



**CENTRO
OLIMPICO
DE ESTUDIOS
SUPERIORES**

**MASTER UNIVERSITARIO EN ALTO RENDIMIENTO
DEPORTIVO**

**“Características físicas y comportamiento de las raquetas
de tenis”.**

Tutor:
Mikel Izquierdo Redín

TRABAJO DE FIN DE MASTER

DATOS DEL ALUMNO:

APELLIDOS: RINCÓN CARRASCO.

NOMBRE: ALBERTO.

PROMOCIÓN: 2003-2005.

Mayo de 2008



**COMITE
OLIMPICO
ESPAÑOL**



CENTRO
OLÍMPICO
DE ESTUDIOS
SUPERIORES

EL COMPORTAMIENTO FÍSICO DE LAS RAQUETAS DE TENIS:

ÍNDICE

- Introducción.....página 3.
- Centro de percusión.....página 4.
- Centro de masas.....página 5.
- Momento de inercia.....página 6.
- Coeficiente de restitución.....página 6.
- Tiempo de contacto.....página 7.
- Desviaciones del eje longitudinal en el impacto.....página 9.
- Tensión de las cuerdas.....página 10.
- El cordaje.....página 12.
- Rigidez de la raquetapágina 15.
- Restitución de la bola.....página 16.
- Nodos de vibración: puntos de reposo.....página 17.
- El punto dulce “sweet spot”.....página 20.
- El punto muerto (dead spot).....página 21.
- Zona de potencia (the power región).....página 21.
- Potencia de la raqueta.....página 22.
- Interacción bola-raqueta.....página 23.
- Firmeza en el agarre.....página 24.
- Consejos de Howard Brody a la hora de elegir una raqueta.....página 28.
- Conclusiones. Aplicaciones prácticas del trabajo.....página 29.
- Anexo I. Reglamento de la ITF respecto a las raquetas de tenis.....página 30.
- Anexo II. Tendencias comerciales de las principales marcas.....página 31.
- Anexo III. Principales novedades comerciales de las principales marcas.....página 32.
- Bibliografía.....página 47.



COMITE
OLÍMPICO
ESPAÑOL

INTRODUCCIÓN

Este trabajo pretende hacer una revisión general de artículos de investigación que estudian distintos parámetros del comportamiento físico de las raquetas de tenis.

El objetivo de esta revisión es tener una herramienta que compile la información relativa a este ámbito, y que sirva de ayuda a técnicos, deportistas y aficionados del mundo del tenis para dar respuesta a alguno de los muchos interrogantes de la técnica y la biomecánica del tenis, al tiempo que entendemos mejor el comportamiento del implemento que se utiliza en esta bonita disciplina deportiva, la raqueta.

Desde hace más de cincuenta años, como dice Howard Brody en su artículo “La física de la raqueta de tenis”, la forma y tamaño de las raquetas, prácticamente no ha cambiado. Las raquetas “modernas” de metal y nuevos compuestos como fibra de vidrio, fibra de carbono, kevlar, etc., heredaron la forma y tamaño de las de madera. De igual forma ocurrió con los cordajes de tripa de cerdo, que han aguantado de manera exitosa las exigencias del alto rendimiento deportivo del tenis hasta nuestros días.

Parece ser que no hay demasiada información publicada sobre el tamaño, forma y peso ideales óptimos de una raqueta de tenis y esto tiene una explicación sencilla. Todos los tenistas de alto nivel han aprendido a jugar al tenis con raquetas antiguas que han ido evolucionando lentamente. Cualquier cambio brusco en la forma, tamaño o peso en dichas raquetas, desembocará en una disminución del rendimiento del tenista que no está adaptado a la nueva raqueta y que no puede permitirse el lujo de perder varios años de su vida deportiva en comprobar si esa raqueta le aportará mejores resultados en el futuro que la habitual. Por otro lado, aunque dicho deportista fuese lo suficientemente valiente como para arriesgar su tiempo, nunca podríamos comparar los resultados obtenidos, ya que solo puede escoger una de las dos opciones. La otra alternativa que nos quedaría sería comparar varios jugadores después de varios años de entrenamiento habiendo unos, entrenado con las raquetas habituales y otros con los supuestos “prototipos” ideados por los físicos. Opción, esta última, tremendamente arriesgada, sobre todo para los que decidiesen probar las nuevas raquetas, que estarían envueltas en una constante incertidumbre, y que, además, una vez alcanzasen su mejor nivel de rendimiento, no habría una forma objetiva de comparar a los tenistas. Las ejecuciones técnicas posiblemente serían diferentes para cada tipo de raqueta, la capacidad de máximo rendimiento de cada tenista también sería posiblemente diferente, los puntos fuertes y débiles de cada tenista serían diferentes y aun así, suponiendo que las técnicas de ejecución para ambos tipos de raquetas fuesen las mismas, las capacidades de máximo rendimiento de ambos tenistas fuesen las mismas, los puntos fuertes y débiles de ambos fuesen los mismos y hubiese uno de los jugadores que obtuviese siempre los mejores resultados en competición, resultaría prácticamente imposible afirmar que el mejor rendimiento alcanzado por el mejor de ambos tenistas se debiera al tipo de raqueta utilizado, ya que hay una gran cantidad de factores, además de la armonía entre jugador y raqueta que determinan el éxito del tenista en competición.

Esta situación es la que acompaña hoy en día a todos los tenistas a la hora de elegir la mejor raqueta para su juego. No se puede tener la certeza de cuál es la mejor raqueta para cada tenista y muchas veces vale más mantener las características de la raqueta del tenista y dejar que vaya evolucionando el tenista sobre ésta que empezar la adaptación a una nueva a pesar de que la variación entre ambas raquetas no sea muy significativa.

Uno de los cambios más significativos en la historia de la evolución de las raquetas fue el que introdujo Head con su raqueta sobredimensionada. Head mantuvo, la longitud, el balance o punto de equilibrio de la raqueta y su peso de modo que las sensaciones del tenista no eran muy diferentes. Ahora bien, se descubrió más tarde, que el punto óptimo de impacto, variaba en esta raqueta unos 4-5 centímetros hacia la empuñadura, con lo cual, el momento de inercia en el momento del impacto, para ese punto, también. Ya veremos más adelante que suponen estos cambios y otros en las características de las raquetas.

Con este trabajo voy a intentar obtener las premisas básicas para conocer una raqueta de tenis y poder así tener más claro, si es posible, cual es la raqueta que queremos, o que nos interesa, a la hora de ponernos a jugar y lograr nuestro mejor tenis.



CENTRO
OLÍMPICO
DE ESTUDIOS
SUPERIORES

A lo largo del trabajo se irán presentando y explicando conceptos y aspectos fundamentales para comprender el comportamiento físico de las raquetas de tenis. Al final, se presentan unas conclusiones que sirven, o al menos pretender servir, de aplicación a la mejora del rendimiento de los tenistas.

CENTRO DE PERCUSIÓN

En un supuesto en el que se golpee una raqueta colgada de un hilo, suspendida libremente (Fig. 1), el centro de percusión o COP (center of percussion) sería aquel en el que, inicialmente, no se produce traslación. Varía según por donde se sujete la raqueta.

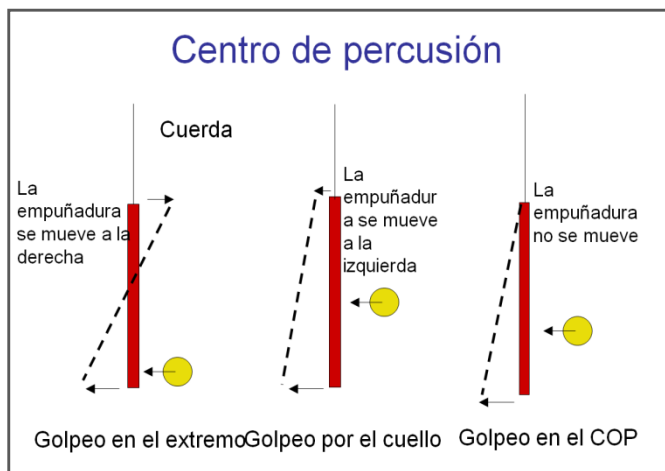


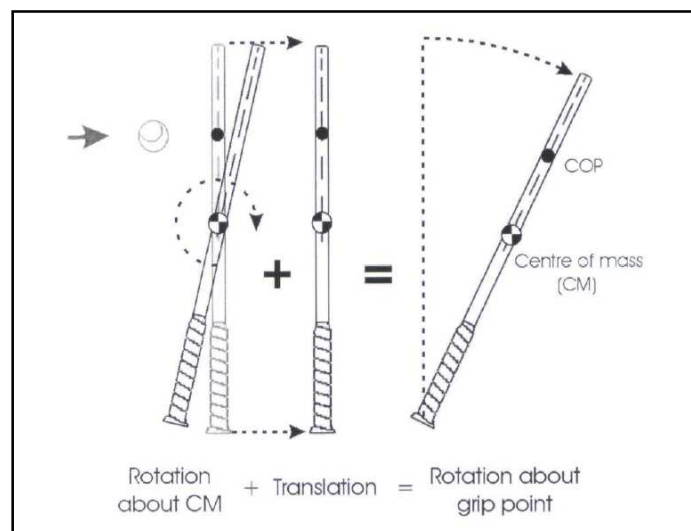
Figura 1. El COP estará localizado a una distancia de $L/3$ del extremo de la zona de golpeo (zona contraria a la de la empuñadura). Si la pelota impacta en el COP la barra girará por un eje situado al final de la empuñadura. Cross R (1999). The sweet spots of a tennis racquet. *Sports Engineering*. Volume 1, number 2 (page 63).

Este punto está situado aproximadamente 5 o 6 centímetros por debajo del centro de la cabeza de la raqueta, para una raqueta colocada verticalmente apoyada sobre el extremo de la empuñadura. En algunas raquetas modernas se ha logrado situar más cerca del extremo de la cabeza que del cuello, logrando así una raqueta mucho más potente (“How would a physicist design a tennis racket?” Howard Brody. 1995).

Cuando una bola impacta en el centro de masas de la raqueta, esta sufre un desplazamiento de traslación (Figura 2).

Cuando una bola impacta a una distancia b del centro de masas, ésta sufre primeramente un desplazamiento de rotación alrededor de un eje que atraviesa un punto A y seguidamente un desplazamiento de traslación (Figura 2).

Figura 2. Dibujo tomado del artículo de J. Kotze *et al.* • The racket in high-speed serves. *Sports Engineering* (2000) 3, 67-84.



COMITE
OLÍMPICO
ESPAÑOL

Cuando una raqueta suspendida libremente en el espacio es golpeada por una bola a una distancia b del centro de masas, ésta gira sobre un punto A que inicialmente se mantiene inmóvil. El movimiento de rotación, cancela inicialmente el movimiento de traslación en ese punto. Por esta razón, si la raqueta está sujeta por el puño en el punto A, cuando la bola impacta en un punto B a una distancia b del centro de masas, no es necesario ejercer, inicialmente, fuerza para contrarrestar el impacto. Por esta razón, para cada punto B de impacto de la raqueta, existe un punto A en el que al sujetar por el mismo la raqueta no hay que ejercer fuerza para contrarrestar el impacto. A la inversa, para la zona donde se agarra la raqueta, la empuñadura, existe un punto de impacto en el que el tenista no tiene que ejercer apenas fuerza para contrarrestar la fuerza del impacto.

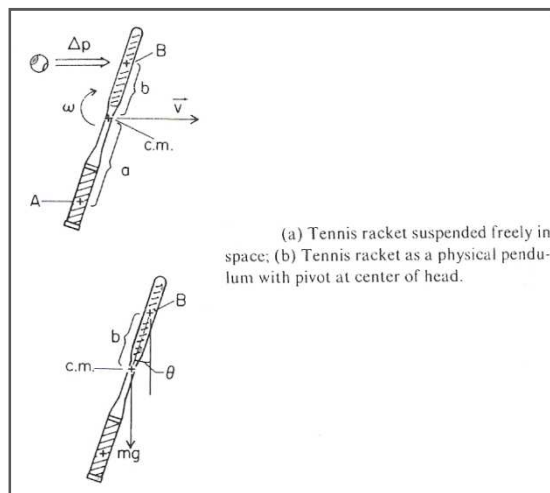


Figura 3. Comportamiento de una raqueta, suspendida libremente, que sufre el impacto de una bola de tenis. Brody, H. (1979) *Physics of the tennis racket. American Journal of Physics* 47, 482-487.

Cuando la bola impacta cerca del extremo de la cabeza de la raqueta, el eje de giro se desplaza hacia el centro de la raqueta y el giro de ésta hace que la muñeca del tenista tienda al límite de su extensión al tiempo que sus dedos son forzados por la empuñadura para que se abran y dejen girar la raqueta (fig. 1).

Al contrario, cuando la bola impacta en una zona cercana al cuello de la raqueta, el eje de giro de ésta se desplaza hacia una prolongación de la empuñadura sufre una traslación hacia atrás haciendo que la muñeca se flexione (fig. 1).

El centro de percusión, es un punto idóneo para el golpeo de la bola, ya que nos va a costar menos esfuerzo contrarrestar la fuerza de incidencia de ésta y por tanto nos va a permitir que con la misma inercia, la bola salga despedida con mayor velocidad que si golpease en otro lugar de la raqueta. No obstante, veremos a continuación que existen otros puntos de la raqueta que son también muy interesantes para golpear la bola.

CENTRO DE MASAS

Punto geométrico que dinámicamente se comporta como si estuviese sometido a la resultante de las fuerzas externas. En la figura 2 corresponde al punto denominado CM.

Por otra parte, cuanto más cerca esté el punto de impacto del centro de masas, más velocidad de rebote tendrá la bola tras golpear el cordaje, ya que menos energía se pierde en la rotación inicial de la raqueta. Lo más habitual es que el centro de masas de una raqueta se encuentre en la zona del cuello de la raqueta, aproximadamente en el centro geométrico de la raqueta. Estará un poco más adelantado o atrasado en función de si la raqueta tiene el balance o punto de equilibrio adelantado (raqueta “cabezona”, más potente), neutro o atrasado (más ágil).

De nuevo otro punto o zona interesante para recibir a la bola en el momento del impacto. Obviamente, al coincidir el centro de masas fuera de la zona encordada no se va a buscar el impacto en dicha zona, pero sí que resulta interesante acercarse o alejarse de él en función de la búsqueda de potencia.

MOMENTO DE INERCIA

Es la inercia de un cuerpo a rotar, es decir, la resistencia o dificultad que opone dicho cuerpo, en nuestro caso, la raqueta, a rotar. Se define como la suma de los productos entre las masas de las partículas que componen un sistema, y el cuadrado de la distancia r de cada partícula al eje escogido ($I = \sum m_i r_i^2$). Por tanto depende del reparto de masas del objeto y de la distancia de éstas al eje de giro.

Cuando la bola impacta en la raqueta en el COP, en un primer momento, no hay fuerzas netas que actúen sobre la mano del tenista, porque el eje de giro de la mano, la muñeca, coincide con el eje de giro de la raqueta.

Muchas veces, cuando se pretende realizar un golpe más potente, como sucede en el servicio, el tenista busca impactar más cerca del extremo de la raqueta porque se consigue un mayor momento de inercia, ya que el eje de giro, en este caso el hombre, está más lejos de la masa a mover y, por tanto, mayor es la velocidad angular ($\omega = \Delta pb / I_{c.m.}$) de la raqueta en el momento del impacto con lo que mayor velocidad se le imprimirá a la bola por el principio de conservación de la cantidad de movimiento.

Tenemos pues otro punto o zona de impacto interesante para según qué situaciones. En este caso se busca un mayor momento de inercia alejando lo más posible el punto de impacto con respecto al eje de giro. En el caso anterior del centro de masas se busca también incrementar el momento de inercia acercando el punto de impacto al centro de masas del sistema. En general, ante ambas situaciones nos va a interesar alejarnos del eje de giro, ya que I aumenta más cuando se incrementa r que cuando se incrementa m , ya que r está elevado al cuadrado. El único inconveniente que puede tener el incremento de I con el aumento de r , es que al golpear la bola más lejos, se requiere una mayor pericia.

COEFICIENTE DE RESTITUCIÓN

El punto que en las raquetas denominamos COR (coefficient of restitution) (Groppel *et al*, 1987a; Liu, 1983; Missavage, Baker & Putnam, 1984) es el punto en el que la fuerza de restitución es mayor, es decir, el punto en el que la relación entre la velocidad de incidencia de la bola y la velocidad de rebote, tras el impacto de la bola con las cuerdas, es mayor.

$$COR = \sqrt{(h_r/h_d)}$$

Donde h_r es la altura de rebote (rebound height) y h_d es altura de caída (drop height). Se habla de alturas porque, habitualmente, la forma de hallar el COR de un objeto sobre una superficie se halla observando la relación entre la altura de caída del objeto sobre dicha superficie y la altura que el objeto alcanza en el rebote.

Este punto coincide con el centro del área encordada, siempre que se mida con la cabeza fijada a alguna estructura en la que no intervenga la flexibilidad de la raqueta. Es el lugar donde más elasticidad hay de la zona encordada ya que es el punto más alejado de la estructura rígida de la raqueta.

Tenemos pues un conflicto a la hora de buscar el punto de impacto ideal, ya que tenemos dos puntos ideales que el tenista debe buscar a la hora de impactar con la bola y una sola bola.

El COP, en las raquetas modernas está muy cerca del centro de la cabeza, varía según el tipo de raqueta, ya que, a lo largo de los años, se han ido modificando los tamaños de la cabeza y la distribución de pesos de la misma para hacer coincidir el COP con el centro de la cabeza de la raqueta. La marca pionera en modificar las características de la raqueta para lograr esto fue Head con su raqueta Prince sobredimensionada. Después, Wilson obtuvo el mismo efecto incrementando el peso de la cabeza sin aumentar el tamaño de ésta, dándole además, una mayor inercia a la raqueta a la hora de golpear la bola.



CENTRO
OLÍMPICO
DE ESTUDIOS
SUPERIORES

Por otro lado, hay que decir que, el COR, en una raqueta que es sujeta por un tenista, está muy cerca del cuello, porque cuando la bola impacta en la raqueta, ésta se flexiona y se disipa una parte de la fuerza de la bola. Cuanto más lejos de la empuñadura golpee la bola, más se flexiona la estructura de la raqueta y más energía se disipa, con lo cual, menos energía para devolver a la bola. Por eso el COR está cerca del cuello de la raqueta.

