



Universidad
de Alcalá

Universidad de Alcalá
Facultad de Fisioterapia
Departamento de Fisioterapia

"Reclutamiento de unidades motoras en contracciones concéntricas, isométricas y excéntricas"

ALUMNO: Nuria Martín Laín

TUTOR: Pedro de la Villa Polo, Catedrático

Alcalá de Henares, 22 de Mayo de 2012



Universidad
de Alcalá

Universidad de Alcalá
Facultad de Fisioterapia
Departamento de Fisioterapia

"Reclutamiento de unidades motoras en contracciones concéntricas, isométricas y excéntricas"

ALUMNO: Nuria Martín Laín

TUTOR: Pedro de la Villa Polo, Catedrático

Firma del autor:

VºBº del tutor:

Alcalá de Henares, 22 de Mayo de 2012

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradecer a la Universidad de Alcalá, y en especial al Departamento de Fisioterapia, por permitirnos la Adaptación al Grado en Fisioterapia.

A todos los profesores y fisioterapeutas que, a lo largo de estos años, han contribuido en mi formación académica y profesional. En especial a César y Sonia, con quienes he aprendido mucho este curso, tanto personal como profesionalmente.

A mi tutor, Pedro de la Villa, por toda la ayuda prestada y sus orientaciones para que este estudio se pudiera realizar.

A mis padres y mis hermanas, por permitirme estudiar y estar a mi lado apoyándome y animándome en todo momento. A toda mi familia y a mis amigos, por el apoyo y los ánimos recibidos.

A mis compañeros, por toda la ayuda que me han dado y compartir tantos momentos divertidos juntos a lo largo de estos años.

Por último agradecer a todos los estudiantes que, de forma voluntaria, han participado en el estudio.

RESUMEN

Introducción: El Dolor Muscular Postesfuerzo de Aparición Tardía (DOMPAT), coloquialmente conocido como "agujetas", es un dolor localizado que aparece en el músculo después de haber realizado un esfuerzo intenso y que se prolonga durante 5-7 días. El mecanismo principal por el cual se produce se desconoce todavía, aunque se ha observado que aparece más fácilmente si el músculo se contrae de forma excéntrica.

Objetivo: Este estudio pretende observar si existe relación entre la fuerza producida y el grado de reclutamiento de unidades motoras de cada contracción (concéntrica, isométrica y excéntrica).

Material y métodos: Se trata de un estudio piloto observacional que contó con la colaboración de 15 estudiantes voluntarios, 8 hombres y 7 mujeres con edades comprendidas entre los 18 y los 22 años (con una edad media de 19,27 años). Los sujetos (7 entrenados y 8 no entrenados) cumplimentaron un cuestionario previamente. Los aspectos evaluados fueron la actividad eléctrica del músculo tríceps braquial del miembro superior dominante y la fuerza producida por el sujeto durante una flexión de brazos o fondo, es decir, durante la contracción concéntrica, isométrica y excéntrica de dicho músculo.

Resultados y discusión: Los sujetos, de forma general, realizan una mayor fuerza en las contracciones excéntricas que en las concéntricas e isométricas, sin apreciarse diferencias significativas entre sujetos entrenados y no entrenados. Se observó una correlación entre el peso corporal y la fuerza producida por el sujeto. En el análisis de la actividad eléctrica se observó un mayor reclutamiento en las contracciones concéntricas que en las excéntricas e isométricas, presentando los sujetos entrenados un reclutamiento menor que los no entrenados. En la correlación realizada entre la fuerza ejercida y el reclutamiento de unidades motoras de cada contracción, los resultados obtenidos no fueron significativos.

Conclusión: Este estudio nos permite calcular el tamaño muestral para el cual serían significativos los resultados obtenidos en este estudio.

PALABRAS CLAVE: Dolor Muscular Postesfuerzo de Aparición Tardía (DOMPAT), Delayed Onset Muscle Soreness (DOMS), Fuerza Muscular, Dinamometría, Actividad Eléctrica, Electromiografía.

ABSTRACT

Introduction: Delayed Onset Muscle Soreness (DOMS) is a localized pain that appears in the muscle after an intense effort and continues for 5-7 days. The main mechanism by which occurs is still unknown, although it has been observed that it appears more easily if the muscle performs eccentric contraction.

Objective: This study aims to observe if there is a relationship between force and the level of motor unit recruitment of each contraction (concentric, isometric and eccentric).

Material and methods: this study is an observational pilot study which counted with the collaboration of 15 student volunteers, 8 men and 7 women with an age between 18 and 22 years (a median age of 19,27 years). Subjects (7 trained subjects and 8 untrained subjects) filled a questionnaire previously. The evaluated aspects were the electrical activity of the triceps brachii muscle of the dominant upper limb and the force produced by the subject during a push-up, that is, during the concentric, isometric and eccentric contraction of the muscle.

Results and discussion: subjects, in general, perform a greater strength in eccentric contractions than in concentric and isometric contractions, and there were no differences between trained and untrained subjects. It was observed a correlation between body weight and the force produced by the subject. In the analysis of electrical activity was observed a greater recruitment in concentric contractions than in the eccentric and isometric contractions. The trained subjects presented a lower recruitment than untrained subjects. On the correlation between the force and the motor unit recruitment of each contraction, the results were not significant.

