

PRIMERAS JORNADAS REGIONALES DE ACÚSTICA AdAA 2009

19 y 20 de noviembre de 2009, Rosario, Argentina



AdAA2009-A035R

Variación de la altura psicoacústica como medio de expresión en el piano: estudio exploratorio

Federico Miyara ^(a), Sergio A. Santi ^(b), Ezequiel Mignini ^(a),
Ernesto Accolti ^(a), Pablo J. Miechi ^(b)

(a) Laboratorio de Acústica y Electroacústica, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario. Riobamba 245 bis, 2000 Rosario, Argentina. E-mail: fmiyara@fceia.unr.edu.ar, ezequelmignini@gmail.com, ernestoaccolti@gmail.com

(b) Facultad de Humanidades y Artes, Universidad Nacional de Rosario. Berutti 2195 bis, 2000 Rosario, Argentina. E-mail: ssanti@fhumyar.unr.edu.ar, pmiechi@gmail.com

Abstract

Players of bowed and plucked string and wind instruments, as well as singers, use extensively the resource of varying subtly the frequency of sounds to enhance expressiveness (for instance, by means of vibrato). This is not possible in the case of the piano, since the musician cannot alter the string tension neither its length. However, the intensity variations due both to the envelope and to the diverse touch pressure applied to successive notes cause psychoacoustic pitch fluctuations, which could impact on the expressiveness. In this paper the likeliness of this idea is explored by computing, using models available in the literature, the pitch variations elicited by this mechanism in isolated notes played by professional pianists. Future works are planned using pianistic passages instead of an isolated note used in this first exploratory stage. Although not conclusive results have been achieved, a methodological framework for further studies is shown. Particularly, an interactive platform of evaluation was developed for a procedure of experimentation.

Resumen

Tanto en los instrumentos de cuerda frotada o pellizcada y de viento como en el canto se utilizan fluctuaciones sutiles de frecuencia (vibratos) como medio para lograr expresividad. Ello no es posible en el piano, dado que el intérprete no puede modificar ni la tensión ni la longitud de las cuerdas. Sin embargo, tanto las variaciones de intensidad contenidas en la envolvente del sonido como las que se pueden lograr entre notas sucesivas variando la presión del toque, provocan variaciones de altura psicoacústica que podrían tener un efecto expresivo. En este trabajo se explora esta hipótesis determinando, mediante los modelos de la literatura, las diferentes variaciones de altura que se generan en notas aisladas ejecutados por pianistas profesionales. Se proyectan trabajos futuros con pasajes pianísticos en lugar de una nota aislada usada en esta primera etapa exploratoria. Aunque no se llegó a resultados concluyentes, se sientan las bases metodológicas para continuar con el estudio. Particularmente, se desarrolló una plataforma interactiva de evaluación asociada a un procedimiento de experimentación.

1 Introducción

La investigación de los procesos físicos y psíquicos involucrados en la expresión musical reviste interés desde diversos puntos de vista. En primer lugar, permite un análisis sistemático de la interpretación y los principios que la sustentan. En segundo lugar, pone a disposición del intérprete la posibilidad de ejercitar el control expresivo en forma más eficiente, al delimitar las acciones requeridas para lograr el efecto deseado. En tercer lugar, abre la posibilidad de automatizar ciertos procesos expresivos en la música ejecutada electrónicamente, mejorando su verosimilitud y aceptabilidad. Por último, permite efectuar determinaciones inversas de algunos procesos psíquicos mediante el conocimiento objetivo de las variables físicas involucradas. Esto podría tener aplicación en disciplinas como la musicoterapia.

En líneas generales, y a partir de la simple audición de cualquier pasaje musical grabado, puede concluirse que la interpretación se puede lograr mediante el exclusivo control de los parámetros físicos del sonido. Si bien es cierto que en una interpretación en vivo pueden existir otros canales comunicativos como el histrionismo visual (ademanos, movimientos de la cabeza y el cuerpo, expresiones faciales) y el clima asociado a la experiencia de escucha grupal, también es cierto que en ausencia de los mismos la comunicación musical sigue siendo factible y efectiva.