Hatze (1992, 1993, 1994) empezó a utilizar el concepto de ACOR (apparent coefficient of restitution) o coeficiente de restitución aparente para referirse a la proporción o relación existente entre la velocidad de incidencia (pre-impacto) y la velocidad de rebote de la bola (post-impacto) en aquellos test en los que la raqueta no estaba fijada por la cabeza, ya que los datos difieren con respecto a situaciones de test en los que la raqueta tiene movilidad (sujeta por un tornillo, sujeta por la mano de un jugador, etc.).

Tabla 1. La tabla de la derecha muestra diferentes resultados de COR encontrados en diferentes estudios de diferentes años, raquetas y velocidades de bola. KotzeJ, Mitchell SR and Rothberg SJ (2000). The role of the racket in high-speed tennis serves. *Spots Engineering* 3:2, 67.

Table 1 COR results from the literature

Year	Researcher	COR type	COR values	Ball speed (m s ⁻¹)
1976	Head	COR _{gc}	0.3–0.6	27
1979	Brody	COR _{hc}	0.854	8.5
1979	Watanabe <i>et al.</i>	COR _{gc}	0.44	19.30
		COR _p	0.43	19.63
		COR _f	0.43	16.49
1980	Elliott <i>et al.</i>	ACOR _{gc}	0.45–0.50	21
1982	Elliott	ACOR _s	0.65	22.7
1984	Missavage <i>et al.</i> †	ACOR _f	0.36	25.3
		ACOR _{gc}	0.42	25.3
		COR _s	0.758–0.885	20
1992	Hatze	COR _s	0.83	21.19
1993	Hatze	ACOR _s	0.43	21.19
		ACOR _s	0.42	21.16
		COR _{hc}	0.80	21.05
		ACOR _f	0.5	26.4
1993	Kawazoe	ACOR _f	0.5	26.4
1995	Wilson	ACOR _{gc}	0.6	19
1997	Brody	ACOR _f	0.492	20

Subscripts: hc = head clamped; gc = grip clamped; gp = grip pivoted; f = free suspended; p = player held; s = simulated play.
†Performed on a stiffened racket.

R. Bower & P. Sinclair (1999) introdujeron el término ACORO (apparent coefficient of restitution for an oblique impact) para referirse a la relación entre la velocidad de rebote y de aproximación en impactos oblicuos. Los resultados de su estudio demostraban que para impactos oblicuos, el ACORO se incrementaba cuando para una misma raqueta, se aumentaba la rigidez de su estructura o se disminuía la tensión de su cordaje. Es decir, se demuestra que las raquetas tienen un comportamiento similar en cuanto al COR tanto para impactos normales como para impactos oblicuos con respecto a la tensión de las cuerdas y la rigidez de la raqueta.

Por tanto, tres posibles puntos o zonas diferentes para el impacto de la bola que son interesantes en función del punto de vista desde el que se mire: fuerzas netas sobre la mano, momento de inercia aplicado a la bola o fuerza de restitución aplicada a la bola.

TIEMPO DE CONTACTO

El periodo de tiempo que la bola está en contacto con las cuerdas, suele ser cercano a los 5 milisegundos (figura 5). Este tiempo es muy importante por dos razones principales que se explican a continuación.

La primera es que, cuando la bola impacta en las cuerdas, la estructura rígida de la raqueta se flexiona y, por su elasticidad, recupera su forma devolviendo la fuerza que actuó sobre ella en sentido contrario. A pesar de lo que se podría pensar, esta fuerza devuelta por la elasticidad de la estructura rígida de



COMITE
OLÍMPICO
ESPAÑOL

la raqueta no sirve para aplicarla a la bola, ya que el tiempo de contacto de ésta con las cuerdas, es menor que el tiempo que la raqueta tarda en recuperar su forma natural, es decir, que cuando la estructura rígida de la raqueta devuelve la fuerza que la bola le ha aplicado previamente, la bola ya no está en contacto con las cuerdas para recibirla.

La segunda es que este tiempo de contacto es el tiempo del que dispone el tenista para influir en la bola de manera que ésta describa la trayectoria deseada.

A continuación se muestra una tabla en la que aparecen tiempos de contacto (en milisegundos) de diferentes bolas con diferentes superficies encordadas a diferentes tensiones.

Rebounding surface	Type of ball		
	Penn	Spalding Australian	Tretorn (pressureless)
Lead brick	3.9	4.5	4.5
Prince (70 lb)	6.1	6.3	6.3
Prince (50 lb)	6.5	6.7	6.4
Spalding Smasher	6.4	6.8	6.6

*All balls were dropped from a height of 3.7 m. Their measured velocity at impact (8.3 m/sec) was slightly lower than the theoretical value (8.5 m/sec) because of air resistance. One Prince racket was strung with a synthetic at 70-lb tension, the other Prince with gut at 50-lb tension and the Spalding Smasher with synthetic at an unknown tension. The racket head was clamped for these data.

Tabla 2. Tiempos de contacto (en milisegundos) de diferentes bolas con diferentes superficies encordadas a diferentes tensiones. H. Brody. *Physics of the tennis racket. American Journal of Physics* 47, 482-487.

Estos tiempos se pueden medir con videocámaras que graban a más de 1000 fotogramas por segundo en las que se toman los fotogramas uno a uno o por mecanismos con dispositivos de láser, fotodetectores y osciloscopios como el desarrollado por Howard Brody (figura 4).

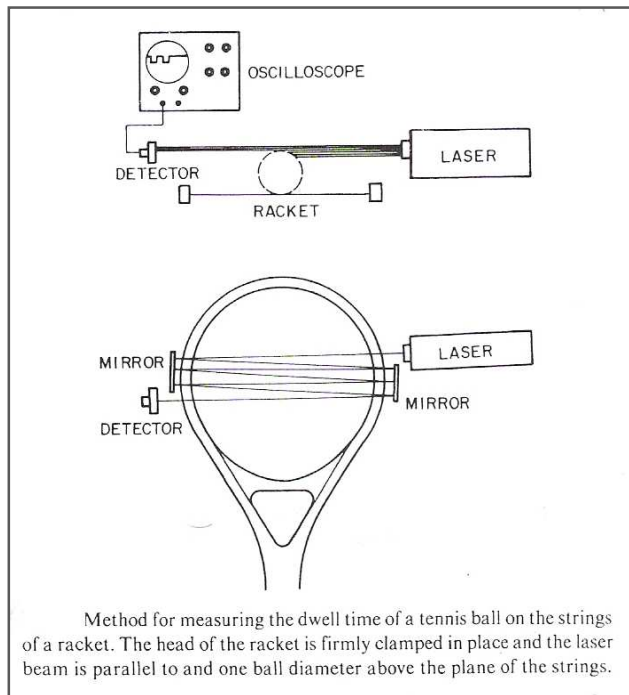


Figura 4. Para obtener todas estas conclusiones, H. Brody observó el comportamiento de la bola al impactar contra el cordaje a través de un mecanismo como el que muestra la figura. Brody, H. (1979) *Physics of the tennis racket. American Journal of Physics* 47, 482-487.

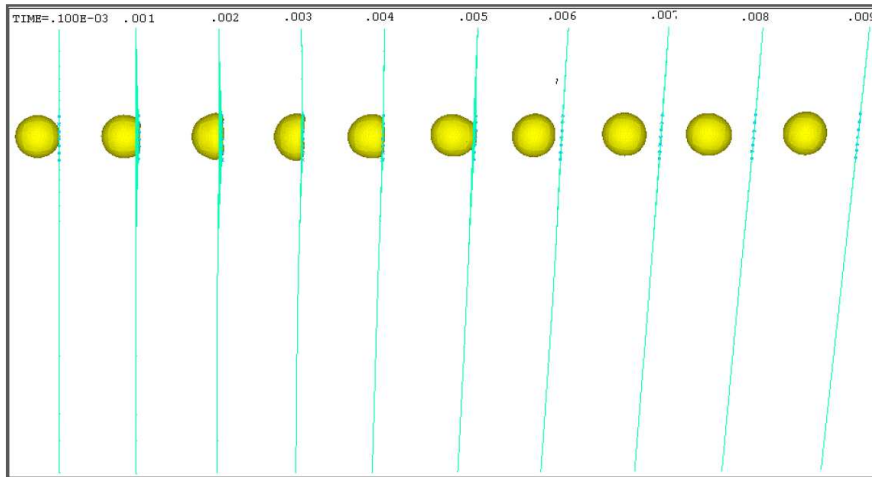


Figura 5. Imágenes de un impacto de bola sobre una raqueta con las medidas de tiempo de contacto en milisegundos. Appunti sulla meccanica del tennis. Federico Casolo.

DESVIACIONES DEL EJE LONGITUDINAL EN EL IMPACTO

El punto de impacto ha de estar, en la medida de lo posible en el eje longitudinal de la raqueta, ya que desviarlo a derecha o izquierda, significa que la raqueta tenderá a girarse porque se genera un impulso angular directamente proporcional a la distancia del punto de impacto con respecto al eje longitudinal.

Este último aspecto se puede corregir incrementando el momento de inercia de la raqueta (centro de masas más cerca del extremo de la raqueta) o incrementando la distancia que existe entre el eje longitudinal de la raqueta y el extremo lateral de la cabeza de la misma (haciendo la cabeza más ancha).

Wilson fue una de las marcas pioneras en resolver este problema lastrando las raquetas (más momento de inercia) mientras que Head optó por incrementar el tamaño de la cabeza en su modelo "Prince" (dobló el momento de inercia con incremento del 40% de la envergadura de la cabeza de la raqueta).

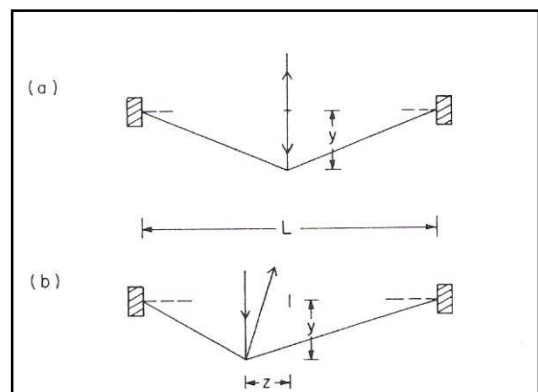
Otro detalle que ayuda a corregir este problema es incrementar el diámetro de la empuñadura, ya que al impactar la bola en la raqueta, la mano del tenista tiene un mayor control sobre las fuerzas de giro. Esto es válido, siempre y cuando el tenista sea capaz de manejar cómodamente la raqueta a pesar de que la empuñadura sea más gruesa.

Cuando el impacto no se produce en el eje longitudinal, la bola golpea en un lado de la cabeza de la raqueta, a una distancia determinada del eje longitudinal y la bola tiende a rebotar hacia el centro, corrigiéndose ligeramente el error técnico del tenista (fig. 6). El ángulo que forma la trayectoria de la bola antes y después del impacto podemos llamarlo error angular y depende de varios factores: (z/L) (y/L) , donde z es distancia del punto de impacto al centro de las cuerdas, L es la longitud de las cuerdas e y es la distancia de desviación de las cuerdas. Por tanto el error angular vendrá determinado por la siguiente fórmula.

$$\Delta\theta = (Cz\Delta_v/L)(m/LT)^{1/2}$$

Donde C es una constante, z es la distancia del punto de impacto al centro de las cuerdas, Δ_v es el cambio de velocidad de la bola, L es la longitud de las cuerdas, m es la masa de la bola y T es la tensión de la cuerda.

Figura 6. Representación gráfica de la desviación del ángulo de rebote de la bola tras golpear a una distancia del centro de la cuerda. H. Brody. Physics of the tennis racket. *American Journal of Physics* 47, 482-487.



La conclusión que podemos obtener de esto es que al aumentar la longitud de las cuerdas (L), se reduce el error angular, por eso los principiantes utilizan raquetas con cabezas más grandes (coloquialmente conocidas como “sartenes”).

También podemos afirmar que, a mayor variación de la velocidad de la bola (Δv), mayor error angular ($\Delta\theta$). Lo que significa también que, a medida que el punto de impacto se aleja del punto medio de las cuerdas, mayor error angular, ya que hay más diferencia entre la velocidad de incidencia y la de rebote. Por esta razón resulta difícil golpear fuerte la bola con alta precisión.

TENSIÓN DE LAS CUERDAS

Otro aspecto tremendamente importante que condiciona el comportamiento de una raqueta de tenis es la tensión de las cuerdas. Esta tensión se mide habitualmente en libras o kilogramos, pero hay que tener en cuenta que la misma tensión en cuanto a kilos es diferente en función del tamaño de la cabeza (tamaño de la superficie encordada), los espacios entre las cuerdas, la rigidez de la raqueta, el tipo de cordaje, etc. Una forma significativa de medir la tensión del cordaje es someter a éste a una carga y observar la deformación que sufre ante dicha carga.

Como ya hemos comentado anteriormente, a menor tensión de cordaje, más energía cinética se acumula para que sea devuelta a la bola en el rebote (dependiendo del tipo de bola puede llegarse a un COR de 0.93-0.95). Recordemos que a más energía disipada por la bola o por las características de la raqueta (una mayor tensión de las cuerdas significa mayor energía disipada), menos energía cinética para el rebote, por tanto, menor COR y menor velocidad de salida de la bola.

En cuanto al comportamiento de la bola según la tensión de las cuerdas, para una misma raqueta y un mismo jugador, podemos decir, en términos generales, que a mayor tensión obtendremos menos potencia y más control, y con menor tensión obtendremos más potencia y menos control.

Hace algunos años, se pensaba lo contrario porque los jugadores profesionales tenían más tensión en sus cuerdas y la bola iba más rápido. Todo esto quedó rápidamente aclarado una vez que empezaron a hacerse estudios serios con aparatos de precisión que no dejaron lugar a dudas. Aproximadamente la mitad de la energía que lleva la bola antes del impacto se pierde cuando golpea una superficie dura (fig. 7). Las cuerdas tienen pérdidas de energía relativamente pequeñas cuando son deformadas.

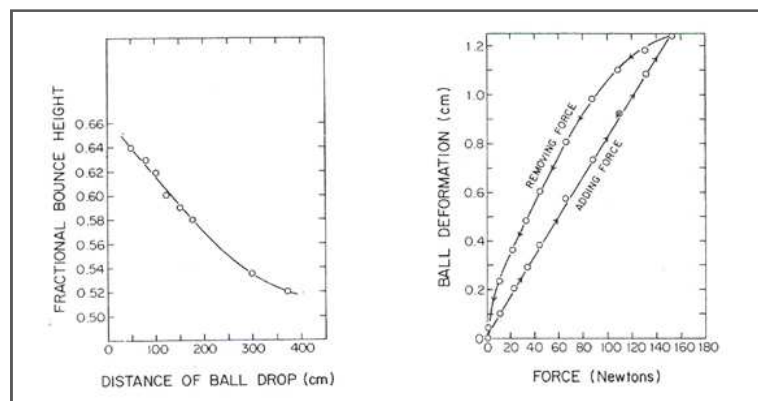


Figura 7. Representaciones gráficas de la relación entre la altura de caída de una bola y la altura que alcanza dicha bola en el rebote, tras golpear una superficie dura (izquierda) y la deformación de una bola de tenis en función de la fuerza que a la que es sometida, teniendo en cuenta que la fuerza se aplica únicamente en un lado, ya que está colocada en un recipiente semiesférico (derecha). H. Brody. *Physics of the tennis racket. American Journal of Physics* 47, 482-487.

Para entender fácilmente el papel del cordaje en las raquetas de tenis, podemos decir que la altura de rebote de una bola que se deja caer desde una altura de 1 metro sobre una superficie dura es de

aproximadamente 60 centímetros, mientras que si la bola se deja caer sobre el centro de la cabeza de una raqueta apoyada en el suelo, la altura de rebote alcanza aproximadamente unos 80 centímetros (fig. 7).

Como es lógico, la disminución de la tensión del cordaje para ganar velocidad de salida de la bola tras el impacto, tiene un límite. Existe una tensión mínima a partir de la cual, el hecho de disminuirla no significa incrementar el COR. Esto sucede cuando, a la vista se observa que, las cuerdas se desplazan lateralmente al impactar con la bola y no vuelven a su lugar de origen por que han perdido su elasticidad. Cuando esto ocurre se disipa parte de la energía en dichos desplazamientos laterales y por el rozamiento entre las cuerdas.

En 1982 Elliot encontró un límite, en la tensión máxima que se debería de aplicar a los cordajes, en 245 N. Más tarde, esto fue confirmado por Thornhill *et al* (1993) quienes establecieron los límites recomendables mínimo y máximo para la mayoría de los cordajes entre 200 N (20.38 kgrs.) y 245 (24.97 kgrs.) respectivamente.

Grannigan & Adali en 1981 desarrollaron un modelo matemático de una raqueta de tenis incluyendo la bola, el cordaje, la raqueta y la mano. Los resultados de este modelo confirmaron que una tensión más baja en el cordaje, hace que el tiempo de impacto sea más largo y la velocidad de rebote sea mayor. Cordajes más estrechos y menos densos provocan mayor giro o efecto en la bola ya que cortan la superficie de la bola y aumentan la adherencia entre las superficies (Brody 1987).

Es necesario que haya, por tanto, la tensión suficiente para que las cuerdas tengan un comportamiento elástico y recuperen su posición tras el impacto, de manera que transmitan su energía acumulada a la bola en la parte final del golpeo (figura 8). Esto ha de ocurrir antes de que la bola recupere su forma esférica natural, pues una vez ocurra esto, perderá el contacto con las cuerdas y ya no habrá intercambio de fuerzas.

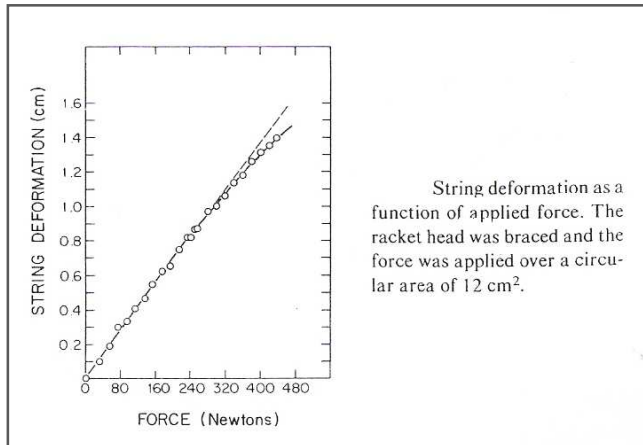


Figura 8. Deformación del cordaje en función de la fuerza aplicada. H. Brody. *Physics of the tennis racket. American Journal of Physics* 47, 482-487.

