

Riesgos y beneficios de las tensiones musculares excéntricas

Gildardo Díaz Cardona

Lindstedt, LaStayo y Reich (2001)(1) en su revisión narran que la palabra excéntrica fue introducida por primera vez por Armussen en 1953, al combinar el prefijo ex "desde o fuera de ella", con la palabra "céntrica centro, definiendo una contracción muscular que se alejaba del centro del músculo. Pero explican que fue Fick en 1882, el que observó que un músculo podía ejercer mayor fuerza cuando se estira mientras se contraía. Y que luego Hill en 1932, mostró que existía disminución de la liberación de energía en un músculo que se estiraba cuando se contraía. Sin embargo, dicen que la primera demostración práctica fue presentada por Bud, Biglan y Murdoch en 1952, con dos bicicletas estacionarias, unidas por una sola cadena, con los espaldares de los sillones colocados espalda con espalda, donde un sujeto pedaleaba hacia adelante ejecutando una contracción concéntrica y el otro se oponía a este movimiento, trabajando excéntricamente (por el frenado de los pedales hacia atrás) y así terminan contando cómo fue el origen de tan valiosa palabra en la biomecánica y por tanto, en la vida diaria "contracción excéntrica".

La manifestación excéntrica de la contracción muscular consiste en la asociación de un estiramiento muscular y una contracción muscular. Tradicionalmente en el mundo del entrenamiento, el trabajo excéntrico ha sido planteado a partir de cargas superiores a 1 repetición máxima (1RM), ya que la contracción muscular excéntrica tiene la capacidad de generar más fuerza que la contracción concéntrica (Komi y Buskirk, 1972)(2). Asimismo, la fuerza realizada durante una contracción excéntrica puede ser hasta un 30% superior a la fuerza máxima isométrica (Schmidbleicher y Buhle, 1987)(3).

El número de unidades motrices reclutadas en un trabajo excéntrico es menor que el solicitado ante una carga igual en una contracción isométrica o concéntrica, por lo que cada unidad motriz necesita producir una fuerza superior, y sus fibras musculares soportan mayor carga (Hakkinen et al., 1987, Aagaard et al., 2000; McHugh et al., 2000)(4).

Según Piazzesi et al., (2007)(5) cuando se contraen de forma voluntaria las fibras musculares, sólo la mitad de las cabezas de miosina se unen sobre los filamentos de actina, pero si al mismo tiempo de producirse la contracción, la musculatura está estirada, se observa que nuevas cabezas de miosina vienen a reforzar la acción de las primeras para ayudar ante la tensión demandada.

Al comparar el trabajo muscular excéntrico, con el isométrico y el concéntrico, presenta valores inferiores en relación a diferentes parámetros como la frecuencia cardíaca, la concentración de lactato en sangre presión arterial (Carrasco et al., 1999; Durand et al., 2003)(6).

Algunos autores han indicado que tras un entrenamiento excéntrico se observa una pérdida de fuerza explosiva durante periodos superiores a 24 horas (principalmente en personas o deportistas que no están acostumbrados al mismo), y la posibilidad de inducir daño muscular (McHugh et al., 2000; Byrne, et al., 2004; Mjølshnes et al., 2004; García-López et al., 2006; Arnason et al., 2008)(7).

En relación a las tendinopatías, se ha incorporado el trabajo excéntrico como medio de prevención y recuperación de esta lesión. Las localizaciones más habituales se presentan en el tendón rotuliano, el tendón de Aquiles, el tendón del manguito de los rotadores, y en los tendones de los epicóndilos medial y lateral del codo (Cannell et al., 2001; Cook & Khan, 2001; Silbernagel et al., 2001; Wilson et. al., 2005) (8). Las actividades o deportes donde las acciones a desarrollar son explosivas (i.e. saltos, cambios de dirección, cambios de ritmo, etc.) y/o se presentan de manera reiterada, son contextos donde se incrementa el riesgo de padecer una lesión tendinosa. Entre las posibles causas lesivas podemos encontrar problemas morfoestáticos, una incorrecta ejecución técnica, material en malas condiciones (factores biomecánicos), una excesiva demanda de la fuerza, principalmente a nivel de sollicitación excéntrica bien sea por reiteración de la misma o por las intensidades requeridas, desequilibrios musculares, retracción muscular.

Las contracciones musculares excéntricas raramente ocurren de forma aislada, sino que aparece integrada en la secuencia de ciclo estiramiento-acortamiento.

