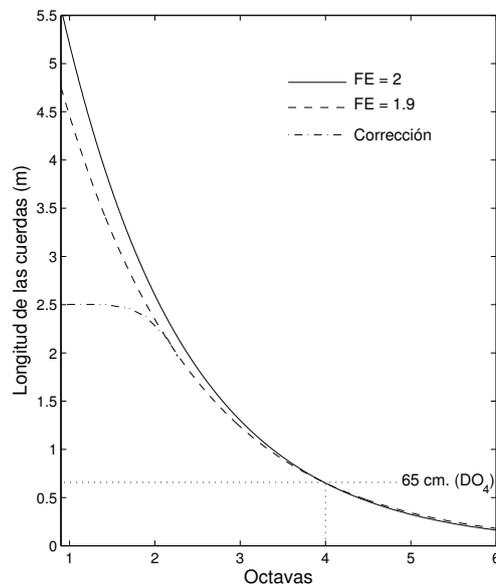


Figura 5.3: Comparación de diferentes factores de encordado.

5.3. Inarmonía

En la mayoría de los cordófonos, los parciales producidos en las cuerdas son armónicos, como corresponde al caso de una cuerda ideal, es decir, de elasticidad infinita, fija en ambos extremos. En realidad, toda cuerda posee un cierto grado de rigidez, pero en estos casos la desviación respecto al caso ideal es despreciable. En el piano, la enorme tensión a la que son sometidas las cuerdas las hace altamente rígidas, lo que obliga a enfocar el problema desde un punto de vista no ideal.

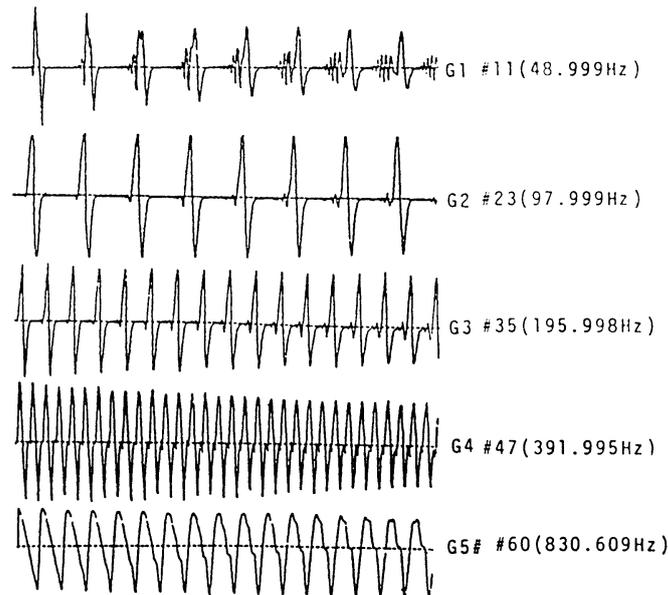


Figura 5.4: Formas de onda para varias cuerdas Sol (fuente: [4]).

Se comprobó experimentalmente que el efecto de la rigidez es que la cuerda se comporte como un medio dispersivo. Esto quiere decir que, en ella, las ondas sonoras no se propagan todas a la misma velocidad, como es habitual, sino que la velocidad de propagación depende de su frecuencia. A mayor frecuencia, mayor velocidad de propagación. Por tanto, en el caso de un sonido musical compuesto, los parciales superiores se propagarán a mayor velocidad que el modo fundamental y los parciales inferiores. Esto se puede apreciar en la fig. 5.4, donde se han calculado las formas de onda de cinco notas teniendo en cuenta la rigidez. Si nos fijamos en la primera forma de onda, vemos que, al transcurrir un cierto tiempo tras el inicio de la vibración, un grupo de pequeñas crestas, correspondientes a los parciales superiores, se ha adelantado a la cresta total del comienzo, que contenía todos los parciales. En el resto de notas ocurre lo mismo, aunque de manera menos clara. Se puede demostrar matemáticamente que este efecto tiene como resultado la *inarmonía* de los parciales: los modos ya no serán exactamente

múltiplos enteros de la fundamental. En el caso del piano, la inarmonía tiene como resultado la cada vez mayor desviación hacia frecuencias más altas de los parciales (fig. 5.5). En término medio, la inarmonía es tal que hace subir un tercio de semitono al armónico 10°, y un tono entero al armónico 20°. El parcial 15° coincide aproximadamente con el que sería, si no hubiera rigidez, el armónico 16°.

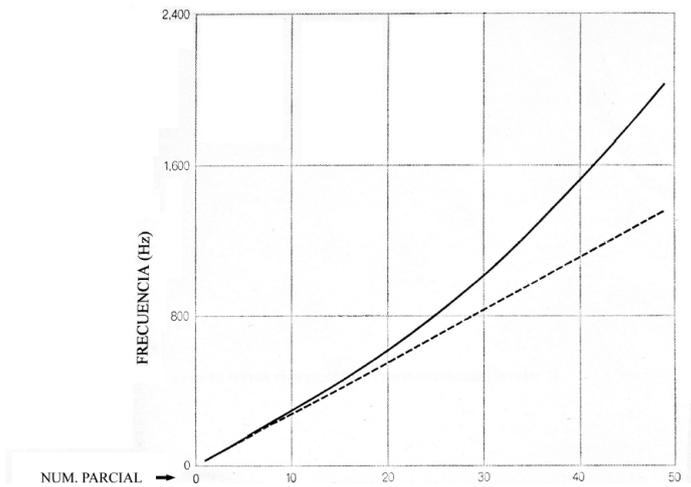


Figura 5.5: Inarmonía. La línea de trazos representa una serie armónica (fuente: [2]).

La frecuencia del parcial n -ésimo para una cuerda rígida viene dada por la siguiente fórmula:

$$f_n = f_0 n \sqrt{1 + Bn^2} \quad (5.8)$$

donde f_0 es la frecuencia fundamental, n es el número de parcial y B es el *coeficiente de inarmonía* [12]. Este coeficiente es el que representa el grado de inarmonía, y es directamente proporcional a la tensión aplicada y a la proporción diámetro/longitud de la cuerda. La inarmonía variará, pues, a lo largo de la tesitura. Esta variación se muestra en la figura 5.6. Se observa que la inarmonía es mínima en el registro central y crece hacia los extremos. Son dos las razones para el crecimiento en la zona grave: en primer lugar, las cuerdas tienen una mayor relación diámetro/longitud, ya que se va acortando cada vez más el factor de encordado y aumentando el diámetro, por lo que B irá aumentando. Siguiendo el mismo razonamiento, se concluye que la inarmonía en los graves será menor en los pianos de cola, con cuerdas inferiores más largas, que en los pianos verticales. En segundo lugar, el entorchado de cobre provoca reflexiones adicionales de la onda en los puntos donde éste acaba, es decir, cerca de la barra *Capo d'astro* y del puente. Se comprobó que estas reflexiones contribuyen a la inarmonía. Asimismo, B crece en el registro agudo debido a que la corta longitud y la alta tensión hacen que las cuerdas se comporten casi como barras.

