

FÍSICA DE LA HONDA

INTRODUCCION

Comparando el tiro con honda con otros deportes de lanzamiento como el tenis o el golf, que utilizan un instrumento para transferir la fuerza muscular sobre el proyectil (pelota o bola), hay que decir que la honda es el medio más eficaz. El tenis o el golf gastan parte de la energía muscular desarrollada en el golpe de la raqueta o bastón contra la pelota, deformándose éstos temporalmente. En el mejor de los casos se pierde un 10 o 15 % de la energía. Además, la resistencia del aire al movimiento de la raqueta o bastón es mayor que la correspondiente a la honda. El principio físico en que se apoyan estos deportes es distinto, ya que tenis y golf se basan en la transferencia por impacto de la cantidad de movimiento desarrollada por el cuerpo y la raqueta o bastón a la pelota, mientras que la honda acelera directamente el proyectil mediante el impulso del cuerpo y brazo, liberándose éste de manera limpia y sin pérdidas en el disparo.

Aunque los mencionados deportes tienen una física común en algunos aspectos, hay otros muchos diferentes en relación al comportamiento del proyectil en el aire, el diseño del instrumento lanzador, las velocidades y trayectorias, etc. Por esta razón es imprescindible disponer de una física específica para la honda, de la misma manera que existe para cada uno de los otros deportes de lanzamiento.

El lanzamiento con honda comienza con el desarrollo de un esfuerzo muscular que se trasfiere a la honda cargada con el proyectil, produciendo su aceleración a lo largo de una trayectoria más o menos curvada (generalmente de volteo) previa al disparo o liberación del proyectil. Dicho esfuerzo tiene lugar a través de una cadena de impulsos ejercidos por las caderas, el torso, el hombro, el brazo, el antebrazo y la muñeca. Al final de la trayectoria de lanzamiento el proyectil es liberado con una energía cinética que depende de su masa y de la velocidad conseguida durante su aceleración. Cada hondero es capaz de conseguir un máximo esfuerzo y para él la velocidad de lanzamiento dependerá del peso del proyectil, siendo mayor aquella cuanto menor sea éste. La velocidad de lanzamiento conseguida depende también aparentemente de la longitud de la honda, pero no tanto como podría imaginarse según veremos más adelante.

El proyectil se ve afectado en su vuelo por la resistencia del aire a su avance, que ejerce una fuerza proporcional a su sección frontal y al cuadrado de su velocidad.

$$F_r = k \cdot A \cdot V^2$$

Actúan dos factores en sentido contrario, el tamaño del proyectil, que favorece el avance contra el aire cuanto más pequeño sea, y la velocidad que lo dificulta, ya que la

velocidad será mayor cuanto más pequeño sea el proyectil dado que la potencia muscular se convierte en energía cinética del mismo.

Por otro lado, para igual peso de los proyectiles, y por tanto igual velocidad de lanzamiento, si usamos materiales de diferente densidad, por ejemplo piedra y plomo, vemos que para el plomo la sección es mucho más pequeña, y por lo tanto menor la resistencia del aire.

Otro factor importante a considerar es la forma del proyectil y su comportamiento aerodinámico. Los proyectiles fusiformes presentan menor superficie frontal que los esféricos para un mismo peso, especialmente cuando se desplazan bien orientados o con poca inclinación. Para ello el proyectil debe ser lanzado de punta y girando para que conserve su dirección por efecto giroscópico, lo que nos lleva a considerar la dinámica del proyectil dentro de la bolsa o “balística interior”.

La superficie del proyectil también es importante, produciendo menor fricción con el aire las superficies rugosas que las lisas debido a la creación de turbulencias semejantes a las producidas en una pelota de golf. Estas turbulencias aumentan también el efecto Magnus, lo que puede utilizarse para conseguir mayores alcances al elevarse la trayectoria. Sin embargo este efecto es sólo apreciable para proyectiles de poca densidad.

Y también es muy importante el diseño de la honda en relación al proyectil, tanto en las características de su material como en su resistencia al aire, en el grosor y estructura de sus cuerdas y en el diseño de la bolsa. Hay que decir que la honda debe ser diseñada de acuerdo al proyectil y no al contrario, ya que como veremos existe un proyectil óptimo que proporciona el máximo alcance y también otro para la mayor precisión.

Todos los factores considerados anteriormente para el proyectil se relacionan de manera compleja, y para evitarnos complicados cálculos matemáticos lo más práctico es utilizar un simulador balístico, que nos permitirá obtener multitud de datos cambiando los parámetros de entrada.

SIMULADOR DE TRAYECTORIAS

Por simplificar la disposición de un simulador específico para la honda, hemos tomado uno de propósito general, correspondiente al Tiro parabólico con rozamiento, ya que los habituales para el tenis o el golf no se adaptan bien a la honda.

Puede usarse en esta dirección en la Red:

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/dinamica/stokes2/stokes2.htm>

Se empleará el simulador correspondiente a **Fuerza de rozamiento proporcional al cuadrado de la velocidad**.

$$\mathbf{F_r} = \frac{1}{2} C_d \times \rho \times S \times v^2 \quad (1)$$

El simulador dibuja las trayectorias de un determinado proyectil correspondientes a diferentes ángulos de lanzamiento en presencia del aire y en el vacío a 45°.

Los datos de entrada son la **velocidad** y el valor de $\mathbf{b} = \mathbf{c}/\mathbf{m}$, siendo \mathbf{m} la masa del proyectil y \mathbf{c} un parámetro que está dado por: $\mathbf{c} = \frac{1}{2} \mathbf{C}_d \times \rho \times \mathbf{S}$

Siendo \mathbf{C}_d = coeficiente de arrastre

ρ = densidad del aire

\mathbf{S} = sección frontal del proyectil

El \mathbf{C}_d indica la mayor o menor facilidad de desplazamiento de un objeto en un fluido, y depende de factores como la velocidad, la sección frontal del objeto, la densidad y la viscosidad del fluido. Estos factores se relacionan mediante el denominado

$$\text{Número de Reynolds (Re)} = \rho \times \mathbf{D} \times \mathbf{V} / \eta$$

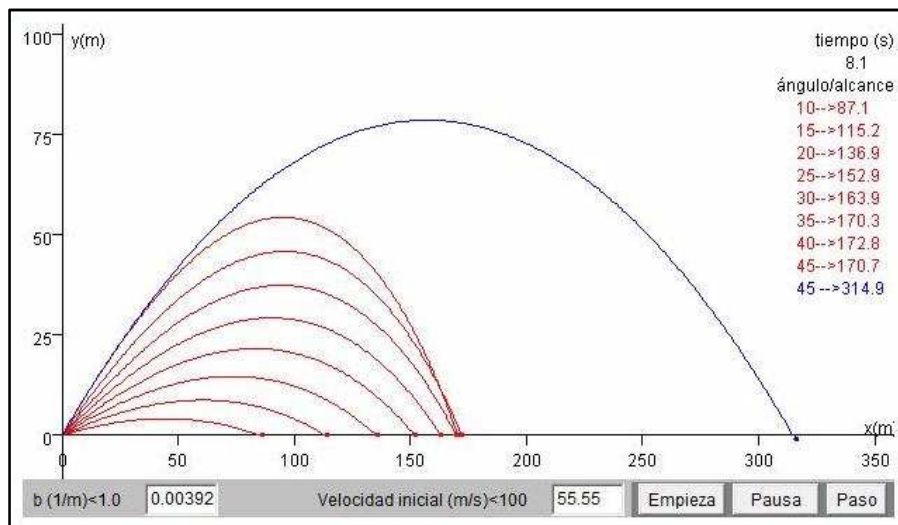
donde \mathbf{D} es la lg. mayor de la sección frontal, \mathbf{V} la velocidad, ρ la densidad y η la viscosidad del fluido.