Los tipos de acción muscular se pueden clasificar, con respecto a los cambios que se producen en la longitud del músculo, en dos grupos diferentes:

a) Acción estática o contracción isométrica, donde el músculo genera fuerza permaneciendo invariable su longitud.

b) Acción dinámica o anisométrica, donde el músculo genera fuerza produciendo un desplazamiento articular y variando su longitud. En función del sentido del desplazamiento hablamos de una contracción concéntrica o trabajo positivo cuando la acción del músculo es un acortamiento, y por otro lado hablamos de acción excéntrica o trabajo negativo cuando la acción del músculo es un alargamiento. Existen 3 tipos de contracción (isométrica, dinámica concéntrica y dinámica excéntrica) se pueden comparar con respecto a 5 características importantes:

1. El desarrollo de fuerza
2. La hipertrofia
3. El control neural
4. La actividad en el electromiograma
5. El dolor muscular de acción tardía (D.M.A.T.)

1. Con respecto a la fuerza que se puede desarrollar con los 3 tipos de contracción, ésta lleva un orden jerárquico. Con contracciones excéntricas podemos desarrollar una fuerza máxima superior en un 30% a la fuerza máxima isométrica, que es a sus veces un 10% mayor que la fuerza máxima concéntrica. La mayor fuerza desarrollada por la contracción excéntrica se debe a que a la tensión generada por el componente contráctil del músculo, se le suma la del componente elástico en serie formado por la línea "z" de los sarcómeros, el eje de cabezas de miosina, el tendón y las fibras que separan a éste del hueso llamadas fibras de Sharpey. Con respecto al ejercicio isométrico es importante remarcar que el desarrollo de la fuerza durante el mismo es específico del ángulo articular utilizado.

2. Con respecto a la hipertrofia, para la mayoría de los autores el ejercicio concéntrico es más favorable para producir aumento de la masa muscular que

el excéntrico y el isométrico.

3. Con respecto al control neural, en contracciones isométricas y concéntricas, el reclutamiento de unidades motoras se produce siguiendo el ya mencionado principio del tamaño. En cambio las acciones excéntricas se alejan del principio del tamaño, activándose preferentemente las unidades motoras mayores y más rápidas.

Comparando el ejercicio isométrico con el concéntrico, vemos que el isométrico, al mantener un mayor tiempo de tensión, permite a las unidades motoras descargar más regularmente, produciendo mejoras en la frecuencia de estímulo y en la sincronización.

Por lo tanto el aumento de fuerza en el ejercicio isométrico se debe a una mejoría en la coordinación intramuscular, pero en perjuicio de la coordinación intermuscular, debiéndose combinarse siempre con trabajos dinámicos.

4. Si comparamos la curva EMG / Tiempo, utilizando la misma carga con los 3 tipos de contracción, veremos que será necesaria una mayor activación con la contracción concéntrica, luego con la isométrica y por último con la excéntrica, que será la que registrará la menor actividad eléctrica. Esto significa que el grado de excitación necesario para producir una fuerza dada es menor cuando el músculo se estira enérgicamente que cuando se acorta a la misma velocidad.

5. El dolor muscular de acción tardía, depende en gran parte de la intensidad y duración del esfuerzo además del tipo de ejercicio realizado siendo la contracción excéntrica la que causa las mayores molestias. Se suele manifestar entre las 24 y las 72 después de realizado un entrenamiento intenso y la máxima intensidad suele darse a las 48 hs(9). Existe un orden de reclutamiento según el tipo de (UM), durante las contracciones concéntrica e isométrica, este orden de activación no aplica para las contracciones musculares excéntricas donde de manera selectiva se reclutan primero las (UM) rápidas.

Menor activación muscular: durante las contracciones excéntricas se produce una menor activación de las unidades motoras en comparación con las contracciones concéntricas e isométricas, a un nivel de activación del 50% de contracción excéntrica, corresponde a un nivel de activación del 75% de contracción concéntrica. Enoka (1996)(10) propone que este fenómeno se debe a dos factores: un menor nivel de activación de todas las motoneuronas y un menor número de motoneuronas implicadas. Roig y Ranson, (2007)(11) se basa en que el cerebro planea y procesa de forma diferente ambos tipos de contracciones (concéntrica y excéntrica). La mayor magnitud del potencial positivo durante las contracciones excéntricas, parece indicar que una cantidad superior de información sensorial está siendo sometida en el cerebro durante dicho modelo de funcionamiento muscular.

Owings y Grabiner (2002, citados en LaStayo et al., 2003)(12), propusieron que desde el Sistema Nervioso Central, los comandos u órdenes son diferentes en función del tipo de concentración que se va a realizar.