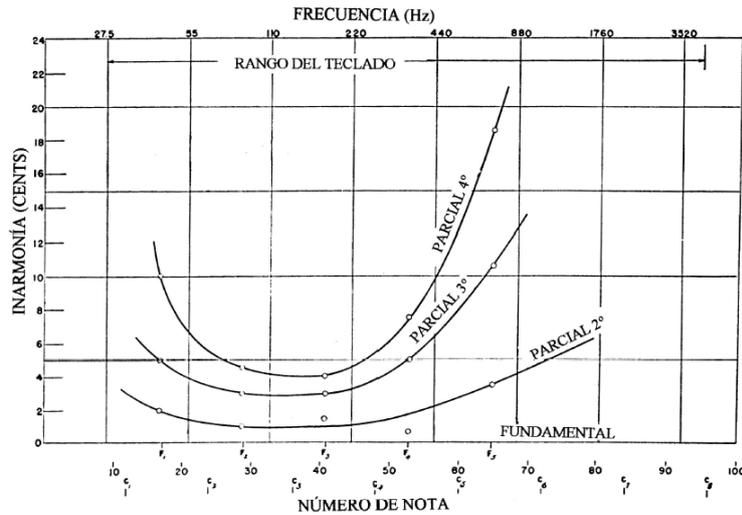


Figura 5.6: Inarmonía en función de la posición de la cuerda (fuente: [13]).

¿Es la inarmonía un efecto deseable? En la primera mitad de siglo se propusieron numerosos métodos para compensarla. Sin embargo, una serie de experimentos y encuestas realizadas en 1965 en la universidad de Brigham Young demostraron que una leve inarmonía no sólo era deseable, sino que era una de las características que aportaba mayor riqueza y calidez al sonido del piano [2]. Mediante una serie de osciladores eléctricos se sintetizaron dos sonidos de piano: uno con los parciales perfectamente armónicos y otro con un cierto grado de desviación. Las muestras fueron sometidas a un jurado compuesto por músicos y no-músicos. Ambos coincidieron en describir el sonido armónico como “frío”. La valoración subjetiva de sonidos de piano simultáneos como “cálidos” está tal vez relacionada con los batidos que se producen en los parciales más agudos como consecuencia de la inarmonía. Por otro lado, el jurado fue capaz de distinguir correctamente entre sonidos sintéticos armónicos y sonidos de pianos reales, mientras que sólo acertó la mitad de las veces cuando se trataba de distinguir entre sonidos sintéticos inarmónicos y sonidos reales.

Sin embargo, un grado excesivo de inarmonía sí empeora la calidad del sonido. En la figura 5.6 hemos visto que la inarmonía crece notablemente en las bajas y altas frecuencias. En el caso de altas frecuencias esto no es especialmente preocupante, ya que los parciales superiores se adentran en la región de frecuencias inaudibles. En los graves, por el contrario, todos los parciales relevantes son audibles. El espectro de las notas graves del piano tiene la característica de que la amplitud del modo fundamental de vibración es muy inferior a la de los armónicos medios. El oído, a falta de una fundamental clara, intenta “reconstruir” la altura del sonido basándose en las diferencias entre los sucesivos parciales. Si éstos son perfectamente armónicos, se determina sin problemas la fundamental y el oyente

“imaginará” que oye el sonido completo. Si los parciales son muy inarmónicos, la altura de la nota quedará confusa, y el sonido se considerará más desagradable. Por este motivo conviene reducir la inarmonía en las notas graves del piano. Esto se consigue alargando en lo posible las cuerdas. Esta es una de las razones por las que el piano de cola, con cuerdas bajas más largas, se considera de mejor calidad que el vertical. En las zonas media y aguda, no hay una diferencia sustancial de la inarmonía entre modelos de cola y vertical.

Por último, cabe destacar un interesante efecto que la inarmonía tiene sobre la afinación del piano [13]. El proceso de afinación consiste en eliminar en lo posible los batidos que se producen entre determinados parciales al comparar una serie de intervalos. Se comienza afinando una de las octavas centrales y, basándose en los componentes de sus notas, se va *saltando* hacia las demás. Dado que estos componentes son inarmónicos, el resultado de la comparación es que las octavas más agudas se irán afinando alejándose cada vez más *hacia arriba* de la afinación temperada, y las graves alejándose *hacia abajo* (fig. 5.7). Este fenómeno se conoce como *afinación estirada*. La desviación total es de unos 30 cents entre el DO_1 y el DO_8 , siendo el DO_1 15 cents más grave que su valor temperado y el DO_8 15 cents más agudo. Ni siquiera la octava, que es el único intervalo teóricamente justo de la afinación temperada, es exacta en el caso del piano. Sin embargo, la afinación estirada es necesaria para que el piano esté afinado *consigo mismo*.

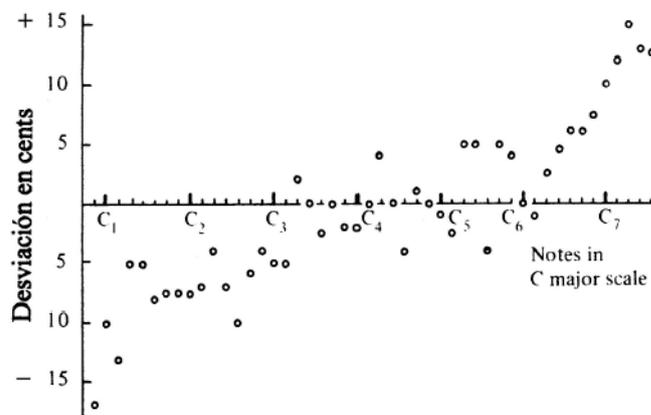


Figura 5.7: Afinación *estirada* (fuente: [3]).

5.4. Doble caída

El sonido del piano es producido por vibraciones libres. Esto significa que, una vez se ha aportado energía a la cuerda mediante el martillo, se deja vibrar libremente, al contrario que, por ejemplo, el violín, en el que la fuerza es mantenida

por el arco. Por tanto, la evolución temporal de la amplitud del sonido, es decir, la envolvente, carecerá de zona de mantenimiento y vendrá determinada por la forma en que la cuerda va perdiendo esta energía. Recuérdese que la envolvente temporal juega un papel tan importante como el espectro en la caracterización del sonido de un instrumento. Es, pues, del máximo interés estudiar el período de caída de las notas. Evidentemente, a lo largo de toda la discusión siguiente no se considerarán los apagadores. Siempre que se hable del tiempo de caída de una nota se sobreentenderá que se mantiene pulsada la tecla hasta que el sonido se hace inaudible.

