

Rate of force development

Artículo original Road to Performance

Introducción

En la última década el rendimiento deportivo en los deportes de equipo está evolucionando gracias a la gran cantidad de investigación que se está llevando a cabo en relación a estos, ayudándonos a entender en profundidad cada una de las disciplinas y cómo podemos elevar el rendimiento de nuestros deportistas.

Una de las principales líneas de investigación que se ha popularizado es la optimización del entrenamiento de la fuerza aplicada a las diferentes disciplinas de los deportes de equipo. Esto está ayudando a preparadores y readaptadores físicos a entender las necesidades generales de sus deportes y elevar los niveles de fuerza de sus deportistas. Como concepto transversal, está cobrando una gran importancia el concepto de *Rate of Force Development (RFD)*, en el que se valora la aplicación de fuerza respecto en relación al tiempo. Dado que las acciones en los deportes de equipo se dan en un tiempo muy reducido, alcanzar los valores de fuerza máxima del deportista no es posible. Por lo tanto, la capacidad de nuestros deportistas para ser capaces de aplicar mayores niveles de fuerza en periodos cortos de tiempo es de un gran interés para preparadores físicos.

A lo largo de esta publicación expondremos, basándonos en la literatura científica actual, qué factores fisiológicos sustentan esta capacidad de aplicar fuerza en breves periodos de tiempo. Tras conocer qué factores explican esta aplicación de la fuerza, veremos importantes consideraciones metodológicas para poder realizar una medición lo más fiable y válida posible, de modo que los resultados que tengamos reflejen lo mejor posible lo que realmente queremos medir. Si queremos mejorar a nuestros deportistas, debemos conocer bien en qué punto nos encontramos en un inicio, y valorar los efectos del entrenamiento tras diseñar un plan de entrenamiento.

Desde RTP buscamos siempre la aplicación práctica, llevar la evidencia científica hacia una herramienta útil con la que trabajar los preparadores físicos. Es por eso que también buscamos exponer qué variables debemos tener en cuenta durante el entrenamiento si buscamos una mejora de esta capacidad en nuestros deportistas.

Palabras clave: *Rate of force development, RFD, Rendimiento, Fuerza rápida*

Definición y características

La *Rate of force development* (RFD) se considera un importante parámetro de la fuerza, el cual ha adquirido un especial interés en los últimos años, especialmente en aquellos deportes donde es necesario aplicar altos niveles de fuerza en periodos breves de tiempo (100-300ms)¹ y donde no se puede llegar a producir la máxima fuerza muscular.

En comparación con la máxima contracción voluntaria, la RFD parece:: 1) tener una mayor relación con el rendimiento físico específico del deporte; 2) ser un parámetro de mayor sensibilidad para detectar los cambios agudos y crónicos a nivel neuromuscular; 3) estar potencialmente determinado por diferentes mecanismos fisiológicos. Por todo esto, es una variable importante no solo para la investigación en el ámbito del rendimiento físico, sino también para preparadores físicos, ya puede ayudar a entender cómo se modifica la capacidad de generar fuerza, cuales son los factores que la alteran y cómo podemos cuantificarla y mejorarla para buscar incrementar el rendimiento.

De manera general, podríamos definir el término *Rate of force development* (RFD) como la pendiente de la curva fuerza (o torque) – tiempo durante la contracción muscular^{2,3}

$$RFD = \Delta \text{Fuerza} / \Delta \text{Tiempo}$$

Además, en la literatura también encontramos diferentes términos para hacer referencia a este mismo concepto, como puede ser fuerza explosiva, contracción balística, rápida contracción muscular, etc.