En los instrumentos de arco es posible controlar con gran precisión, y en forma continua, parámetros tales como la frecuencia (mediante variaciones de la posición del dedo de la mano izquierda sobre la cuerda), la intensidad (controlando la presión y/o la velocidad del arco), y hasta el timbre (controlando la distancia del arco al puente, así como la forma del ataque). Lo mismo acontece en el canto y en los instrumentos de viento, en los que las variaciones de caudal de aire se traducen en variaciones de intensidad (y en alguna medida de frecuencia) y las variaciones de la presión y posición del labio, en cambios en la frecuencia y el timbre.

El piano, por el contrario, posee sólo una limitada cantidad de recursos físicos para el control expresivo del sonido emitido. Idealmente, el intérprete podría controlar el perfil de velocidad instantánea de bajada de la tecla de muchas formas diferentes, pero debido al sistema de escape, en la práctica el sonido emitido por la cuerda una vez desvinculado el martillo de la tecla sólo depende de la energía cinética acumulada por el martillo. No puede decirse lo mismo de los sonidos emitidos por la propia tecla u otras partes del mecanismo al golpear contra los límites de sus recorridos, pero en el caso de las interpretaciones consideradas técnicamente correctas tales ruidos no son significativos.¹ Inclusive experimentos realizados hace ya muchas décadas (Hart, 1934; White, 1930) revelaban muy poca o ninguna diferencia entre el sonido producido por un intérprete humano y un actuador mecánico operando sobre la tecla.

Se han realizado numerosas investigaciones sobre los aspectos cinético y dinámico de la interpretación musical en el piano, esto es, el control del tiempo de emisión y de la intensidad de cada sonido. El primer aspecto ha sido objeto de diversos estudios. Sundberg y Verillo, por ejemplo, intentan describir matemáticamente la distribución de intervalos de entrada correspondientes al *ritardando* final en el caso particular de ciertas piezas de Bach (Sundberg *et al.*, 1980). Repp, por otra parte, realiza un estudio estadístico de interpretaciones de un minué de Beethoven por 19 pianistas célebres (Repp, 1990a), así como de la microestructura temporal presente en la interpretación de *Träumerei*, de Schumann (Repp, 1990b; Repp, 1996).

¹ Una buena técnica pianística procura evitar los sonidos “golpeados”, y para ello controla lo que sucede con la tecla desde que el martillo se desvinculó de ella.

El aspecto dinámico influye no sólo en la intensidad sino también en la cualidad tímbrica, ya que a mayor intensidad, mayor proporción de armónicos superiores. Se sabe, no obstante, que en el piano no es posible un control independiente de ambos factores (Hart, 1934; White, 1930),² por lo cual en la práctica dicho control se ejerce a través de la velocidad con que el martillo incide sobre la cuerda.³

Todd ha combinado ambos aspectos (temporal y dinámico), puntualizando el refuerzo mutuo entre intensidad y velocidad (Todd, 1992; Todd 1995) en algunos estilos musicales como los del clasicismo y el romanticismo.

Existe una característica de los sonidos del piano que agrega una tercera dimensión al control expresivo: la envolvente. Como es sabido, la envolvente de los sonidos del piano posee una doble caída exponencial. El primer tramo tiene una duración típica de entre 0,5 s y 2 s, dependiendo de la nota pulsada y corresponde a una caída rápida (típicamente entre 10 dB/s y 30 dB/s), En el segundo tramo la caída es más lenta, siendo para algunas notas de hasta 1,5 dB/s (Fletcher et al., 1998). El primer tramo es especialmente interesante porque en él se pone de manifiesto un fenómeno que ha sido extensamente estudiado en particular para tonos puros aislados o parcialmente enmascarados: la variación con la intensidad de la altura psicoacústica percibida (Zwicker et al., 2007). En el presente trabajo se explorará la posibilidad de que este fenómeno sea un factor importante en la expresión musical.