Conclusion: This study allows us to calculate the sample size for which the results obtained in this study would be significant.

KEY WORDS: Delayed Onset Muscle Soreness (DOMS), Strength Muscle, Dynamometry, Electrical Activity, Electromyography.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Dolor Muscular Postesfuerzo de Aparición tardía.....	1
1.2. Músculo Esquelético.....	4
1.2.1. Anatomía macroscópica.....	4
1.2.2. Anatomía microscópica.....	5
1.2.3. Tipos de fibras musculares.....	7
1.2.4. Inervación del músculo esquelético.....	8
1.2.5. Reclutamiento de fibras.....	10
1.2.6. Tipos de contracción muscular.....	12
1.3. Electromiografía.....	13
1.3.1. Electromiógrafo.....	13
1.3.2. Registro de la señal eléctrica.....	14
1.3.3. Parámetros.....	14
1.3.4. Electromiografía de la contracción isométrica.....	15
1.3.5. Electromiografía de la contracción isotónica.....	15
1.4. Fuerza Muscular. Dinamometría.....	16
1.4.1. Dinamómetros.....	16
1.5. Hipótesis del Estudio.....	18
 2. METODOLOGÍA.....	 19
2.1. Variables a evaluar.....	19
2.2. Recogida de datos.....	20
2.2.1. Explicación de la prueba.....	20
2.2.2. Colocación de electrodos y dinamómetros.....	21
2.2.3. Realización de la prueba.....	21
2.2.4. Recursos materiales.....	23

3. RESULTADOS.....	25
3.1. <i>Parámetros constitucionales.....</i>	25
3.2. <i>Grado de entrenamiento.....</i>	25
3.3. <i>Prueba física.....</i>	26
3.4. <i>Fuerza producida.....</i>	29
3.5. <i>Correlación entre peso corporal y fuerza ejercida.....</i>	31
3.6. <i>Registro de actividad eléctrica muscular.....</i>	31
3.7. <i>Reclutamiento de unidades motoras, RMS.....</i>	33
3.8. <i>Distribución de los sujetos según el reclutamiento de unidades motoras.....</i>	36
3.9. <i>Correlación entre la fuerza ejercida y el reclutamiento de unidades motoras.....</i>	38
4. DISCUSIÓN.....	39
5. CONCLUSIONES.....	41
6. BIBLIOGRAFÍA.....	43
7. ANEXOS.....	47
7.1. <i>Cuestionario.....</i>	47

ÍNDICE DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

DOMPAT: Dolor Muscular Postesfuerzo de Aparición Tardía

DOMS: Delayed Onset Muscle Soreness

Fig.: Figura

EMG: Electromiografía

ARV: Average Rectified Value (Valor Promedio Rectificado)

RMS: Root-Mean-Square (Raíz Cuadrada Media)

cm: centímetros

Hz: hercios

kHz: kilohercios

IMC: Índice de Masa Corporal

kg: kilogramos

m: metros

kg/m²: kilogramos por metro cuadrado

R²: coeficiente de correlación

μV: microvoltios

CC: Contracción Concéntrica

CI: Contracción Isométrica

CE: Contracción Excéntrica

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

TABLAS:

Tabla 1.1. Características de las fibras musculares.....	8
Tabla 1.2. Características de las unidades motoras.....	9
Tabla 3.1. Promedios de los parámetros constitucionales.....	25
Tabla 3.2. Sujetos entrenados y no entrenados.....	26
Tabla 3.3. Fuerza producida por un sujeto en 10 flexiones.....	29
Tabla 3.4. Fuerza media producida por cada sujeto en las tres fases de contracción, dividido por género y grado de entrenamiento.....	30
Tabla 3.5. RMS de un sujeto en 10 flexiones.....	33
Tabla 3.6. Promedio de la RMS de cada sujeto en las tres fases de contracción, dividido por género y grado de entrenamiento.....	35
Tabla 3.7. Distribución de sujetos en grupos según el reclutamiento de unidades motoras.....	36

FIGURAS:

Fig. 1.1. Estructura macroscópica del músculo.....	4
Fig. 1.2. Estructura de una fibra muscular.....	5
Fig. 1.3. Estructura de una miofibrilla.....	6
Fig. 1.4. Reclutamiento de fibras musculares según la intensidad de la fuerza muscular.....	11
Fig. 1.5. Tipos de contracciones musculares.....	12
Fig. 1.6. Electromiógrafo.....	13
Fig. 1.7. Dinamómetros manuales.....	17
Fig. 2.1. Colocación de los electrodos y los dinamómetros.....	21
Fig. 2.2. Secuencia de la prueba física.....	22
Fig. 3.1. Prueba física y curva fuerza-tiempo.....	28

Fig. 3.2. Correlación entre peso corporal y fuerza ejercida.....	31
Fig. 3.3. Gráficas temporales de fuerza ejercida y actividad eléctrica....	32
Fig. 3.4. RMS de un sujeto en 10 flexiones.....	34
Fig. 3.5. Ejemplos del comportamiento del reclutamiento de unidades motoras.....	37
Fig. 3.6. Correlación entre fuerza y reclutamiento de dos de los sujetos.....	38