Fue en los años 40 cuando se llevó a cabo por primera vez el examen de la caída con cierto rigor experimental [14]. Midiendo las envolventes se obtuvieron, para la mayoría de las notas, gráficos del tipo de la figura 5.8. En ella, se observa que la fase de ataque es casi instantánea, como corresponde a un instrumento de percusión. Como era de esperar, no existe fase de mantenimiento. Los resultados interesantes son los que se observan en la caída: se distingue una primera fase en la que la tasa de atenuación es elevada, y una segunda en la que el sonido decae con más lentitud. La primera fase de la caída recibe el nombre de *sonido inmediato*, y la segunda, el de *resonancia*. Este fenómeno, conocido como *doble caída* o *doble atenuación*, es una característica acústica casi exclusiva del piano, y desde que fue descubierto ha venido intrigando a los investigadores. No fue hasta 1977 cuando se propuso una explicación satisfactoria, con la publicación del importante artículo de Gabriel Weinreich, “*Cuerdas acopladas del piano*” en el diario de la Sociedad Americana de Acústica [15]. Este artículo constituye uno de los hitos de la investigación pianística.

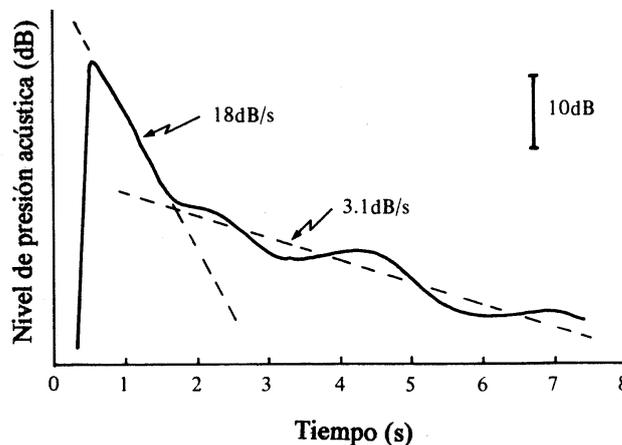


Figura 5.8: Doble caída (fuente: [3]).

Weinreich llegó a la conclusión de que la doble caída tenía su origen principal en la utilización de dobles y triples cuerdas. Como se ha mencionado en la introducción, esta es una estrategia empleada desde los inicios del clavicordio con

el objetivo de aumentar el volumen. Otro camino a seguir podía haber sido el utilizar cuerdas simples de mayor diámetro, pero en el caso del piano esto hubiese creado un grado de inarmonía inaceptable.

Es prácticamente imposible conseguir una afinación perfecta entre las cuerdas de un grupo unísono, siendo lo normal cometer *errores* de unos pocos cents. Al igual que la inarmonía, desde el punto de vista físico estas pequeñas desafinaciones pueden parecer indeseables, pero, una vez más, la práctica musical ha demostrado que no es así. Por un lado, la fase de resonancia contribuye enormemente a la capacidad que tiene el piano de sostener las notas durante un tiempo prolongado, uno de sus mayores atractivos. Por otro, los batidos producidos por la desafinación enriquecen el sonido de forma similar a como lo hacía la inarmonía: se realizaron nuevas encuestas, dando como resultado mayoritario que un piano perfectamente afinado sonaba *muerto*. Hoy en día, los buenos afinadores introducen desafinaciones voluntarias cuidadosamente calculadas entre las cuerdas unísonas.

El simple hecho de utilizar cuerdas múltiples, aunque estén perfectamente afinadas, ya produce el efecto de la doble caída. La desafinación de las cuerdas también contribuye, de manera independiente. A continuación se explicarán los dos casos por separado.

Para el primer caso, supondremos que las cuerdas están perfectamente afinadas. Para simplificar, consideraremos sólo dos cuerdas. Estas pasarán por el puente muy cerca una de otra. Se dice entonces que las cuerdas están *acopladas* a través del puente: habrá una gran transmisión mutua de las vibraciones, o, lo que es lo mismo, el movimiento de una influirá altamente en la otra. La transferencia de energía a través del aire es, en comparación, despreciable. La cantidad de energía que se transmite a través del puente depende de la diferencia de fase del movimiento de las cuerdas, siendo el movimiento del puente la suma de los movimientos de las cuerdas. Si las cuerdas vibran con la misma frecuencia y amplitud, pero en oposición de fase, el puente no se moverá y la transmisión de energía será nula. Si las cuerdas vibran en fase, el movimiento del puente será el doble que si vibrase una sola cuerda, y la transmisión será máxima. El acoplamiento entre las cuerdas y el puente constituye lo que se llama un *apoyo resistivo*. Este tipo de apoyo no modifica la frecuencia de la cuerda, aunque sí amortigua su movimiento. El puente, como sabemos, a su vez acopla a las cuerdas con la tabla armónica. A través de él se transmite la energía hacia ésta, desde donde es radiada al aire. A mayor transferencia de energía entre las cuerdas y la tabla, más pronto se agotará el movimiento de la cuerda, el sonido será más corto y de mayor intensidad. Si la transmisión es pequeña, como en el caso de la oposición de fase entre dos cuerdas, la energía se disipará lentamente, prolongando el sonido, que tendrá muy poco volumen. ¿Cómo se explica, pues, que dos cuerdas unísonas, que, se supone, vibrarán en fase al ser golpeadas por el martillo, y por tanto, transferirán muy rápidamente su energía al puente, provoquen precisamente el efecto contrario, es decir, el aumento del tiempo de caída?

La razón es que en una situación acústica real es imposible que dos cuerdas vibren *exactamente* en fase. Irregularidades aleatorias alterarán mínimamente el movimiento, y romperán la simetría. En el caso que nos ocupa, la mayor fuente de irregularidades es la superficie de contacto del martillo, que no podemos considerar perfectamente lisa. Por esa razón, en el impacto una de las dos cuerdas adquirirá una amplitud ligeramente superior a la otra (fig. 5.9). Al principio, las dos cuerdas vibran en fase y sus movimientos se sumarán en el puente. La transferencia de la energía a la tabla (o, lo que es equivalente, la atenuación) será rápida. Esta es la fase de *sonido inmediato*. Cuando la cuerda de menor amplitud inicial se atenúa por completo no se detiene su movimiento: el puente vibra todavía debido a la otra cuerda, y fuerza a la primera a seguir moviéndose. En un apoyo resistivo, como en este caso, siempre hay una diferencia de fase de un cuarto de ciclo entre el movimiento de una cuerda y el movimiento que ésta induce sobre el puente (la demostración de esta propiedad es sencilla y se omitirá aquí). Del mismo modo, si un puente en movimiento empuja a una cuerda inicialmente en reposo, la diferencia será también de un cuarto del periodo. En la presente discusión, una cuerda mueve al puente (la que aún no se ha atenuado por completo), y éste a su vez induce el movimiento de la cuerda que ya había llegado a amplitud cero. La diferencia de fase total entre las cuerdas será, por tanto, medio ciclo, es decir: estarán en oposición de fase. A partir de ahora, el puente se moverá muy poco y la atenuación será mucho más larga: hemos entrado en la fase de *resonancia*.