2 Variación de la altura psicoacústica con la intensidad

La escala de altura psicoacústica desarrollada inicialmente por Stevens y Volkman (Stevens et al., 1937; Zwicker et al., 2007) describe la relación existente entre la frecuencia y la sensación de agudeza. Fue construida mediante experimentos en los que se solicitaba a los sujetos ajustar la frecuencia de un tono de modo que se percibiera como la mitad de agudo que otro de referencia. En todos los casos se mantuvo el nivel de sonoridad constante en 60 fon.

Si ahora se fija la frecuencia de un tono puro y se varía su intensidad, se observa que la altura evocada no es constante. La relación entre la altura y la intensidad depende de la frecuencia. Así, para frecuencias menores que unos 1500 Hz, la altura aumenta al disminuir la intensidad, mientras que para frecuencias mayores que 1500 Hz, la altura disminuye al disminuir la intensidad, como se muestra en la figura 1 (Zwicker et al., 2007). La variación v allí indicada se define como

$$v = \frac{f_{40 \text{ dB}} - f_{L_p}}{f_{L_p}} \quad (1)$$

donde $f_{40 \text{ dB}}$ es la frecuencia de un tono puro de 40 dB y f_{L_p} la frecuencia de un tono puro de nivel de presión sonora L_p que produce igual altura.

² Muchos pianistas creen que sí lo logran, e inclusive atribuyen a los movimientos que realizan con la muñeca, el brazo o el cuerpo tales variaciones tímbricas. Sin embargo, dichos movimientos permiten sólo el control de la velocidad del martillo, es decir de una sola variable. Ello no impide aceptar que tales movimientos puedan tener un efecto sobre la interpretación, pero ello se debe a que crean condiciones para que el músico controle mejor esa única variable, por ejemplo a través de algún mecanismo de realimentación sensoriomuscular. También pueden tener un efecto histriónico que predispone al oyente (e incluso al propio músico) a percibir de determinada manera los sonidos emitidos, pero este fenómeno está fuera del objeto del presente trabajo.

³ No debe descartarse el hecho de que la variación tímbrica pueda resultar más notoria que la de la intensidad, ya que se sabe que en condiciones normales es muy difícil notar diferencias de intensidad menores de 1 dB.

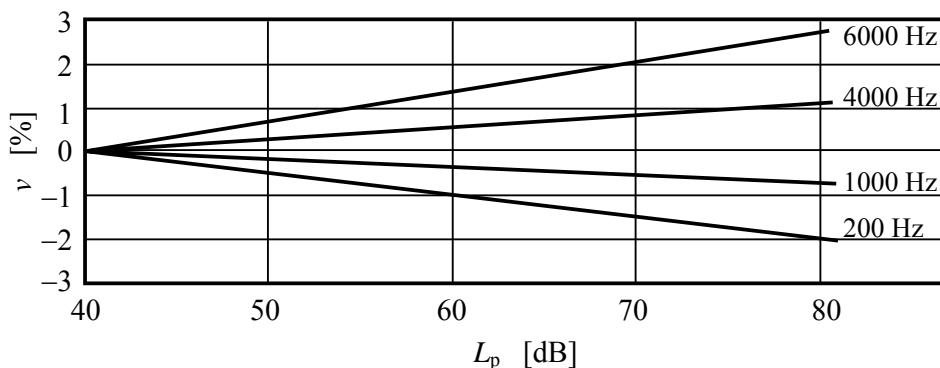


Figura 1. Variación ν de la altura psicoacústica con respecto a la que se tiene para un nivel de presión sonora de 40 dB

En el caso del piano (y haciendo por el momento una simplificación grosera) esta fluctuación de altura se produciría en cada nota ejecutada debido a la disminución de intensidad por la caída en la envolvente. Esto cumpliría la misma función que la fluctuación de altura en un vibrato como medio expresivo en el canto y otros instrumentos. La ligera desafinación que produce esto en el caso del vibrato causa un efecto dramático del mismo tipo que los acordes disonantes, particularmente de las combinaciones de paso.