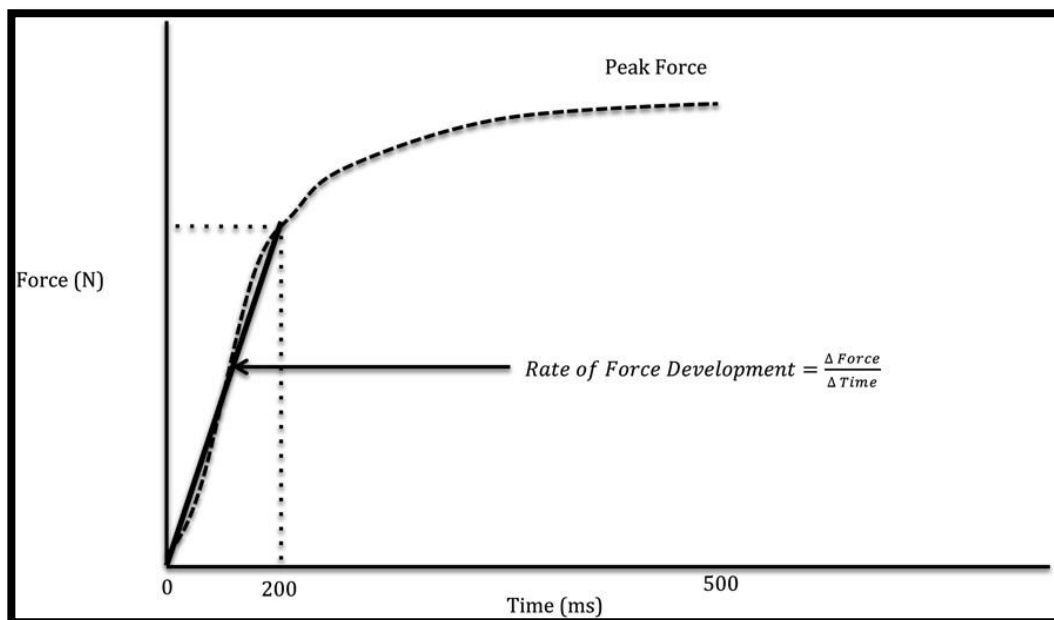


Imagen 1. Curva fuerza - tiempo, con pendiente RFD⁴

En la gran mayoría de la literatura revisada, la RFD es medido mediante test de contracción isométrica, pero también se han descrito mediciones en acciones dinámicas, que tendrán una mayor especificidad respecto a las acciones deportivas¹. Este parámetro puede ser expresado en términos absolutos ($\text{N} \cdot \text{s}^{-1}$) o relativo al pico de fuerza, masa corporal o a la sección de área transversal muscular. Considerando que la RFD viene determinado por la pendiente de la curva, podemos obtener varios ratios de una misma medición, cogiendo entre dos puntos temporales dentro de la pendiente¹. El espacio temporal que utilicemos como referencia para evaluar dependerá de la precisión de la medición realizada, del tipo de acción que se quiera estudiar y los

diferentes mecanismos que subyacen a la propia producción de fuerza en el grupo muscular o movimiento seleccionado.

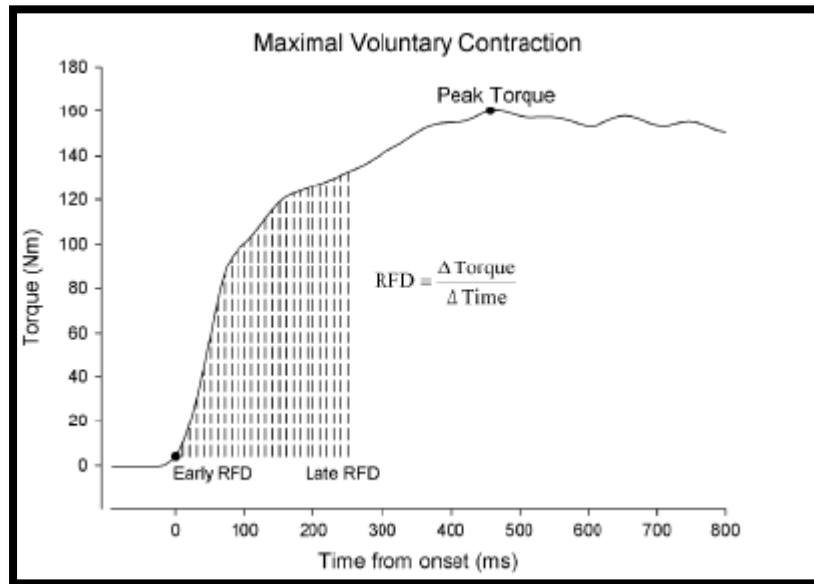


Imagen 2. Torque obtenido durante una contracción máxima voluntaria de un sujeto, reflejando en la línea temporal el comienzo de la RFD y las diferentes fases⁵.

Previo a entrar a analizar los diferentes factores que determinan la RFD, aclararemos unos conceptos importantes a tener en cuenta. Dentro de lo que entendemos por RFD, encontraremos dos fases principales. Una primera fase, denominada *early phase*, que hace referencia a los inicios de la contracción (entorno a los primeros 100 ms), y una segunda fase denominada *late phase* que la situamos en torno a los 200ms en adelante⁵ (ver Imagen 2). Otro concepto que debemos tener claro, es el concepto de Máximo RFD (MRFD), entendido como el máximo ratio de desarrollo de la fuerza en una ventana de tiempo determinada (ver Imagen 3).