Resulta así que el \mathbf{C}_d es una función del \mathbf{Re} , que normalmente se calcula de manera experimental. Para una esfera puede calcularse por la fórmula:

$$\mathbf{C}_d = 24/\mathbf{Re} + 6/(1 + \text{raíz de Re}) + 0,4$$

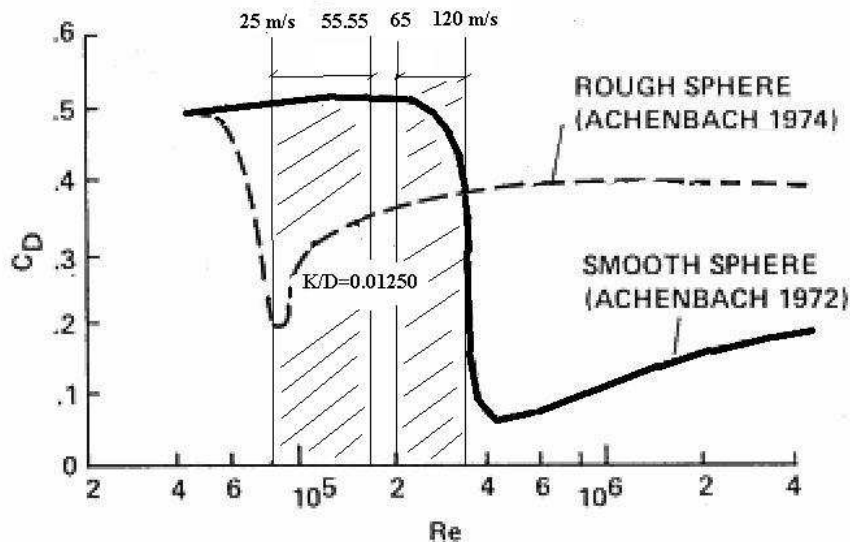
Veamos ya un ejemplo práctico de estas fórmulas aplicándolas a un campeón de honda capaz de lanzar a 200 Km/h, una velocidad que es alcanzada con frecuencia por los tenistas en el saque. La honda, de mayor longitud y más aerodinámica que la raqueta, sin duda puede lanzar a más velocidad, pero tomaremos los 200 Km/h como referencia básica junto con un proyectil esférico de piedra de 100 gr., semejante en tamaño a una pelota de golf.

El valor calculado de $\mathbf{b} = \mathbf{c}/\mathbf{m} = 0,0039296$, aplicado al simulador nos da un alcance máximo de **173 m** para un ángulo de 40°. Vemos que el alcance en vacío es de alrededor de 315 m, lo que supone una pérdida del 45% del alcance debido a la resistencia del aire.



COEFICIENTES DE ARRASTRE

Como hemos dicho, los coeficientes de arrastre son una función del número de Reynolds. Las curvas de Achenbach siguientes, obtenidas de manera experimental, relacionan ambos valores para el caso de una esfera.



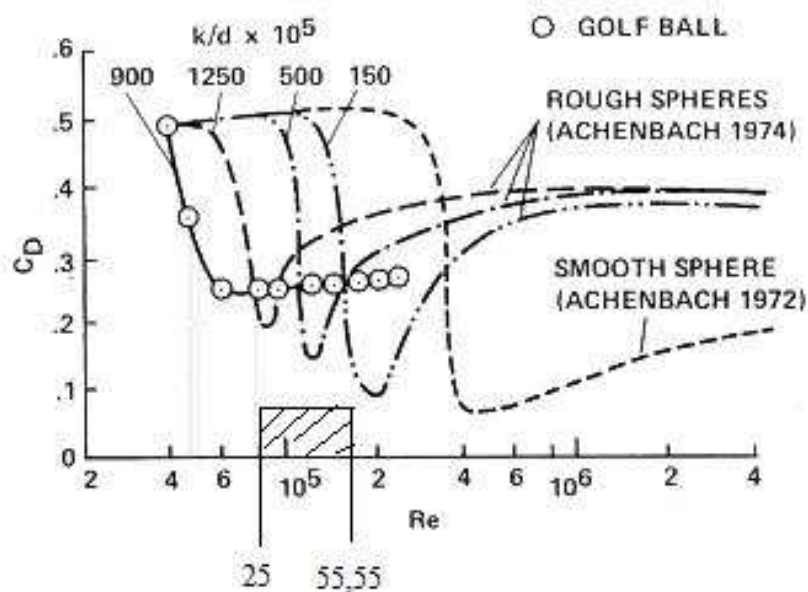
La curva de trazo grueso corresponde a esferas de superficie lisa, y como vemos el C_d se mantiene prácticamente cte. alrededor de 0,5 hasta valores de Re algo superiores a 200.000. Vemos que valores de Re mayores de 350.000 el C_d empieza a caer drásticamente ya que se entra en régimen turbulento, de menor resistencia al arrastre. Hemos representado en la parte superior diferentes velocidades de un proyectil estándar de 4 cm de diámetro sobre los valores de Re correspondientes. Para los valores habituales de un hondero, estaremos situados en la primera franja rayada, con $C_d = 0,5$ aproximadamente. Los 120 m/s (432 Km/h) correspondientes al descenso brusco del C_d son aparentemente inalcanzables para un hondero.

La curva de trazo discontinuo corresponde a esferas de superficie rugosa, y como vemos los valores del C_d son sensiblemente inferiores, lo que conducirá a alcances mayores. Aunque pueda parecer sorprendente, este es un efecto usado en las pelotas de golf, cuya superficie está cubierta de pequeñas depresiones. La curva corresponde a un proyectil de rugosidad $K/D = 0,01250$, que es la relación entre la profundidad de las depresiones y el diámetro del proyectil. En nuestro caso, para el proyectil de 4 cm de diámetro, la profundidad de las depresiones sería de medio milímetro. Vemos que para este proyectil y la máxima velocidad estándar de 55,55 m/s el C_d pasa a ser de 0,35 en lugar de 5. Si pretendemos calcular ahora el alcance del proyectil rugoso, debemos tener en cuenta que la velocidad del proyectil cambia a lo largo de la trayectoria y al hacerlo cambia también el C_d , al contrario que para el proyectil liso que permanece prácticamente constante. Al cambiar el C_d cambia también la resistencia del aire. El cálculo del alcance sería complejo si admitimos el efecto de un C_d variable, por lo que tomaremos un valor medio del para el rango de velocidades que adquiere el proyectil a lo largo de su trayectoria, que está entre los 55,55 m/s iniciales y

los 25 m/s estimados para su velocidad más baja. Le correspondería así un C_d medio en torno a 0,3. Aplicando el simulador obtenemos un alcance de 200 m. frente a los 173 calculados anteriormente para un proyectil natural liso (con pequeñas irregularidades y un C_d estimado de 0,45). Hemos conseguido pues un incremento de alcance del 15%. Un proyectil rugoso tal como éste es fácil de fabricar golpeando uno liso con otra piedra o un martillo.

PROYECTILES RUGOSOS

Profundicemos un poco más en el comportamiento de los proyectiles rugosos. La siguiente gráfica de Achenbach muestra las curvas de diferentes grados de rugosidad y la correspondiente a las pelotas de golf, que están diseñadas para optimizar su alcance en base a este fenómeno.



La curva de la izda. trazada sobre pelotas de golf tiene unas características extraordinarias, con un C_d casi constante para toda la gama de velocidades de la pelota de golf, hasta las más altas. Las siguientes son curvas de distinta rugosidad, desde la vista anteriormente de grado 0,01250 hasta la de 0,00150, que correspondería a depresiones diez veces menos profundas que las de la primera. Realmente existen curvas indefinidas hasta la correspondiente a la superficie lisa.

En la gama de velocidades que nos estamos moviendo con la honda (25 – 55,55), señaladas en la parte inferior del gráfico, vemos que la rugosidad óptima para nuestros intereses sería la correspondiente a la curva de índice 0,00500, ya que en ella se aprovecha la parte más baja y tendríamos un valor medio del C_d óptimo. Corresponde a nuestro proyectil de 4 cm con depresiones de 1/5 de milímetro. Para él estimaríamos un C_d medio de 0,2 que nos daría un alcance máximo de 248 m, un 43% más que para el proyectil natural liso.

Aunque estemos manejando aproximaciones demasiado favorables que en la práctica pueden ser difíciles de alcanzar, es evidente la importancia que tiene la elección

de un proyectil adecuado a nuestra potencia de disparo, y que un grado de rugosidad pequeño, quizás el correspondiente a una piedra natural de granito sin pulir, puede resultar excelente. También que deben evitarse los proyectiles demasiado pulidos de cara a conseguir el máximo alcance.

MATERIAL DE LOS PROYECTILES

Como vimos en la fórmula (1), la fuerza de rozamiento es proporcional a la sección frontal del proyectil. Si empleamos materiales de distinta densidad, para un mismo peso la sección de los proyectiles será más pequeña cuanto mayor densidad, menor la fuerza de rozamiento y mayor el alcance. Veamos el alcance para nuestro tirador estándar y proyectil esférico de plomo de 100 gr.