El método excéntrico es también muy apropiado para lograr efectos neurales produciendo un alto reclutamiento de unidades motoras rápidas y un desplazamiento de la curva fuerza/tiempo hacia la izquierda indicando esto una

mejoría en el Índice de Manifestación de Fuerza.

La dosificación en el entrenamiento excéntrico con cargas máximas denominado "típico" es con una intensidad del 100% o mayor, 4 a 5 series de 1 a 6 repeticiones, con la máxima velocidad posible. Cuando no es posible realizar contracciones excéntricas con carga máxima se deben utilizar esfuerzos submáximos minimizando de ésta forma el daño en el tejido y la inhibición por dolor residual. Muchos autores opinan que es beneficioso la inclusión de contracciones excéntricas a niveles submáximos, con una correcta dosificación, desde las primeras etapas de un plan de rehabilitación debido a que permiten restablecen los componentes neurales alterados luego de una lesión.

Para realizar trabajos focalizando la atención sobre la fase de frenado o excéntrica, podemos valernos de diferentes estrategias:

- a) Emplear una tecnología que nos facilite la fase concéntrica devolviendo la carga al punto de partida.
- b) Trabajar con porcentajes inferiores al de 1RM modulando la velocidad de ejecución (lenta) y establecer el número de series y repeticiones en función de los porcentajes de trabajo.
- c) Dividir la acción y polarizar la atención sobre la fase excéntrica del movimiento.
- d) Recibir ayuda externa (compañeros) para hacer la fase concéntrica del movimiento.
- e) Oposición manual de un compañero y acción de frenado por parte del sujeto que trabaja.
- f) Trabajar la manifestación excéntrica en cadena cinética cerrada y/o abierta.
- g) Trabajar sobre planos inclinados o superficies inestables para incrementar o facilitar la localización del trabajo en función de la articulación implicada.
- f) Emplear material y aprovechar diferentes recursos en función del grupo muscular a trabajar, la amplitud de trabajo y la intensidad o velocidad con que se demande el mismo (9).

Menor gasto energético: Asmussen (1953, citado por Lindstedt et al. 2001)(1) y Bigland-Ritchie y Woods (1976, citados por Lastayo 2003)(12) concluyeron que los requerimientos de oxígeno del ejercicio excéntrico era menores en comparación con el ejercicio concéntrico equivalente (53-59%). Una posible explicación está relacionada con el proceso de la contracción muscular. Los puentes cruzados durante la contracción excéntrica son forzosamente desactivados por el estiramiento, sin necesidad de ATP. Además, se añade el hecho que el trabajo excéntrico comparado con los otros modelos de contracción muscular provoca una menor actividad del sistema simpático, y del sistema cardiovascular.

En general se acepta que durante las acciones excéntricas hay una mayor producción de fuerza relativa, a pesar de la ligera menor actividad superficial electromiografica (EMG) comparadas con las acciones musculares concéntricas. Este hecho se debe probablemente al menor reclutamiento relativo y a las tasas de descarga de las unidades motoras activas secundaria a la eficiencia mecánica superior y a la disipación de energía de las acciones musculares excéntricas.

Daño Muscular: El ejercicio excéntrico intenso puede desencadenar en el músculo una serie de proceso que produce una sintomatología aguda caracterizada por el dolor, inflamación, rigidez muscular y aumento de la concentración sérica de proteínas musculares como la creatina Kinasa (CK) Byrne, Twist and Eston

(2004)(13), definieron como situación de daño muscular, aquella en la que uno o más marcadores directos o indirectos estaban presentes. Dicho daño, que probablemente es debido al grado de tensión a la que son sometidas las fibras por falta de acondicionamiento excéntrico, pueden ser el inicio del proceso de adaptaciones agudas y crónicas al ejercicio excéntrico.

El músculo como material dúctil, responde al alto nivel de tensión generada por la contracción excéntrica, deformándose (elasticidad). Fridén et al. (1981; Newham et al. 1983; Beaton et al. 2002, citados en Proske, and Morgan, 2001)(14) evidenciaron en biopsias de músculos, que fueron ejercitados excéntricamente y había presentado dolor muscular tardío (DOMS) alteraciones morfológicas en los filamentos del músculo que consistieron en desorganización de las líneas Z, afectando las moléculas de titina (encargada de mantener la estructura de los elementos contráctiles de la miofibrilla), produciendo un daño selectivo y no homogéneo. Igualmente fueron encontrados desplazamientos de los núcleos de las células musculares (Child et al., 1999, citado en Byrne, Twist and Easton, 2004)(15).