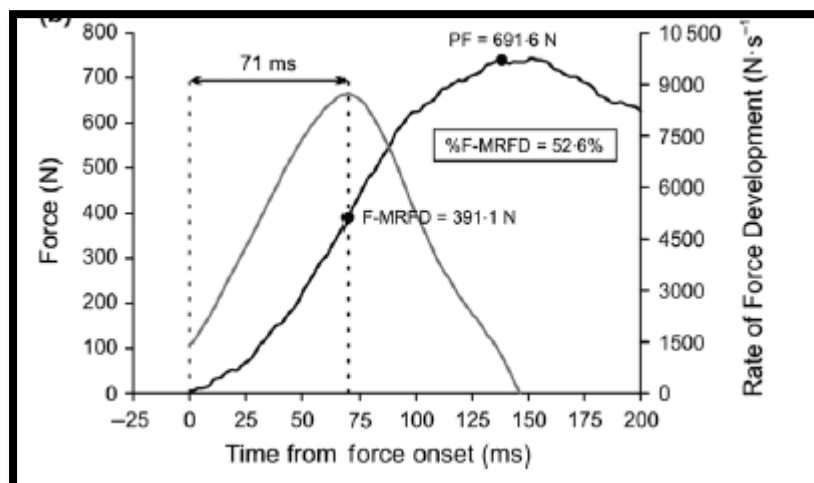


Imagen 3. Curva fuerza tiempo. La línea gris refleja la RFD y la línea negra la fuerza. Obtenido de Rodríguez-Rosell et al¹.

Factores fisiológicos

La contracción muscular es un proceso multifactorial que depende de factores neurales y estructurales. La magnitud y velocidad de acortamiento va a jugar un papel importante, determinando la máxima fuerza generada y la RFD en cada instante de la contracción¹. Sin

embargo, sabemos que, al igual que en la gran mayoría de factores del entrenamiento, existe una importante variabilidad entre individuos en relación a estas características.

Factores neurales

1. Velocidad de descarga de las unidades motoras

Esta velocidad de descarga parece ser uno de los factores más determinantes que van a influir en la RFD¹. La velocidad de ejecución del movimiento (y en definitiva, acortamiento de la fibra muscular) va a modificar la contribución de esta velocidad de descarga⁶. La existencia o no de una contracción previa al movimiento alterará también la capacidad de generar mayores valores de fuerza por unidad de tiempo⁷. Mayores velocidades de descarga se obtienen al inicio de una contracción máxima voluntaria (en torno a 200 Hz), donde el MRFD se alcanza, en comparación con las velocidades de descarga en el momento que se alcanza la máxima fuerza generada (15-35 Hz)¹. Por lo tanto, para alcanzar un desarrollo rápido de la mayor fuerza posible, la velocidad de descarga va a ser un factor determinante⁷.

2. Par de descargas eléctricas

Entenderemos este par de descargas como un par de potenciales de acción con un intervalo de tiempo de menos de 5 ms entre sus picos¹, lo que probablemente se deba a una despolarización tardía en las dendritas de las motoneuronas espinales¹. Este par de descargas parece ser que induce un incremento de la liberación de Ca²⁺ en el retículo sarcoplasmático al inicio de la contracción, lo que incrementa el pico de fuerza y por tanto la magnitud de la integral fuerza-tiempo⁸. Esto supone un aumento de la ratio, y por tanto una mayor cantidad de producción de fuerza. Es una estrategia de gran importancia del sistema nervioso para incrementar la eficiencia en contracciones rápidas, especialmente durante la *early phase*.

3. Sincronización de unidades motoras

Este concepto hace referencia al nivel de correlación entre el *timing* de descarga de los potenciales de acción y las unidades motoras activas de manera simultánea¹. En relación al RFD, parece que no hay evidencia clara que suponga un factor optimizador. Parece no estar claro que un incremento de los inputs a las neuronas motoras espinales suponga una mayor sincronización de las unidades motoras en condiciones voluntarios¹.

La velocidad de reclutamiento de las unidades motoras, velocidad de descarga de estas unidades motoras, y los *inputs* sinápticos recibidos por las neuronas motoras antes de comenzar a generar la fuerza, dictan en gran medida la capacidad del deportista para generar fuerza de manera rápida⁹.

Factores estructurales

Al igual que los factores neurales tienen una gran importancia, especialmente en la *early phase*, los factores estructurales también tienen su papel y con mayor importancia en la *late phase*. La máxima contracción voluntaria explica el 18, 29, 57 y 78% en la varianza de la RFD durante los primeros 10, 50, 100 y 200 ms respectivamente⁶.