La mejora en la precisión de disparo con un el incremento de la tensión de las cuerdas es más difícil de medir. La explicación a esto es que al aumentar la tensión, disminuye la distorsión de las cuerdas con lo que hay menor error angular de éstas para impactos fuera del centro de la raqueta (figura 6). Otra explicación a esto es que al haber más tensión, se deforma más la bola y aumenta la superficie de contacto entre ésta y el cordaje y por tanto mayor control (Groppel 1982).

Otro aspecto que tenemos que tener en cuenta en relación a esto es que, a mayor tiempo de contacto de la bola con las cuerdas, más influencia tienen éstas sobre aquella. Por eso, cuando la tensión del cordaje es menor, más tiempo en contacto con las cuerdas y más influencia sobre la bola en el golpeo. Una mala ejecución técnica, desencadenará un mayor error y una buena ejecución técnica, desencadenará en un mejor acierto.

A pesar de esto, hay que tener en cuenta que un tenista no debe hacer cambios bruscos en la tensión de su raqueta ya que al cambiar el comportamiento de la bola, variará su efectividad por falta de adaptación. Incluso puede llegar a darse el caso opuesto al buscado. Si, por ejemplo, un tenista quiere sacrificar un poco de su potencia para ganar control y no lo hace poco a poco, intentará pegar mucho más fuerte a la bola de lo que le pega habitualmente para lograr que vaya a la velocidad que normalmente van sus bolas. Al pegar mucho más fuerte de lo habitual, no tendrá la misma precisión, puesto no se ha adaptado a las circunstancias y el resultado final será el contrario al buscado: menor control sobre la bola.

Debe ser el propio tenista el que busque la tensión que le va bien, aquella que, en conjunto, le proporciona mejores sensaciones en la pista y mejores resultados en competición.

Una vez que sabemos la tensión con la que el tenista se siente mejor, tendremos que buscar el tipo de cordaje al que mejor se ajusta dentro del gran abanico de posibilidades que nos ofrecen las distintas casas comerciales, ya sea natural o sintético.

Una raqueta pierde entre un 30 para cordajes de nylon y un 40 % para cordajes de poliéster de la tensión a la que ha sido encordada nada más terminar dicha acción. Las principales causas de estas pérdidas de tensión son las siguientes: los cambios de tensión-relajación del cordaje sometido a tensión, la distorsión de la cabeza de la raqueta durante el encordado, fricción entre las cuerdas principales y las transversales y la alineación de la cabeza tensionada unida a la fricción de las cuerdas y los ojales o agujeros por los que atraviesan la estructura de la raqueta (Cross & Bower 2000). Esto, a priori, no es un problema, ya que la pérdida de tensión suele ser muy parecida siempre y por tanto el tenista pide la tensión con la que se siente cómodo, aunque luego haya un 30 o 40 % de diferencia entre la tensión que pide y la que realmente tiene su raqueta. El problema con esto lo tiene los científicos que se encargan de estudiar las características dinámicas de las raquetas y quieren que sus experimentos se asemejen lo más posible a la realidad de competición. Esto fue lo que ocurrió a Casolo & Lorenzi (2000) cuando predijeron que cuando se encordaba la raqueta, se incrementaba la frecuencia de vibración, y, en realidad, la frecuencia de vibración de la estructura de la raqueta disminuye cuando se le añade el cordaje (Cross 2001b). Es imposible asegurar que la tensión de la raqueta es la deseada y que además es la misma en cada cuerda, pero es algo deseable por parte del tenista. Lo que realmente es importante es que el encordador tenga la habilidad suficiente como para hacer que la zona encordada de la raqueta, tenga la tensión deseada por el tenista teniendo en cuenta todos los factores que pueden alterar dicha tensión (tipo de cordaje, tensión inicial, superficie de zona encordada, tiempo de uso, tensión en cuerdas principales y transversales, etc.). A mayor sensibilidad del tenista, mayor exigencia tendrá con el encordador y mayor importancia cobrarán las pequeñas diferencias de tensión en la raqueta para lograr el mejor rendimiento.

EL CORDAJE

El cordaje más emblemático es el de tripa, hecho con intestino de vaca, cerdo u oveja. Este cordaje ha sobrevivido por el momento, a todas las evoluciones sufridas por el deporte del tenis y aun hoy en día sigue compitiendo con los distintos compuestos sintéticos que las grandes marcas han desarrollado a lo largo de los años. Es un material muy resistente y de una gran elasticidad a altas tensiones.

En la actualidad los fabricantes han desarrollado multitud de cordajes de diferentes características, en función de lo que busque el tenista, que resultan de las múltiples combinaciones posibles entre la elasticidad (recuperación de la forma tras la deformación del impacto), la durabilidad (resistencia a la tensión y a la abrasión) y la adherencia (tacto en el golpeo de la bola para imprimir un determinado efecto).

Además de las propiedades de las que ya hemos hablado como: elasticidad, tensión, pérdidas de tensión en función del tiempo, diámetro del cordaje, el tipo o el diseño del cordaje, hay uno al que no se le ha prestado, hasta ahora, demasiada atención, es el coeficiente de fricción. Este coeficiente juega un papel determinante en la interacción entre la bola y las cuerdas (R. Cross 2000). Prácticamente todos los cordajes que existen en el mercado mantienen eficientemente la energía elástica del golpeo sin pérdidas significativas, independientemente de la tensión que tengan esos cordajes, del tipo que sean y del uso que hayan tenido previo. Como ya se ha dicho en anteriores apartados, se puede aumentar el COR aumentando la potencia de la raqueta o disminuyendo la tensión de la superficie encordada. Sin embargo, el incremento resultante de estas



CENTRO
OLÍMPICO
DE ESTUDIOS
SUPERIORES

acciones, no supera en el mayoría de los casos el 1 % de la velocidad de rebote de la bola, algo inapreciable por la mayoría de los tenistas.

Se ha demostrado (R. Cross 2000) que un pequeño cambio en el coeficiente de fricción (de deslizamiento y de rodadura) inferior a 0.3 da como resultado un importante cambio en el ángulo de rebote y en el giro (efecto) de la bola tras el golpeo en la zona encordada. Este aumento en el giro (efecto) de la bola, puede parecer a la vista del jugador como una pérdida de potencia, ya que la bola caerá antes si el efecto del golpe es liftado, por lo que es un dato que hay que tener muy en cuenta a la hora de interpretar el comportamiento de los cordajes.

De la gran variedad de cordajes que existen en el mercado, podemos diferenciar 4 tipos claramente: tripa natural, nylon, polyester y kevlar (ordenados por orden según su rigidez dinámica). Habría un quinto tipo que sería el zyex pero su oferta en el mercado es reducida por lo que no se tendrá tan en cuenta como el resto. El tipo más común en el mercado es el nylon. Está disponible en multitud de formas (monofilamento, multifilamentos, con resinas o con capas diferentes). El kevlar se diferencia de los demás en que es muy rígido y sufre mayores pérdidas de tensión por soportar impactos.

El mejor cordaje es aquel que mejores sensaciones le proporciona al tenista. Una gran parte de los tenistas profesionales prefiere la tripa natural, ya que es altamente elástica y mantiene la tensión mejor que otros tipos de cuerda. Otros prefieren el poliéster que tiene las propiedades opuestas, ya que es más rígido y pierde tensión rápidamente. El poliéster pierde tensión rápidamente una vez encordada la raqueta y ante impactos repetidos (figura 9). No obstante la tensión del poliéster aumenta durante cada impacto debido a la alta rigidez del cordaje. Estas características combinadas hacen que el comportamiento final del poliéster se asemeje al de tripa natural. El pico de fuerza que soporta un cordaje de tripa durante un impacto siempre será más pequeño que el que soporta un cordaje de poliéster (para iguales raquetas, iguales calibres de cordaje, igual número de cuerdas e igual velocidad de impacto) a pesar de la tensión inicial. La duración del impacto es normalmente más larga con el cordaje de tripa que con el cordaje de poliéster, aunque podrían ser iguales si la tensión inicial es muy alta en el cordaje de tripa y muy baja en el de poliéster (Rod Cross *et al* 2000).

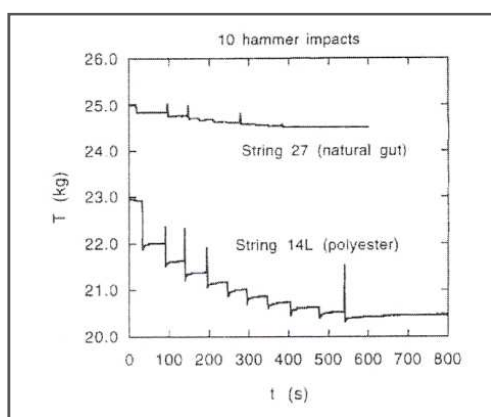


Figura 9. Comparación entre la pérdida de tensión de un cordaje de tripa natural y un cordaje de poliéster antes 10 impactos de martillo. Cross R, Lindsey C & Andruczyk D (2000). Laboratory testing of tennis strings. *Sports Engineering* 3:4, 219-230

Tanto la magnitud como la duración de la fuerza que actúa sobre la cuerda afecta al tacto y a la sensación del tenista, por lo que también afecta al control de la bola.

Cuando el impacto es de corta duración provoca altas frecuencias en la estructura de la raqueta, lo que es más eficiente que un impacto de larga duración que provoca frecuencias más bajas y además hace que la raqueta rote más cuando la bola no impacta en el eje longitudinal, lo que significa que el ángulo de rebote se desviará más que si el impacto fuese de menor duración (Rod Cross *et al* 2000).

Por esta razón, algunos tenistas prefieren tener más control y utilizan poliéster mientras que otros prefieren una sensación más suave y confortable y prefieren la tripa natural. En cualquier caso, la energía perdida en las cuerdas en el impacto es despreciable y no hay diferencias en la velocidad rebote de la bola (Cross 2000c). Muchos otros jugadores prefieren el nylon ya que ofrecen buenas sensaciones, buen control, buen precio y buena durabilidad. La tripa y el poliéster no destacan por su durabilidad.



COMITÉ
OLÍMPICO
ESPAÑOL



CENTRO
OLIMPICO
DE ESTUDIOS
SUPERIORES



Figura 10. Distintos tipos de cordaje. Tripa natural a la derecha. Secciones de cordajes sintéticos a la izquierda.

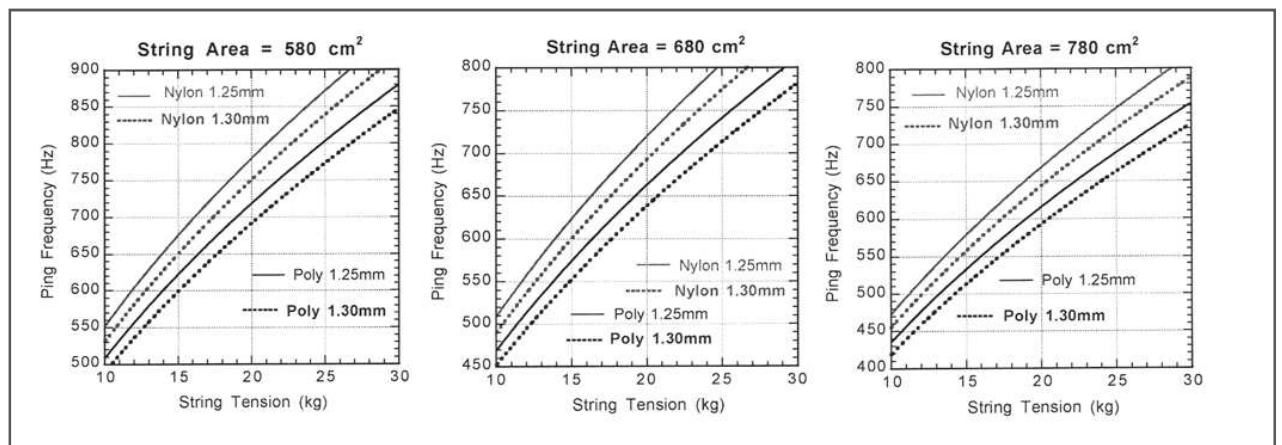
<http://www.itftennis.com/technical/>

Los tenistas expertos son capaces de diferenciar variaciones de tensión en su cordaje escuchando las vibraciones que se producen en su raqueta cuando golpean con su palma de la mano el centro del cordaje. La frecuencia de vibración de una cuerda depende de la longitud de la cuerda, de la tensión a la que es sometida y de su masa. Los cordajes delgados son más ligeros y vibran más deprisa que los gruesos del mismo material. La frecuencia de vibración de un cordaje de tenis puede hallarse por la siguiente fórmula:

$$f = \sqrt{\frac{T}{4mL}}$$

Las cuerdas en una raqueta varían en longitud pero como están tejidas juntas en una misma superficie, vibran de manera conjunta y, por tanto su frecuencia es la misma. Dicha frecuencia es un promedio de todas las frecuencias de vibración que tendrían cada una por separado. El promedio de frecuencia de vibración vendría dado por la ecuación anterior en la que m es la masa de una cuerda de longitud $L = \sqrt{A}$ donde A es el área de la superficie encordada (Cross 2006).

Rod Cross (2006) realizó un estudio en el que analiza diferentes frecuencias de vibración de diferentes tipos de cordaje (nylon y poliéster), con diferentes grosores (1.25 y 1.30) en diferentes raquetas con diferentes áreas encordadas (580 cm^2 , 680 cm^2 y 780 cm^2). La utilidad de este estudio radica en que gracias a él se puede calcular la pérdida de tensión de la zona encordada de la raqueta mediante la frecuencia de vibración que alcanza ante un impacto (la frecuencia se puede medir con un micrófono y un osciloscopio) de maneta que el tenista pueda saber de una manera objetiva cuando debe encordar de nuevo su raqueta. Con pérdidas de tensión del 10 %, se considera que la raqueta debe ser encordada de nuevo. Según esto y ayudándonos de la ecuación que se mostró anteriormente, una pérdida de tensión del 10 %, supone una bajada de frecuencia de vibración de un 5 %. Por tanto si se detecta una disminución de la frecuencia de vibración del 5 % en nuestra raqueta, sabremos que la tensión de la superficie encordada ha caído un 10 % y debemos encordarla de nuevo.



COMITE
OLIMPICO
ESPAÑOL



CENTRO
OLÍMPICO
DE ESTUDIOS
SUPERIORES

Figura 11. Frecuencia de vibración de diferentes cordajes (nylon de grosor 1.25 y 1.30 y poliéster de grosor 1.25 y 1.30) en raquetas con distintos tamaños de áreas encordadas (580 cm^2 , 680 cm^2 y 780 cm^2). Cross, R. (2001a) Measuring string tension. *Racquet Tech*, July, 26, 14–18.

RIGIDEZ DE LA RAQUETA

Podríamos pensar que cuanto más elástica sea la estructura de la raqueta (cabeza, cuello y empuñadura), más energía absorberá del impacto y más energía podrá transmitir a la bola en el rebote. Pero no es así, más bien lo contrario, debido a los materiales de que se componen las raquetas, su masa, su forma y al resto de sus características, el periodo de vibración provocado por el impacto de la bola en las cuerdas, es más largo que el tiempo que la bola está en contacto con las cuerdas (tabla 3). Por eso, la mayor parte de la energía que se emplea en deformar la raqueta en un impacto de bola, no es devuelta a la bola, ya que esa “devolución” se produce una vez que la bola ha dejado de tener contacto con las cuerdas.

Period of oscillation of tennis rackets. ^a		
Type of racket	Frequency of oscillation (h)	Time for half-period (msec)
Spalding Smasher	32.8	15.3
Wilson T-3000	25.6	19.6
Prince	31.3	16

^a These data were taken with the handle clamped firmly to a massive table and the racket struck at the center of the strung area by a ball.

Tabla 3. Periodos de oscilación de diferentes raquetas de tenis al ser golpeadas en el centro de su cordaje por una bola. (H. Brody. *Physics of the tennis racket. American Journal of Physics* 47, 482-487).

Por tanto, una raqueta más rígida, supone menos energía deformándola por el impacto de la bola, con lo que el cordaje absorbe más energía que puede devolver a la bola en el rebote, lo que significa, más potencia. Y, por otro lado, significa que hay un periodo de oscilación de la estructura de la raqueta menor, es decir, que recupera antes su forma tras el impacto y puede que parte de esa energía se trasmite a la bola antes de que pierda en contacto con la raqueta.

Además, al disminuir la tensión del cordaje, se incrementa el tiempo de contacto de la bola con aquel, lo que puede mejorar la combinación entre el tiempo de contacto y el periodo de oscilación de la raqueta.

Para resumir la importancia de la rigidez de la raqueta de tenis en la velocidad que se imprime a la bola tras el golpeo, podemos concluir que: cuando la bola impacta en las cuerdas, hace que éstas se deformen y absorban la energía para después devolver a la bola gran parte de ella (fig. 12). Si las cuerdas tienen mayor tensión, se deforman menos y llegará un momento en que no puedan absorber más energía que será disipada por la raqueta haciendo que ésta flexe resultando lo siguiente:

- Las cuerdas al deformarse, recuperan la posición antes y la bola está menos tiempo en contacto con las cuerdas. La energía que la raqueta devuelve a la bola es menor.
- La estructura de la raqueta se deforma más y como su periodo de oscilación es mayor que el de las cuerdas, la energía se pierde y la bola rebota con menor energía.

Si, por el contrario, las cuerdas tienen menor tensión, se deforman más y absorberán más energía que será devuelta a la bola resultando lo siguiente:

- Las cuerdas al deformarse, recuperan la posición más tarde y la bola está más tiempo en contacto con las cuerdas. La energía que la raqueta devuelve a la bola es mayor.
- La estructura de la raqueta se deforma menos y como su periodo de oscilación es menor, la energía que se pierde es menor y la bola rebota con mayor energía.



COMITE
OLÍMPICO
ESPAÑOL



Figura 12. En esta imagen se puede apreciar perfectamente la deformación que sufre el cordaje en el momento de impactar la bola. www.itftennis.com/technical/. 15/05/2008.

La gran pérdida de energía que se produce por la deformación de la raqueta se puede observar sujetando la raqueta por el puño en un tornillo y observando el COR de una bola lanzada contra las cuerdas a diferentes distancias de la zona del puño:

- COR = 0.6 cerca del cuello de la raqueta. Hay más rigidez de la raqueta.
- COR = 0.2 cerca de la punta de la raqueta. Hay más flexión o deformación de la raqueta.
- COR = 0.4-0.5 en el centro de la zona encordada. Es la zona intermedia de flexión o deformación.

Si, fijamos la raqueta por la cabeza, es decir, impedimos que se deforme o flexe la estructura rígida de la raqueta cuando la bola impacte en ella, el COR es mucho mayor ya que se disipa menos energía, especialmente en el centro de la cabeza, que es como ya habíamos comentado en apartados anteriores donde más elasticidad tiene el cordaje (punto de máximo COR).