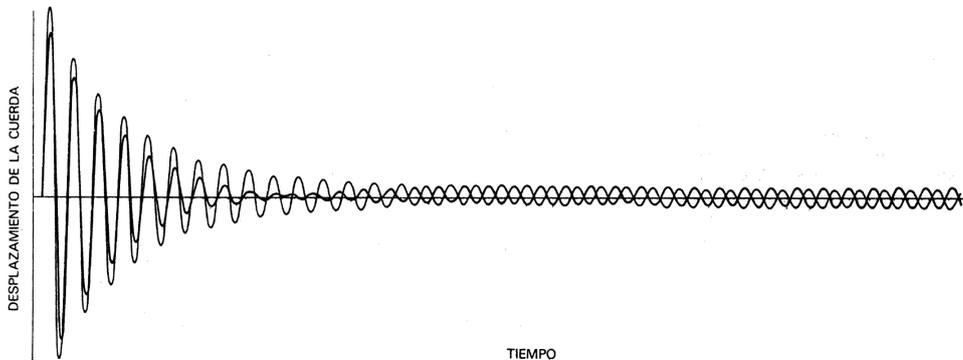


Figura 5.9: Vibración de dos cuerdas acopladas (fuente: [16]).

Como se ha mencionado, también la desafinación contribuye a la doble caída. En este caso, la explicación física es mucho más compleja. A grandes rasgos, lo que ocurre es lo siguiente: inmediatamente después del impacto, las dos cuerdas vibran en fase, lo que da el sonido inmediato. Debido a la desafinación, las cuerdas variarán ligeramente en frecuencia, y poco a poco se irán desfasando entre sí. Cuando este desfase adquiere valores próximos al medio ciclo de una de las fre-

cuencias, los movimientos prácticamente se anularán en el puente, y se alargará la caída.

Se ha comprobado experimentalmente que el encordado múltiple es, con mucho, el factor predominante en el fenómeno de la doble caída. Sin embargo existen varios factores más que contribuyen. Uno de los casos más importantes es el de la existencia de dos direcciones de vibración, o *polarizaciones*. La cuerda no sólo se mueve en dirección vertical (desde el punto de vista de un plano de cola), sino que, de nuevo debido a imperfecciones en la superficie del martillo, adquiere una cierta componente horizontal (ver fig. 5.10). Inmediatamente después del impacto, la componente vertical es más de diez veces superior a la componente horizontal. Sin embargo, por la forma en que las cuerdas están unidas al puente, la componente vertical se atenúa mucho más rápidamente (el puente cede más al movimiento vertical). Por tanto, transcurrido un tiempo inicial, sólo queda la componente horizontal, más débil y de atenuación más lenta, lo que contribuye a la resonancia. Nótese que en este caso no están involucradas las cuerdas múltiples, por lo que también es posible observar dobles caídas en cuerdas aisladas, como han demostrado los experimentos. No existe un acuerdo entre los investigadores del piano acerca de la influencia de las polarizaciones en la doble caída. Mientras algunos artículos, como el de Weinreich, afirman que ésta es alta, otros niegan incluso que esta influencia exista [17].

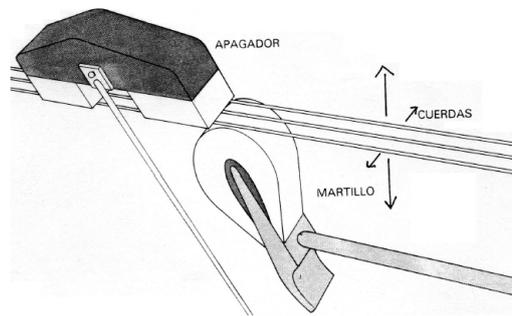


Figura 5.10: Componentes en la vibración de las cuerdas (fuente: [16]).

La doble caída es especialmente notable en el registro medio. Las pendientes de los dos tramos de envolvente tienden a igualarse cada vez más a medida que subimos hacia el agudo. En las notas más altas, la caída tiene una única pendiente y deja de ser doble. Además, cuanto más aguda es la nota, más rápida es la atenuación, debido al mayor efecto del rozamiento del aire en altas frecuencias. En los graves, la incoherencia entre las cuerdas múltiples tarda más en alcanzarse, por lo que la fase inmediata dominará buena parte de la caída (ver fig. 5.11). También se observan oscilaciones en algunos casos. Éstas se deben, en parte, al batido de desafinación y en parte a la rotación del plano de polarización de la cuerda. La figura 5.12 muestra un promedio de tiempos de caída para toda la

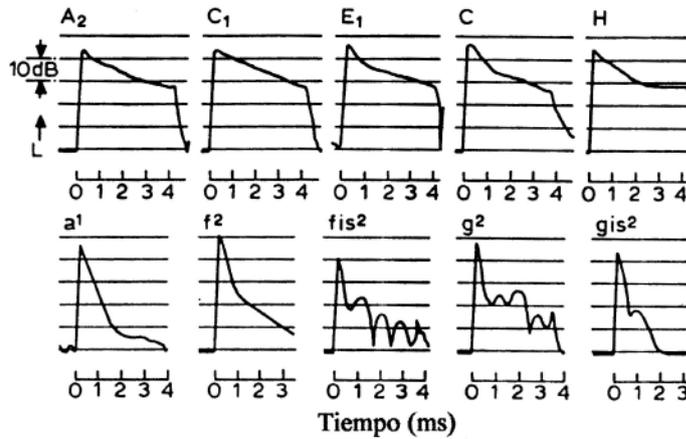


Figura 5.11: Envolventes medidas de varias notas (fuente: [4]).