La velocidad de lanzamiento será la misma de 55,55 m/s ya que no cambia la masa. El C_d permanece constante como vimos para proyectiles lisos, en torno al 0,45 admitiendo ligeras imperfecciones en la superficie. Lo que cambia en la fórmula es la sección del proyectil. Haciendo los cálculos para el valor de $b = c/m = \frac{1}{2} C_d \times \rho \times S/m$ nos resulta de 0,0015041 en lugar de 0,0039296 calculado inicialmente para el proyectil estándar de piedra. Y usando el simulador obtenemos un alcance máximo de 234 m. frente a los 173 iniciales, es decir, un aumento del 35%.

Veamos ahora un proyectil de arcilla secada al sol, usado ampliamente en la antigüedad y quizás la opción más fácil para confeccionar proyectiles estandarizados. Su densidad es de 1,53 gr/c.c. y el valor de b es 0,0057379, con el que el simulador nos da un alcance de 146 m. Resumamos en un cuadro estos valores:

Peso proyectil = 100 gr.
Velocidad lanzamiento = 55,55 m/s (200 Km/h)

Material	Alcance (m)
Arcilla secada al sol	146
Piedra (cuarcita)	173
Plomo	234

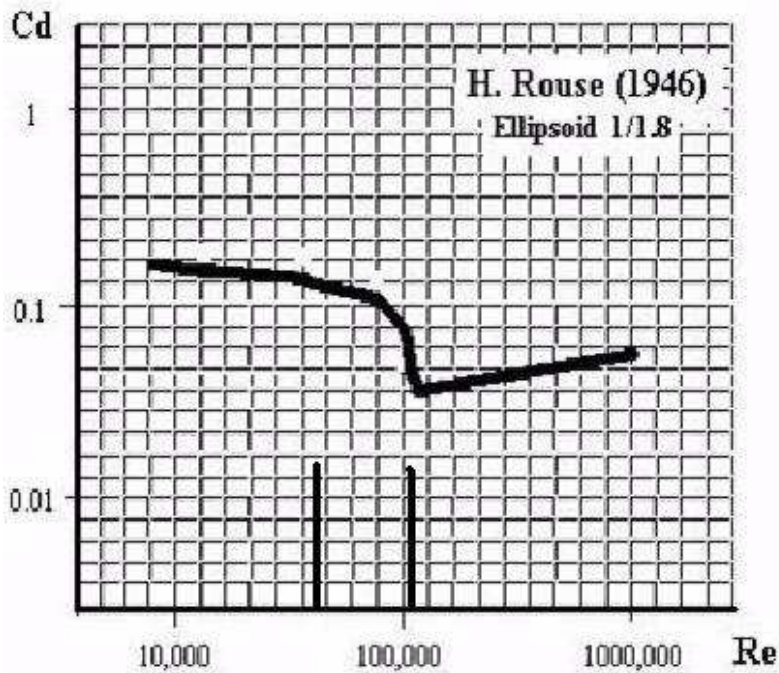
FORMA DE LOS PROYECTILES

Hemos visto a lo largo de la Historia que enseguida se adoptó la forma elipsoide o ahusada en lugar de la esférica, si bien esta nunca se abandonó del todo. Ello indica la ventaja de este tipo de proyectiles elongados. La siguiente gráfica nos presenta los valores del C_d en función del Re para proyectiles elipsoides de razón entre ejes 1:1,8. Esta relación se da entre proyectiles arqueológicos de arcilla, pero los típicos glandes de plomo son más alargados, de relación superior a 1:2. Dado que no es fácil que un glande vuele perfectamente alineado con su eje mayor hacia la diana, tomaremos estos valores

del Cd para los glandes, cuyos alcances ideales serían superiores a los estimados con estas curvas.

Como los valores del Re son proporcionales al diámetro de la sección frontal, resulta que los Re del proyectil elipsoide son igual a los del proyectil esférico multiplicados por 0,822 para el mismo volumen y material. Así pues dado que con el proyectil esférico nuestro tirador con proyectil de 100 gr se movía entre valores 84800 y 174600 de Re, ahora se moverá entre valores de 69.700 y 143.500, en el área marcada en la gráfica, correspondiendo un Cd medio de 0,1.

El valor calculado para **b** es 0,0002258 y el simulador nos da un alcance de **300 m** frente a los 173 para el proyectil esférico del mismo peso, es decir, un 73% más.



Vemos pues la eficacia de los proyectiles ovalados, naturalmente siempre que el vuelo esté bien orientado. En la práctica siempre habrá algo de inclinación del eje mayor sobre la trayectoria de vuelo, por lo que la sección frontal será algo mayor y el alcance real menor que el calculado.

Repitamos el cálculo para proyectiles de arcilla y plomo y resumamos en una tabla

los valores obtenidos:

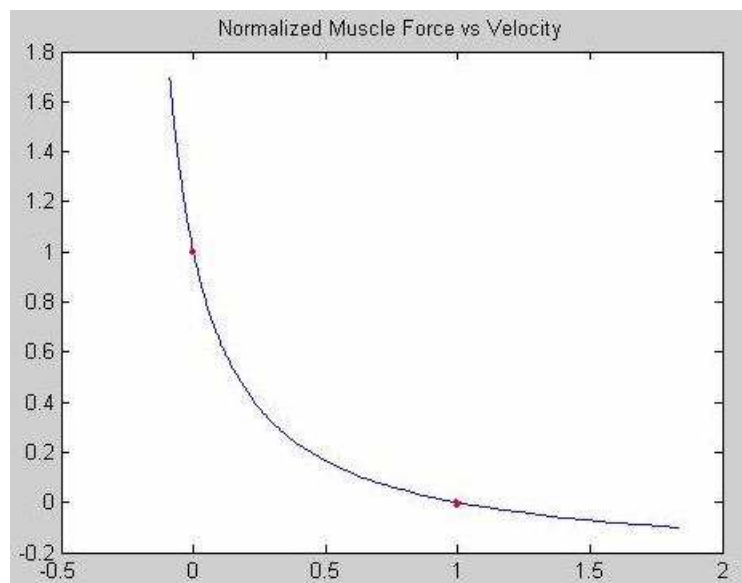
Peso proyectil = 100 gr.
Velocidad lanzamiento = 55,55 m/s (200 Km/h)
ALCANCES

	<u>Esfera</u>	<u>Elipsoide</u>	<u>Increment. (%)</u>
Arcilla	146	262	79
Piedra	173	276	60
Plomo	234	300	28

Del cuadro se sacan curiosas observaciones. El efecto de la forma aerodinámica es mucho mayor en los proyectiles de arcilla que en los de plomo, es decir, aumenta mucho con el tamaño del proyectil. Es más condicionante la forma aerodinámica que el tamaño, ya que un elipsoide de arcilla tiene más alcance que una esfera de plomo, mucho más pequeña. Debido a ello, no hay mucha diferencia de alcance en los tres proyectiles elipsoides, de un 14% entre extremos, mientras que entre los esféricos hay un 60%.

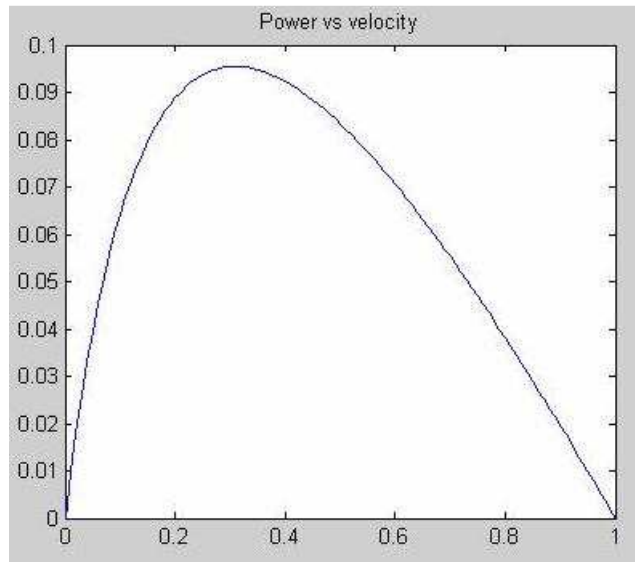
DINÁMICA DEL LANZAMIENTO

Hasta ahora hemos considerado un proyectil estándar de 100 gr de peso en nuestros cálculos, y diferentes características del mismo que nos permitían mejorar mucho el alcance. Ahora intentaremos analizar la relación que existe entre el peso del proyectil y la velocidad con la que se puede lanzar. Esa relación será distinta para cada hondero, ya que su potencia muscular será diferente y también lo será su naturaleza muscular, es decir, la relación fuerza/velocidad que sus músculos al contraerse son capaces de desarrollar. Hay musculaturas que son más aptas para contraerse con velocidad y otras para desarrollar fuerza. De la combinación de estas dos cualidades dependerá también el peso óptimo del proyectil. La relación fuerza-velocidad de contracción muscular viene dada por la fórmula de Hill, que es una hipérbola de ecuación : $(V + b)(F + a) = b(F_0 + a)$ donde a,b y F_0 son constantes. La representación gráfica es la siguiente:



Las coordenadas son los valores relativos de la fuerza y de la velocidad respecto a sus valores máximos, es decir, la mayor fuerza estática que puede soportar el musculo sin moverse y la mayor velocidad de contracción sin fuerza alguna que se le oponga. La parte efectiva de la curva es la comprendida entre los valores 0 y 1 en ambos ejes. Cuanta mayor velocidad de contracción desarrollemos, menor fuerza podremos ejercer con el músculo. Podría pensarse, como supusimos anteriormente de cara a unas

primeras consideraciones, que somos capaces de desarrollar una máxima potencia muscular que podría convertirse en fuerza o velocidad de manera proporcional, según la expresión $F \times V = \text{cte.}$ pero la realidad es distinta según puede apreciarse en la siguiente grafica que representa la potencia muscular en función de la velocidad.