A continuación se muestra una tabla en la que aparecen datos de ratios de altura de rebote y COR (raíz cuadrada del ratio de altura de rebote) sobre varias raquetas y tensiones Brody, H. (1979) Physics of the tennis racket. *American Journal of Physics* **47**, 482-487.

Tabla 4. Diferentes COR, de varias raquetas con diferentes tensiones y distintos tipos de bola. Los valores tan bajos son explicados por la resistencia ofrecida por el aire que hace que la bola pierda parte de su energía cinética. Brody, H. (1979) Physics of the tennis racket. *American Journal of Physics* **47**, 482-487.

Surface	Ratio of rebound height to drop height	COR	COR from velocity measurements
Lead brick	0.520	0.721	0.767
Prince racket (70-lb tension)	0.716	0.846	0.887
Prince racket (50-lb tension)	0.730	0.854	0.901
Spalding Smasher (unknown tension)	0.726	0.852	0.895

*These data were taken with the ball dropped from a height of 3.7 m above the rebounding surface. It is the average of data taken with several types of tennis balls (pressureless Tretorn, Penn ball, and Spalding Australian ball). The COR values obtained by direct velocity measurements (laser method) are consistently higher than the rebound measurements by about 0.05. This is due to the air resistance which reduces the kinetic energy of the ball during both its fall and rise, and therefore give lower values for the COR. For these data the racket head was clamped.

El aumento de la rigidez de la estructura de la raqueta también podría tener un efecto sobre el control en la precisión del disparo (Widing & Moeinzadeh 1990), pero esto lo veremos más adelante.

RESTITUCIÓN DE LA BOLA

Por otro lado y de acuerdo con todas las reflexiones hechas hasta el momento, hay que tener en cuenta que la restitución de la bola es más lenta que la del cordaje. Cuando la bola vuelve a su estado natural tras la deformación del impacto contra el cordaje, ya no está en contacto con las cuerdas y, por tanto, toda la energía que se emplee en la deformación de la bola se disipa y no se aplica a la velocidad de rebote de la bola tras el golpeo. Esta es otra de las razones por las que el hecho de tener el cordaje con menor tensión nos va a proporcionar una velocidad de rebote mayor en la bola, ya que, ésta se va a deformar menos y se va a disipar menos energía que se sumará a la de rebote tras el impacto.

NODOS DE VIBRACIÓN: PUNTOS DE REPOSO

Para entender el concepto de nodo de vibración, o punto de reposo ante la vibración, de una raqueta de tenis tras recibir un impacto de una pelota de tenis es necesario conocer a grandes rasgos los distintos modelos de vibración en una estructura simple como una barra homogénea. Los distintos modelos de vibración están representados en la figura 13 en la que se puede apreciar el modo de vibración de una barra homogénea libre, una barra homogénea fijada por un extremo y que vibra a altas frecuencias (cerca o por encima de 200 Hz) y una barra fijada firmemente por uno de sus lados y que vibra a baja frecuencia.

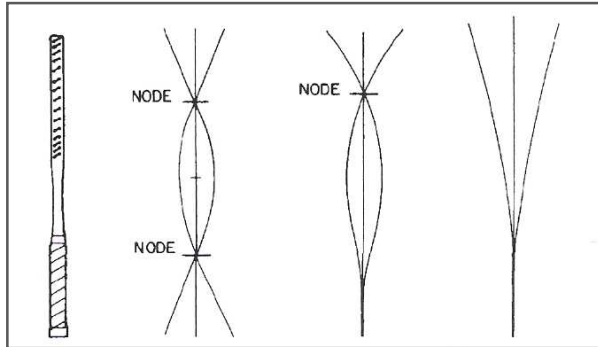


Figura 13. Modos de vibración de una barra homogénea libre, una barra homogénea fijada por un extremo y una barra fijada firmemente por uno de sus lados. (Brody, H. (1981) *Physics of the tennis racket II: The sweet spot. American Journal of Physics*, **49**, 816-819).

Si se fija una raqueta firmemente por la empuñadura y es golpeada por pelotas de tenis, a baja velocidad, que provocan vibraciones de entre 25 y 40 Hz, no se genera ningún nodo de vibración, ningún punto de reposo. Que ocurra esto está supeditado a la rigidez de la raqueta, a la masa y a su distribución.

Si la raqueta fuese una barra homogénea y fijada por un extremo, de longitud L y la frecuencia fuese 6 veces más alta (altas velocidades de bola) que en el caso anterior, habría un nodo en $L/5$. Es decir, a una distancia del extremo equivalente a $L/5$ existiría un punto de reposo, un punto en el que no habría vibración.

Si la estructura fuese una barra homogénea libre de longitud L , la frecuencia sería también unas seis veces más alta que en el primer caso y tendría dos nodos, cada uno a una distancia de $L/5$ de cada extremo de la barra.

Como la raqueta no es una barra homogénea, Lacoste y Hedrick y col. realizaron un estudio con la raqueta libre y con la raqueta fijada por la empuñadura concluyendo que cuando la bola golpea el COP (center of percussion), no hay impulso y que cuando la bola golpea el nodo de vibración, la oscilación de la raqueta es nula. Estos autores defienden que es este último punto el conocido "sweet spot" o "punto dulce" de la raqueta. En este estudio, determinaron la posición del nodo de vibración para un gran número de raquetas, pero no informaron de la distancia de este punto con los COP de cada una de esas raquetas.

Racket	Frequency of fundamental mode (Hz)	Frequency of high mode (Hz)	Distance of node from racket tip (cm)
Prince Pro	36.2	168	13.5
Prince Classic	31.0	127	13.5
Wilson T-2000	26.0	132	13
Head Master	32.5	168	13
Durbin	30.6	138	13
Durbin (with 10 g on tip)	29.2	133	11.5

Tabla 5. Frecuencias de vibración y distancia desde el extremo de la raqueta hasta el nodo de vibración de distintas raquetas que estudiaron Lacoste y Hedrick y col.

La posición del nodo de vibración varía en función de la distribución de la masa de la raqueta y de la flexibilidad de sus partes.

El nodo de vibración de la raqueta es otro de los puntos o zonas interesantes de la raqueta para que la bola golpee.



CENTRO
OLÍMPICO
DE ESTUDIOS
SUPERIORES

H. Brody ideó un mecanismo para registrar las vibraciones y la frecuencia de éstas en la zona encordada de la raqueta para poder hallar los nodos de vibración y sus frecuencias. El mecanismo consistía en instalar unas piezas de la casa Kynar que no eran otra cosa que cintas delgadas piezoeléctricas, es decir, que se polarizan cuando son sometidas a presión. Gracias a la alteración de esas cintas piezoeléctricas en el momento del impacto de la bola se pueden calcular, en función de dicha alteración, parámetros como la frecuencia de vibración, su duración en el tiempo, etc. De esta manera se puede hallar el punto de menor vibración y de menor duración, es decir, el nodo o sitio más idóneo para que impacte la bola, desde el punto de vista de las vibraciones.

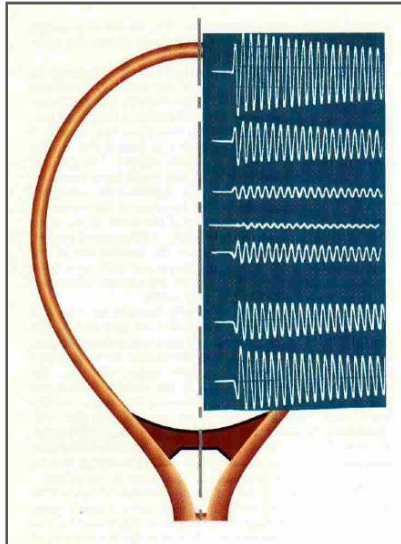


Figura 14. El dibujo muestra el gráfico de amplitud de las vibraciones que son provocadas en una raqueta suspendida libremente por el impacto de la bola en distintas localizaciones a lo largo del eje longitudinal. Brody, H. (1995) How would a physicist design a tennis racket? *Physics Today*, **48**, 26-31.

Para una raqueta sujeta firmemente por la empuñadura, la frecuencia suele oscilar entre unos 25-30 Hz, mientras que con la raqueta suspendida libremente, la frecuencia más baja registrada es de entre 100-200 Hz.

De estos dos modelos estudiados, la raqueta suspendida libremente y la sujeta por la empuñadura, es la primera la que se comporta de una manera más similar, en cuando a los registros de frecuencias, a la raqueta cuando la empuña el tenista en situación de juego real según el estudio de H. Brody.

La amplitud de oscilación de la raqueta depende de varios factores:

- Velocidad relativa entre la bola y la raqueta.
- Rigidez de la estructura.
- Distancia desde el punto de impacto hasta el nodo de vibración de la raqueta.

Para hallar el nodo de vibración de una raqueta y para sentir la amplitud de la oscilación resultante de un impacto en la raqueta basta con sujetarla por el extremo de la empuñadura con la punta de dos dedos y golpear las cuerdas en distintas zonas con una bola sujeta por la otra mano al tiempo que acercamos lo más posible el oído a la zona del grip como se fe en la figura 15.



Figura 15. Rod Cross sujeta una raqueta por la empuñadura con dos dedos mientras golpea con una bola la zona encordada para buscar el nodo de vibración. Brody H, Cross R and Lindsey C. *The Physics and Technology of Tennis*.



COMITE
OLÍMPICO
ESPAÑOL

Otro dato interesante es la resonancia de la frecuencia (prolongación de la vibración en el tiempo) de una raqueta, con una masa concreta, ya que es un buen indicador rigidez de la raqueta. Al incrementar la masa disminuye la resonancia y al incrementar la rigidez incrementa la resonancia.

A pesar de que muchas marcas actuales venden raquetas basándose en su capacidad de absorción rápida de vibraciones evitando que éstas se propaguen al brazo del tenista. No hay evidencias clínicas de que dichas vibraciones sean la causa de lesiones tan conocidas como “el codo de tenista”.

En realidad, el aparato que mejor absorbe las vibraciones de la raqueta es la mano humana. Esto se puede observar en la figura 16 que muestra la comparativa de dos representaciones gráficas en las que se aprecia la vibración producida por una raqueta sujeta por una mano mientras es golpeada y la vibración producida por una raqueta suspendida libremente mientras es golpeada. Recordemos que era este modelo, el de la raqueta suspendida libremente, el que más se asemeja, en cuando a las vibraciones que producía con la situación real de juego.

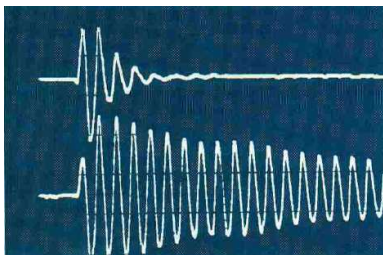


Figura 16. Comparativa de vibraciones generadas en una raqueta tras el impacto de una bola en una raqueta sujeta por una mano (arriba) y una raqueta suspendida libremente (abajo). Brody, H. (1995) How would a physicist design a tennis racket? *Physics Today*, 48, 26-31.

Algunos diseñadores han intentado usar gránulos encapsulados y otros objetos que podrían moverse por la estructura de la raqueta buscando la absorción de la energía de vibración tras el golpeo de la bola. También es habitual ver las raquetas engalanadas con gomas de colores de muchos tipos (anti vibradores) que buscan la absorción de las vibraciones. Ciertamente, pueden reducirse las vibraciones cerca de 500 Hz, pero son las vibraciones de las cuerdas las que se reducen y no la vibración de la estructura rígida de la raqueta, por lo que únicamente se consigue un mayor confort o comodidad del jugador a la hora de golpear la bola, un mejor estado psicológico durante el juego y un sonido de golpeo más limpio y nítido. Si realmente se consiguiese un objeto que absorbiese las vibraciones de la raqueta, tras unos cuantos golpes, se pondría realmente caliente, ya que transformaría la energía de las vibraciones en calorífica (Brody 1995).

No hay demasiados estudios serios que nos muestren donde golpea realmente la bola en la zona encordada durante el juego real. Algunos autores como Herbert Hatze dicen que es el nodo de vibración más que el centro de percusión o el centro geométrico, donde los jugadores hacen golpear la bola.

Algunos estudios dicen que un agarre firme de la raqueta supone añadir el peso del brazo al de la raqueta, ya que aumenta la masa inercial, lo que supone un incremento de la potencia en el golpeo. H. Brody ha demostrado que esto no es cierto midiendo la frecuencia de resonancia de una raqueta suspendida libremente y de una raqueta agarrada por la mano fuertemente. Ignorando la absorción de la mano, se puede suponer que el aumento de la resonancia de la frecuencia es debido a la masa del brazo y de la mano que se han añadido a la raqueta. Añadiendo 40 gramos de masa al extremo del puño en la raqueta libre, se obtendrían los mismos resultados que en la raqueta agarrada fuertemente con la mano. Es decir, en efecto, al agarrar fuertemente la raqueta en el momento del impacto, se le imprime mayor velocidad a la bola, pero este incremento de velocidad por el incremento inercial del brazo y la bola, se podría sustituir con unos 40 gramos de masa añadida al extremo de la empuñadura.

Autores como L. K. Vethecan & A. J. Subic (2002) han estudiado la atenuación de las vibraciones en las raquetas mediante amortiguadores de vibración dinámica. Son sistemas de amortiguación de las vibraciones integrados en la estructura de la raqueta. Las condiciones en las que se desarrollan sus investigaciones no tienen en cuenta la cinemática del giro ni la dinámica del brazo, con lo que las conclusiones aunque son interesantes por arrojar cierta claridad sobre los distintos sitios en los que se pueden colocar los amortiguadores, no son todavía útiles para la mejora del rendimiento de los tenistas. No obstante, muchas marcas ya han desarrollado sistemas de este tipo que, según parece al ver la información comercial,

absorben las vibraciones que la raqueta sufre cuando impacta con la bola (anexo III de novedades comerciales).

EL PUNTO DULCE O “SWEET SPOT”

Se puede definir como el punto óptimo de impacto de la bola sobre la raqueta. Las distintas tendencias a la hora de definir el “sweet spot” según los diferentes autores se apoyan en uno o varios de los conceptos que se nombran a continuación: coeficiente de restitución (COR), centro de percusión (COP) o del nodo de vibración.

Se trata pues del lugar idóneo para que la bola golpee en cada impacto ya que cuesta menos esfuerzo contrarrestar la fuerza de la bola, el impacto es más confortable para el tenista y la bola se desplaza más deprisa.

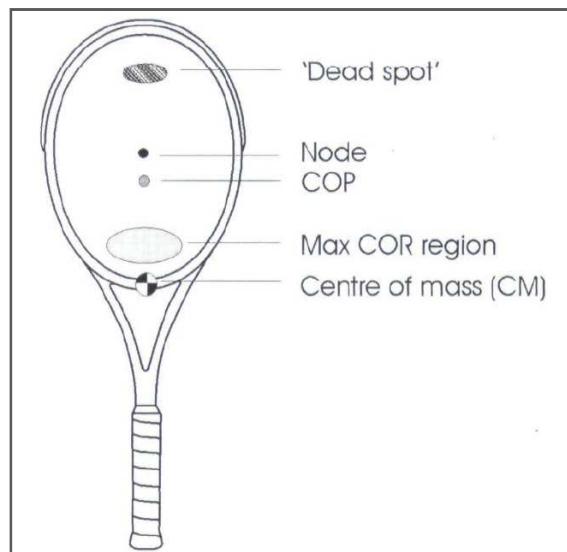
No podemos decir que punto de los mencionados (COR, COP o nodo de vibración) es más importante que el resto. Todos ellos tienen su valor e importancia a la hora de situar la mejor zona del cordaje para que la bola impacte. La raqueta ideal sería aquella que por sus características de fabricación hiciese coincidir los tres puntos de los que estamos hablando en una misma zona del cordaje y que dicha zona fuese lo más amplia posible.

Como ya hemos dicho, el “punto dulce” es el término utilizado para describir el punto o región de la raqueta de tenis donde la bola debería ser golpeada para lograr el resultado óptimo. Existen varias definiciones para este término en función del fenómeno físico en el que nos basemos para definirlo.

Definiciones:

- Howard Head: región de la cara de la raqueta donde el coeficiente de restitución es superior (región de potencia).
- Una segunda definición habla de que el “punto dulce” es el centro de percusión, es decir, es el punto o zona del cordaje en el que no hay movimiento inicial de traslación cuando golpea la bola.
- Otra definición habla del punto o zona del cordaje en el que, cuando la bola lo golpea, las frecuencias de vibración u oscilación, son mínimas. Este punto es el nodo o nódulo de vibración. La región donde la vibración es baja, se puede designar como región nodal.
- Por último podemos hablar de otra definición que tiene mucha acogida en el mundo del tenis y que dice que: el “sweet spot” o “punto dulce” es el punto o área de la raqueta que al ser golpeado por la bola provoca buenas sensaciones al tenista que está ejecutando el gesto técnico. Ésta es, por supuesto, la definición más subjetiva de todas y la menos precisa, pero se puede considerar como una combinación óptima de todas las anteriores aplicadas a la percepción de cada tenista individualmente.

Figura 17. Localizaciones comunes para las distintas definiciones de “punto dulce”. Kotze J, Mitchell SR and Rothberg SJ (2000). The role of the racket in high-speed tennis serves. *Sports Engineering* 3:2, 67



EL PUNTO MUERTO “DEAD SPOT”

Algunos autores han denominado “dead spot” a la zona o área del cordaje que se encuentra en el extremo de la cabeza y que logra los valores de ACOR más altos en la bola para gestos en los que la raqueta alcanza altas velocidades. Es la zona en la que se alcanzan las velocidades de rebote de bola más altas. Esto sucede en gestos como el servicio o remate en los que la ejecución técnica hace que el cuerpo del tenista se alinee desde la punta de los pies hasta la punta de la raqueta, logrando así un momento inercial (suma de todos momentos de inercia provocados por las distintas palancas que se alinean cuando el gesto se ejecuta correctamente) con una distancia al eje de giro muy superior a los del resto de gestos técnicos. En estas circunstancias concretas, el radio de giro prima sobre el resto de los aspectos estudiados ($I = \sum m_i r_i^2$), ya que logra las más altas velocidades de bola. Figura 17.