1. Distribución tipo de fibras

El fenotipo de fibra muscular es considerado un factor de gran importancia para el desarrollo de RFD⁶. Cuando encontramos una mayor proporción de fibras IIX y/o IIA hay un mayor RFD intrínseco¹. Del mismo modo, se ha observado que existen correlaciones positivas en MRFD y porcentaje de fibras tipo IIX¹. Sin embargo, este ratio o porcentaje de tipo de fibra solo explicaría una pequeña parte de la varianza de la RFD¹⁰, por lo que refuerza la idea de que la magnitud de RFD va a ser multifactorial.

2. Área de la sección transversal de la fibra muscular

El incremento del área de la sección transversal de la fibra muscular, y en particular de las fibras tipo II parece ser efectivo para mejorar el rendimiento en RFD¹.

3. Estructura del tendón

La función del tendón, sin propiedades contráctiles propias, es transmitir la fuerza procedente de las fibras musculares hacia el hueso. El tiempo utilizado para el desarrollo de la fuerza se verá condicionado por las propiedades mecánicas del tendón¹. El *stiffness* del tendón modifica el tiempo necesario para provocar el estiramiento de los componentes elásticos en serie, y por lo tanto afecta a la RFD. Un mayor *stiffness* supondrá una mejor transmisión de fuerzas desde los elementos contráctiles, produciendo una mayor RFD¹. Otros elementos pasivos, como la aponeurosis intramuscular, tienen también un importante papel en el desarrollo de la RFD, especialmente en contracciones isométricas¹.

4. Geometría muscular

La arquitectura muscular (como el ángulo de penación o la longitud de fascículo) tienen también un importante papel en la función muscular y por lo tanto en la RFD. Aunque la velocidad de acortamiento efectiva de la fibra va a disminuir cuando mayor sea el ángulo de penación, la rotación que ocurre durante la contracción contribuye a un incremento en la velocidad que se produce entre origen – inserción¹.

5. Función retículo sarcoplasmático

Las fibras musculares con mayor sensibilidad al calcio, son capaces de producir mayor RFD. Esto es uno de los cambios que se pueden lograr a través del entrenamiento y que influirían en la RFD¹, aunque con cierta capacidad limitada de mejora, especialmente en fibras tipo II⁶.