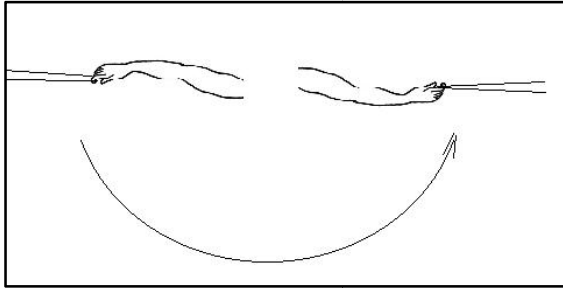


Vemos que la potencia muscular es variable y que su máximo valor se consigue para una velocidad de contracción del 30 % de su valor máximo. La contracción de los músculos se transmite por medio del sistema óseo a la mano, que es en último término la que mueve la honda. El sistema óseo-muscular implicado en el lanzamiento no es simple, sino formado por una serie de palancas óseas actuadas por músculos que superponen su acción. Las principales son el brazo y el antebrazo, movidas por los músculos del hombro y brazo respectivamente, aunque también actúan de manera apreciable las caderas y el torso, incluso las piernas, al avanzar un paso en el lanzamiento, y la mano en la última sacudida antes de liberar el proyectil. Hemos aterrizado en la biomecánica, con su compleja arquitectura, y habrá que encontrar simplificaciones y equivalencias para disponer de un modelo sencillo que nos permita al menos hacer cálculos aproximados.

Hay que decir que el impulso principal de lanzamiento consiste en un violento tirón de la mano desde atrás hacia adelante, después de algún tipo de volteo o movimiento destinado a tensar las cuerdas de la honda y posicionarla en el punto de inicio de la aceleración. Según sea el estilo, se movilizarán grupos de músculos distintos, por lo que de cara al cálculo del alcance máximo habría que determinar qué estilo es el más favorable. Esquematizaremos dos estilos que pueden representar a la totalidad con mayor o menor aproximación.

Lanzamiento por debajo:

El lanzamiento desde volteo vertical consiste básicamente, como hemos visto en el texto principal, en un movimiento circular desde atrás adelante del brazo extendido, según se aprecia en la figura siguiente. La impulsión que se produce la hace básicamente la

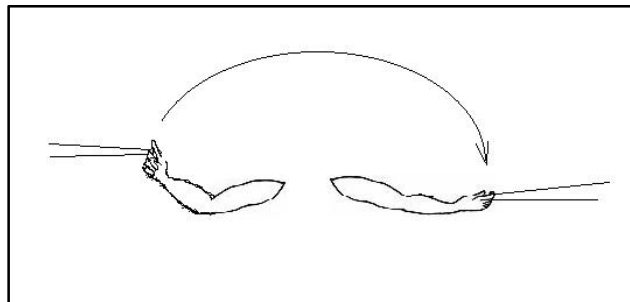


musculatura del hombro, pectoral y dorsal, con el brazo extendido describiendo un círculo. Aunque durante el lanzamiento se da normalmente un paso adelante y la trayectoria de la mano en consecuencia es más abierta, el impulso sigue siendo fundamentalmente

el circular de 180° que hace el brazo alrededor del hombro. Hay que decir que es un buen estilo para distancia.

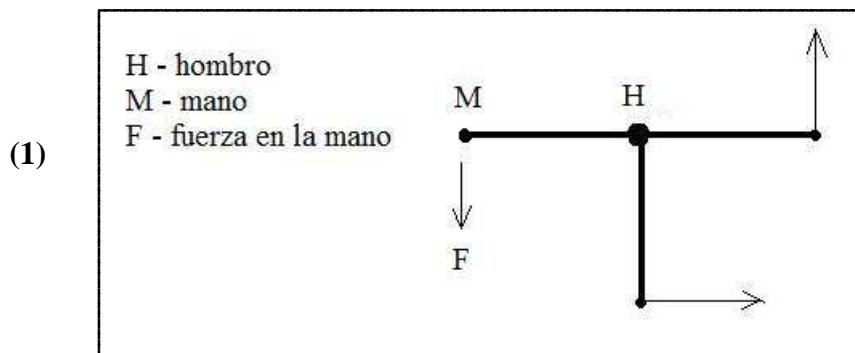
Lanzamiento por arriba:

Es el estilo más común, que admite muchas variantes según la inclinación del plano de lanzamiento. Si es vertical y a la altura de la cabeza, el brazo en su posición inicial está algo más doblado que en la figura y girado hacia fuera del dibujo, formando casi



un ángulo recto con su posición final extendido. Si el plano de lanzamiento es inclinado o lateral, la posición del brazo es la del dibujo, estando en un plano más o menos inclinado, en el que transcurre toda la trayectoria de lanzamiento. Aunque parece semejante al anterior estilo, salvo que el lanzamiento es por arriba, sin embargo en lugar de girar todo el brazo a la vez se propulsa primero el codo y enseguida el antebrazo, para finalmente después dar una sacudida con la muñeca. La impulsión principal la realiza la musculatura del hombro, la pectoral, dorsal y la del antebrazo. No obstante, las diferentes variantes movilizan en diferente grado los grupos de músculos, siendo en el caso de lanzamiento lateral muy semejante al primero estilo.

El primer estilo, y el segundo en su variante lateral, se pueden asimilar mecánicamente a una palanca simple con punto de apoyo en el hombro. Tomaremos ese modelo para nuestros cálculos aproximados. El esquema mecánico es el siguiente:



Aunque los músculos que actúan en la primera y segunda parte del lanzamiento son distintos, supondremos una fuerza media constante a lo largo de toda la trayectoria y por

tanto una aceleración constante de la mano. Le corresponderá una curva F – V como la anteriormente expuesta.

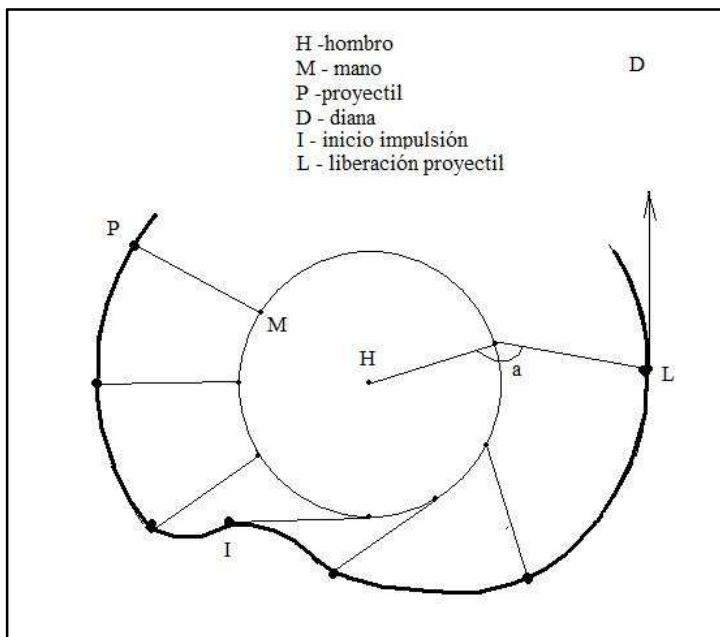
Para definir la curva correspondiente a nuestro campeón hondero tenemos que considerar que el tipo de palanca del brazo tiene el apoyo en un extremo (la articulación del hombro) y la inserción del músculo un poco separado de él, mientras que la carga está en el otro extremo del brazo. Es una palanca pues que demultiplica la fuerza del músculo y multiplica su velocidad. El comportamiento de la mano responderá, partiendo de esos valores modificados, a la misma curva de valores relativos que la musculatura del hombro. Para definirla tendremos que estimar los valores de la **fuerza máxima** de tracción estática que puede soportar su mano y la velocidad de su movimiento sin carga. Respecto a la fuerza, tomaremos un valor de **55 Kg**, extrapolado de la medida para una persona normal en un aparato de tracción. En cuanto a la **velocidad máxima** tomaremos la de **45 m/s** (162 Km/h), correspondiente a un buen pitcher de baseball que lanza una pelota de 142 gr a 160 Km/h. La **fórmula de Hill** puede concretarse así para nuestro hondero:

$$(45V_r + 11,77)(50F_r + 13,28) = 744,8$$

TRAYECTORIA DEL PROYECTIL EN EL VOLTEO

En la práctica, la trayectoria circular anterior supuesta para el brazo será más alargada, ya que el hombro y la cadera se avanzan al disparar e incluso se da un paso adelante mientras el brazo gira, pero la impulsión principal es relativa al esfuerzo que el hombro hace girando, por lo que seguiremos considerando una trayectoria circular de impulsión como aproximación para nuestros cálculos.