Es probable que el uso de las variaciones de altura psicoacústica como medio de expresión en el canto hayan surgido como reflejo de la expresividad en el habla a través de la entonación. Dado que la altura en música tiene un valor semántico propio, serían las variaciones sutiles de la altura las que causarían similar efecto expresivo. Este efecto puede incrementarse por la agogia, es decir, prolongando en el tiempo la nota sobre la que se quiere un acento expresivo, ya que la caída durará más tiempo.

Ahora bien, si dos notas sucesivas tienen aproximadamente la misma intensidad (o, más propiamente, el mismo nivel de sonoridad), perceptivamente se tiende a asociar a cada una la altura evocada por el pico que se alcanza al comienzo de la nota.⁴ Esto lleva a que el efecto de variación de la altura no se manifieste. Pero si la segunda nota es más débil, por ejemplo si su pico se aproxima al nivel inmediatamente anterior (atenuado por la caída de la envolvente), la relación tonal entre ambas alturas modificadas, por tener menor nivel, prevalecerá como patrón relacional a reconocer (y por lo tanto asociar). En consecuencia, dicha variación de altura quedará más expuesta y cumpliría la función expresiva postulada.

También se acentúa el efecto si la nota en cuestión lleva un acompañamiento de tipo *obstinato* (acordes repetidos o bajo de Alberti) que mantiene una mayor regularidad dinámica (de intensidad). Esto produce un efecto interesante, ya que produce una "disonancia psicoacústica" sin el efecto secundario del batido (*battimento*) que causaría una verdadera variación de frecuencia. O sea, la ventaja de un efecto dramático de variación de altura sin la desventaja de una desafinación.

NOTA: La reverberación natural de un ambiente espacioso produce ligeras disonancias entre las notas precedentes y las nuevas, lo que en general resulta agradable si no es excesiva. En este caso sí existen batidos, pero probablemente poco perceptibles cuando la reverberación no es muy alta. Supongamos una reverberación de 1,5 s. Ello implica una caída de 40 dB/s. Se

⁴ Esto está relacionado con el hecho de que la sonoridad global de un tono modulado se asimila a la sonoridad máxima.

puede constatar que para notas que duren 0,25 s la caída de la primera nota es aproximadamente de 10 dB, lo cual significa un batido relativamente poco audible entre la segunda y la primera notas.

Una segunda consecuencia surge de la evidencia que la presencia de un sonido modifica la sonoridad aparente y la altura psicoacústica de otros sonidos simultáneos (Zwicker et al., 2007). Es posible, por ejemplo, después de tocar una nota de cierta intensidad, hacer que las que siguen acompañen la caída de la primera. Por ejemplo en una escala, las siguientes notas pueden tener sus picos iniciales de un valor parecido al valor final de la nota precedente. Hasta sería posible que la nota parezca aumentar de sonoridad a pesar de que su intensidad disminuye progresivamente por su caída exponencial. En base a esto sería teóricamente posible, manipulando la intensidad de un acompañamiento, lograr que una nota cuya intensidad física decae, parezca aumentar o disminuir su altura, creando un auténtico vibrato psicoacústico.

3 Planificación del experimento

En esta primera etapa exploratoria se decidió evitar el efecto producido por el enmascaramiento en la percepción de altura. Para ello se utilizó una nota aislada ejecutada por un piano y se cuidó de realizar el experimento en un ambiente con bajos niveles de ruido.

La altura de una nota producida por un piano, a lo largo del tiempo, puede ser medida a través de distintos procedimientos.

El procedimiento empleado consiste en que al sujeto se le presente una nota de piano (sonido de prueba) desde su ataque hasta un determinado instante (t), teniendo éste que ajustar un tono puro (sonido de referencia) de manera que sea percibido con la misma altura.