Esta disrupción miofibrilar, fue encontrada tres veces más en las fibras rápidas que en las lentas, (Fridén et al., 1983, citado en Proske, 2001)(14), lo que corrobora lo enunciado anteriormente sobre la selectividad de mayor reclutamiento de fibras rápidas durante la contracción excéntrica. Este daño sobre el sarcolema y retículo sarcoplasmático, puede inducir a un incremento en la concentración de Ca^{++} intracelular. La unión de estos dos fenómenos mecánico y fisiológico, explica la pérdida de tensión en la contracción muscular.

Posteriormente a esta lesión mecánica se desencadena una reacción inflamatoria, mediada por la síntesis de leucotrienos, encargados de incrementar la permeabilidad vascular y actuando como factores quimiotácticos (atrayendo neutrófilos al sitio del daño) y las prostaglandinas (E2 y PGE2), productoras del dolor, a la hipersensibilidad de determinadas aferencias primarias. Este proceso se evidencia por la hinchazón, debida a la acumulación del líquido, con infiltrados de neutrófilos (detectados tanto en sangre, como en músculo) que liberan durante su actividad fagocítica: lisozimas (facilita la rotura de proteínas dañadas) y oxígeno.

Efecto de la repetición de carga: Está demostrado que en forma aguda el ejercicio excéntrico de intensidad elevada, produce daño muscular y en consecuencia dolor e inflamación. Pero si se realiza el mismo ejercicio, un tiempo después se produce una adaptación “efecto protector” basado en los principios del entrenamiento deportivo. Este fenómeno ha sido llamado “Efecto de la repetición de carga” (RBE) (Mc Hungh et al., 1999 citado por Guilhem , Cornu y Guével, 2010)(16)

Este proceso depende del tipo de ejercicio excéntrico realizado, de la carga, del número de repeticiones y del rango o amplitud del movimiento realizado (longitud del complejo músculo-tendón). (Pettitt et al., 2005, citado en Brughelli and Cronin, 2007)(17) y ha demostrado que ejercicios realizados en mayores rangos de movilidad, son más susceptibles de producir el “Efecto de la repetición de carga” (RBE), que en ejercicios de menor amplitud.

McHungh et al (1999 citado por Guilhem, Cornu y Guével, 2010)(16) postulan la siguiente teoría sobre el “Efecto de la repetición de carga” (RBE):

Neurales: Aunque está controvertido, parece que una de las explicaciones del “Efecto de la repetición de carga” (RBE), es el patrón de reclutamiento específico, de las fibras rápidas que se produce de las contracciones excéntricas.

Mecánicas: Hay dos posibles explicaciones:

Re-organización estructural de los filamentos intermedios (agrupaciones de proteínas fibrosas) (transmisión de fuerzas), después del primer ejercicio, proporcionan unas mejores condiciones para afrontar la segunda carga excéntrica. (Fridén et al., 1983, citado en Proske and Morgan, 2001)(14)

Adaptación del tejido conectivo intramuscular: posterior a un ejercicio con alto componente excéntrico, ayudaría a disipar el estrés de las miofibrillas durante las contracciones excéntricas. (Lapier et al., 1995, citados en Guilhem, Cornu y Guével, 2010)(16).

Celular: Reforzamiento de la membrana celular, como explicación alternativa a la adaptación del tejido conectivo. (Clarkson y Temblay, 1988, citado en Izquierdo, 2008 p. 619)(18) Eliminación de un grupo de fibras débiles susceptibles al daño, después del primer ejercicio. (Byrne et al., 1985, Foley, 1999, citados en Izquierdo, 2008 p. 619 y Mair et al., 1995, citada en Byrne, Twist and Eston, 2004)(18). Esta teoría pierde valor cuando se demuestra que sucede lo mismo cuando el ejercicio no ha producido daño. (Clarkson y Temblay, 1988; Brown et al., 1997, citados en Byrne, Twist and Eston, 2004). (13)

Adaptaciones crónicas del músculo al ejercicio excéntrico:

Para investigar las adaptaciones al ejercicio excéntrico, es necesario utilizar estímulos que produzcan esfuerzos mecánicos (tensión), junto con la separación de los extremos del músculo (característica de la contracción excéntrica). La revisión bibliográfica ha reportado que la aplicación a largo plazo de estos estímulos pueden producir, entre las muchas adaptaciones: (i) adición de sarcómeros en serie, (Butterfield et al. 2005; Lynn and Morgan, 1994, citados por Duclay, Martin, Duclay, Cometti y Pousson, 2009)(19) que puedan afectar la longitud fascículo; e inducir (ii) adaptaciones en la rigidez del músculo y del tendón (Kubo, Yata, Kanehisa y Fukunaga, 2006). (20)