Supondremos un lanzamiento lateral en un plano paralelo a la línea del horizonte y con una inclinación del mismo sobre el suelo de unos 40 grados, que se aproxima a la inclinación óptima para el máximo alcance. El proceso de lanzamiento comienza con volteo previo lateral de la honda alrededor de la muñeca para movilizarla y tensar las

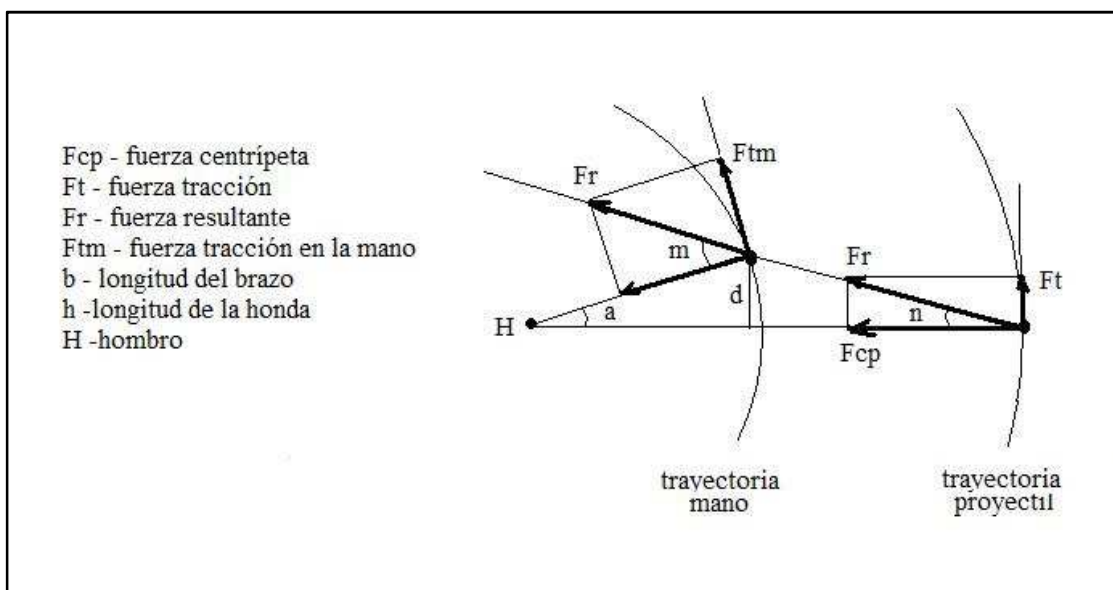


cuerdas, seguido de un movimiento circular más amplio con el brazo estirado, que comienza con el brazo al frente y continúa hasta que la mano está detrás del cuerpo, que es cuando comienza la impulsión propiamente dicha. En esa trayectoria previa de volteo amplio de 180 grados a velocidad constante, la honda, sometida exclusivamente a la fuerza centrífuga

correspondiente a la velocidad V_0 de volteo (se desprecia el pequeño rozamiento del aire), se situará en prolongación del brazo. A partir del comienzo de la impulsión, suponemos que se ejerce una fuerza de tracción cte. transmitida por la mano que irá acelerando el proyectil y aumentando su velocidad hasta alcanzar la velocidad V_1 de lanzamiento. El proceso efectivo de impulsión tiene lugar durante un ángulo descrito por el brazo de unos 90° , desde una posición de la mano detrás del cuerpo hasta la posición lateral de liberación. No obstante, la aparición de la fuerza de tracción de la mano no puede ser instantánea aunque si muy rápida, y el proyectil se irá quedando retrasado inicialmente por inercia hasta que su velocidad vaya aumentando progresivamente y la creciente fuerza centrífuga vaya enderezándolo en relación a las cuerdas de la honda, aumentando el ángulo "a" que forma la honda con el brazo, y describiendo el proyectil una trayectoria del tipo de la figura siguiente. Se aprecia también que al principio de la impulsión, con el proyectil a una velocidad cercana todavía a V_0 , aunque la mano está casi todavía en el punto de inicio de la impulsión, detrás del cuerpo, la honda se ha quedado retrasada, por lo que la trayectoria de lanzamiento de 90° que habíamos supuesto para la mano se prolonga 45° más hacia atrás para el proyectil, mientras que la liberación del mismo tiene lugar a los 90° aproximados para el proyectil aunque la mano los sobrepase.

ALCANCE MÁXIMO

Veamos ahora con un ejemplo práctico los cálculos que podemos hacer en base a la distribución de fuerzas en la trayectoria. Sobre el proyectil actúan las dos fuerzas citadas, de tracción, que lo acelera en su trayectoria, y la fuerza centrípeta que lo sujeta en ella. Ambas resultan de la fuerza F_r que la mano trasmite a lo largo de las cuerdas. Esta es la única manera posible de acelerar un proyectil con un medio flexible como son



las cuerdas de la honda. Debido a la inclinación de la honda respecto al brazo, la mano puede transmitir la fuerza F_t de tracción que acelera el proyectil. A su vez, la fuerza F_r

en la mano, se descompone por un lado en una fuerza a lo largo del brazo que es ejercida por unos músculos del brazo y hombro distintos de los que rotadores que propulsan el brazo hacia adelante en el lanzamiento. La otra componente de la fuerza es la propia de la impulsión, que en las curvas de Hill hemos ajustado para la mano, como dijimos.

Veamos las ecuaciones que resultan:

Datos de partida

Masa del proyectil = m

Lg. honda = h

Lg. brazo = b

R = b + h

V_o = velocidad inicial del proyectil

V₁ = velocidad de disparo del proyectil

ω_o = 1,36 rev/sg

V_o = 8,5 · R

F_o = Fuerza estática máxima en la mano

V_{mm} = velocidad máxima en la mano sin carga

(ω_o se ha determinado en base a valores experimentales. Le corresponde una V_o = 1,36 · 2π · R = 8,5 · R).

Calcularemos en primer lugar la lg. de la trayectoria de impulsión, que como dijimos describe un ángulo aproximado de 135°, si bien el radio en la primera parte es inferior a los 70 cm de la honda. Calculando el radio medio, resulta una trayectoria de aproximadamente un 27% superior a la correspondiente al giro de 90 grados.

lg = 1,3 · π/2 · R = 2 · R De aquí deducimos el tiempo y la aceleración:

$$Lg = \frac{1}{2} (V_1 + V_o) \cdot t \text{ , , } t = 4 \cdot R : (V_1 + V_2) \text{ , , } a = (V_1 - V_o) : t = (V_1 - V_o) (V_1 + V_o) : 4 \cdot R$$

A esta aceleración le corresponde una fuerza de tracción de:

$$\underline{Ft = m \cdot a = (V_1 - V_o) (V_1 + V_o) \cdot m : (39,2 \cdot R)} \quad (1)$$

Calculemos ahora el ángulo m de la siguiente manera:

$$\text{tang } m = Ft : F_{cp} \quad F_{cp} = m \cdot V_1^2 : R \text{ , ,}$$

$$\underline{\text{Tang } n = 0,25 \cdot (V_1 - V_o) (V_1 + V_o) : V_1^2} \quad (2)$$

Por otro lado, en la fig. puede calcularse fácilmente:

$$\text{sen } a = \text{sen } b \cdot h : b \quad (3)$$

$$\mathbf{m = a + n} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} F_{tm} &= F_r \cdot \sin m \quad \sin n = F_t : F_r ,, \\ \mathbf{F_{tm} = F_t \cdot \sin m : \sin n} \quad (5) \end{aligned}$$

Por otro lado, en el punto de liberación la honda forma un ángulo pequeño respecto a la dirección del brazo, por lo que podemos estimar que la velocidad del proyectil se va aproximando al doble de la velocidad de la mano V_m :

$$\mathbf{V_m = V_1 \cdot b : R} \quad (6)$$

Calcularemos el valor de la velocidad relativa:

$$\mathbf{V_r = V_m : V_{max}.} \quad (7)$$

De la fórmula de Hill obtendremos la fuerza relativa F_r correspondiente y de ella obtendremos el máximo valor de la fuerza que puede desarrollar en la mano el hondero a esa velocidad de disparo (F_{mm}). Si la F_{tm} calculada antes es inferior a esta F_{mm} , el disparo es viable, aunque sobrará potencia. Si F_{tm} fuera superior a F_{mm} el disparo no sería viable por falta de potencia del hondero. Iterando el cálculo para diferentes velocidades de lanzamiento obtendremos una para la que $F_{tm} = F_{tmm}$, que será el valor óptimo o de **máximo alcance**.