Sí, por ejemplo, una nota de piano con frecuencia fundamental $f_0 = 440\text{Hz}$ es usada como sonido de prueba y un tono puro de frecuencia variable como sonido de referencia; el sujeto, escuchará el sonido de prueba e inmediatamente después el sonido de referencia, debiendo ajustar la altura del sonido de referencia hasta producir la misma sensación de altura que la producida por el sonido de prueba.

Para tal fin se recurrió al uso del entorno de programación musical MAX/MSP⁵, a través del cual se implementó un Patch que sirvió como interfaz para los sujetos.

El sonido de referencia presenta la misma sonoridad que la alcanzada por el sonido de prueba en el instante t , y su altura puede variar en un rango de 200 cents entorno a la frecuencia fundamental de la nota. Para poder ajustar la amplitud del tono de referencia se calculó la sonoridad dinámica del sonido de prueba utilizando el modelo DLM reportado en Chalupper et al., 2002. La amplitud del sonido de referencia se mantuvo constante durante la experimentación, a modo de simplificación del modelo de sonoridad, debido a que los contornos de igual sonoridad son aproximadamente constantes en el rango de variación de la frecuencia. Luego el modelo de sonoridad de tonos puros de Zwicker (Zwicker et al., 2007) se implementó en forma inversa para obtener la amplitud del sonido de referencia a partir de la sonoridad deseada.

El sonido de prueba es presentado para 4 valores de t y 5 notas de diferente altura según se muestra en tabla 1 y 2.

⁵ Software concebido en 1986 como un proyecto destinado a producir música interactiva por el IRCAM (Instituto de Investigación y Coordinación Acústico Musical) en París.

Tabla 1. Notas ensayadas y sus respectivas frecuencias.

G2	C3	D4	C5	A5
98 Hz	131 Hz	294 Hz	523 Hz	880 Hz

Tabla 2. Duraciones del sonido de prueba t .

500 ms	1000 ms	1500 ms	2000 ms
--------	---------	---------	---------

La muestra utilizada para el experimento se compuso de 12 sujetos entrenados musicalmente.

Para realizar la prueba se utilizaron los auriculares audiométricos HDA 200 de la marca Sennheiser, calibrados según Accolti et al., 2009. El nivel de presión sonora se calibró a un tono de referencia de 1 kHz a 80 dB, lo cual es equivalente a estar a un metro de un piano cuando se ejecuta una nota con fuerza media. Dichos auriculares fueron diseñados a partir de protectores auditivos por lo cual poseen un muy buen aislamiento con los sonidos del exterior. Además las pruebas se llevaron a cabo en el estudio de música electroacústica de la Escuela de Música de la Facultad de Humanidades y Artes de la UNR donde el nivel de presión sonora equivalente de ruido de fondo es de 27 dBA.

4 Resultados

Luego de realizar los experimentos se obtuvieron, para cada nota, las correspondientes respuestas de los sujetos, datos expresados en frecuencia en unidades de Hz en función de t .

Tal como fue expuesto con anterioridad, debido a que la altura psicoacústica de los tonos puros no solo depende de la frecuencia sino también del nivel de presión sonora (que a su vez depende de la amplitud del sonido de referencia), se aplicó la corrección correspondiente (ver sección 2).

Una vez realizado éste ajuste se obtuvo la altura psicoacústica expresada en unidades de mels (Zwicker et al., 2007).

Para poder estudiar el fenómeno se realizó un análisis estadístico de los resultados, los cuales se muestran en la figura 2 y 3 para una de las notas ensayadas (C5). Para las demás notas ensayadas se observa una tendencia semejante.

A continuación, para enmarcar estos resultados en un contexto musical, se buscó representar las variaciones de frecuencia obtenidas expresadas en la unidad cent, de uso frecuente en el entorno musical. Para ello se utilizó el modelo de la figura 1 quedando los resultados en términos de la variación de frecuencia que muestra la misma sensación de altura que si el tono puro hubiese sido escuchado a un nivel de presión sonora de 40 dB, este descriptor se referenciará en adelante como Δf_{40dB} en unidades de cents (ver figura 3).