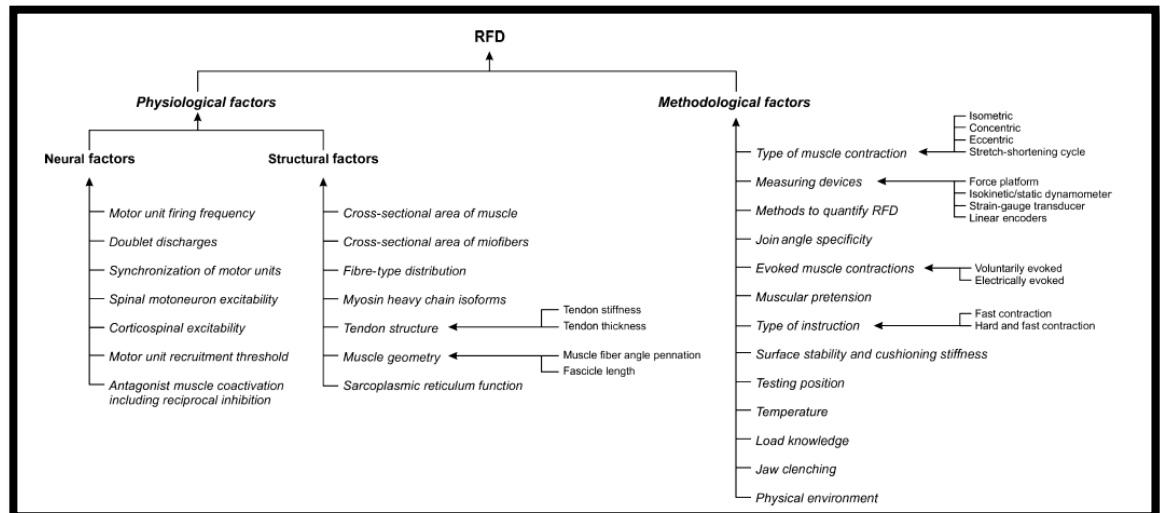


Imagen 4. Factores fisiológicos y metodológicos que condicionan la RFD¹

Medición RFD: Consideraciones metodológicas

Métodos para calcular la RFD

Diferentes métodos han sido descritos en la literatura científica para el cálculo de la RFD, tanto absoluto como relativo, a partir de la curva fuerza-tiempo. La RFD como valor absoluto, se calcula a través de la media de la pendiente de la curva fuerza-tiempo a partir de determinados intervalos de tiempo (0-30, 0-50, 0-100 ms, etc.) desde el inicio de la contracción, mientras que el MRFD se cuantifica como el pico máximo de esa curva. Esta medición de RFD se puede también relativizar a la máxima contracción voluntaria, es decir, mediciones desde el inicio de la contracción hasta intervalos de 25, 50 o 75% de esta máxima contracción. Vamos a encontrar diferentes tipos de análisis en función de lo que nos interesa valorar: intervalos para alcanzar niveles determinados de fuerza, tiempo desde el inicio hasta alcanzar el MRFD, ratio entre pico de fuerza y tiempo necesario para alcanzarlo, etc¹.

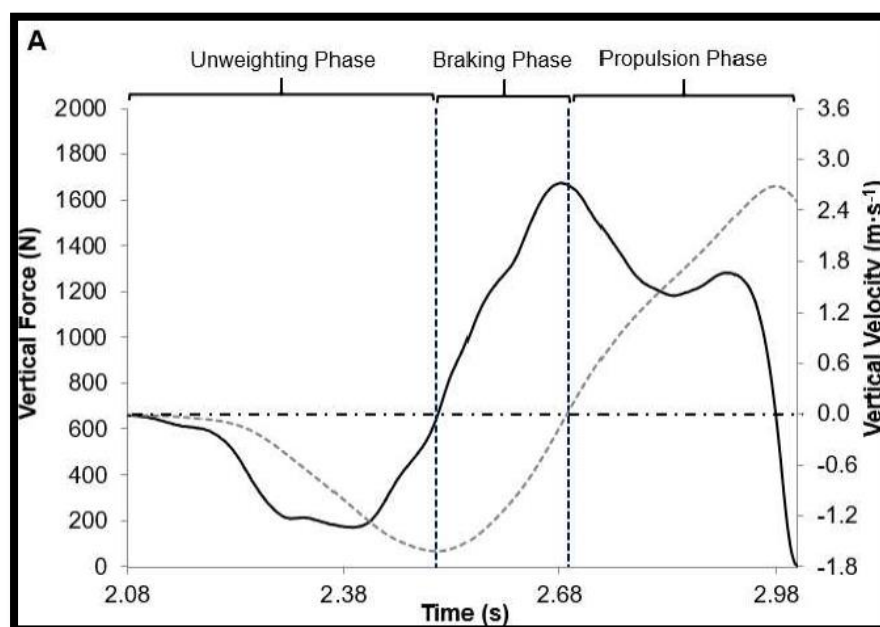


Imagen 5. Fases de aplicación de fuerza durante un CMJ¹¹

En mediciones dinámicas, como en el caso del salto *Countermovement Jump* (CMJ), la RFD viene determinada por la diferencia entre pico máximo de *ground reaction force* (GRF) en la curva registrada menos el GRF en el punto del comienzo de la fase excéntrica (aceleración vertical) partido por el tiempo¹².

Sin embargo, parece tener mucho más sentido el cálculo de la RFD en un CMJ durante la fase excéntrica¹³, ya que la fuerza aplicada durante la parte inicial de la fase concéntrica tiende a ser poco pronunciada o incluso menor que durante la fase final de la fase excéntrica¹ (ver Imagen 5).

Dentro del cálculo de la RFD, podemos realizar el cálculo normalizado¹: 1) la pendiente de la curva fuerza tiempo relativo a la fuerza máxima (expresado como %Fuerza máxima · s⁻¹); 2) la MRFD relativa a fuerza máxima, peso corporal, o área de sección transversal; 3) la ratio de incremento en la fuerza relativa desde el comienzo de la contracción hasta alcanzar cierto nivel (a determinar) de fuera isométrica relativa al máximo. Dado que la RFD absoluta está influenciada por la capacidad muscular de producir un pico máximo de fuerza, es importante ser capaces de valorar la RFD normalizado¹. Aunque consideremos la RFD como una variable independiente de la fuera máxima dinámica o isométrica, que expresan capacidades diferentes, la verdad es que tienen una cierta relación, por lo que la valoración (en función de lo que nos interese) puede ser

no tan concreta como queríamos. Por lo tanto, la RFD relativa y absoluta, parecen reflejar capacidades neuromusculares diferentes. Del mismo modo, la RFD relativa nos permite la comparación entre individuos. Por lo tanto, para una valoración completa la mejor opción será siempre tener datos tanto de la RFD absoluta, acompañado de la relativa.