Resumamos el proceso de cálculo:

Proceso de cálculo:

$$\mathbf{F_t = (V_1 - V_o)(V_1 + V_o)m/39,2R}$$

$$\mathbf{Tang n = 0,25(V_1 - V_o)(V_1 + V_o)/V_1^2}$$

$$\mathbf{\sin a = \sin n \cdot h / b}$$

$$\mathbf{m = a + n}$$

$$\mathbf{F_{tm} = F_t \cdot \sin m / \sin n}$$

$$\mathbf{V_m = V_1 \cdot b / R}$$

$$\mathbf{V_r = V_m / V_{max}}$$

$$\mathbf{F_r = 14,89 / (45V_r + 11,77) - 0,265}$$

Lo aplicaremos a nuestro hondero, cuyos datos de partida son:

$$b = 0,7$$

$$h = 0,7$$

$$V_o = 12$$

$$F_o = 55$$

$$V_{mm} = 45$$

Haciendo el cálculo para diversos valores de velocidad de la mano, podemos llegar a horquillar un valor óptimo de velocidad de lanzamiento, según se aprecia en la tabla:

V_1	Fmm	Ftm
48	8,3	7.6
49	8	8
50	7.8	8,7

Para una velocidad de disparo de 49 m/s la fuerza que debe soportar la mano es justo la máxima que puede soportar para esa velocidad. Para velocidades superiores ya no es capaz de soportarla y para velocidades inferiores le sobraría potencia sin usar. Esta velocidad óptima de 49 m/s (176 Km/h), es algo inferior a la máxima supuesta inicialmente para nuestro campeón (200 Km/h). En el simulador obtenemos el alcance para esa velocidad.

Alcance máximo para nuestro hondero = 148 m.

Velocidad de lanzamiento = 176 Km/h

Curiosamente este alcance está en línea con los record de distancia de los últimos años en Baleares, el único lugar donde los registros son fiables. Los records Guinness son muy superiores, pero aparte de la incertidumbre sobre la fiabilidad de su registro, hay que decir que hay otros factores que juegan un importante papel en el alcance, como la longitud de la honda y su diseño, y naturalmente el peso del proyectil. Recordemos que nuestro hondero lanzaba un proyectil de 100 gr con una honda de 70 cm, lo que sin duda no son valores óptimos.

LONGITUD DE LA HONDA

Es evidente que el alcance depende de la longitud de la honda, pero veamos en qué proporción aumenta. Supondremos una honda ideal, sin rozamiento de las cuerdas y bolsa con el aire, como hasta ahora. Ensayaremos el alcance para hondas corta (45 cm), media (75 cm) y larga (100 cm).

Los resultados son:

Lg. honda (cm)	45	70	100
Vel. Disparo optima	44	49	54
Alcance	128	148	167
Alcance/lg.	2,84	2,1	1,6
R (m) = brazo + honda	1,15	1,40	1,70
Veloc/radio	38,26	35	31,7

Vemos que el alcance no es proporcional a la lg. de la honda, sino que crece en una proporción bastante menor. Una honda de 100 cm, de lg un 122 % mayor que una de 45 cm, tiene sin embargo un alcance sólo un 30 % superior. De ahí que en la práctica, salvo en competiciones de alcance, las hondas de longitud media sean las más aconsejables, ya que respecto a una larga solo pierden un 13% de alcance, ganando en precisión y manejabilidad.

Vemos también que la velocidad óptima no crece en la misma proporción que el radio de lanzamiento o la lg de la honda, sino progresivamente inferior.

Obsertvamos no obstante que hemos mejorado el alcance de nuestro hondero usando la honda larga, pasando de los 148 m a los 167m con un proyectil de 100gr. Veamos a continuación el efecto del peso del proyectil en el alcance y cual pudiera ser el peso óptimo.

PESO ÓPTIMO DEL PROYECTIL

Usaremos la honda de lg. media y ensayaremos pesos entre 15 y 60 gr. Los valores óptimos de alcance obtenidos usando el procedimiento de cálculo y el simulador son:

Masa (gr)	20	30	35	40
Vel. Optima (m/s)	68,5	63,8	61,9	60,3
Parámetro b	0,006718	0,005869	0,005575	0,05333
Alcance (m)	164,8	166,3	165,5	161,8

Como vemos, aunque la diferencia en alcance es mínima para todos los proyectiles, el de **30 gr** parece el óptimo. En la tabla anterior vimos el alcance **para 100 gr = 148 m**. También observamos que el alcance con honda larga y 100 gr. es algo superior a éste con honda media y 30 gr, sin los problemas añadidos de una honda especialmente ligera. Y es que, evidentemente, el uso de proyectiles ligeros tiene ciertos inconvenientes, tales como la necesidad de empleo una honda muy ligera también, que presente poca resistencia al aire en el volteo y sobre todo que se tense bien en él con el escaso peso del proyectil, ya que en caso contrario la transmisión del impulso del disparo sería ineficiente. También se explica contemplando este cuadro la existencia de proyectiles arqueológicos de pesos tan pequeños como 20 y 25 gr.

Para terminar con este apartado, veremos el alcance para el peso óptimo de proyectiles esféricos y elípticos de plomo. Probaremos con pesos pequeños, ya que ahí estará el proyectil óptimo.

ESFÉRICOS

Masa	5	10	15	20
Velocidad	80,7	75,4	71,6	68,5
b	0,00408	0,00324	0,00283	0,00257
Alcance	251,3	264	265,7	263,1

Como vemos el peso óptimo es de 15 gr.

GLANDES (1:1,8)

Masa	1	2	3	5
Velocidad	86,8	85	83,5	80,7
b	0,001048	0,000832	0,0007268	0,000613
Alcance	492	512	518	511

El peso del glande óptimo es extraordinariamente pequeño, lo que a pesar de ser sorprendente resulta todavía superior al peso del plomo de una pequeña bala de calibre .22, de probada efectividad y alcance. El problema de proyectiles tan pequeños es la imposibilidad de propulsarlos individualmente con una honda, y cualquier solución utilizada, como el disparo de un grupo de ellos o el uso de una bolsa tarada, se traduce en la disminución de la velocidad de lanzamiento.

La importancia del empleo de proyectiles ligeros para optimizar el alcance, y los condicionantes que ello implica en la honda, nos lleva a considerar el estudio de su diseño.

DISEÑO DE UNA HONDA LIGERA

Analizaremos el comportamiento de una honda ligera para proyectil natural de piedra esférico. Para otros proyectiles cambiarán de manera considerable tanto los pesos mínimos como el alcance, según vimos anteriormente. Hay varios aspectos a considerar.

Rozamiento con el aire de las correas de la honda y la bolsa en el lanzamiento.

Este efecto va a restar algo de la fuerza disponible en la mano, por lo que el alcance será menor que el teórico calculado anteriormente. Calculemos su valor para una honda media, de bolsa óptima, dividida, que no añada rozamiento al del proyectil que contiene, y unas correas formadas por cuerda prefabricada de 5 mm de diámetro. El proyectil será de 100 gr (diámetro = 4 cm) y la velocidad la óptima de 49 m/s.

Bolsa-proyectil:

$C_d = 0,45$ (el del proyectil esférico)

$F_r = 1/2 C_d \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 = 0,09 K_p$

Cuerdas:

$C_d = 1$ (cilindro largo)

Veloc.² media de las cuerdas en el disparo = $1/2(V_{\text{mano}}^2 + V_{\text{bolsa}}^2) = 1500$

$F_r = 0,7 K_p$ (aprox. para las dos cuerdas).