Finalmente se realizó un análisis de varianza utilizando el software estadístico Minitab para estudiar la relación entre la altura psicoacústica en función de cada sujeto y el instante t . Como resultado se pudo observar que el factor comprendido por cada sujeto fue estadísticamente significativo y por el contrario t no resultó significativo ($\rho = 0,10$), lo cual se puede interpretar como un importante efecto de la subjetividad en la muestra pero no es suficiente para descartar el efecto de t ya que este puede no revelarse en este experimento preliminar dado que se trabajó con una sola réplica del experimento para cada sujeto.

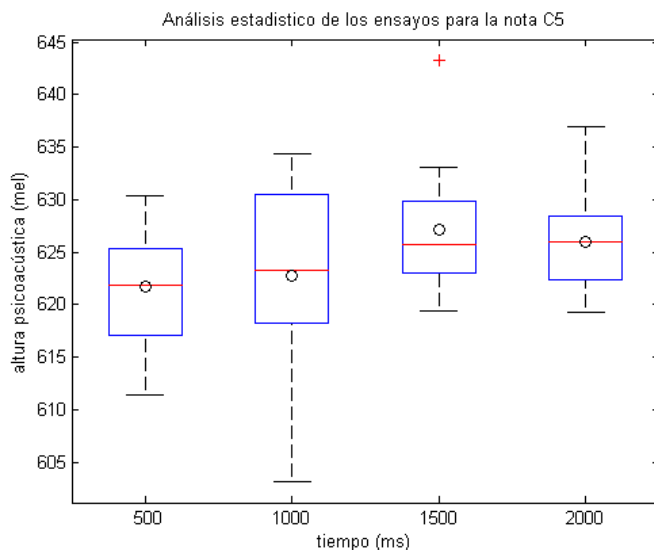


Figura 2. Altura psicoacústica de la nota de piano C5 en función del tiempo. Gráfico de *box & whiskers*. Las cajas representan los intercuartiles, los bigotes los valores mínimos y máximos y las líneas rojas las medianas. Los círculos representan los promedios. La cruz color rojo representa un dato dudoso, en cuanto se separa del cuartil 75 en 1,5 veces el rango intercuartil.

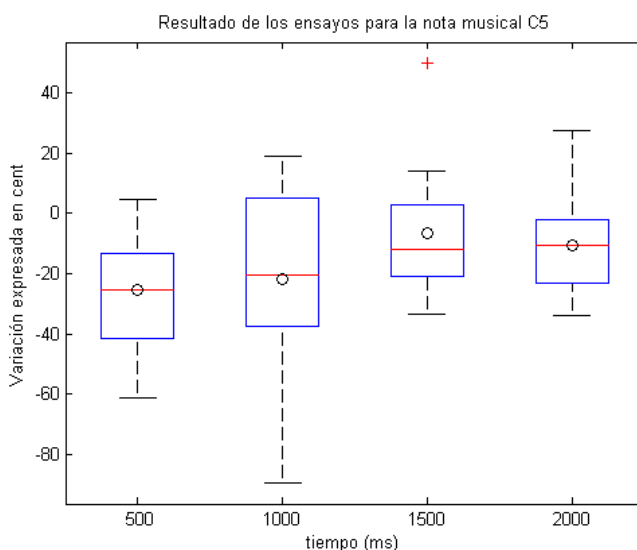


Figura 3. Δf_{40dB} de la nota de piano C5 en función del tiempo. Gráfico de *box & whiskers*. Las cajas representan los intercuartiles, los bigotes los valores mínimos y máximos y las líneas rojas las medianas. Los círculos representan los promedios. La cruz color rojo representa un dato dudoso, en cuanto se separa del cuartil 75 en 1,5 veces el rango intercuartil.