Tipo de contracción muscular

A la hora de realizar la valoración de la RFD en nuestros deportistas debemos tener en cuenta si haremos un análisis de una contracción isométrica o dinámica, ya que diferentes tipos de contracción van a producir una gran variación en la RFD obtenida¹. En una contracción isométrica, conseguimos un test más cerrado⁶, con un gran control de la medición, lo que nos permite replicar la medición en test sucesivos, lo que nos aporta una mayor fiabilidad. Sin embargo, este tipo de contracción también tiene sus contras respecto a una valoración dinámica¹: 1) menor relación con el tipo de acción en rendimiento deportivo; 2) es específico del ángulo que se escoja medir, por lo que sólo examina una pequeña parte de una curva fuerza – longitud. De este modo, si escogemos realizar una valoración isométrica, debemos tener claro que ángulo escogemos, ya que la fuerza aplicada va a ser específica del ángulo.

Inicio de la contracción

Determinar el inicio de la contracción es importante para un correcto análisis. Se proponen dos métodos para determinar el inicio de la contracción. El primero, de unidades absolutas (ejemplo de 7,5 Nm), o un método relativo a la máxima contracción voluntaria (MCV), por ejemplo 2 o 2,5% de cada individuo. Este método relativo está más recomendado a la hora de realizar el análisis⁶.

Otro factor que debemos tener en cuenta para determinar el inicio de la contracción es el ruido inherente al dispositivo de medición que utilicemos. Los dinamómetros comerciales utilizan umbrales relativamente altos debido a que suelen tener un ruido elevado, entorno a 5Nm o >1 %MCV⁶. Una mala detección de los inicios de la contracción debido a altos umbrales por alto ruido del dispositivo de medición, podría suponer mediciones no válidas o poco fiables de la *early phase* de la contracción (primeros 50 ms, 75 ms, etc.). Por lo tanto, utilizar valores relativos a MCV, dispositivos de calidad para este tipo de medición concreta, tener en cuenta el ruido y relativizar en función de este ruido (ej. 3SDs) van a ser estrategias a considerar a la hora de realizar valoraciones de la RFD⁶.

Dispositivos de medición

El tipo de dispositivo que utilicemos para la medición de la RFD va a condicionar de manera muy importante la validez y fiabilidad del dato que obtengamos. Podemos encontrar en la literatura científica el uso de instrumentos como plataforma de fuerzas o dinamómetros isocinéticos / electromecánicos. Algunos otros estudios utilizan mediciones indirectas de la fuerza con instrumentos como el encoder lineal, con el hándicap de que los valores de fuerza son derivados de la carga externa y la aceleración de esta carga, lo que supone que en situaciones de una fase estática de una contracción dinámica (en la que existe aplicación de fuerza sin que comience el movimiento) esta medición no se obtiene¹. Del mismo modo, en un estudio¹⁴ comparando un mismo gesto con dos dispositivos diferentes (plataforma de fuerza y encoder lineal), destaca diferencias en la curva fuerza tiempo generada por cada dispositivo, por lo que resalta la importancia de no comparar resultados obtenidos entre ambas tecnologías. Por lo tanto, si existe la posibilidad, se recomienda la medición directa de la fuerza aplicada a través de la plataforma de fuerza, y no utilizar la medición indirecta, aunque es lógico que no siempre es una tecnología al alcance. El ruido y el filtrado que se aplique⁶, siendo interesante valorar un dispositivo con bajo ruido y una alta frecuencia, e intentando mantener los datos con el mínimo filtrado y más en bruto posible.

Pre-Tensión

En valoraciones de contracciones isométricas, el nivel de tensión previa a una activación máxima va a influir en los datos obtenidos, en especial de la magnitud obtenida en la RFD^{1,6}. Por este motivo, se recomienda realizar estas valoraciones con una pre-tensión mínima con el fin de obtener la medición lo más válida posible para aplicar fuerza de manera rápida.

Instrucción verbal

El tipo de instrucción que demos a la hora de realizar el test, también va a condicionar el tipo de resultado que obtengamos en el mismo. Dado que es una valoración de fuerza respecto al tiempo, las instrucciones de aplicar fuerza “rápido”, “fuerte” o ambas pueden influir en la curva resultante. Los resultados muestran que con una instrucción de “rápido”, se consiguen mayores niveles de RFD que “fuerte” o “fuerte y rápido” (este último con mayores valores en la fase tardía, después de 200 ms)¹.

Dentro de la metodología para la evaluación encontraremos otras variables importantes. La posición del test (sentado, bipedestación, tumbado...), temperatura muscular, superficie sobre la que se aplica la fuerza, así como una familiarización previa con el test y el número de intentos serán también de importancia para tener en cuenta en la valoración^{1,6}.