Fuerza rozamiento total = $0,8 K_p$ (aprox.)

La fuerza en la mano para el lanzamiento a 49 m/s es de 8 Kp, luego se pierde el 10% de ellos. Vemos la importancia de disminuir el diámetro de las cuerdas de la honda. Dado que la sección transversal al aire es proporcional al diámetro, el rozamiento cambiará proporcionalmente a él. Vemos también que el rozamiento es proporcional a la longitud de las cuerdas, lo que puede ser condicionante de cara al empleo de proyectiles pequeños, que sin duda limitarían la longitud de la honda para conseguir un volteo adecuado, como veremos.

Tensado previo de las cuerdas

Las cuerdas están hechas de fibras, naturales o artificiales, agrupadas según algún procedimiento de torcido, trenzado, encamisado, etc, que las convierte en un todo de características propias. Las fibras tienen una característica de elasticidad determinada que las alarga una determinada cantidad que depende de la fuerza de tracción aplicada a ellas y de su naturaleza. Además, las fibras no son perfectamente rectas, dependiendo de su elaboración la mayor o menor curvación, alabeo o ensortijamiento. Por eso, antes de que la fibra empiece a trabajar a tracción, debe enderezarse por flexión precisando la acción de una fuerza mínima. Además, al trenzar o componer la cuerda en base a numerosas fibras, de manera que resulte la trenza suficientemente flexible, las fibras conservan parte de deformación inicial además de la producida por el trenzado. Ello hace que toda cuerda, antes de poder trabajar a tracción, deba estirarse un poco de manera no elástica. Después ya se comporta elásticamente, siendo su alargamiento proporcional a la fuerza de tracción aplicada. Este efecto se comprueba experimentalmente sometiendo la cuerda a cargas progresivas y midiendo alargamientos. Cuando los alargamientos empiecen a ser proporcionales a las fuerzas aplicadas, todas las fibras de la cuerda estarán trabajando a tracción. Ese es el punto que debe conseguirse previamente al impulso de lanzamiento, ya que en caso contrario dicho impulso de la mano no se transmitiría de manera adecuada al proyectil.

Es evidente que cuanto más gruesa sea la cuerda, mayor será esa fuerza de tensado previo. Dicha fuerza se va a conseguir por medio del volteo, que proporcionará al proyectil una fuerza centrífuga dependiente de la masa del mismo. La velocidad angular de volteo podemos considerarla constante para cualquier honda, ya que debe permitirnos un buen control sobre el inicio de la impulsión, por lo que la fuerza de tensado previo va a depender básicamente del peso del proyectil. Dada una honda determinada, el peso mínimo del proyectil a emplear quedará, pues, determinado.

Si llamamos:

F_0 = fuerza de tensado previo

V_0 = velocidad de volteo

M_n = masa mínima del proyectil

R = lg de la honda

$$F_0 = M_m \cdot V_0^2 / R, \text{, } \underline{M_m = R \cdot F_0 / V_0^2} \quad (a)$$

Nos quedará por determinar F_0 para calcular M_m , la masa del proyectil mínimo para esa honda. La determinación hay que hacerla por procedimientos experimentales.

Por otro lado, para una determinada fibra y tipo de trenza, y para una longitud dada, la fuerza F_0 va a variar, de manera aproximada, proporcionalmente a la sección de la cuerda, como dijimos, es decir, al cuadrado del radio, lo cual quiere decir que cuanto más delgada sea la cuerda menor será la fuerza F_0 de tensado previo, es decir, menor será el peso del proyectil mínimo. Si queremos conseguir grandes alcances, ya vimos en el anterior apartado que los proyectiles deben ser ligeros, y en consecuencia las hondas también, lo que se consigue fundamentalmente utilizando cuerdas delgadas.

$$F_0 = K \cdot \pi R^2 = K' \cdot R^2$$

F_0 varía con el cuadrado del diámetro de la cuerda, decreciendo muy rápidamente con él. La determinación experimental de F_0 para una honda dada, se hace como dijimos, sometiendo la honda a tracción hasta que los alargamientos empiecen a ser proporcionales a la fuerza, lo que según la Ley de Hooke significará que se empieza a comportar como un elemento elástico.

Veamos un caso práctico:

Cuerda de fibra sintética trenzada de 8 mm.

$L_g = 1$ m.

F_0 (experimental) = 1,5 Kp

Comparación con otra de 2 mm

$R_0 = 4$ mm

$R_1 = 1$ mm

De (a) : $M_{m_0} = 200$ gr. $M_{m_1} / M_{m_0} = F_1 / F_0$

$F_1 / F_0 = R_1^2 / R_0^2$, , $M_{m_1} / M_{m_0} = R_1^2 / R_0^2$, , $M_{m_1} = 12,5$ gr.

Considerando las dos cuerdas de la honda, el **peso mínimo** para cuerda de 2 mm sería:

Proyectil mínimo = 25 gr.

Además, ese peso mínimo debería proporcionar por inercia en el volteo el suficiente agarre por rozamiento en la bolsa, de manera que el proyectil no resbalase en ella. La fuerza de rozamiento la produce la Fuerza centrífuga empujando al proyectil contra la bolsa y debería ser igual o superior al peso del proyectil para que este no se caiga de ella en el volteo. Este aspecto nos llevará más adelante a considerar el diseño de la bolsa, ya que de él dependerá la superficie de contacto con el proyectil y la mayor o menor fuerza de rozamiento conseguida.

$$F_r = k \cdot F_c$$

donde k es el coeficiente de rozamiento proyectil-bolsa, característico de la naturaleza del material de ambos.

Vemos pues que podemos albergar esperanzas de conseguir alcances máximos usando cuerdas delgadas. Ahora analicemos que problemas puede ocasionarnos este uso. Básicamente son dos: elasticidad de las cuerdas y torsión de las mismas.

Elasticidad de las cuerdas

Una cuerda, una vez alcanzado el tensado previo, se comporta bajo tracción siguiendo la ley de Hooke, común para todos los cuerpos elásticos:

$$\text{Extensión} = k \cdot \text{tensión}$$

Donde extensión es el incremento de longitud por unidad y tensión la fuerza por unidad de sección de la cuerda. El coeficiente K, característico de cada cuerda, mide su capacidad para estirarse más o menos de manera elástica, esto es, sin deformarse posteriormente ni romperse. Desde el caucho hasta una varilla metálica, podemos encontrar todos los grados de elasticidad de los materiales. Hay que decir que una cuerda muy elástica se comporta como un muelle, de manera que absorbe energía acumulándola en su deformación para devolverla una vez liberado. Esto no es conveniente para una honda, ya que al liberarse el proyectil la fuerza acumulada no se transmitiría al mismo y se perdería. El efecto se observa claramente si intentamos hacer una honda con cuerdas de caucho. El impulso de lanzamiento lo que hace es estirar las cuerdas acumulando su energía, y la liberación se malbarata al desajustarse los tiempos del proceso de lanzamiento.

La honda requiere una elasticidad mínima de las cuerdas, de manera que el impulso de lanzamiento de la mano se transmita íntegro y de manera instantánea al proyectil.

Sin embargo, para cuerdas delgadas, según la ley de Hooke, el alargamiento de la cuerda para una fuerza dada es mayor cuanto menor es la sección de la cuerda: $\Delta L / L = k \cdot F / S$, $\Delta L = L \cdot k \cdot F / S$, para iguales Fuerza y Longitud el alargamiento total es inverso a la sección. No obstante, al cambiar el peso del proyectil, la relación óptima de Fuerza velocidad aplicadas en la impulsión venía dada por la **Formula de Hill** vista anteriormente:

$$(45Vr + 11,77)(50Fr + 13,28) = 744,8$$

en la que vemos la relación inversa de ambas. Observamos también en la tabla de cálculo del peso óptimo, que a medida que disminuye el peso aumenta la velocidad óptima, por lo que la fuerza de impulsión disminuye corrigiendo en parte el alargamiento que se deriva de la fórmula de Hooke para iguales fuerzas. Seguimos pues albergando esperanzas de que la honda de cuerda delgada funcione bien. En cualquier caso, la elección de una fibra adecuada nos proporcionará elasticidades suficientemente pequeñas como para garantizar la eficiencia de la honda.