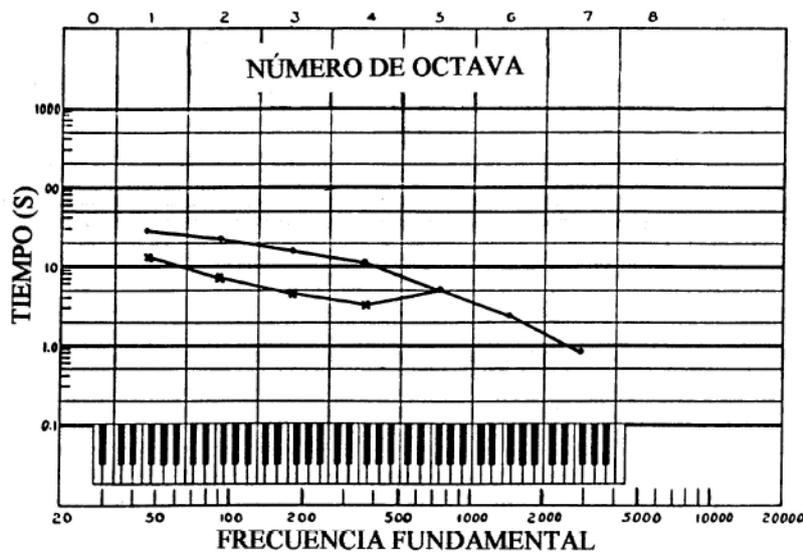


Figura 5.12: Doble caída en función de la posición de la cuerda, para un piano de cola (fuente: [14]).

extensión. La línea de cruces muestra el tiempo en segundos que tardaría el sonido en disminuir en 60 dB si la tasa de caída fuese siempre la del sonido inmediato. La línea de puntos muestra el mismo tiempo para la tasa de caída de la resonancia. En el registro agudo, ambas líneas convergen en una sola, como corresponde a la caída simple. Esta figura no indica las duraciones de cada fase de caída, sino la diferencia de pendiente entre ambas: cuanto más separadas estén las líneas, más abrupto será el cambio de pendiente.

5.5. Consecuencias sobre el espectro

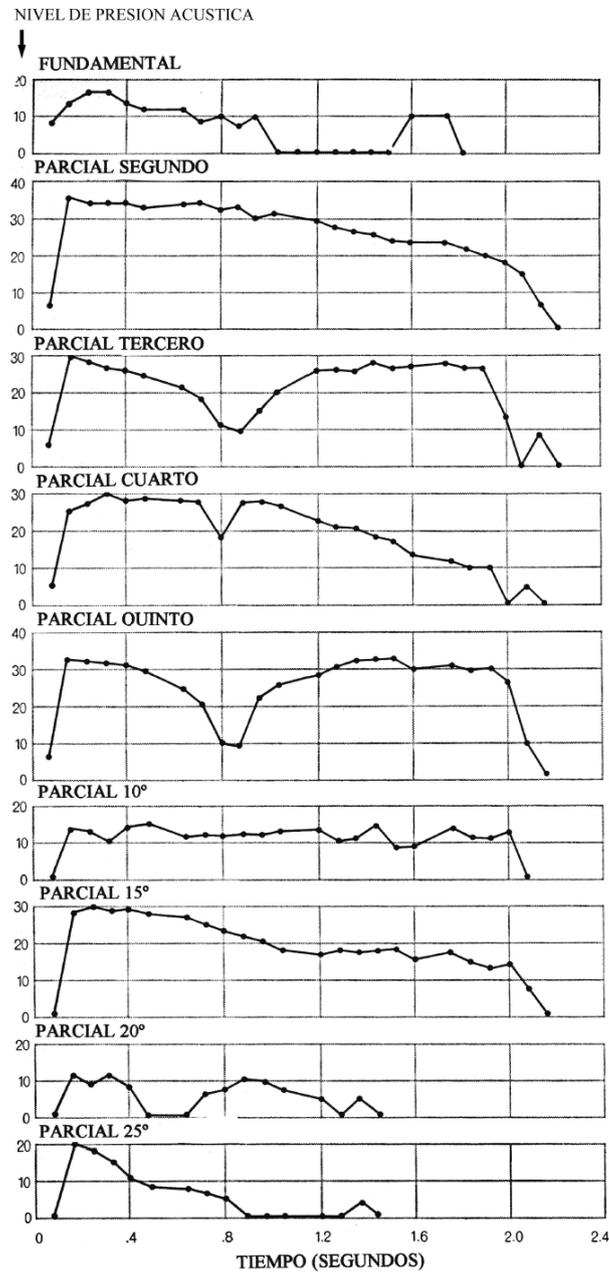


Figura 5.13: Envolventes de algunos parciales de la nota Do 1 (fuente: [2]).

Las observaciones hechas en el párrafo anterior acerca de los tiempos de caída a diferentes frecuencias no sólo son válidas para notas, sino también para los

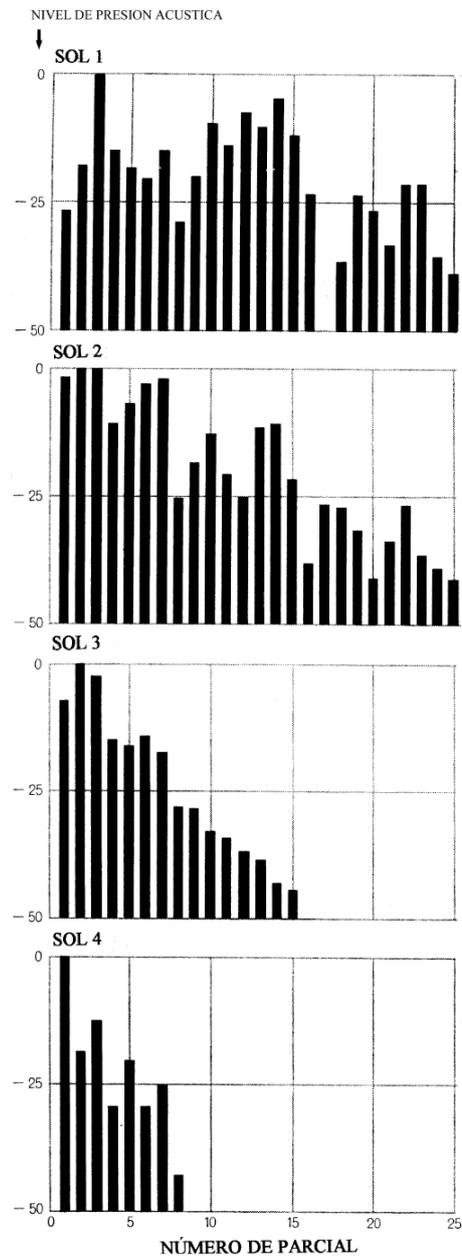


Figura 5.14: Espectro máximo para varias notas (fuente: [2]).

parciales. Los parciales agudos decaerán más rápidamente debido al mayor efecto del rozamiento del aire a altas frecuencias. Del mismo modo, los parciales graves constarán prácticamente sólo de sonido inmediato. Esto último es equivalente a decir que el sonido se hace inaudible antes de pasar a la fase de resonancia,

que, aunque sí se produce, el oído humano no es capaz de detectarla (el umbral de audición para frecuencias bajas es relativamente alto). Esto hace que los graves tiendan a desaparecer más rápidamente que los parciales medios, que se encontrarán la mayor parte del tiempo en resonancia. Además, las cuerdas largas tienen la propiedad de producir fundamentales y primeros parciales de poca amplitud, inferior a la de los medios, lo que acentúa el efecto. Esas consideraciones se reflejan en la fig. 5.13, donde se han representado las envolventes temporales individuales de cada componente del Do más grave del teclado. Se observa que algunos parciales incluso vuelven a aumentar en intensidad antes de comenzar a decaer definitivamente.