Entrenamiento y RFD

Dentro del rendimiento deportivo, es interesante poner el foco del entrenamiento en la mejora de la RFD, ya que está es de vital importancia en las acciones deportivas que buscamos trabajar: salto, sprint, etc^{13,15,16}.

Tal y como hemos ido comentando a lo largo de esta publicación, la importancia de los diferentes mecanismos fisiológicos que determinan la RFD en cada fase son diferentes. Por lo tanto, el entrenamiento que hagamos va a influir de manera diferente en las adaptaciones que se produzcan en una fase y/u otra en relación con la RFD⁵, tanto positiva como negativamente.

Lo primero que debemos tener en cuenta a la hora de querer mejorar la RFD es que fase queremos mejorar, y en qué tipo de contracción. Saber si es determinante mejorar la fase excéntrica de la acción u otra, si buscamos mejorar la *early phase*, o por el contrario no dependemos tanto de un mínimo tiempo de aplicación y tenemos como objetivo mejorar la *late phase*.

En relación a la velocidad de ejecución, si nos centramos en el entrenamiento para la mejora de la RFD excéntrico, realizar esta fase a una máxima velocidad controlada (resultando en menos de 1s de fase en *squat*) supone un mayor incremento en la RFD (0 – 250 ms) respecto a un mismo entrenamiento realizado con una fase excéntrica más lenta con mayor carga¹⁷. Encontramos el mismo resultado en diferentes ejercicios si la velocidad de ejecución excéntrica es a alta velocidad, las mejoras en la *early phase* son mucho mayores que en la *late phase*¹⁸.

Si comparamos las variables generales de intensidad y volumen, el entrenamiento de alta intensidad (3-5RM), con la intención de velocidad máxima, tiene un efecto de mejora de la *early phase* en la RFD, que no encontramos en el entrenamiento de menor intensidad (10-12RM) y mayor volumen¹⁹. El volumen alto a intensidades medias, a pesar de tener un efecto estructural beneficioso, parece no ser el mejor para la mejora de la RFD si es lo buscamos especialmente en tiempos de aplicación de fuerza bajos²⁰.

En resumen, si queremos mejorar las fases iniciales de la RFD, con gran influencia de factores neurales, debemos buscar trabajar a velocidades de ejecución e intención altas, con intensidades relativamente altas que permitan el mayor reclutamiento posible. El manejo de estas dos variables, en la fase concreta y que tenga una gran importancia en el gesto que queremos mejorar será de gran importancia a la hora de diseñar el entrenamiento con este objetivo.

Sin embargo, no debemos olvidar que en el entrenamiento deportivo cada caso es un mundo. La respuesta adaptativa a cada dosis de entrenamiento presenta una gran variabilidad intersujetos,

dependiendo esto de sus características²¹. Por lo que una vez más, desde RTP creemos que un buen análisis inicial de las características y necesidades del deportista es necesario para poder diseñar un proceso de entrenamiento ajustado para la mejora de los déficits que presente cada deportista.

Conclusiones y aplicaciones prácticas

1. La RFD tiene una gran importancia en el rendimiento en los deportes de equipo, ya que en este contexto el tiempo disponible para la aplicación de fuerza es mínimo. Además, es un parámetro sensible a cambios agudos y crónicos a nivel neuromuscular (fatiga, adaptaciones, etc.).
2. La RFD se sustenta sobre dos factores fisiológicos: neurales (velocidad de descarga, par de descargas, sincronización y velocidad de reclutamiento) y estructurales (tipo de fibras, área sección transversal, geometría muscular y estructura del tendón).
3. Existen dos fases principales dentro de la RFD. Una *early phase* que abarca desde el inicio de la contracción hasta aproximadamente los primeros 100 ms y depende principalmente de factores neurales; y una segunda fase denominada *late phase* que se da aproximadamente hacia los 200 ms y donde los factores estructurales tienen una mayor importancia.
4. Cuando se valora la RFD debemos tener diferentes consideraciones metodológicas para asegurar una medición lo más fiable posible: 1) qué tipo de acción; 2) qué contracción; 3) qué instrumento utilizamos; 4) cuándo marcamos el inicio de la contracción; 5) y de qué manera explicamos cómo realizar el test. Todos estos factores tendrán una gran importancia en el resultado que obtengamos de esa medición.
5. Como preparadores físicos debemos tener en cuenta qué variables del entrenamiento nos favorecen para la mejora de la RFD. Si queremos mejorar la *early phase* sabemos que vendrá determinado por factores neurales, que debemos abordar mediante velocidades de ejecución altas (y con máxima intención), y con intensidades relativamente altas que favorezcan un mayor reclutamiento de unidades motoras.