Torsión de las cuerdas

Otro efecto que puede resultar inconveniente para nuestra honda de cuerdas delgadas es el efecto de torsión de las mismas. Una cuerda, sometida a un par de torsión, gira un ángulo determinado hasta que su resistencia a la torsión equilibra dicho par:

$$\Theta = T \cdot L / G \cdot J$$

Siendo **T** el par torsor, **L** la longitud entre el par y la sección de la cuerda considerada, **G** el Módulo de Rigidez del material, que define su resistencia a la torsión, y **J** un parámetro relativo al diámetro de la cuerda.

En la honda el par de torsión se produce en el volteo debido a la variación de la posición de la mano a lo largo de la trayectoria de volteo, haciendo que el proyectil gire por inercia. Esto puede traducirse en el enrollamiento de cuerdas muy delgadas, que tendrá mayor o menor importancia según la manera de sujeción de las cuerdas. En principio, salvo empleo conjunto de proyectiles grandes con cuerdas delgadas, o cuerdas extraordinariamente finas como el sedal de nylon, este efecto no va a preocuparnos demasiado si ligamos el uso de cuerdas finas al de proyectiles pequeños. Mención aparte es el uso de cuerdas torcidas en vez de trenzadas, que es desaconsejable incluso para cuerdas normales, toda vez que tienden a enrollarse de manera natural en el volteo.

Longitud de las cuerdas

Vimos que el rozamiento del aire contra las cuerdas en el volteo era proporcional a la longitud de las cuerdas. También que esa fuerza de rozamiento es apreciable y por lo tanto va a tener una influencia importante en el caso de empleo de proyectiles ligeros. Al ser pequeño el peso del proyectil, también lo será la fuerza centrípeta. Si aumentamos la longitud de la honda, aumentará el rozamiento del aire y la fuerza de tracción efectiva resultante será menor, cayendo la velocidad del proyectil y por tanto su fuerza centrípeta, por lo que la cuerda dejará de estar tensa dificultando un disparo eficaz. Esto nos obligaría a emplear un proyectil más pesado, menos optimizado para el vuelo. Aunque aparentemente una mayor longitud de las cuerdas proporcionaría mayor velocidad lineal de volteo al proyectil, la verdad es que el volteo se vuelve ineficaz debido a la resistencia del aire si sobrepasamos una cierta longitud de las cuerdas, ya que la máxima velocidad angular que seamos capaces de dar a nuestro brazo no produce la adecuada velocidad lineal para tensar las cuerdas. Por todo ello, peso del proyectil, longitud y grosor de las cuerdas están relacionados de manera que existe una combinación óptima de todos ellos.

Hagamos una simulación con los tres factores. Al considerar el rozamiento del aire sobre la honda ligera, la fuerza de tracción de la mano deberá por un lado vencer dicha resistencia del aire y además acelerar el proyectil desde V_0 hasta V_1 . Según (1)

$$F_t = F_{ra} + (V_1 - V_0)(V_1 + V_0)m/39,2R$$

Donde F_{ra} = fuerza rozamiento aire sobre las dos cuerdas = $2 \cdot 1/2Cd \cdot \rho \cdot A \cdot V^2$.

$$F_{ra} = 0,1326 \cdot L \cdot D \cdot Vmd^2 (Kp).$$

Siendo L y D la longitud y diámetro de las cuerdas y V_{md}^2 la media del cuadrado de la velocidad de la honda a lo largo de su longitud. Simularemos de entrada la variación del alcance en función de la lg. de la honda y el peso del proyectil para una honda de cuerdas de 4 mm de diámetro.

	20 gr.	30	35	40	50	60
70 cm	vel = 65 alc = 157,3	61 159,4	59,5 159,2	58 158,6	56 157,9	53,7 154,5
100	72 172,3	67 174	65,8 175,8	64 175,3	61 173	59 171,8
150	81 190,4	76 195	73,8 195,3	72,1 196,8	68,8 194,5	66 193

Vemos que el alcance, teniendo en cuenta el rozamiento de la honda ligera considerada, sigue creciendo con la lg. de la misma, y que el peso óptimo crece un poco con ella. También que para una misma lg. las diferencias de alcance en toda la gama de pesos presentada es mínima, por lo que es aconsejable elegir los pesos superiores que proporcionan mayor control de la honda. Vemos también que para la honda media, los datos con y sin rozamiento (considerados anteriormente) se traducen en una **caída de alcance y velocidad un poco superior al 4 %**. En cuanto a las hondas largas, es evidente que requieren más volteo hasta que adquieran la tensión previa de las cuerdas y que la eficacia de la impulsión con ellas es más difícil.

Calculemos ahora el proyectil mínimo para conseguir la tensión previa de las cuerdas en las tres lg. de honda consideradas:

$M_m = F_o : (W_o^2 \cdot L)$,, F_o

70 cm	100	150
71,4 gr	50	33,33

 no depende de la lg. de la cuerda en el margen que consideramos, por lo que $M_{m1}/M_{m0} = L_0/L_1$ además, para una misma lg. $M_{m1}/M_{m0} = R_1^2/R_0^2$

Vemos que al margen de los pesos óptimos, estamos obligados, para una mayor eficacia en el lanzamiento, a usar pesos superiores a los 50 gr, lo cual no es de extrañar dado que nuestra honda ligera no lo era demasiado con sus cuerdas de 4 mm de diámetro. Veamos ahora cuerdas más delgadas y el efecto que producen en una honda de lg media de 70 cm. Pero antes calculemos los proyectiles mínimos para los distintos calibres de cuerda:

Diam = 4 mm	2 mm	1 mm
Mm = 71,4 gr	17,85 gr	4,45 gr

Ensayemos pues pesos de 20 a 40 gr:

	20 gr	30	35	40
Diam=4 mm	v = 65 alc = 157,3	61 159,4	59,5 159,2	58 158,6
2 mm	66,5 161	62,3 162,4	60,65 162,3	59,2 161,8
1 mm	67,3 162,4	62,9 163,7	61,3 164,2	59,7 163,1

Salvo la honda de 4mm, que requiere un proyectil de 71 gr para tensado previo, las dos hondas ligeras consideradas funcionan de manera óptima para proyectiles de 30 a 35 gr, siendo la diferencia de alcance de pocos metros. Vemos que la ventaja de la honda ligera es precisamente el no necesitar un tensado previo grande, lo que permite el empleo de proyectiles ligeros que proporcionan mayor alcance.

Honda ligera de elección:

Diámetro de cuerdas = 1 a 2 mm

Proyectil = 30 a 35 gr.

Longitud = 70 a 100 cm

(Para lg = 100 cm el peso mínimo para cuerdas de 2 mm es de 25,5 gr.)

Diseño de la bolsa

El objetivo a conseguir es una bolsa que añada la mínima resistencia contra el aire a la del proyectil. Para ello el diseño de bolsa de dos cordones sería el mejor, aunque para una cómoda colocación del pequeño proyectil sin riesgo de su caída al voltear, proponemos el siguiente diseño que hemos llamado “bolsa en ojo”, que se adapta muy bien a proyectiles esféricos. Se trata, como puede verse, de una bolsa de dos cordones



en la que está inscrito un anillo sobre

el que se coloca el proyectil. Para una mejor adherencia del proyectil a los cordones, en caso de usarse cuerda de fibra sintética como es lo más conveniente para este tipo de honda ligera, es recomendable revestir las zonas en contacto con el proyectil con alguna sustancia antideslizante, como silicona, pegamentos, esparadrapo, etc.

CONCLUSIONES

Los cálculos y datos expuestos corresponden por necesidad a un estilo de lanzamiento simplificado, basado exclusivamente en la acción aceleradora del brazo propulsado por el hombro sobre el proyectil. Como ya apuntamos, la realidad es más compleja ya que intervienen otras partes del cuerpo en la impulsión, como el movimiento de torso y caderas e incluso las piernas en su movimiento de avance. Por ello los alcances pueden resultar superiores a los mostrados según el estilo de lanzamiento empleado.

El empleo de hondas ligeras y proyectiles ligeros tiene solo justificación cuando el objetivo a conseguir es la optimización del alcance de competición. Ello requiere un estilo de lanzamiento especial en el que se favorece la velocidad desarrollada por la mano en el lanzamiento, con trayectorias amplias y una preimpulsión durante último volteo para subir lo más posible la velocidad del proyectil antes del tirón final.

Para otras modalidades del tiro con honda, como la precisión, tanto la honda como el proyectil óptimos son completamente diferentes, siendo recomendables proyectiles pesados y hondas más consistentes pero que permitan un buen control de la dirección de disparo. Pero eso requiere ya otro estudio que excede la dimensión del presente, en el que se ha pretendido plantear de manera general la problemática y los diversos aspectos implicados en el tiro, con especial atención al tiro de distancia.