ZONA DE POTENCIA (THE POWER REGION)

Con esta expresión H. Brody se refiere a la zona de mayor potencia, la zona encordada de la raqueta cuyo COR es máximo. Se calcula fijando una raqueta por la empuñadura y lanzándole bolas a una velocidad $\rightarrow v$ determinada y observando la diferencia entre la velocidad de incidencia y la velocidad de rebote. También se calcula fijando la raqueta por la empuñadura y lanzando bolas desde una altura determinada y observando la diferencia entre la altura de caída y la altura de rebote (h_d : drop height y h_r rebound height).

El COR tiende a ser máximo a lo largo del eje longitudinal de la raqueta y su pico máximo está muy cerca del cuello, más que del centro de la raqueta. Esto es así porque como ya hemos visto anteriormente, a medida que nos vamos hacia el extremo de la raqueta, la estructura rígida de ésta va cediendo ante el impacto y se deforma más, ya que el punto de sujeción está cada vez más lejos y se deforma la raqueta, lo que hace que se disipe más energía (Figura 18).

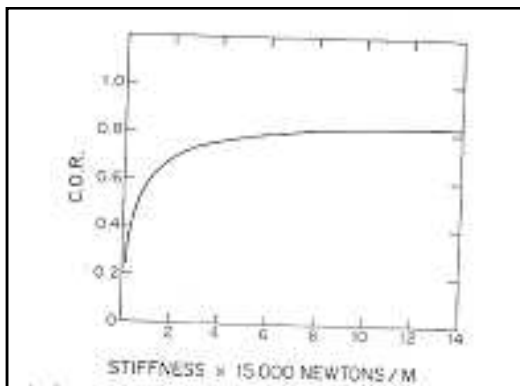


Figura 18. COR con respecto a la rigidez de la raqueta para bolas que impactan en el centro de la zona encordada cuando la raqueta está firmemente sujeta por la empuñadura. Una raqueta normal, se flexiona aproximadamente un centímetro para una fuerza de 100 Newtons. (Brody, H. (1981) *Physics of the tennis racket II: The sweet spot. American Journal of Physics*, 49, 816-819).

Si la raqueta estuviese fijada por la cabeza, para analizar únicamente el COR de la zona encordada, éste se encontraría en el centro de la cabeza de la raqueta.

Para incrementar el COR de la raqueta en su conjunto hay tres formas diferentes:

1. Incrementar el tamaño de la raqueta hacia la empuñadura sin incrementar la longitud de la raqueta. Recordando, por supuesto, que la bola debe golpear un poco por debajo del centro de la cabeza de la raqueta para que el COR sea mayor.
2. Incrementar la rigidez de la estructura de la raqueta. Esto se consigue incrementando la sección de la raqueta o utilizando algún material o compuesto que de mayor rigidez a la estructura). Hoy en día, con la gran evolución que han sufrido la tecnología y los materiales, se conocen compuestos con los que se consiguen estructuras de raqueta mucho más rígidas y del mismo peso que las antiguas de madera o aluminio.
3. Reducir la tensión de las cuerdas teniendo en cuenta que, la longitud de las cuerdas. No es lo mismo una tensión de 23 kilos para una cuerda de una longitud L que una de tensión de 23 kilos para una cuerda de otra longitud L' . Por esta razón, a mayor longitud de cabeza de la raqueta, mayor tensión hay que poner en el cordaje para tener el mismo comportamiento con la bola que si la cabeza de la raqueta tuviese una longitud menor.

$$F = 4T/Ly(1 + \frac{4z^2}{L} + \dots)$$

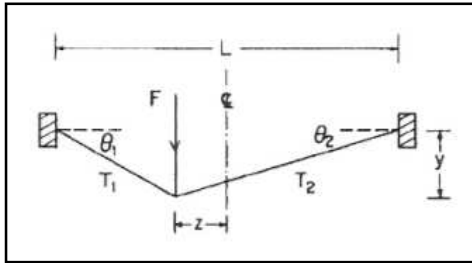


Figura 19. Rebote y de una cuerda de longitud L provocado por una fuerza F aplicada a una distancia Z de su centro. (Brody, H. (1981) *Physics of the tennis racket II: The sweet spot. American Journal of Physics*, **49**, 816-819).

POTENCIA DE LA RAQUETA. Si el tenista ejecuta un gesto a una velocidad determinada, la cabeza de la raqueta, tendrá también una velocidad determinada y, cuanto más pese la mencionada raqueta, más velocidad se imprimirá a la bola tras el golpeo, ya que, según las leyes cinemáticas, se ha de conservar la cantidad de movimiento.

$$M_1V_1 = M_2V_2$$

Ahora bien, cuanto más pesa la cabeza de la raqueta, más dificultad a la hora de moverla, menos velocidad de ejecución y más posibilidades de fatiga. Todo ello sin tener en cuenta que al incrementar el peso de la raqueta, la precisión también disminuye, y por tanto también el rendimiento.

Cierto es que no hay muchos estudios que relacionen el **PESO DE LA RAQUETA** con la fatiga del jugador a lo largo de un partido o la velocidad del swing con el peso de la raqueta, pero la tendencia actual es justo la de aligerar el peso de la raqueta lo que nos hace pensar que es más beneficioso para el rendimiento buscar mayor velocidad del gesto para imprimir velocidad a la bola tras el golpeo que incrementar el peso de la raqueta. Hace 50 años, cuando las raquetas eran de madera, éstas tenían un peso de 14-15 onzas (396-425 grs) y su **BALANCE** era neutro, es decir, que el punto de equilibrio de la raqueta estaba muy cerca del medio del eje longitudinal de la raqueta o, lo que es lo mismo: el centro de masas coincidía con el centro geométrico. Hoy en día, algunas de las raquetas que están en el mercado pesan unas 9-10 onzas (254-283 gramos) y tienen el balance adelantado, es decir, son aproximadamente una cuarta parte más ligeras y tienen el punto de equilibrio adelantado (hacia la cabeza de la raqueta), son las llamadas, en el argot tenístico, raquetas cabezonas. El desplazar el peso hacia la cabeza de la raqueta supone que, con menos peso de raqueta (un 30-40 % menos que las antiguas), se mantiene el **MOMENTO DE INERCIA** (swing weight; $I = \sum m_i r_i^2$) ya que se concentra más masa en el extremo que golpea la raqueta. Al mismo tiempo, al ser más ligera, permite al tenista realizar el gesto más deprisa con lo que hay una ganancia en la potencia del gesto con lo que se puede imprimir mayor velocidad a la bola.

A todo lo anterior hemos de añadir que las raquetas modernas, se fabrican con materiales nuevos (grafito, fibra de carbono, fibra de vidrio, etc.) que son los responsables de la mayor ligereza, al tiempo que hacen que su estructura sea más rígida y las convierta en implementos más eficientes.

Además de todo esto, hay que decir que, la velocidad de la bola depende del lugar de la cabeza de la raqueta donde ésta golpee. Si golpea en el **CENTRO DE MASAS** (punto geométrico que dinámicamente se comporta como si estuviese sometido a la resultante de las fuerzas externas), no se pierde energía en la rotación. Si la raqueta tiene el centro de masas cerca del centro de la cabeza se generará más inercia en la bola al golpearla y por tanto rebotará con más velocidad. Aumentar el tamaño de la cabeza o el peso (mediante lastre) de la misma también significa aumentar el momento de inercia. La velocidad de rebote de la bola disminuye cuando no se golpea en el punto en el que coinciden ambos ejes, sobre todo al alejarnos del eje longitudinal (COR entre 0.5, cerca del centro de masas sobre el eje longitudinal, y 0.2, lejos del centro de masas sobre el eje longitudinal). Los fabricantes llaman a este valor COR pero en muchas ocasiones realizan las pruebas con raquetas suspendidas libremente o sujetas por el mango sobre monturas flexibles, con lo que no se tiene en cuenta el retroceso de la raqueta al impactar la bola. Por eso, a la hora de estudiar los valores



CENTRO
OLÍMPICO
DE ESTUDIOS
SUPERIORES

del COR de una raqueta con un cordaje, hay que tener en cuenta la forma de obtener dichos valores ya que puede que unos no sean comparables a los otros.

INTERACIÓN BOLA-RAQUETA: la situación de laboratorio es diferente a la de juego real, ya que la raqueta se desplaza a una velocidad que es comparable a la de la bola y esto no ocurre en el laboratorio. La velocidad de la bola tras ser golpeada por la raqueta será la resultante de la siguiente fórmula:

$$v' = -ev + (1 + e)V$$

donde v' es la velocidad de la bola tras el golpeo, e es la relación entre la velocidad de incidencia de la bola y la velocidad de ésta tras el golpeo, v es la velocidad de incidencia de la bola y V es la velocidad de la raqueta que depende de:

- El punto de giro en el momento del impacto y su efectividad.
- La distancia entre el punto de impacto y el punto de giro (en el revés a dos manos se acorta esta distancia ya que se golpea más cerca que en el revés a una mano).

En las raquetas antiguas, el punto de potencia se situaba cerca del cuello de la raqueta, pero en las modernas, éste se encuentra cerca del centro de la cabeza (COR), cerca del nodo de vibración y cerca del centro de percusión, por todo lo que ya hemos explicado.

Con estas características de raqueta se logran mejoras en la velocidad que pueden llegar a ser determinantes en competición ya que para gestos como el servicio suponen una gran ventaja por varias razones:

- Cuanto más lejos se golpee, más distancia al eje de giro y por tanto más velocidad de la zona de la raqueta que va a impactar sobre la bola (más momento de inercia).
- Al tener más masa en la cabeza, se aumenta también la inercia que va a impactar sobre la bola.
- Al ser de materiales más rígidos, a pesar de que el impacto se lleva a cabo más lejos del punto de sujeción, se disipa menos energía y, por tanto, se transmite más energía a la bola en el rebote de ésta contra las cuerdas.
- Al golpear la bola más arriba, el ángulo de incidencia de la bola sobre el cuadro de saque de la zona de pista del adversario es mayor (más cercano de la vertical), lo que lo convierte en más incómodo de restar, ya que el bote será más alto.

En la figura 20 se puede observar una representación gráfica de la comparación entre dos raquetas con distinto punto de máxima potencia: una con el punto de máxima potencia en el centro de la cabeza (balance neutral) y otra con el punto de máxima potencia más cercano al extremo de la cabeza (de cabeza pesada o "cabezona" según el argot tenístico).



Figura 20. Representación gráfica de dos raquetas cuyos puntos de máxima potencia están situados en distinta zona: centro de la cabeza (balance neutral de la raqueta) y extremo de la cabeza (balance adelantado para golpes más potentes). Brody, H. (1995) How would a physicist design a tennis racket? *Physics Today*, 48, 26-31.



COMITE
OLÍMPICO
ESPAÑOL

Teniendo en cuenta todo lo anterior, estamos en condiciones de diseñar una raqueta en función de las características del tenista que la va a empuñar. Obviamente, una buena raqueta no evita los errores del jugador, pero sí que ofrece una respuesta uniforme cuando la bola impacta en ella. Teniendo en cuenta las limitaciones de diseño de la ITF (Anexo I) las premisas para diseñar una raqueta que ofrezca una respuesta uniforme son las siguientes:

- Una estructura rígida.
- Un mayor momento de inercia.
- Un centro de masas más cerca del extremo.

Se han investigado formas de raqueta novedosas que seguramente serían interesantes para mejorar el rendimiento deportivo como los ejemplos que se mencionan a continuación:

- Raquetas con una superficie encordada curvada, de tipo focal, con la parte encordada, con la que se golpea a la bola, cóncava de manera que aunque la bola no pegase en centro de dicha zona, lograrse corregir la trayectoria de ésta para evitar que al volver a la cancha del adversario botase fuera de la pista.
- Raquetas con un giroscopio, integrado en la estructura de éstas, que estabilizase la raqueta cuando la bola impactase fuera del eje longitudinal.
- Raquetas asimétricas, con el puño más abajo para que todas las bolas impactasen por encima del eje longitudinal asimétrico, de manera que todas las bolas golpeadas salvaran, casi con total seguridad, la red.

Además de la dificultad que supone la adaptación a nuevas raquetas por parte de los tenistas y la dificultad que supondría valorar las posibles mejoras de resultados de las nuevas raquetas con respecto a los anteriores, la normativa de la ITF no permite este tipo de modificaciones. Como es lógico, con esta normativa, se intenta mantener el control y la igualdad de condiciones de competición para todos los jugadores.

FIRMEZA EN EL AGARRE

En su artículo "The sweet spot of a tennis racket", Rod Cross hace un análisis de las fuerzas que intervienen en el golpeo de tenis y que son transmitidas de la raqueta a la muñeca, y de la muñeca a la raqueta. Y lo que es más interesante aún, la influencia que puede tener la muñeca en el momento del impacto para lograr un determinado efecto o una determinada trayectoria en la bola tras el golpeo.

La firmeza en el agarre de la raqueta influye en el COR y, en general, la mano influye en el comportamiento de la raqueta. Eliot (1982) y Watanabe *et al* (1979) concluyeron que cuando se golpea cerca del centro de las cuerdas, el efecto de la firmeza del agarre en el COR es despreciable. Es decir, que independientemente del tipo de agarre o sujeción de la raqueta, el efecto en el COR es despreciable cuando la bola impacta en el centro de las cuerdas. Sin embargo, sí que aumenta el COR con agarre más firme cuando los impactos se alejan del centro de las cuerdas.

El tiempo de transmisión de impulso de la raqueta hasta la mano es de 1.5 milisegundos. Durante este tiempo, la mano tiene una fuerte influencia sobre la bola, siempre y cuando ésta siga en contacto con el cordaje (recordemos que el tiempo medio de contacto de la bola con las cuerdas en un impacto es de 5 milisegundos).

Las fuerzas que se transmiten a la mano no se anulan en su totalidad ni siquiera cuando el impacto de la bola se produce en el nodo de vibración o en el COP. Según el tipo de impacto y la zona donde se produzca, la fuerza resultante que soporta la mano puede ser positiva o negativa, ya que, cuando la bola golpea en la raqueta se produce un impulso de torque o par de fuerzas sobre un eje que atraviesa la muñeca.

Medir la fuerza neta que actúa sobre la mano es difícil. Para lograr esto Rod Cross pensó que sería un buen indicador la velocidad del antebrazo en un punto cercano a la muñeca durante y después del impacto. La técnica experimental que empleó se describe en el párrafo siguiente. En este estudio no se aborda un tema interesante que es el papel de la mano en la velocidad de salida de la bola. Según estudios recientes del autor,

si el impulso provocado por el movimiento de la mano llega al punto de impacto justo cuando la bola está dejando las cuerdas, entonces, la bola estará poco afectada por la mano.

Técnicas experimentales:

- Raqueta empleada: 1990 vintage Wilson de grafito. 370 gramos de masa. 685 milímetros de longitud.
- Condiciones iniciales: raqueta en estado de reposo para:
 - o Simplificar el experimento aunque se distancia de la realidad.
 - o Procesar los datos de forma rápida.
 - o Para garantizar la reproducción del experimento en las mismas condiciones.
- Instrumentación de la raqueta: la raqueta fue instrumentada con cinco discos piezoeléctricos (discos de material que se polariza y emite una señal eléctrica ante estímulos de presión o de tracción) a 1, 12, 17 y 24 centímetros del extremo de la empuñadura y en el centro de la zona encordada como muestra la figura.

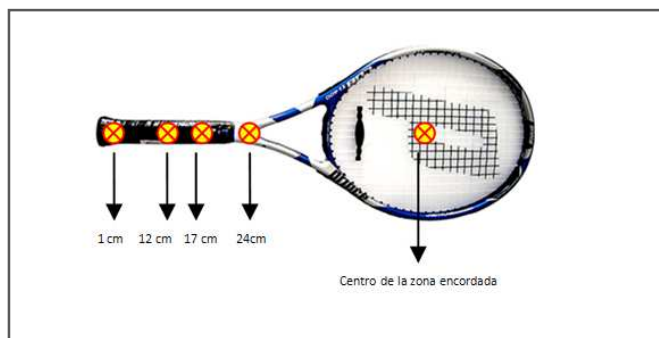


Figura 21. Representación gráfica de la distribución de los discos piezoeléctricos que R. Cross colocó en la raqueta para realizar el estudio.

Rod Cross concluyó, entre otras cosas, que veremos más adelante, que:

- El coeficiente de restitución y la duración del impacto varía ligeramente con la velocidad de la bola, pero esto no tendrá efecto sobre el tiempo de transmisión del impulso hacia la empuñadura o sobre el efecto resultante en la mano.
- La amplitud de vibración del modelo, permanece en 0 cuando la bola impacta en el nodo de vibración, a pesar de la velocidad que lleve la bola.

Tiempo de transito del impulso a lo largo de la empuñadura:

Hasta este momento no se había medido el tiempo que tarda el impulso en transmitirse desde el cordaje hasta la empuñadura. El tiempo de transito del pulso desde el centro de las cuerdas hasta el punto situado a 12 centímetros del extremo de la empuñadura fue de 1.5 milisegundos.

En el modelo de vibración básico de empuñadura sujeta, la vibración del impacto alcanza una frecuencia de 102 Hz, una longitud de onda de 0.8 m, con nodos de vibración a 15 cm de cada extremo de la raqueta y una velocidad de onda de 80 m/s. El tiempo durante el cual la onda se está propagando desde el centro de las cuerdas hasta el final de la empuñadura (0.53 m de distancia) es de 6.5 ms para el modelo básico (figura 22).

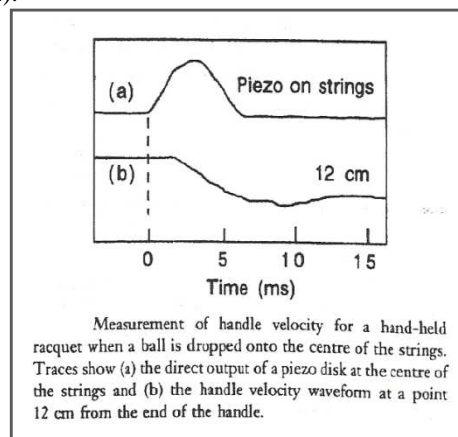
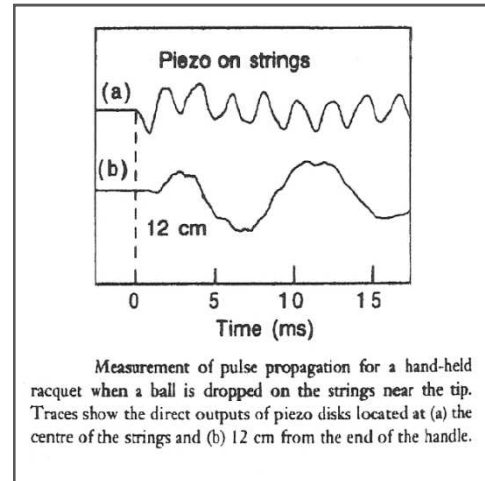


Figura 22. Mediciones de la velocidad de propagación de la onda para una raqueta sujeta por la empuñadura que es golpeada en el centro de las cuerdas. (a) es la trayectoria descrita por la cinta piezoeléctrica del centro de las cuerdas y (b) es la trayectoria descrita por la cinta piezoeléctrica situada en el punto que está a 12 cm del extremo de la empuñadura. Cross R (1999). The sweet spots of a tennis racquet. *Sports Engineering*. Volume 1, number 2(page 63)

El siguiente modelo de vibración que se estudia es el de la bola golpeando en la zona encordada cercana al extremo de la raqueta (figura 23). La frecuencia es de 276 Hz, la longitud de onda es de 0.52 m y la velocidad de honda de 143 m/s. Para estos componentes de honda, el tiempo de transito desde el centro de las cuerdas hasta el punto situado a 12 cm del extremo de la empuñadura es de 3.6 ms. Sin embargo, el movimiento inicial de la empuñadura se produce a 1.5 ms. Posiblemente esto sea debido a una combinación de efectos de altas frecuencias transversales generada por el impacto.