Adaptaciones neurales: De acuerdo a las características de la contracción excéntrica, Guilhem, Cornu y Guével, (2010) (16), describen las respuestas de estas propiedades al entrenamiento excéntrico, con los siguientes resultados:

a. Actividad cortical más amplia y más rápida a medida que los movimientos se están ejecutando (Fang et al., 2004 citado en Guilhem, Cornu y Guével, (2010)(16).

b. Estudios con electroencefalogramas mostraron una alta y temprana actividad cortical, antes, y durante contracciones excéntricas submáximas y máximas, lo que sugiere un proceso de programación en el Sistema Nervioso Central (SNC) diferente a las contracciones concéntricas.

c. Inversión del patrón de activación de las unidades motoras. Durante la contracción excéntrica son reclutadas preferiblemente las fibras de contracción rápida y las unidades motoras de umbral alto en todos los niveles de carga. Con el entrenamiento excéntrico se presenta aumento de fibras musculares intermedias (IIa y IIa/IIb), y a veces disminución de las IIb (Nardone, et al. 1989 citado en Enoka, 1996) (10).

d. Aumento del efecto “educación-cruzada” (efecto mediante el cual la fuerza se producen en la extremidad contra lateral no entrenada) (Enoka, 1996)(10)

e. Adaptaciones neurales rápidas, secundarias a entrenamiento de la resistencia y adaptaciones neuronales más rápidas al entrenamiento de la fuerza (Hortobagyi et al. 1996; Hortobagyi et al. 2001 citado en Enoka, 1996)(10)

f. Atenuación de la actividad nerviosa muscular simpática (Carrasco et al., 1999 citado en Roig, 2009)(6)

g. Reducción de la amplitud electromiografía (EMG) en los niveles de fuerza similar, porque la activación de unidades motoras es más bajo (Tesch et al., 1990 citado en Enoka, 1996)(10).

Adaptaciones Fisiológicas: Se ha demostrado que con el entrenamiento excéntrico, se mejora la eficiencia del metabolismo, presentando mayor resistencia a la fatiga y al aumento del consumo de oxígeno durante las acciones excéntricas son insignificantes en comparación con las contracciones concéntricas e isométricas (Horstmann et al., 2001; Ryschon et al., 1997; Dudley et al., 1991 citado en Roig, y Ranson, 2007)(11).

Se podría teóricamente definir que en una determinada carga de trabajo con un gasto metabólico reducido, aumentaría en la duración de tiempo. Por ejemplo, un protocolo en bicicleta excéntrico ha demostrado mayores ganancias de fuerza e hipertrofia muscular en comparación con el entrenamiento concéntrico a la misma intensidad metabólica. (LaStayo et al., 2000, citado por Roig, y Ranson, 2007)(11).

La capacidad de proporcionar igual o mejor fortalecimiento en un mínimo costo de energía: Ventajas mecánicas de las contracciones de alargamiento, por mayor absorción y almacenamiento de energía (LaStayo et al., 2003)(12), en teoría podría ser de gran beneficio para los grupos que se caracterizan por una baja tolerancia al ejercicio tales como los adultos mayores (LaStayo et al., 2003)(12) y pacientes con enfermedades crónicas (Roig et al., 2008 citado en Roig et al. 2010)(21) Estos resultados son consistentes con las investigaciones que ilustra (Ryschon et al., 1997, citado en Roig, y Ranson, 2007)(11) de una relativa bajo producción de volumen de ATP y una reducción de la producción de volumen de ATP y una reducción de la producción de amoníaco y lactato durante la contracción excéntrica, en comparación con las acciones de los músculos concéntricos (Horstmann et al., 2001, citados en Roig, y Ranson, 2007)(11).

Por lo tanto, se concluye que la mayor resistencia a la fatiga es debido a las ventajas mecánicas de las contracciones de alargamiento, debido a la mayor absorción y almacenamiento de energía y al bajo consumo de oxígeno en comparación con las contracciones concéntricas.

Adaptaciones Mecánicas: (Cambios estructurales). Los factores intrínsecamente relacionados con la arquitectura muscular observados en programas de entrenamiento excéntrico son el área de sección transversal del músculo (CSA), el ángulo de penetración y la longitud de la fibra.