Nótese que la afirmación anterior de que los parciales graves caen más rápido no significa que las notas más graves tarden más en extinguirse. Éstas son especialmente ricas en componentes, y el sonido se verá mantenido por el alto número de parciales medios presentes. Aunque los graves y la fundamental estén poco o nada presentes durante la mayor parte del sonido, el oído cuenta con mecanismos para garantizar la correcta percepción de la altura, como se ha mencionado al comentar las consecuencias de la inarmonía. A pesar de ello, es posible percibir en ocasiones un cambio gradual (hacia el agudo) aparente de la altura de una nota a lo largo de la caída.

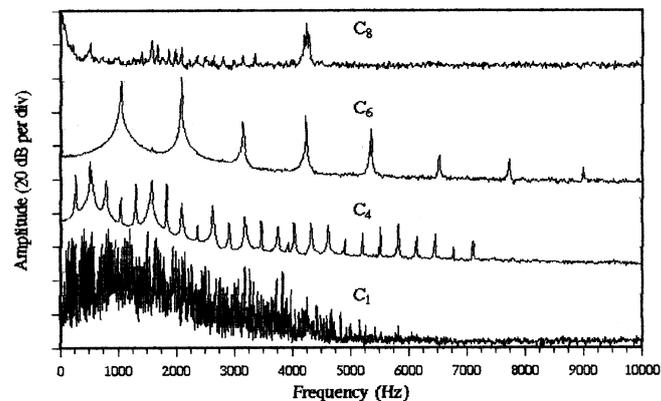


Figura 5.15: Espectros medidos para cuatro notas distintas (fuente: [7]).

De todo lo anterior se deduce que la calidad tímbrica del piano no es constante: la *envolvente espectral* variará en función del tiempo. Esta es otra de las particulares características del sonido del piano. La fig. 5.14 muestra los *espectros máximos* para cuatro notas diferentes. Cada barra corresponde a la amplitud máxima que alcanza cada parcial en toda la caída. En el primero se observa que la fundamental es inferior en amplitud que los parciales medios. Las notas agudas tienen menos parciales relevantes y/o audibles, por el efecto del aire ya mencionado. Para cada nota, los parciales superiores estarán más presentes cuanto

más fuerte se toque la nota, según lo explicado en el apartado de interacción. Otra forma parecida de representar de una vez un espectro variante es promediando las amplitudes. La fig. 5.15 muestra los espectros reales, no simplificados, de varias notas.

5.6. Los pedales

El pedal derecho, o pedal fuerte, no sólo tiene el efecto obvio de controlar el tiempo de caída manejando los apagadores, sino que tiene también consecuencias tímbricas. Al permitirse la vibración libre de todas las cuerdas, aquellas que se aproximen más a los parciales de una determinada nota tocada vibrarán por simpatía y alterarán el sonido total. La simpatía se produce en parte a través del aire y en parte a través del puente. Las cuerdas más agudas, al no tener apagadores debido a su corto tiempo de caída, siempre estarán expuestas a la vibración simpática producida por las otras notas, pero su efecto es casi inapreciable. Por otro lado, al tocar las notas sin apagadores, el efecto de pisar el pedal derecho es más que notable, ya que las vibraciones simpáticas de los parciales de las cuerdas más largas son relativamente fuertes.

Muchos compositores modernos han utilizado el fenómeno de la vibración por simpatía como recurso compositivo. El ejemplo de la figura 5.16, perteneciente al volumen IV de “Mikrokosmos”, de Béla Bartók, es uno de los más conocidos. Las notas en forma de rombo significan que se han de pulsar las teclas suavemente, sin producir sonido alguno, con lo que se separan los apagadores. El fuerte acorde inicial de la mano derecha induce vibraciones en estas tres notas, que constituirán el acompañamiento de la melodía.



Figura 5.16: Ejemplo de aprovechamiento de la vibración por simpatía (fragmento de “Mikrokosmos” de Bartók).

El pedal izquierdo del piano de cola, o pedal *una corda*, desplaza todo el mecanismo de manera que el martillo sólo golpea dos de las tres cuerdas en los grupos triples. El nombre de *una corda* proviene del tiempo en que los pianos se fabricaban con dobles cuerdas. Esto no tiene el comúnmente creído efecto de disminuir la potencia total del sonido. Si suponemos que tenemos un par de cuerdas, y percutimos una de ellas, la otra comenzará a vibrar en oposición de fase debido a la transmisión a través del puente, de forma muy parecida a la explicada más arriba en el apartado de la doble caída (fig. 5.17). La potencia del sonido inmediato se verá, efectivamente, reducida, debido a que sólo la primera cuerda participa en él. Sin embargo, como se ve en la figura, el nivel sonoro de la resonancia se verá notablemente incrementado con respecto al de una percusión

normal (ver fig. 5.9). El verdadero efecto de este pedal es, pues, aumentar la proporción de resonancia con respecto al sonido inmediato, lo que produce un sonido más suave y más apto para pasajes *cantabile*. En los pianos verticales se obtiene un efecto parecido acercando los martillos a las cuerdas.

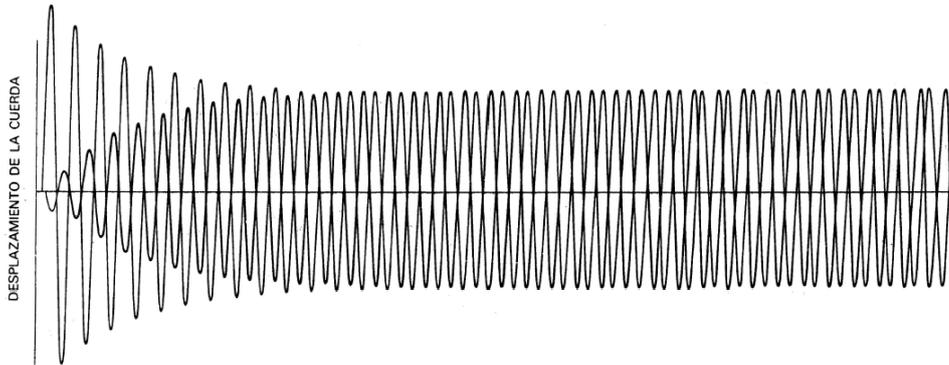


Figura 5.17: Vibración de un par de cuerdas acopladas con el pedal *una corda* pisado (fuente: [16]).