Figura 23. Mediciones de la velocidad de propagación de la onda para una raqueta sujeta por la empuñadura que es golpeada en el extremo de las cuerdas. (a) es la trayectoria descrita por la cinta piezoeléctrica del centro de las cuerdas y (b) es la trayectoria descrita por la cinta piezoeléctrica situada en el punto que está a 12 cm del extremo de la empuñadura. Cross R (1999). The sweet spots of a tennis racquet. *Sports Engineering*. Volume 1, number 2(page 63)



En beisbol, ocurre algo parecido, las estimaciones según el modelo de frecuencia básica nos dicen que la bola debería dejar de tener contacto con el bate antes de que el impulso llegase a la mano. Sin embargo, las mediciones muestran que el impulso llega a la mano antes de que la bola deje el bate (R. Cross 1998).

Mediciones de velocidad hacia la empuñadura y efectos de brazo, mano y antebrazo en la dinámica de la raqueta:

Según lo que hemos visto anteriormente, un impulso se propaga a la mano antes de que la bola deje las cuerdas, con lo cual, la mano puede tener un efecto en el resultado final.

El nodo de vibración se desplaza hacia el extremo de la empuñadura cuando se sujeta la raqueta con la mano (figuras 24 y 25) o, cuando se le añade una masa. Si se añaden 40 grs a la empuñadura, el nodo se desplaza del punto situado a 15 cm hasta el punto situado a 12 cm del extremo de la empuñadura. Pero el efecto de la mano y el antebrazo sobre la raqueta en el momento de golpear, no se puede simular con un simple añadido de masa en la empuñadura (Casolo y Ruggieri. 1991). El esquema dinámico de la situación puede ser modelado según muestra la figura 26.

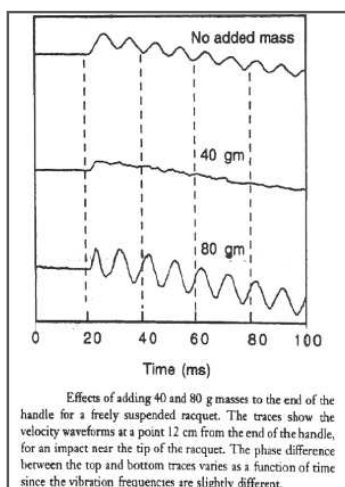


Figura 24. Velocidad de onda en un punto situado a 12 cm. Del extremo de la empuñadura cuando se añaden 40 grs., 80grs. o 0 grs. de masa al extremo de la empuñadura. Cross R (1999). The sweet spots of a tennis racquet. *Sports Engineering*. Volume 1, number 2(page 63).

Figura 25. Esquema de observación de la rotación y traslación de una raqueta sujeta por la mano de un tenista cuando es golpeada por una bola en el extremo de la cabeza en el COP y en la zona más cercana al cuello. F_1 es la fuerza que actúa sobre la parte superior de la mano. F_2 es la fuerza que actúa sobre la parte inferior de la mano. F_3 es la fuerza que actúa en el antebrazo, cerca de la muñeca que es aproximadamente equivalente a $F_1 + F_2$. El punto negro indica el eje de rotación de la raqueta según los experimentos del laboratorio. La línea discontinua indica la posición inicial de la raqueta antes del impacto de la bola. Cross R (1999). The sweet spots of a tennis racquet. *Sports Engineering*. Volume 1, number 2 (page 63).

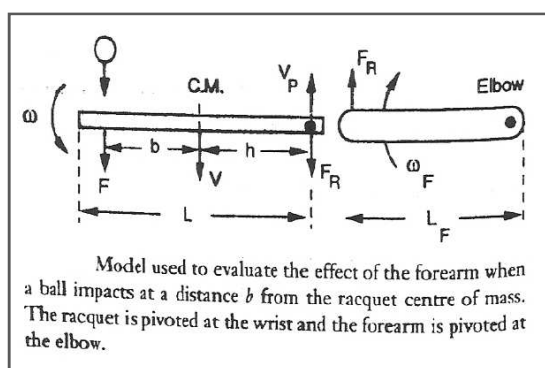
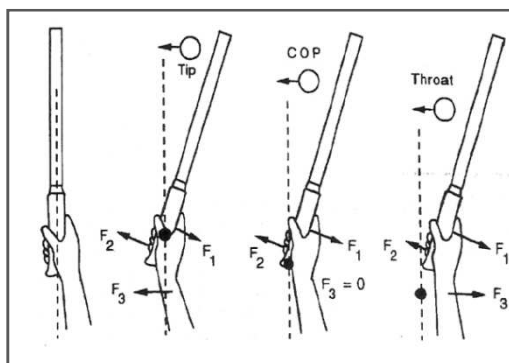


Figura 26. Modelo usado para evaluar el efecto del antebrazo cuando una bola impacta a una distancia b del centro de masas de la raqueta. La raqueta pivota en la muñeca y el antebrazo pivota en el codo. Cross R (1999). The sweet spots of a tennis racquet. *Sports Engineering*. Volume 1, number 2 (page 63).

Un impacto fuera del centro geométrico de la raqueta da como resultado vibraciones de la estructura, traslación y rotación. Cuando esto sucede se producen fuerzas resultantes en la mano y en el antebrazo que serán proporcionales a la distancia entre el centro de las cuerdas y el punto de impacto.

Cuando la raqueta está sujetando al tenista, el nodo de vibración de la empuñadura se desplaza hacia el extremo, ya que se encuentra muy cerca del centro de la mano, independientemente del punto en el que impacte la bola.

No hay ningún punto en la zona encordada en el cual, al ser golpeado por la bola, las fuerzas se compensen completamente, siempre hay fuerzas resultantes. Ahora bien, el componente vibracional si que puede llegar a ser 0, cuando la bola impacta en el nodo de vibración.

Las fuerzas resultantes sobre la mano, son más pequeñas cuando los impactos se producen entre el centro de las cuerdas y el COP.

Las fuerzas resultantes sobre la mano, son más grandes cuando los impactos se producen en el extremo de la raqueta.

El COP no tiene especial relevancia con respecto a las fuerzas que actúan sobre la mano, es decir, aunque la bola impacte en este punto, se producen fuerzas resultantes en la mano. Sin embargo, si que tiene relevancia con respecto a las fuerzas que actúan en el antebrazo como resultantes de un impacto, ya que el valor de dicha fuerza es muy cercano a 0 cuando el impacto se produce en el COP.

Conclusiones:

La mano juega un papel más significativo de lo que se sospechaba inicialmente, ya que el impulso es transmitido de las cuerdas a la mano antes de que la bola deje las cuerdas. El efecto de la mano en la velocidad de la raqueta no ha sido investigado pero si se ha encontrado que:

- El nodo de vibración de la empuñadura se desplaza por debajo de la mano muy cerca del extremo.
- El eje de rotación de la raqueta se desplaza por debajo de la mano, muy cerca del extremo.
- Las fuerzas de vibración en la mano y el antebrazo son igual a 0 cuando el impacto de la bola se produce en el nodo de vibración, en la zona central de las cuerdas.

- La fuerza que se genera en el antebrazo con el impacto de la bola, se minimiza cuando ésta golpea en el centro de percusión. No llega a ser nunca 0 porque siempre hay un pequeño componente de vibración presente.

Cuando las vibraciones o las fuerzas que se generan en el antebrazo son 0 o están muy cerca de él, la bola está impactando en lo que ha venido llamándose a lo largo de todo el trabajo “sweet spot”, pero aún queda mucho trabajo por hacer para llegar a conocer en detalle estos puntos y con ellos las fuerzas que se generan, tanto el antebrazo como en la mano del tenista.

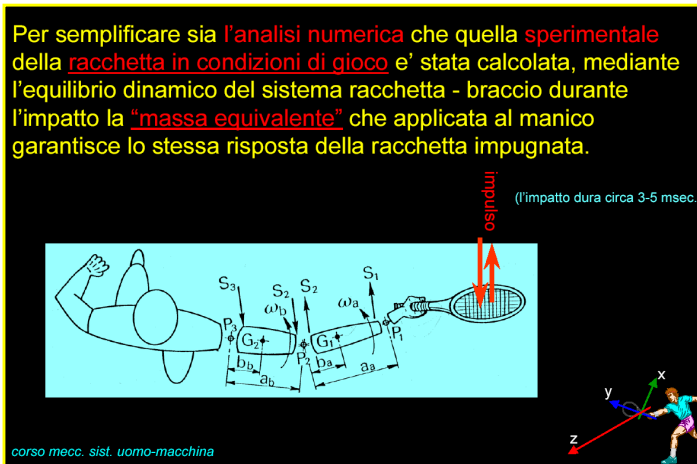


Figura 27. Modelo de esquema de fuerzas del impacto de la bola sobre el sistema raqueta-brazo de Federico Casolo. El esquema explica el equilibrio dinámico del sistema raqueta-brazo durante el impacto que hace que las fuerzas se compensen y se garantiza una fuerza de respuesta sobre la bola casi igual a la aplicada por el brazo al mango de la raqueta. “Apunti sulla meccanica del tennis” Federico Casolo

CONSEJOS DE HOWARD BRODY A LA HORA DE ELEGIR UNA RAQUETA:

En general, podemos decir que se debe buscar aquella raqueta cuyas características se adaptan al tipo de juego del tenista que la va a utilizar, sin tener demasiado en cuenta los consejos publicitarios de las grandes marcas ni los modelos que usan las estrellas del tenis, ya que, aunque anuncien un determinado modelo, sus raquetas están adaptadas a sus características personales de juego independientemente del modelo de raqueta que utilicen.

Como norma general, Una gran cabeza supone una mayor estabilidad en los aficionados ya que genera más potencia y menos errores.

Una estructura más ligera con un tamaño medio de cabeza es mejor para jugadores de servicio y volea y de golpes planos.

Los tenistas más prudentes suelen utilizar raquetas con cabezas más sobredimensionadas con tensiones de cordaje no demasiado altas y de peso y momento de inercia que hacen que la sensación del golpeo sea sólida.

En cualquier caso, como dice H. Brody: “Conocer la física del juego y de la raqueta puede mejorar tu disfrute. Pero no es suficiente: yo nunca he ganado un torneo de tenis”.

CONCLUSIONES FINALES

1. La raqueta ideal ha de cumplir los siguientes requisitos:
 - El nodo de vibración, el centro de percusión y el coeficiente de restitución máximo han de estar lo más cerca posible y han de compartir una zona que ha de ser lo más amplia posible.
 - La raqueta ha de ser lo más rígida posible al tiempo que mantiene o incrementa su ligereza, es decir, rigidez y ligereza han de mantener un equilibrio.
 - La empuñadura ha de ser lo suficientemente ancha como para que el tenista sea capaz de evitar las toraciones provocadas por impacto de la bola fuera del eje longitudinal de la raqueta, pero al mismo tiempo, ha de ser un agarre comfortable para el jugador.
 - En función del tipo de juego del tenista, la raqueta tendrá un balance u otro. Para jugadores especialistas en el juego de fondo, raquetas potentes con balance adelantado. Para jugadores de saque y volea, raquetas más maniobrables, con balance neutro o retrasado para tener un mejor control de la bola.
 - Las sensaciones percibidas por el tenista con la raqueta ideal han de ser de máxima confortabilidad, eficacia y eficiencia.
2. La tensión ideal de las cuerdas ha de ser aquella con la que el jugador se siente cómodo y con la que encuentra el equilibrio entre su potencia y control (dirección y efecto) deseados. No hay que preocuparse únicamente de los kilos de tensión, ya que hemos visto que se pierde tensión nada más encordar la raqueta y que varía en gran medida en función de la raqueta con la que se juega.
3. El tenista ha de desarrollar una sensibilidad con la que sepa detectar cual es la tensión idónea y cuando ha variado lo suficiente, por el desgaste o sobre uso, como para cambiarla por una recién encordada.
4. De la misma manera que para la tensión del cordaje, el jugador ha de decidir tipo de cordaje elegir en función de cual es que le aporta mejores sensaciones, eficacia y efectividad en el juego.
5. Es importantísimo en los primeros años de formación del tenista enseñarle la importancia de encontrar el “punto dulce” de su raqueta para obtener de ella la máxima efectividad y eficiencia técnica en el juego con el mínimo esfuerzo físico y el mínimo riesgo de lesión.
6. Es importantísimo también que en los primeros años de formación del tenista se le instruya y prepare, mediante situaciones de juego de máxima variabilidad (variando tipos de raqueta, tipos de cordaje, tensiones diferentes) de manera que sea capaz de desarrollar una sensibilidad que le permita distinguir cuál es su raqueta ideal, su cordaje ideal y su tensión ideal.

ANEXO I

REGLAMENTO DE LA ITF RESPECTO A LAS RAQUETAS DE TENIS.

4. LA RAQUETA

Las raquetas, que se han aprobado para el juego conforme a las Reglas del Tenis, deben ajustarse a las especificaciones estipuladas en el Apéndice II.

La Federación Internacional de Tenis decidirá si una raqueta o prototipo se ajusta a las especificaciones del Apéndice II o si se aprueba o no para utilizarla en el juego. Dicha resolución puede ser tomada por su propia iniciativa o siguiendo la solicitud de una parte que tenga un interés genuino en el juego, incluyendo un jugador, un fabricante de equipo de tenis o una asociación nacional o cualquiera de sus miembros. Tales resoluciones y solicitudes serán hechas de acuerdo con los Procedimientos de Revisión y Consideración de la Federación Internacional de Tenis que sean aplicables.

Caso 1 : ¿Puede haber más de un encordado en la superficie de golpeo de una raqueta?

Decisión : No. La regla menciona claramente un encordado, y no encordados, de cuerdas cruzadas (véase el Apéndice II).

Caso 2 : ¿Es el encordado de una raqueta considerado generalmente uniforme y plano, si las cuerdas están en más de un nivel?

Decisión : No.

Caso 3 : ¿Pueden colocarse dispositivos para reducir la vibración sobre el encordado de la raqueta? En caso afirmativo, ¿dónde se pueden colocar?

Decisión : Sí, pero estos objetos únicamente pueden colocarse fuera de la zona de las cuerdas cruzadas.

Caso 4 : Durante el transcurso del juego, un jugador rompe accidentalmente las cuerdas de su raqueta. ¿Puede seguir jugando otro punto con la raqueta en esas condiciones?

Decisión : Sí, excepto cuando los prohíban de manera específica los organizadores del torneo.

Caso 5 : ¿Se permite que un jugador utilice más de una raqueta durante el juego?

Decisión : No.

Caso 6 : ¿Puede incorporarse a la raqueta una pila (batería) que afecte a sus características de juego?

Decisión : No. Una pila (batería) está prohibida pues es una fuente de energía, como una célula solar u otros accesorios similares.

APÉNDICE II

LA RAQUETA

a. La superficie de golpeo de la raqueta, definida como el área principal delimitada por los puntos de entrada de las cuerdas en el marco o puntos de contacto de las cuerdas con el marco, será plana y consistirá de un entramado de cuerdas cruzadas conectadas a un marco y entrelazadas o adheridas alternativamente donde se cruzan. El cordaje será generalmente uniforme y, en particular, no tendrá menor densidad en el centro que en cualquier otra área.

La raqueta será diseñada y encordada de tal forma que las características de juego sean idénticas en ambas caras. La raqueta estará libre de objetos adheridos, protuberancias y accesorios, con la excepción de los utilizados única y específicamente para limitar o prevenir deterioros y desgarros o vibración o, en el caso del marco, para distribuir el peso. Estos objetos, protuberancias o accesorios deben ser razonables en tamaño y ubicación.

b. El marco de la raqueta no excederá de 73,7 cm. (29 pulgadas) de longitud total, incluyendo el mango. El marco de la raqueta no excederá de 31,7 cm. (12,5 pulgadas) de anchura total. La superficie de golpeo no excederá de 39,4 cm. (15,5 pulgadas) de longitud total, y de 29,2 cm. (11,5 pulgadas) de ancho total.

c. El marco, incluyendo el mango y las cuerdas, estará libre de cualquier dispositivo que haga posible cambiar materialmente la forma de la raqueta, o cambiar la distribución del peso en la dirección del eje longitudinal de la raqueta, que pudiese alterar el momento de balanceo de inercia o cambiar deliberadamente cualquier propiedad física que pueda afectar el funcionamiento de la raqueta durante el juego de un punto. No se construirá o pegará a la raqueta ninguna fuente de energía que pueda cambiar o afectar sus características de juego.

ANEXO II

TENDENCIAS COMERCIALES DE LAS PRINCIPALES MARCAS FABRICANTES DE RAQUETAS

Las principales tendencias en la fabricación de raquetas de las principales casas comerciales, no son muy diferentes aunque pueda parecer lo contrario al ver sus reclamos publicitarios. En la mayoría de los casos, estas tendencias están de acuerdo con las conclusiones que hemos venido estudiando a lo largo de este trabajo. A continuación se muestra una relación de las principales novedades que se incluyen en los modelos actuales de raqueta que se encuentran disponibles en el mercado:

- Empuñaduras más confortables y con mejor adherencia o grip.
- Sistemas de amortiguación de vibraciones para mejorar las sensaciones de golpeo del tenista y el confort.
- Diseños de estructuras más aerodinámicos.
- Mejoras en los materiales de construcción con mejor rendimiento en cuanto a la rigidez de la estructura rígida de la raqueta (fibra de carbono, grafito, titánio, etc).
- Utilización de nanotecnología (manipulación de la materia a nivel atómico y molecular) para lograr más rigidez en la estructura de la raqueta.
- Diferentes mecanismos que amplían la zona idónea de impacto.
- Diferentes diseños en los ojales por los que pasa el cordaje con el fin de dar más libertad de movimiento al cordaje (mejor elasticidad de los mismos) y menor rozamiento entre éste y la estructura de la raqueta.
- Raquetas fabricadas con materiales más ligeros.