Una de las principales adaptaciones que presenta el músculo, posterior a un entrenamiento excéntrico es el aumento de masa de la estructura estimulada, que se visualiza en la hipertrofia del músculo, determinada por el aumento del área de la sección transversal, factor desencadenante de la generación de la fuerza muscular (Dudley et al., 1991; Farthing y Chilibeck, 2003; Komi y Buskirk, 1972; Higbie et al., 1996, citados en Guilhem, Cornu y Guével, 2010)(16).

La capacidad de producción de la fuerza máxima de un músculo es proporcional a su área de sección transversal (CSA): Cuanto más grande de puentes cruzados (actina –miosina) que se pueden activar durante una contracción.

Teóricamente la hipertrofia puede deberse a: Mayor capacidad para generar fuerza máxima, presente en las contracciones excéntricas.

Respuesta celular (reparación) al daño inicial producido en las proteínas de los miofilamentos de las fibras musculares, que potenciaría la respuesta hipertrófica muscular.

Un proceso asociado a la hipertrofia muscular es el aumento en el ángulo de penetración, el cual es modificado por el aumento de la masa muscular. Varias investigaciones han demostrado, que posterior a una fase de entrenamiento con carga, se aumenta el ángulo de penetración de los fascículos musculares (adición de la cantidad de elementos contráctiles en paralelo) (Aagaard, et al., 2001, citado en Roig, O'Brien, Kirk, Murray, McKinnon, Shadgan and Reid, 2009)(22). Con relación al entrenamiento excéntrico se demostró que en un programa de 10 semanas aumentó el ángulo de penetración en 21.4% frente a un 13.3% de un programa concéntrico (Blazevich et al., 2007, citado en Guilhem, Cornu y Guével, 2010)(16)

En cuanto al cambio de longitud de los fascículos musculares, los protocolos de entrenamiento que utilizaron sobre carga (Seynnes et al., 2007, citados en Guilhem, Cornu y Guével, 2010)(16) o de alta velocidad por ejemplo, pliometría (Blazevich et al., 2007, citados en Guilhem, Cornu y Guével, 2010)(16) han reportado incremento de la longitud de los fascículos musculares (adición de sarcómeros en serie). Un estudio encontró un aumento de 3.1% de la longitud de los fascículos del vasto lateral después de un entrenamiento excéntrico, comparado con un 6.3% de entrenamiento concéntrico, sin significancia estadística entre las modalidades de entrenamiento entre las dos modalidades de entrenamiento (Blazevich et al., 2007, citado en Guilhem, Cornu y Guével, 2010)(16).

“Ejercicios excéntricos de alta intensidad resultan en grandes cambios de la longitud óptima”

“Músculos que se contraen excéntricamente a lo largo de su longitud resultan en grandes cambios de la longitud óptima”

“Alto volumen de ejercicio excéntrico resultan en grandes cambios de la longitud óptima”

“La combinación de alta intensidad/ contracción excéntricamente a lo largo de su longitud o alto volumen/ contracción excéntricamente a lo largo de su longitud producen grandes cambios en la longitud óptima”

“La arquitectura no afecta el cambio de longitud óptima”

Los posibles mecanismos responsables de estas respuestas pueden ser:

La “sarcomerogénesis” es el proceso por medio del cual se forman nuevos sarcómeros en serie dentro de una fibra muscular, el cual tiene un importante papel en la relación entre longitud del sarcómero y el ángulo articular (Butterfield et al., 2005; Lynn et al., 1998; Yu et al, 2003 citados en Roig y Ranson, 2007)(11).

Incremento de la tensión pasiva: pueden presentarse por dos fenómenos: uno de respuesta aguda, “de hasta 10 días después de una sola sesión de ejercicio excéntrico, debido a una disrupción del proceso de acoplamiento de excitación” y el otro, de respuesta crónica, “después de programas de entrenamiento excéntrico de 6 a 8 semanas, que puede causar un incremento en la contribución de los elementos pasivos” (Brughelli y Cronin, 2007)(17)

Esta respuesta biomecánica puede tener una ventaja al permitir a la unidad músculo-tendón, que cuanto menor sea el ángulo articular (ángulo de torsión óptimo), es mayor la fuerza muscular generada y entre mayor el rango a través del cual la musculatura se desplaza, posiblemente más riesgo de lesión por tensión muscular. (Brockett et al, 2004; Gleeson et al., 2003; Snyder et al., 1998; Proske et al 2004 citados en Roig y Ranson, 2007)(11).