Capítulo 6

La tabla armónica

Como en todo instrumento musical acústico, la función del cuerpo resonante del piano es la de amplificar el sonido, y la de radiarlo adecuadamente. Tras numerosas pruebas a lo largo de la evolución tecnológica del piano, se llegó a la conclusión de que los mejores resultados para un instrumento de estas características los ofrecía una tabla armónica, en vez de una caja de resonancia. La caja del piano, es decir, la estructura que alberga el teclado, el marco y la tabla armónica, recibe muchas veces de manera incorrecta el nombre de caja de resonancia, a pesar de no tener funciones de amplificación.

La tabla armónica se fabrica actualmente de picea laminada. Está atravesada, en dirección perpendicular a la fibra de madera, por nervaduras o *costillas* del mismo material. Esto tiene como objetivo el igualar la rigidez de la tabla en ambas direcciones. Su anchura oscila en torno al centímetro.

La amplia tesitura del piano requiere una tabla armónica que sea capaz de amplificar uniformemente un gran rango de frecuencias. Los avances industriales han permitido obtener tablas con respuestas en frecuencia relativamente planas. Para conseguir esto, es necesario que cada modo de vibración de la tabla pueda ser excitado por un amplio margen de frecuencias. Las respuestas en frecuencia de los modos se superpondrán y formarán la respuesta en frecuencia de la tabla, tanto más plana cuanto más ancho sea al margen de cada modo. En general, cuanto más cerca esté una cuerda del centro de la tabla, mejor se verá amplificada. Esto justifica en parte la disposición de las cuerdas en dos niveles (*sobreencordado*). Al separar el puente del registro grave y colocarlo en una posición más central, se mejora notablemente la amplificación de los graves. Para la posición de los puentes, ver la fig. 5.2. La fig. 6.1 muestra los modos de vibración de una tabla armónica de un piano vertical, obtenidos experimentalmente. La fig. 6.2 muestra los modos de una tabla de un piano de cola, obtenidos mediante simulación por ordenador.

Las cuerdas, por su gran tensión y rigidez, ejercen una gran presión sobre el puente, empujándolo hacia abajo (fig. 6.3). La fuerza total que tiene que soportar la tabla, que dependerá del ángulo entre la parte corta de la cuerda entre el

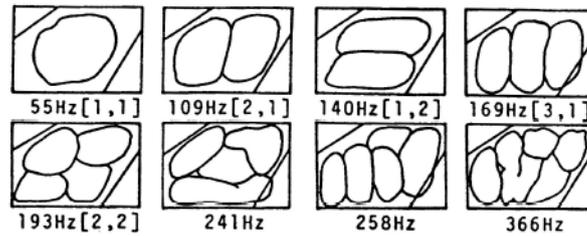


Figura 6.1: Modos de vibración de la tabla armónica de un piano vertical (fuente: [4]).

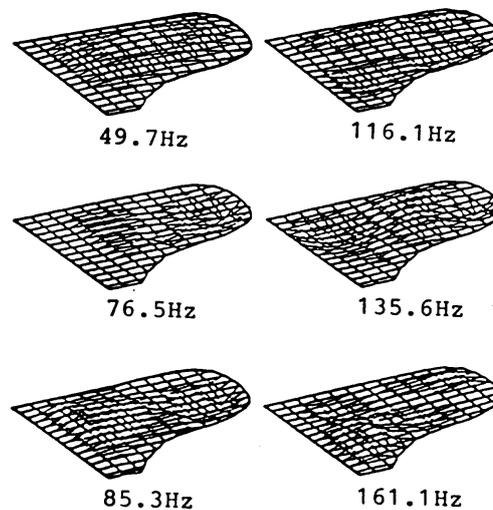


Figura 6.2: Modos de vibración de la tabla armónica de un piano de cola (fuente: [4]).

puente y la clavija de sujeción (indicado por α en la figura), es enorme, y para soportarla mejor, la tabla no es completamente plana, sino que posee un cierto grado de convexidad. A la larga, este empuje reducirá la convexidad, lo que repercutirá en el deterioro de la elasticidad y de las características resonantes de la tabla. Por esta razón se puede afirmar que el piano es un instrumento cuyo sonido se deteriora con el paso de los años, al contrario que los violines, por ejemplo, que mejoran su calidad tímbrica a largo plazo.

La *impedancia acústica* de un cuerpo es una magnitud física que mide la resistencia que un cuerpo opone a las ondas sonoras. En general, para dos cuerpos en contacto, la energía de la onda se transmitirá tanto más rápido cuanto más parecidas sean las impedancias de ambos cuerpos. En el piano consideramos a la tabla junto con el puente y las nervaduras como un mismo cuerpo vibratorio,

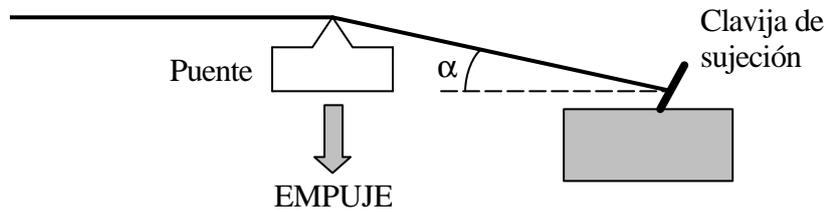


Figura 6.3: Empuje de las cuerdas.

cuya impedancia es bastante elevada en relación con las cuerdas. La diferencia de impedancias se establece en el diseño de pianos de forma que proporcione un balance aceptable entre sostenimiento y potencia del sonido. Para alargar el de por sí pobre sostenimiento de las notas agudas, la parte de la tabla correspondiente a los agudos se hace gradualmente más gruesa y se reduce la longitud de la porción de la cuerda entre el puente y la clavija de sujeción, incrementándose la impedancia en esta zona. Las cuerdas entorchadas en cobre tienen una impedancia considerablemente superior al resto, lo que podría acarrear un cambio repentino de calidad sonora respecto a la del resto de cuerdas. La solución a este problema la proporciona de nuevo el sobreencordado: obsérvese que son precisamente las cuerdas entorchadas las que se montan por encima. El puente bajo está diseñado para compensar este cambio de impedancia.