ANEXO III

PRINCIPALES NOVEDADES COMERCIALES DE LAS PRINCIPALES MARCAS

• **BABOLAT:**

	<p>POWER & CONTROL IN YOUR HAND!</p>	
<p>A FIRST IN THE TENNIS INDUSTRY: Babolat invents the first ergonomic grip perfectly shaped for your hand. The entire palm of the hand is in contact with the grip.</p>		
<ul style="list-style-type: none"> • A more natural grip of the racquet = greater comfort • Less effort while hitting = more power • Less grip rotation in hitting = better control 		
		

	<p>ACTIVE VIBRATION FILTER CUSTOMIZED TO YOUR NEEDS</p>		
<p>INTERFACE BETWEEN THE HANDLE AND THE FRAME</p> <p>These two parts of the racquet are actively linked by the C.D.S (Cortex Damping System) which filters and dampens the vibrations interfering with feel, to enhance the feel of the ball.</p>	<p>CORTEX SYSTEM IS THE FIRST TECHNOLOGY CUSTOMIZED TO FILTER DIFFERENT VIBRATIONS</p> <ul style="list-style-type: none"> - For Competitive players, Cortex filters vibrations for purer feel of the ball. - For Club players, Cortex gives maximum comfort when hitting. 		
	<p>RACQUET WITHOUT CORTEX SYSTEM</p> 	<p>CORTEX SYSTEM FOR COMPETITIVE PLAYERS</p> 	<p>CORTEX SYSTEM FOR CLUB PLAYERS</p> 
	<p>FILTER Filters out vibrations which interfere with feel to enhance the feel of the ball</p>	<p>FILTER + DAMPENER Filters and dampens vibrations for maximum comfort.</p>	
	<p> VIDEO</p>		



AERO modular technology

New modular frame concept with High Modulus Graphite creates maximum penetration of the racquet through the air and increases the hitting power. Perfect control for directional hitting.

Players benefits:

- a faster swing
- increased power while maintaining excellent ball control.

A faster swing for a faster game!



Woofer!
> Learn more...

Rafael Nadal 2005, 2006 and 2007 French Open Champion

Racquet: **aeropro**





CARBON XTREM
NEW

Layers of carbon braided on 3 different angles are placed on the head of the racquet for optimized hitting performance





+ 40% more resistance to torque

2 times less fibers breaking compared to traditional carbon





PURE STORM



PURE STORM TOUR



VIDEO

FERNANDO GONZALEZ

BENJAMIN BECKER



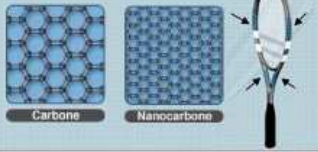
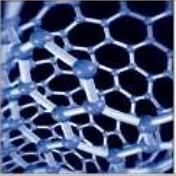





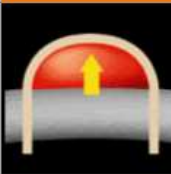
XTREM LASTING PERFORMANCE

XTREM CONTROL

XTREM FEEL

Carbon

	<p>The Technology of the future</p>		<p>VIEW RACQUETS</p>
<p>NS Technology Carbon nanotubes are used to stiffen key areas of the racquet head and shaft .</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Plus 20 % resistant to torsion - More power and stability 	
	<p>Nanotechnology in brief Nanotechnology is the study and working of materials on the scale of the atom : the technology of the minuscule.</p> <p>Carbone Nanotube TM : the material of the future 100 times more rigid than steel (and 5 times lighter !), 10 times stiffer than conventional graphite, Carbon Nanotube TM is the ideal material. Extremely resistant and highly reactive, it provides power to the racquet through rigidity and playing sensations never experienced before.</p> <p>From NASA... to Babolat Currently, NASA is studying a project for a space elevator to connect the earth and a geostationary platform. The cables for this elevator will be made of Carbon Nanotube TM - proof of its exceptional qualities !</p>		

	<p>Patented innovation by Babolat, WOOFER is the first dynamic system which makes the frame and the strings interact when striking the ball.</p>		
	<p>A tennis racquet is a frame with strings. The frame is basically static and holds the driving force of the racquet - the strings - in place. Today the way the strings are attached to the frame limits the performance of this driving force. The strings are attached to both sides of the frame. Only some strings are active when struck by the ball. This means that racquets do not deliver their full potential. Babolat set out to imagine a racquet optimising the frame and the strings - to invent a frame which permits all the strings to work together to their full potential when striking the ball.</p>	<ul style="list-style-type: none"> › Dual Woofer › Woofer Inside › Soft/Side Woofer › FAQ 	
<p>PULLEY FUNCTION</p> <ul style="list-style-type: none"> • The WOOFER eliminates string lock-up : the strings are free to move • The whole surface area reacts on impact : with the WOOFER, more strings work together when striking the ball. The strings are interactive. 		<p>PISTON FUNCTION</p> <ul style="list-style-type: none"> • Increase the trampoline effect : the piston function enables greater surface deformation on impact. • Shock absorption : the pistons act like a suspension system to damp vibrations. 	

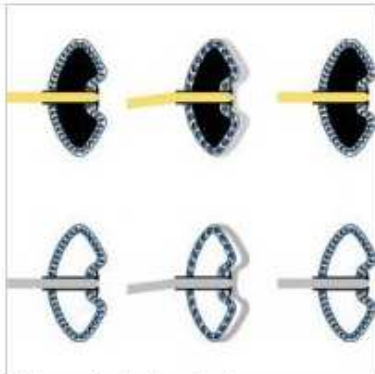


CENTRO
OLIMPICO
DE ESTUDIOS
SUPERIORES

- **HEAD:**

El Tennis Moderno Conquista Las Pistas

El tenis cambia tan rápidamente que resulta difícil seguir la marcha. Se han desarrollado nuevas y mejores técnicas gracias a que hay jugadores profesionales innovadores que buscan constantemente nuevas vías mejores para obtener ventajas competitivas y esto es lo que se denomina ahora "tenis moderno". Estas técnicas pueden aumentar enormemente las prestaciones no sólo de los jugadores profesionales, sino también las de los jugadores de cualquier nivel.



El impacto de la pelota

Sensación y toque más sólidos que una roca

En el juego rápido y agresivo de hoy día, los jugadores competitivos necesitan una raqueta que los dé una sensación y un toque supremos. El nuevo swing es más agresivo y comienza despacio para acelerar rápidamente hasta el impacto con la pelota generando más potencia. El juego de piernas es también más versátil y éstas están ahora más abiertas al golpear. La nueva raqueta de torneo de HEAD tiene una increíble capacidad de respuesta gracias a la tecnología MicroGel™ y da la sensación de ser más sólida que una roca con un toque que supera todo lo visto hasta ahora en el juego.

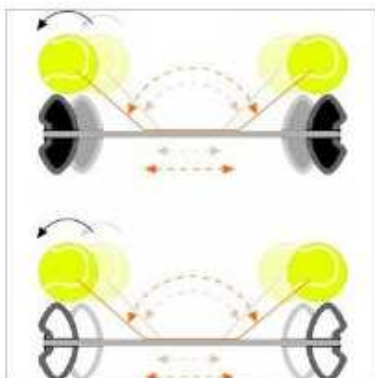
¿Qué ocurre durante el impacto de la pelota?

El material MicroGel™ se deforma y comprime absorbiendo y dispersando la fuerza del impacto por todo el marco para recuperar rápidamente su forma original.

La Tecnología del Marco Llega al Extremo

Características: Las nuevas raquetas Extreme de HEAD tienen una cabeza más ancha que permite que la pelota se deslice más por el encordado generando un efecto insuperable.

Ventaja: La mayor anchura de la cabeza hace que la pelota salga del encordado con mucho más efecto permitiendo disponer de más distancia entre la red y el trayecto de la pelota en el aire.



MicroGel Características

HEAD Metallix™

Hecho de una matriz de fibras de carbono de diseño especial y de una nueva aleación de metal cristalino. La granulación de dicha aleación es 1000 veces menor que la de un metal típico*.



Hecho de una matriz de fibras de carbono de diseño especial y de una nueva aleación de metal cristalino. La granulación de dicha aleación es 1000 veces menor que la de un metal típico*.

La granulación más pequeña significa que aumentan las prestaciones o, como dice el efecto Hall-Petch; cuanto más pequeño sea el granulado tanto más fuerte es el material. El resultado es una raqueta más ligera, más fuerte y con más potencia que nunca.

Estabilizador HEAD

El nuevo estabilizador de HEAD elimina la vibración de la raqueta y asegura un confort definitivo en cada golpe.

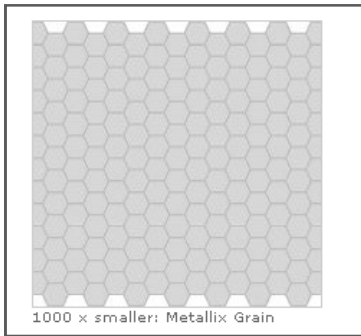
HEAD LMS

Bajando la sección del puente y creando un forma absolutamente nueva del hombro, el diseño LMS (Longer Main String) de HEAD amplía la superficie de golpeo pero sin que la raqueta sea más grande. El jugador tiene la ventaja de disponer de un centro de golpeo más grande y de mejor maniobrabilidad.

*de Powermetal Technologies Inc.



COMITE
OLIMPICO
ESPAÑOL



¿Cómo podemos aprovechar la máxima potencia y controlarla?

Desde los comienzos del tenis se ha doblado siempre la raqueta en la misma dirección del impacto. Ahora ha cambiado todo: las raquetas con la tecnología HEAD Flexpoint™ son las primeras en doblarse de forma completamente nueva.



Hole + Dimple = Flexpoint™

Flexpoint™ tecnología

Montada en Liquidmetal®, la tecnología Flexpoint™ rompe los moldes del diseño tradicional de raquetas con dos orificios de control concebidos con toda precisión ... que dan a la raqueta un nuevo y revolucionario punto de flexión.

Traditioneller Racketflex: Power ohne Kontrolle.
Racketflex mit patentierter HEAD Flexpoint™ Technologie: Power unter Kontrolle.

¿Sólo una raqueta con dos orificios?

Orificio + cavidad = Flexpoint™
Estos dos orificios de nuevo diseño, colocados en la posición de la 3:00 y 9:00 horas del reloj en la cabeza de la raqueta, actúan en común para ofrecer potencia bajo control. La cavidad está concebida para generar flexibilidad reduciendo la altura del marco en un 25 % como máximo. El orificio aumenta la flexibilidad parcial en hasta un 50 %.



Traditional versus Flexpoint™ rackets

"efecto envolvente"

La ilustración muestra el movimiento de la raqueta durante el impacto de la pelota. La raqueta forma una "bolsa" que envuelve a la pelota. El tiempo de permanencia aumenta y se maximiza el control. Para poder imaginárselo piense en cómo agarra la pelota con la mano. Este efecto "envolvente" genera un control jamás visto hasta ahora, pero sin perder nada de potencia.

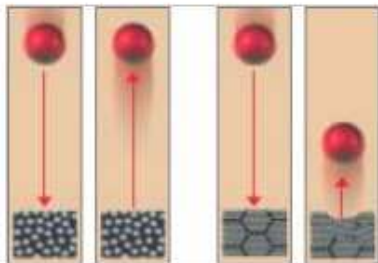




CENTRO
OLIMPICO
DE ESTUDIOS
SUPERIORES

Liquidmetal® - Energía pura. Potencia perfecta.

El material Liquidmetal se aplica en cuatro zonas estratégicas de la cabeza de la raqueta y es el único material capaz de aprovechar toda la energía generada por el swing. Gracias a su estructura atómica líquida no se pierde nada de energía del impacto de la pelota.



Liquidmetal® versus Titanium

Liquidmetal® marca la diferencia

El secreto de las prestaciones de Liquidmetal reside en su estructura atómica líquida. En comparación con los metales convencionales, éste material ofrece ventajas que superan en mucha a las tecnologías utilizadas hoy en el tenis.

Liquidmetal®: Estructura atómica líquida

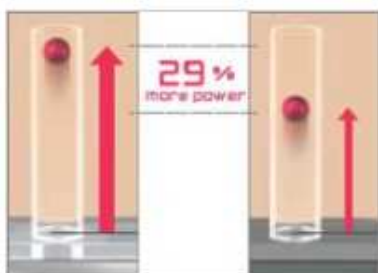
La singular estructura atómica líquida de Liquidmetal no se deforma por el impacto de la pelota devolviendo así la pelota con una energía extrema.

Titanium: La estructura atómica estándar se deforma por el efecto del impacto ausando una pérdida extrema de energía.

La ventaja para todo jugador: 29% más potencia

La singular estructura atómica de Liquidmetal es 2 1/2 veces más fuerte que el titanio y concede un 29% más potencia.

¿Por qué? La tecnología Liquidmetal aprovecha más eficazmente la energía pura del impacto de la pelota poniendo toda esa energía a disposición para devolver el golpe con una potencia máxima. Liquidmetal: energía pura. Potencia perfecta.™



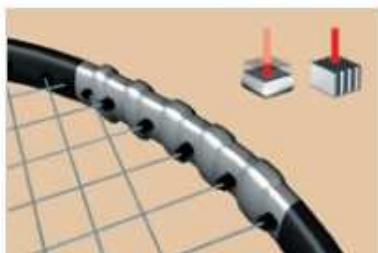
More Power: Liquidmetal® versus Titanium

Total Sweetspot Construction (TSC) ayuda a lograr prestaciones incomparables.

Gracias a su innovadora estructura ondulada, la construcción Total Sweetspot Construction aumenta la resistencia a la torsión en la cabeza de la raqueta.

La ondulación aumenta la rigidez de la superficie para obtener una resistencia y una rigidez óptimas bajo presión.

La Total Sweetspot Construction (TSC) amplía el centro de golpeo a toda la cabeza de la raqueta dando como resultado un control excelente. Ahora da la impresión de que cada golpe se ha dado con el centro del golpeo.



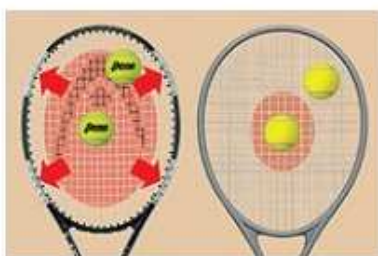
Total Sweetspot Construction

NoShox para obtener más confort

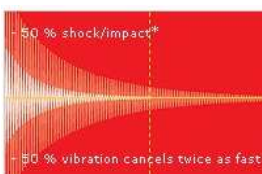
El sistema de amortiguación NoShox consta de una espuma de memoria de nuevo desarrollo integrada en el mango de la raqueta. NoShox reduce considerablemente las vibraciones de la raqueta superando en un 27% a las raquetas convencionales. Ahora, el brazo puede mantener con facilidad hasta los juegos más potentes.

ISD para obtener un gran confort y un sonido perfecto

El amortiguador Integrated String Dampener de HEAD va fijado en los ojales para reducir la vibración del cordaje. Resultado: un confort superior para el brazo, un sonido y un toque perfectos en cada golpe.



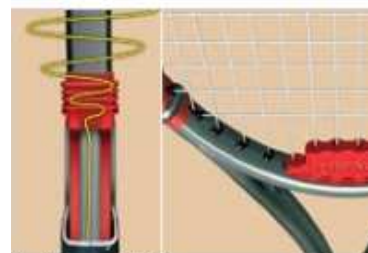
Ultimate control with TSC



Protector racquet with EDS



The string: Head Protector 16



NoShox and ISD



The grip: Head Protector Cushion



COMITE
OLIMPICO
ESPAÑOL



CENTRO
OLIMPICO
DE ESTUDIOS
SUPERIORES

Protect System - La tecnología que te protege contra el codo del tenis

La singular combinación de las tecnologías líderes de raquetas, empuñaduras y cordajes de HEAD reduce el esfuerzo que sufre el brazo y procura un significativo alivio de los dolores.



High-tech piezoelectric fibres are controlled by a microchip.



The Electronic Dampening System (EDS)

La raqueta: Protector MP/OS de HEAD con EDS

A diferencia de los sistemas convencionales, el sistema de amortiguación electrónica (EDS) patentado por HEAD es un sistema activo y controlado electrónicamente.

Un microchip controla las fibras piezoeléctricas de alta tecnología que convierten la energía mecánica del impacto de la pelota en energía eléctrica.

El sistema EDS de HEAD reconoce el modo de amortiguación y genera electrónicamente una contravibración neutralizante reduciendo substancialmente el choque del impacto y las vibraciones. El jugador beneficia de una reducción significativa del esfuerzo que sufre el brazo en cada golpe.

El sistema EDS de HEAD reduce el choque inicial del impacto en más del 50 % y las vibraciones residuales el doble de rápido que una raqueta convencional.

La empuñadura: HEAD Protector Cushion

La empuñadura lleva cámaras de aire especialmente desarrolladas en combinación con una superficie de elastómeros de alta tecnología que ofrece un excelente confort y evita el deslizamiento, reduciendo al mismo tiempo la vibración residual.

El cordaje: HEAD Protector 16

Dispone de la singular tecnología RIP de HEAD, y los modernos materiales utilizados dan como resultado un cordaje híbrido superblando que reduce el choque y las vibraciones para ofrecer gran confort y protección.

Precisión extra. Potencia óptima. Total confort.

HEAD Intelligence X te permite concentrar tu potencia con una Xtra precisión para pegar exactamente donde deseas.



Head Intellifiber - a fiber created from piezoelectric material

HEAD intellifiber™.

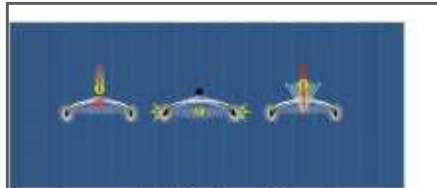
HEAD's intellifibers™ transforma la energía mecánica desde el impacto de la pelota en energía eléctrica lo que tensa la raqueta para mejorar la potencia y el confort. Las Intellifibers™, situadas en el marco y en el corazón de la raqueta, liberan mucha potencia, confort y precisión.

Mientras la bola está en el marco, las Intellifibers™ HEAD crean una resistencia a la flexión de la raqueta y aumentan en un 42 % la estabilidad torsional del marco para una precisión extra.

Dicha tensión torsional además de una estabilidad máxima proporciona una gran potencia que no se encuentra en las raquetas convencionales.