Analizando los resultados obtenidos, apoyados en un análisis de varianza, no se pudo probar que existan diferencias estadísticamente significativas en la altura psicoacústica para distintos valores de t ($\rho = 0,10$).

5 Conclusiones

En los estudios de cada sujeto se pudo observar que existe una variación de la altura percibida en función del tiempo, aunque en esta instancia del estudio no es posible detectar una tendencia estadísticamente significativa ni en forma individual, dado que solo se realizó una repetición de cada prueba, ni en forma global ya que la dispersión fue demasiado alta.

Si bien no fue posible demostrar estadísticamente la hipótesis, tampoco se obtuvo el suficiente apoyo empírico para descartarla. Esta conclusión se basa en el hecho de que los datos obtenidos para el análisis de la dispersión muestran rangos muy amplios, entendiéndose que los límites de estos rangos constituyen variaciones en la altura psicoacústica que son perfectamente perceptibles y mucho más por sujetos fuertemente entrenados musicalmente.

5.1 Direcciones futuras

En base a la posibilidad de que la subjetividad esté jugando un papel muy importante, trabajos futuros buscarán repetir los experimentos usando réplicas. Además, siendo posible que la gran dispersión obtenida se deba al tamaño de la muestra, se buscará utilizar una muestra con un mayor número de sujetos.

En otra línea de experimentos, se pretende experimentar usando pasajes musicales en lugar de una nota aislada. Se realizarán ensayos tomando como referencia diferentes fragmentos de la literatura pianística, principalmente del período Clásico. Se lo hará con pasajes monódicos primero y polifónicos después a modo de incorporar paulatinamente los efectos sobre la altura psicoacústica del postenmascaramiento en el primer caso y los del enmascaramiento simultáneo en el segundo.

Referencias

- Accolti, Ernesto; Miyara, Federico; Mignini, Ezequiel (2009). "Protocolo de calibración de auriculares audiométricos para su uso en investigación psicoacústica" Primeras Jornadas Regionales de Acústica AdAA 2009. Pg. A025 Rosario, Argentina.
- Chalupper, J., Fastl, H. (2002). "Dynamic loudness model (DLM) for normal and hearing-impaired listeners" *Acustica united with Acta Acustica*, Vol 88. Pg. 378-386.
- Fletcher, N.H.; Rossing, T.D. (1998) "The Physics of Musical Instruments". Springer. New York.
- Hart, H.; Fuller, M. W.; Lusby, W. S. (1934). "A Precision Study of Piano Touch and Tone". *Journal of the Acoustical Society of America*, (6), 80,.
- Repp, B. H. (1990). "Patterns of expressive timing in performances of a Beethoven minuet by nineteen famous pianists". *Journal of the Acoustical Society of America* (88) 2, 622.
- Repp, B. H. (1990). "Diversity and commonality in music performance: An analysis of timing microstructure in Schumann's 'Träumerei'". *Journal of the Acoustical Society of America* (92), 2546-2568.
- Repp, B. H. (1996). "The dynamics of expressive piano performance: Schumann's 'Träumerei' revisited". *Journal of the Acoustical Society of America* (100), 641-650.
- Stevens, S.S.; Volkman, J.; Neuman, E.R. (1937). "A Scale for the Measurement of the Psychological Magnitude Pitch". *Journal of the Acoustical Society of America* (8) 3, 185 - 190
- Sundemberg, J., Verillo, V. (1980). "On the anatomy of the retard: A study of timing in music". *Journal of the Acoustical Society of America* (68) 3, 772.
- Todd, N. P. McA. (1992). "The dynamics of dynamics: A model of musical expression". *Journal of the Acoustical Society of America* (91) 6.
- Todd, N. P. McA. (1995). "The kinematics of musical expression". *Journal of the Acoustical Society of America* (97) 3.
- White, W. B. (1930). "The human element in piano tone production". *Journal of the Acoustical Society of America* (1) 3.
- Zwicker, E.; Fastl, H. (2007). "Psychoacoustics. Facts and Models". Springer. Berlin Heidelberg.