Posiblemente la amplitud del movimiento, más el tipo de contracción y la velocidad del movimiento (Blazevich et al. 2007 citados por Guilhem, Cornu y Guével, 2010)(16) son los factores de mayor impacto sobre el cambio de longitud de los fascículos musculares.

Rigidez muscular: El entrenamiento excéntrico produce cambios en la estructura normal del músculo. Esta estructura se convierte en menos distensible con un aumento de la fuerza necesaria para producir un cambio en su longitud, ocasionada por la disminución aguda de la elasticidad, aumento de Ca^{2+} libre post ejercicio induciendo a interrupciones de los miofilamentos y también como resultado de la contractura en el músculo dañado, es decir, las fibras restantes permanecen acortadas a pesar de no disparar impulsos ya inducidos (Allen, 2001; Fridé y Lieber, 1992; Jones et al., 1997, Whitehead et al., 2001 citados en Roig y Ranson, 2007)(11).

Adaptaciones del tendón al ejercicio excéntrico

El tendón, o mejor la unión miotendinosa, tiene muy pocas investigaciones, sobre la respuesta específica al entrenamiento excéntrico, en personas sanas (Duclay et al., 2009; Mahieu et al., 2008; Morrissey et al., 2010; Rees et al., 2008)(19), al contrario de la vasta cantidad de estudios que hay en personas con tendinopatía (Kingma, De Knikker, Wittink, Takken, 2007; Magnussen, Dunn and Thomson, 2009); (Wasielwsky y Kotsko 2007); (Woodley, Newsham-West and Baxter, 2007, citados en Grigg, Wearing, Smeathers, 2009)(23).

La literatura refiere un gran número de trabajos con resultados positivos del ejercicio excéntrico para el tratamiento de la tendinopatía, pero al mismo tiempo no está establecida dicha metodología, algunos son conscientes de las dificultades de las intervenciones fisioterapeutas (Kingma et al., 2007) (24)

Algunos de los efectos reportados son:

- Disminución del dolor y satisfacción entre el 60 y 90% de los pacientes y alargamiento de la unión miotendinosa (Magnussen et al., 2009)(25).

- Disminución de la neo-vascularización en la región, disminuyendo el aumento en el flujo sanguíneo, lo que se traduce a menor degeneración del tendón, facilitando el reforzamiento de la estructura (Öhberg, Lorentzon, Alfredson, 2004)(26).

- Aumento de la síntesis de colágeno tipo I, III (Maffulli, 2000, citado en Wasielwsky y Kotsko, 2007)(27).

- Disminución del grosor del tendón en la región medial por la normalización en las concentraciones de glucosaminoglicanos (Gârdin et al., 2010)(28).

“El entrenamiento excéntrico es una eficiente alternativa que no solo mejora la capacidad de fuerza, sino también la potencia muscular (producto del momento de fuerza y la velocidad de contracción del músculo) en la mayoría de las actividades físicas y deportivas” (Guilhem, Cornu y Guével, 2010)(16)