Los modelos de directividad en el plano horizontal de un piano vertical aparecen en la fig. 6.4. La directividad es uniforme para frecuencias inferiores a los 100 Hz ($\approx LA_2$), mientras que muestra una clara directividad para frecuencias superiores. En la fig. 6.5 se muestran los modelos de directividad en el plano vertical de un piano de cola con la tapa abierta (líneas gruesas) y con la tapa cerrada (líneas finas). Es interesante observar que para 250 Hz, la presión acústica es superior detrás del piano que delante. El efecto de la tapa abierta se hace más apreciable a frecuencias altas.

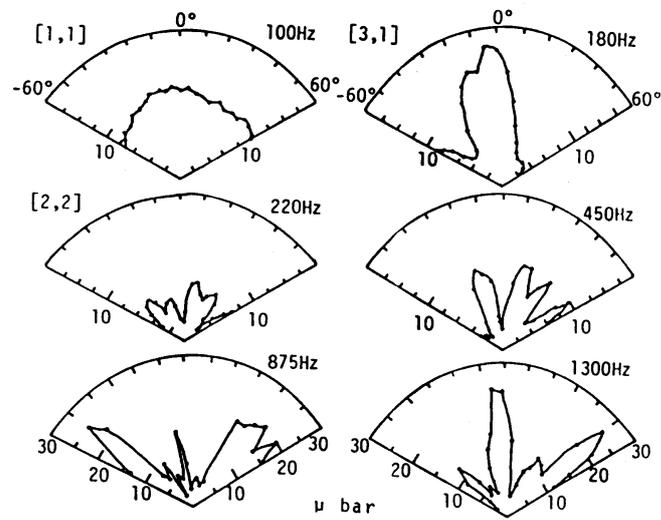


Figura 6.4: Modelos de directividad para el plano horizontal de un piano vertical (fuente: [4]).

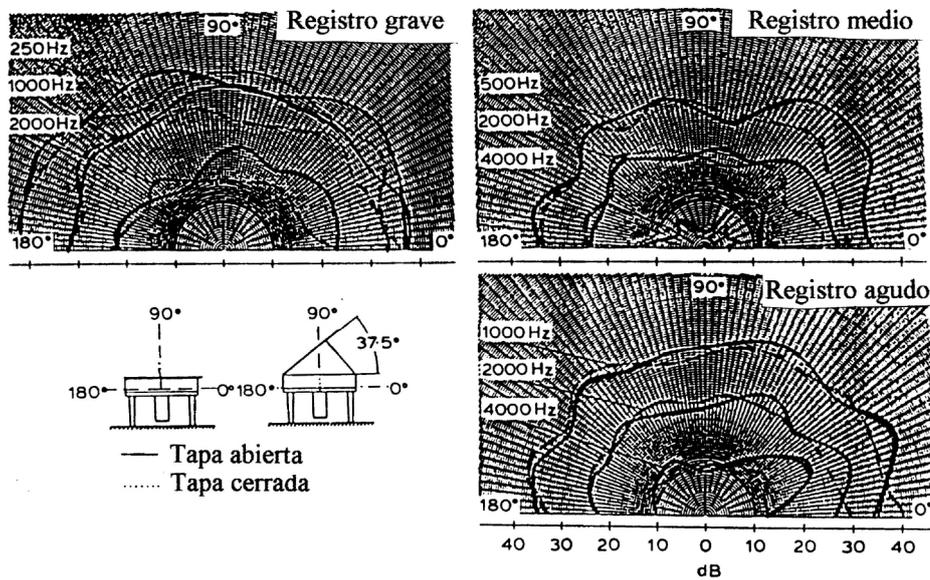


Figura 6.5: Modelos de directividad para el plano vertical de un piano de cola (fuente: [4]).

Bibliografía

- [1] S. Birkett. Technical foundations for analysis of pianos, a research proposal. *Disponible en Internet: www.uk-piano.org/piano_research*, 1999.
- [2] E.D. Blackham. The physics of the piano. *Scientific american*, 213 (6), 1965.
- [3] M. Campbell and C. Greated. *The Musicians' guide to acoustics*. Dent & Sons, 1987.
- [4] H. Suzuki and I. Nakamura. Acoustics of pianos. *Applied Acoustics*, 30, 1990.
- [5] A. Askenfelt and E. Jansson. From touch to string vibrations: an experimental study of the initial course of the piano tone. *Journal of the Acoustical Society of America*, 61, suppl. 1, 1987.
- [6] P.R. Dijksterhuis. De piano. *Nederlandse Akoest. Genootschap*, 7, 1965.
- [7] D.A. Russell. Hammer nonlinearity, dynamics and the piano sound. *Disponible en Internet: www.gmi.edu/drussell*, 1997.
- [8] T. Yanagisawa and K. Nakamura. Dynamic compression characteristics of piano hammer felt. *Journal of the Acoustical Society of Japan*, 40 (11), 1984.
- [9] H.F. Olson. *Music, Physics and Engineering*. Dover, 1967.
- [10] C.A. Culver. *Musical acoustics*. McGraw-Hill, 1956.
- [11] E. Good. *Giraffes, black dragons and other pianos*. Stanford University Press, 1982.
- [12] A. Galembo. Página personal dedicada a la acústica del piano. *Disponible en Internet: www.geocities.com/CapeCanaveral/Lab/8779*.
- [13] O.H. Schuck and R.W. Young. Observations on the vibrations of piano strings. *Journal of the Acoustical Society of America*, 15 (1), 1943.
- [14] D. W. Martin. Decay rates of piano tones. *Journal of the Acoustical Society of America*, 19(4), 1947.

- [15] G. Weinreich. Coupled piano strings. *Journal of the Acoustical Society of America*, 62(6), 1977.
- [16] G. Weinreich. Vibraciones acopladas de las cuerdas del piano. *Investigación y Ciencia*, Marzo 1979.
- [17] T.C. Hundley, H. Benioff, and D.W. Martin. Factors contributing to the multiple rate of piano tone. *Journal of the Acoustical Society of America*, 62(6), 1978.
- [18] R. Causse. Morphologie et acoustique du piano. *Résonances*, 5, IRCAM, Septiembre 1993 (en francés).
- [19] U. Michels. *Atlas de música, Vol. 1*. Alianza, 1997.
- [20] J. Siepmann. *The Piano*. Carlton, 1996.
- [21] Microsoft. *Musical Instruments*. Enciclopedia electrónica, 1993.
- [22] M. Alonso and E. Finn. *Física vol. II: Campos y ondas*. Addison-Wesley, 1987.