HEAD intellifiber™ increases torsional stability.



Maximum stability for ultimate precision



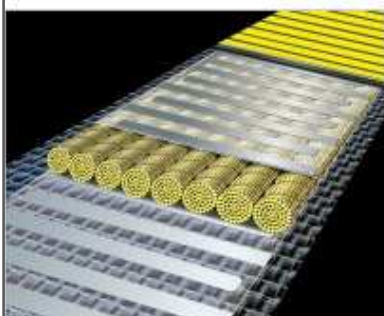
COMITE
OLIMPICO
ESPAÑOL



CENTRO
OLIMPICO
DE ESTUDIOS
SUPERIORES

¿ No le parece interesante saber cómo un chip o un material Intelligent ha podido cambiar el mundo del tenis?

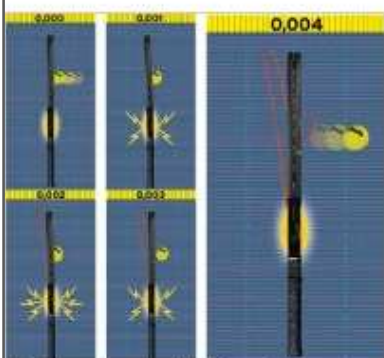
La tecnología Intelligence™ es una aplicación de los últimos conceptos inteligentes que controlan el resultado del producto. A parte de ser usada en la construcción de raquetas de tenis HEAD, ese sistema Intelligence ha sido usado sobre todo en la construcción aero-nautica civil y militar, así como en aero-espacial y automoción.



Head Intellifiber - a fiber created from piezoelectric material



Mechanical energy is convertet into electrical energy.



The Power Benefit of Intelligence

Las Intellifibers™ HEAD.

Sus características excepcionales ofrecen una potencia y una jugabilidad increíbles. Se trata de una nueva fibra creada a partir de un material piezoeléctrico. Con un material totalmente diferente al convencional, las Intellifibers HEAD transforman la energía mecánica desde el impacto de la bola en una respuesta eléctrica que tensa la raqueta al máximo para obtener mayor potencia.

Característica

Se trata de una nueva fibra creada a partir de un material piezoeléctrico

Transformación de la energía

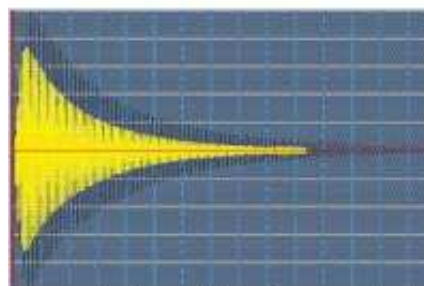
Utiliza la energía mecánica creado por el impacto de la bola y la convierte- en menos de una milésima de segundo- en energía eléctrica.

El beneficio de la potencia

En menos de una milésima de segundo durante el impacto de la bola en el marco, las Intellifibers™ HEAD crean una resistencia activa, se tensan y reducen el movimiento de la raqueta que se produce en todas las raquetas de diseño convencional.

El beneficio de la amortiguación

Al revés de la energía mecánica, la energía eléctrica no proporciona vibraciones. De esta manera, se eliminan inmediatamente un 20% de las vibraciones en el momento del impacto de la pelota en el marco, para un confort optimo.



The reduction of vibration results in a racquet with optimum comfort.



COMITE
OLIMPICO
ESPAÑOL



CENTRO
OLIMPICO
DE ESTUDIOS
SUPERIORES

Titanium - El arma contra el peso

Se trata de un marco compuesto por fibras de Titanio super fuertes y fibras de grfrito extra ligeras para una reducci3n máxima del peso junto con más potencia.



Lightweight construction for perfect handling

Tecnología Ti.Mesh

Se trata de una construcci3n muy elaborada de Titanio, combinado con fibras de carbono para la tensi3n del marco.

La serie Titanium ofrece:

- un peso muy ligero
- una maniobrabilidad excelente
- una potencia máxima
- una gran jugabilidad

Ultra-ligero

Una construcci3n ultra ligera ofrece una maniobrabilidad fácil y rápida de la raqueta.

Beneficios al nivel del marco

El marco uniformizado optimiza las tensiones verticales, reduciendo la torsi3n de la raqueta.

- PRINCE:

IT LOOKS LIKE A TENNIS RACQUET BUT IT'S ALSO AN ADDING MACHINE. +++
(It adds points to your game.)

THE SECRET IS IN THE HOLES.

Like all world-changing innovations, O² technology is based on an ingeniously simple idea. By replacing traditional pin-sized string holes with our massive O-ports, we created a class of racquets that move through the air faster for increased power and greater control, increasing your sweet spot up to 70%. The bottom line is pretty darn simple, too: you will hit your best shots. More often. Even faster.

+sweet spot
Up to a 70% larger sweet spot

+speed
Up to 24% faster through the air

+stability
More control on off center hits

roll over here >>



COMITE
OLIMPICO
ESPAÑOL



**CENTRO
OLIMPICO
DE ESTUDIOS
SUPERIORES**

• **WILSON:**

[K]FACTOR Racket Technology

W Line nCode [K] Factor

[K]ONTOUR YOKE
New frame engineering technology that enhances stiffness at key stress points on the racquet for improved torsional stability.

[K]ONNECTOR
2 external wings molded into each side of the hoop to increase dwell time of the ball upon impact. This provides greater control and comfort with a larger sweet spot.

[K]OMPACT CENTER
New industrial design innovation that improves handling, maneuverability and provides additional feel. Directly inspired by #1 in the world Roger Federer.

[K]AROPHITE BLACK FRAME
A proprietary next generation structure created through a unique process at the nanoscopic level resulting in more feel and a stronger and more stable racket.

SLINGSHOT YOKE
Throat beams are designed with a wider spacing between them in order to strengthen the racket head support. The result is a more stable and stronger racket.

ISO ZORB GROMMETS
An exclusive Wilson polymer is inserted into the grommets making them softer. Grommets are then strategically placed on different areas of the racket where they act as vibration buffers to significantly increase playing comfort.

LONGER MAIN STRINGS
are a result of the head shape and provide users with more power

W GRIP
new grip made from exclusive materials for an incredibly soft feel in the palm of your hand.

nCODE Racket Technology

W Line nCode [K] Factor

nCODE FRAME
When a racket is nCoded, nano-sized silicon dioxide crystals permeate the voids between the carbon fibers. This adjustment made at the molecular level, significantly strengthens and enhances the stability of the overall carbon matrix.

VOLCANIC CROSS SECTION
Stronger geometry provides greater frame strength and enhanced power.

nZONE
Uniquely designed, oversized string holes allow for much greater compression of the string bed. nZone results in a significantly larger sweet spot providing more power and forgiveness.

NANOFOAM
A proprietary new material used to fill and insulate the frame tubes in strategic points inside the racket. Nanofoam, provides a smoother quieter and enhanced overall feel.

DOUBLE HOLES
By increasing the diameter of the grommet holes, the string bed is allowed to flex more when impacted by the ball resulting in a smoother feel and added power.



**COMITE
OLIMPICO
ESPAÑOL**



CENTRO
OLIMPICO
DE ESTUDIOS
SUPERIORES

- **VÖLKL:**



Sistemáticamente realizada para las necesidades de las mujeres: Völkl Tennis ha añadido un concepto específico de mujer a su Serie de raquetas DNX y a la Serie BB

DNX

Völkl Tennis es la primera compañía mundial en usar este nuevo y revolucionario material creando una nueva generación de raquetas de tenis únicas y de alta tecnología.



Qué es DNX? – DNX es un material absolutamente innovador en el mundo y se usa no sólo para la fabricación de raquetas de tenis, sino también para cualquier otro producto basado en grafito. Las calidades y propiedades de este nuevo material son ya por sí revolucionarias: DNX es 25 veces más resistente que la fibra de carbono convencional.

En los laboratorios de investigación del mundialmente conocido grupo Fraunhofer TEG se produce este nuevo y revolucionario material por vez primera como fibra industrial. Inicialmente concebido para la industria aeronáutica, las fibras DNX nanoscópicas se emplean en zonas estratégicamente importantes de una raqueta de tenis aumentando así su estabilidad y potencia.

El DNX se aplica en áreas estratégicas de todas las raquetas DNX . Las ventajas se manifiestan instantáneamente en cada golpe: DNX para el máximo rendimiento.

DNX – la innovación revolucionaria de material que constituye la piedra angular de una serie de raquetas que romperá con todas las reglas. Las fibras DNX se sitúan en zonas estratégicamente importantes de cada raqueta de tenis y añaden una dimensión absolutamente nueva a la fabricación de raquetas de tenis:

- Gracias a DNX las raquetas ahora pueden ser más resistentes, manteniendo un manejo cómodo y fácil de controlar. Además, ¡son más potentes!
- Asimismo, con DNX, las raquetas son más flexibles, pero siguen siendo tan ligeras a la vez que proporcionan un nuevo nivel de estabilidad y potencia sin precedentes.



COMITE
OLIMPICO
ESPAÑOL



CENTRO
OLÍMPICO
DE ESTUDIOS
SUPERIORES

Catapult Technology

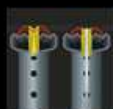


TECNOLOGIA CATAPULT

Con la tecnología Catapult se obtiene un 30% más de control sobre la pelota que acelera con potencia, incluso si no se la da exactamente en el centro de golpeo.

Este aumento de la potencia se debe a los resortes Catapult que van colocados en la parte exterior del marco. Éstos se deforman elásticamente con el impacto de la pelota haciendo que ésta penetre más en el lecho del cordaje. Así se controla mejor la pelota.

Los resortes posibilitan una reposición más rápida del encordado en el momento adecuado con lo que la pelota sale catapultada con más fuerza en dirección al contrincante.



Pre-loading – activación de los resortes Catapult

Los resortes Catapult colocados libremente sobre el marco se tensan ya previamente al encordar la raqueta. El cordaje activa los resortes.



Fase de control – Tiempo de penetración de la pelota

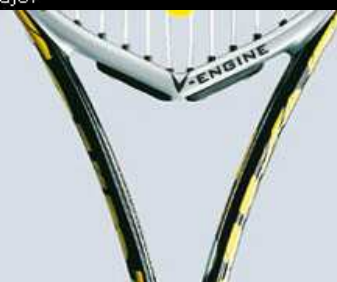
Los resortes Catapult ceden con el impacto de la pelota y se tensan. Así forma la pelota una bolsa más profunda en el encordado ampliándose con ello el tiempo de penetración de la pelota. La pelota puede controlarse notablemente mejor.



Fase de potencia – Tiempo de salida de la pelota

Al tensarse los resortes Catapult al máximo se recuperan con plena potencia y aceleran la reposición del cordaje. Con este efecto de catapulta se acelera la pelota y se reduce considerablemente el tiempo de salida del cordaje.

V-Engine™ Technology



TECNOLOGIA V-ENGINE™

La nueva forma en V en el área del hombro da al marco rigidez adicional y a cada jugador notablemente más potencia.

Adicionalmente aumenta la estabilidad del marco a la torsión. Ello posibilita un juego controlado al golpear pelotas descentradas.

Potencia adicional gracias a una construcción más rígida del marco.

Control adicional al disponer de más estabilidad a la torsión.



COMITE
OLÍMPICO
ESPAÑOL



CENTRO
OLIMPICO
DE ESTUDIOS
SUPERIORES



**SENSOR HANDLE™
SYSTEM**

**VIBRATION CONTROL
HANDLE**

**VIBRATION ABSORBER
HANDLE**

COMFORT HANDLE TECHNOLOGY

Sensor Handle™ System

LA interacción de los materiales TechnoGel™ (rojo) y EVA (amarillo) en la construcción de la empuñadura se encarga de dar un confort óptimo gracias a una excelente amortiguación de las vibraciones y los choques. El sistema Sensor Tour Handle lleva una capa más delgada de EVA para potenciar la sensación de juego directo.

Vibration Control Handle

El revestimiento EVA (amarillo) de la empuñadura permite una amortiguación óptima de las vibraciones. Protección máxima de músculos y articulaciones.

Vibration Absorber Handle

Amortiguación de vibraciones para proteger el brazo en la serie Junior.

Big Grommet™ Technology



TECNOLOGÍA BIG GROMMET™

Big Grommet™ amplían el espacio libre del cordaje. El resultado es que se obtiene mas potencia, incluso cuando no se golpee a la pelota de forma ideal. Big Grommet™ apoyan de forma ideal la revolucionaria tecnología Völkl Catapult.

**Big Grommet™ amplía el
el centro de golpeo en hasta
+ 100 cm².**



COMITE
OLIMPICO
ESPAÑOL



Power RAP

POWER RAP (Racquet Added Protection)

Esta protección de poliamida contra golpes es especialmente resistente y se adapta de forma aerodinámica al marco. Protege a la raqueta y al cordaje por todos lados.



PRECISE FRAME

Precise Frame

Esta geometría reniforme del marco se ha desarrollado exclusivamente para los modelos Tour 10. Se encarga de dar una flexibilidad adicional al marco y, con ello, de dar un control y toque de pelota máximos.



POWER PLACEMENT FRAME

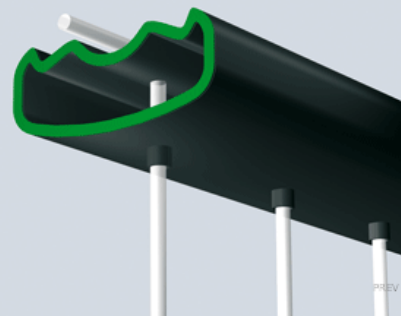
Power Placement Frame

Marco de geometría cuadrada para obtener mas rigidez y estabilidad a la torsión. Esta construcción da una potencia adicional y precisa a las raquetas de la serie tour.



CENTRO
OLIMPICO
DE ESTUDIOS
SUPERIORES

POWER MAX FRAME



Power Max Frame

La potente construcción para los modelos Catapult. Aun mas potencia gracias a una geometría del marco exactamente calculada para aumentar al máximo la rigidez de la raqueta.



COMITE
OLIMPICO
ESPAÑOL



CENTRO
OLÍMPICO
DE ESTUDIOS
SUPERIORES

BIBLIOGRAGÍA

- Brody, H. (1987) *Tennis Science for Tennis Players*. University of Pennsylvania Press.
- Brody H, Cross R and Lindsey C. The Physics and Technology of Tennis.
- Brody, H. (1979) Physics of the tennis racket. *American Journal of Physics* **47**, 482-487.
- Brody, H. (1981) Physics of the tennis racket II: The sweet spot. *American Journal of Physics*, **49**, 816-819.
- Brody, H. (1995) How would a physicist design a tennis racket?. *Physics Today*, **48**, 26-31.
- Brody H, Cross R and Lindsey C (2004). The Physics and Technology of Tennis: Howard
- Brody, Rod Cross & Crawford Lindsey (2004). *The Physics Teacher* -- May 2004 -- Volume 42, Issue 5, p. 318
- Bower, R. and Sinclair, P (1999). Tennis racket stiffness and string tension effects on rebound velocity and angle for an oblique impact. *Journal of Human Movement Studies*, **37**, 271-286.
- Carré MJ, Asai T, Akatsuka T and Haake SJ (2002). The curve kick of a football II: flight through the air. *Sports Engineering* **5**:4, 193-200
- Casolo F and Ruggieri G (1991). Dynamic análisis of the ball-racket impact in the game of tennis. *Meccanica*. Volume **26**, numbers 2-3 (pages 67-73)
- Cross, R. (1985) Demonstration of wave propagation in a periodic structure. *American Journal of Physics*, **53**, 563-567.
- Cooke AJ (2000). An overview of tennis ball aerodynamics. *Sports Engineering* **3**:2, 123-129
- Cross R (2000). Flexible beam analysis of the effects of string tension and frame stiffness on racket performance. *Sports engineering* **3**:2, 111-122.
- Cross R (2000). Effects of friction between the ball and de strings in tennis. *Sports Engineering* **3**:2, 85-97
- Cross R (1999). The sweet spots of a tennis racquet. *Sports Engineering*. Volume **1**, number 2 (page 63)
- Cross R and Bower R. (2001). Measurements of string tension in a tennis racket. *Sports Engineering* **4**:3, 165-175.
- Cross, R. (2001a) Measuring string tension. *Racquet Tech*, **July, 26**, 14-18.
- Cross, R. (2001b) Why bows get stiffer and racquets get softer when the strings are added. *American Journal of Physics*, **69**, 907-910.
- Cross R, Lindsey C & Andruczyk D (2000). Laboratory testing of tennis strings. *Sports Engineering* **3**:4, 219-230
- Fletcher NH and Rossing TD (1991). *The Physics of Musical Instruments*. Springer-Verlag, New York, NY, USA.
- Groppe JL, Shin IS, Thomas JA, Welk GJ (1987). The effects of string type and tension on impact in mid-sized and oversized tennis rackets. *International Journal of Sports Biomechanics*, **3**, 40-46.
- KotzeJ, Mitchell SR and Rothberg SJ (2000). The role of the racket in high-speed tennis serves. *Sports Engineering* **3**:2, 67
- Haake SJ, Chadwick SG, Dignall RJ, Goodwill S and Rose P (2000). Engineering tennis – slowing the game down. *Sports Engineering* **3**:2, 131-143
- Haake SJ, Carré MJ and Goodwill SR (2003). The dynamic impact characteristics of tennis balls with tennis rackets. *Journal of Sports Sciences* **21**:10, 839-850
- Haake SJ, Carré MJ, Kirk R and Goodwill SR (2005). Oblique Impact of Thick Walled Pressurized Spheres as Used in Tennis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Scienc.* **219**: 11, 1179-1189
- Mehta DR and Pallis JM (2001). The aerodynamics of a tennis ball. *Sports Engineering* **4**:4, 177-189
- Vethecan JK and Subic AJ (2002). Vibration attenuation of tennis racquets using tuned vibration absorbers *Sports Engineering* **5**:3, 155
- Winding, MAB and Moeinzadeh MH (1990). Finite element modelling of a tennis racquet with variable string patterns and tensions. *International Journal of Sports Biomechanics*, **6**, 78-91.
- <http://www.babolat.com> (mayo de 2008)
- <http://www.head.com> (mayo de 2008)



COMITE
OLÍMPICO
ESPAÑOL



**CENTRO
OLIMPICO
DE ESTUDIOS
SUPERIORES**

- <http://www.princetennis.com> (mayo de 2008)
- <http://www.voelkl-tennis.com> (mayo de 2008)
- <http://www.wilson.com> (mayo de 2008)



**COMITE
OLIMPICO
ESPAÑOL**