Bibliografía

1. Rodríguez-Rosell D, Pareja-Blanco F, Aagaard P, González-Badillo JJ. Physiological and methodological aspects of rate of force development assessment in human skeletal muscle. *Clin Physiol Funct Imaging*. 2017;38(5):743-762.
2. Oliveira FBD, Oliveira ASC, Rizzato GF, Denadai BS. Resistance training for explosive and maximal strength: effects on early and late rate of force development. *J Sports Sci Med*. 2013;12(3):402.
3. Aagaard P, Simonsen EB, Andersen JL, Magnusson P, Dyhre-Poulsen P. Increased rate of force development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training. *J Appl Physiol*. 2002;93(4):1318-1326.
4. Haff GG, Nimphius S. Training Principles for Power. *Strength Cond J*. 2012;34(6).
5. Andersen LL, Andersen JL, Zebis MK, Aagaard P. Early and late rate of force development: differential adaptive responses to resistance training? *Scand J Med Sci Sports*. 2010;20(1):e162-e169.
6. Maffiuletti NA, Aagaard P, Blazevich AJ, Folland J, Tillin N, Duchateau J. Rate of force development: physiological and methodological considerations. *Eur J Appl Physiol*. 2016;116(6):1091-1116.
7. Duchateau J, Baudry S. Maximal discharge rate of motor units determines the maximal rate of force development during ballistic contractions in human. *Front Hum Neurosci*. 2014;8:234.
8. Cheng AJ, Place N, Bruton JD, Holmberg H, Westerblad H. Doublet discharge stimulation increases sarcoplasmic reticulum Ca²⁺ release and improves performance during fatiguing contractions in mouse muscle fibres. *J Physiol*. 2013;591(15):3739-3748.
9. Del Vecchio A, Negro F, Holobar A, et al. You are as fast as your motor neurons: speed of recruitment and maximal discharge of motor neurons determine the maximal rate of force development in humans. *J Physiol*. 2019;597(9):2445-2456.
10. Schilling BK, Fry AC, Chiu LZF, Weiss LW. Myosin heavy chain isoform expression and in vivo isometric performance: a regression model. *J strength Cond Res*. 2005;19(2):270.
11. McMahon JJ, Suchomel TJ, Lake JP, Comfort P. Understanding the key phases of the countermovement jump force-time curve. *Strength Cond J*. 2018;40(4):96-106.
12. Ebben W, Flanagan E, Jensen R. Gender similarities in rate of force development and time to take off during the countermovement jump. *J Exerc Physiol Online*. 2007;10(6).
13. Laffaye G, Wagner P. Eccentric rate of force development determines jumping performance. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*. 2013;16(sup1):82-83.
14. Hansen KT, Cronin JB, Newton MJ. The reliability of linear position transducer and force plate measurement of explosive force-time variables during a loaded jump squat in elite athletes. *J Strength Cond Res*. 2011;25(5):1447-1456.
15. Tillin NA, Pain MTG, Folland J. Explosive force production during isometric squats correlates with athletic performance in rugby union players. *J Sports Sci*. 2013;31(1):66-76.
16. McLellan CP, Lovell DI, Gass GC. The role of rate of force development on vertical jump performance. *J Strength Cond Res*. 2011;25(2):379-385.
17. Stasinaki A-N, Zaras N, Methenitis S, Bogdanis G, Terzis G. Rate of force development and muscle architecture after fast and slow velocity eccentric training. *Sports*. 2019;7(2):41.
18. Oliveira AS, Corvino RB, Caputo F, Aagaard P, Denadai BS. Effects of fast-velocity eccentric resistance training on early and late rate of force development. *Eur J Sport Sci*. 2016;16(2):199-205.
19. Mangine GT, Hoffman JR, Wang R, et al. Resistance training intensity and volume affect changes in rate of force development in resistance-trained men. *Eur J Appl Physiol*. 2016;116(11-12):2367-2374.
20. Suarez DG, Mizuguchi S, Hornsby WG, Cunanan AJ, Marsh DJ, Stone MH. Phase-Specific Changes in Rate of Force Development and Muscle Morphology Throughout a Block Periodized Training Cycle in Weightlifters. *Sports*. 2019;7(6):129.

21. Peltonen H, Walker S, Hackney AC, Avela J, Häkkinen K. Increased rate of force development during periodized maximum strength and power training is highly individual. *Eur J Appl Physiol.* 2018;118(5):1033-1042.