Bibliografía

1. Lindstedt SL, LaStayo, P. C. and Reich, T. E. When Active Muscles Lengthen: Properties and Consequences of Eccentric Contractions. *News Physiology Sciences* 2001 December;16:256-61.
2. Komi PVB, E.R. Effect of eccentric and concentric muscle conditioning on tension and electrical activity of human muscle. *Ergonomics*. 1972;15:417-34.
3. Schmidbleicher DB, M. . Neuronal adaptation and increase of cross-sectional area studying different strength training methods. *En Biomechanics*. 1987:615-21.
4. Hakkinen K, Komi, P.V., Alen, M. & Kauhanen, H. EMG, muscle fibre and force production characteristics during a 1 year training period in elite weightlifters. *European Journal of Applied Physiology*. 1987;56:419-27.
5. Piazzesi G, Reconditi, M., Linari, M., Lucii, L., Bianco, P. Brunello, E., Decostre, V., Stewart, A., Gore DB. Irving, TC., Irving, M. and Lombardi, V. . Skeletal muscle performance determined by modulation of lumber of myosin motors rather than motor force or stroke size. *Cell*. 2007;131:784-95.
6. Carrasco DL, Delp, M.D. & Ray, C.A. . Effect of concentric and eccentric muscle actions on muscle sympathetic nerve activity. *Journal of Applied Physiology*. 1999;86:558-63.
7. McHugh MP, Connolly, D.A., Eston, R.G. & Gleim, G.W. . Electromyographic analysis of exercise resulting in symptoms of muscle damage. *Journal of Sports Sciences*. 2000;18:163-72.
8. Cannell LJ, Taunton, J.E., Clement, D.B., Smith, C. & Khan, K.M. A randomised clinical trial of the efficacy of drop squats or leg extension/leg curl exercises to treat clinically diagnosed jumper's knee in athletes: pilot study. *British Journal of Sport Medicine*. 2001;35:60-4.
9. Krasnov F. Metodología del Entrenamiento de la Fuerza. *Revista de la Asociación Argentina de Kinesiología*
10. Enoka RM. Eccentric contractions require unique activation strategies by the nervous system. *Journal Applied of Physiology*. 1996;81:2339-46.
11. Roig MyR, C. Literature review Eccentric muscle actions: Implications for injury prevention and rehabilitation. *Physical Therapy in Sport*. 2007;8:88-97.
12. LaStayo PC, Woolf, J. M., Lewek, M. D., et al. Eccentric Muscle Contractions: Their Contribution to Injury, Prevention, Rehabilitation, and Sport *Journal of Orthopaedic y Sports Physical Therapy*. 2003;33:557-71.
13. Byrne C, Twist, C. and Eston, R. . Neuromuscular Function After Exercise-Induced Muscle Damage. Theoretical and Applied Implications. *Sports Medicine*. 2004;34:49-69.
14. Proske UaM, D. L. . Tropical Review Muscle Damage from eccentric exercise: mechanism, mechanical signs, adaptation and clinical applications *Journal of Physiology* 2001;537:333-45.
15. Child S, Bryant, A. L., Clark, R. A. and Crossley, K. M. . Mechanical properties of the Achilles tendon aponeurosis are altered in athletes with Achilles tendinopathy *The American Journal of Sports Medicine* 2010;8:1885-93.
16. Guilhem G, Cornu, C. y Guével, A. . Neuromuscular and muscle-tendon system adaptations to isotonic and isokinetic eccentric exercise *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine* 2010;53 319-41.
17. Brughelli MyC, J. . Altering the Length-Tension Relationship with Eccentric Exercise Implications for Performance and Injury *Sports Medicine*. 2007;37 807-26.

18. Izquierdo M. Biomecánica y bases neuromusculares de la actividad física y el deporte 2008.
19. Duclay J, Martin, A., Duclay, A., Cometti, G. y Pousson, M. . Behavior of fascicles and the myotendinous junction of human medial gastrocnemius following eccentric strength training *Muscle Nerve* 2009;39 819-27.
20. Kubo K, Yata, H., Kanehisa, H. y Fukunaga, T. Effects of isometric squat training on the tendon stiffness and jump performance. *European Journal of Applied Physiology*. 2006;96:305-14.
21. Roig M, MacIntyre, D. L., Eng, J. J., Narici, M., Maganaris, C. y Reid, W. D. Preservation of eccentric strength in older adults: Evidence, mechanisms and implications for training and rehabilitation. *Experimental Gerontology*. 2010;45:400-9.
22. Roig M, O'Brien, K., Kirk, G., Murray, R., McKinnon, P., Shadgan, B. and Reid, D. W. The effects of eccentric versus concentric resistance training on muscle strength and mass in healthy adults: a systemic review with meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*. 2009;43:556-68.
23. Grigg NL, Wearing, S. C. y Smeathers, J. E. Eccentric calf muscle exercise produces a greater acutereduction in Achilles tendon thickness than concentric exercise. *British Journal of Sport Medicine*. 2009;43:280-3.
24. Kingma JJ, De Kinkker, R., Wittink, H. M. y Takken, T. Eccentric overload training in patients with chronic Achilles Tendinopathy: a sistemic review. *British Journal of Sport Medicine*. 2007;41.
25. Magnussen RA, Dunn, W. R. y Thomson A. . Nonoperative Treatment of Midportion Achilles Tendinopathy: A Systematic Review *Clinical Journal Sport Medicine*. 2009;19:54-64.
26. Ôhberg L, Lorentzon, R. y Alfredson, H. Eccentric training in patients with chronic Achilles tendinosis: normalised tendon structure and decreased thickness at follow up. *British Journal of Sport Medicine*. 2004;38:8-11.
27. Wasielewski NJyK, K. M. . Does Eccentric Exercise Reduce Pain and Improve Strength in Physically Active Adults with Symptomatic Lower Extremity Tendinosis? A Systemic Review. *Journal of Athletic Training*. 2007;42:409-21.
28. Gârdin A, Movin, T., Svensson, L. y Shalabi, A. The long-term clinical and MRI results following eccentric calf muscle training in chronic Achilles tandinosis. *Skeletal Radiology*. 2010;39:435-42.