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Dolor Muscular Postesfuerzo de Aparición Tardía

El Dolor Muscular Postesfuerzo de Aparición Tardía (DOMPAT), coloquialmente conocido como "agujetas" (en inglés, DOMS, "*Delayed Onset Muscle Soreness*"), es un dolor localizado que aparece en el músculo después de haber realizado un esfuerzo intenso. Dicho dolor aparece horas después del esfuerzo, alcanzando su máxima intensidad entre las 24 y las 72 horas y prolongándose durante 5-7 días.¹

Una característica del DOMPAT es la hipersensibilidad, es decir, la reducción del umbral de dolor a la estimulación mecánica, la cual desencadena una sensación dolorosa ante estímulos que normalmente son inocuos (como una ligera presión en la zona afectada).

El DOMPAT se asocia a una ligera tumefacción, disminución del rango de movimiento articular, rigidez y pérdida de fuerza. Este dolor muscular se diferencia del dolor de origen inflamatorio por no acompañarse de dolor en reposo ni causar interrupción del sueño.

El mecanismo principal por el cual se produce el DOMPAT se desconoce todavía, pero se han propuesto varias teorías:

A. Teoría metabólica:

Los autores que defienden esta teoría, creen que los ejercicios de alta intensidad producen altos niveles de lactato, los cuales se acumulan en los músculos y se "cristalizan" en las horas siguientes.

Estudios recientes han demostrado que la mayor parte del lactato producido durante el ejercicio es eliminado por oxidación mientras que el resto del lactato puede ser utilizado como sustrato para resintetizar glucógeno muscular en el propio músculo que lo ha producido.

En las biopsias musculares realizadas después del ejercicio intenso en los músculos que padecen dolor muscular no se observan "cristales de ácido láctico",

ni siquiera con microscopio electrónico. Además las personas que padecen de la enfermedad de McArdle, las cuales carecen de la enzima glucógeno fosforilasa y por lo tanto no producen lactato al no poder descomponer el glucógeno, pueden sufrir dolor muscular postesfuerzo de aparición tardía.

De esta forma, no ha habido ni hay ninguna evidencia científica en este momento que sustente que el DOMPAT se produce por la formación de cristales de ácido láctico.

B. Teoría mecánica:

La teoría mecánica fue propuesta por Armstrong (1984)² para describir los mecanismos responsables del DOMPAT. Esta teoría sugiere el siguiente proceso:

1. Elevadas tensiones (particularmente las relacionadas con los ejercicios excéntricos) en el tejido contráctil y elástico provoca un daño estructural en las fibras musculares;
2. El daño producido en el sarcolema de las células conlleva a una disrupción en la homeostasis del calcio, lo cual provoca necrosis tisular;
3. Los productos de la actividad macrófaga y los contenidos intracelulares se acumulan en el intersticio, y que a su vez estimulan las terminaciones nerviosas libres de las neuronas sensoriales del grupo IV en los músculos produciendo la sensación de DOMPAT.

Son numerosos los investigadores que han observado que el DOMPAT aparece más fácilmente si el músculo se contrae de forma excéntrica (Byrnes y Clarkson, 1986; MacIntyre y cols., 1995; Fridén y Lieber, 2001; Yu y cols., 2002; Lieber y Fridén, 2002; Cheung y cols., 2003).^{3, 4, 5, 6, 7, 8}

Los daños musculares producidos por los ejercicios excéntricos descritos por Fridén y Lieber (1998)⁹ son disrupciones en el citoesqueleto, pérdida del registro miofibrilar, disrupción de las líneas o discos Z, desorganización de la banda A, y la pérdida de la integridad celular es manifestada por depósitos de fibronectina en el plasma intracelular, regiones hipercontraídas e invasión de células.

Hay estudios que, tras la realización de ejercicios excéntricos, han detectado un aumento de la concentración de enzimas y proteínas musculares en sangre, como la creatina kinasa, mioglobina y troponina I, lo que demuestra que este tipo de ejercicios producen daño muscular.

C. Teoría inflamatoria:

Esta teoría sostiene que, aunque las lesiones musculares nombradas anteriormente en la teoría mecánica están presentes tras un ejercicio excéntrico, la exacerbación de la lesión se debe a la respuesta inflamatoria que tiene lugar durante las 24-48 horas siguientes a dicho ejercicio.

D. Teoría neurogénica:

Esta teoría propone que se produce una alteración en la interpretación sensorial en el sistema nervioso central cuando éste interpreta como dolorosos aquellos estímulos mecánicos no dolorosos conducidos por las fibras mielínicas de gran diámetro.

E. Teoría de isquemia local:

Los autores de esta teoría sugirieron que el ejercicio, aunque sea moderado, causa en el tejido muscular una inflamación que aumenta la presión del tejido, lo que puede llevar a una isquemia local que cause dolor y espasmos musculares. Estos espasmos causan una inflamación adicional y perpetúan un ciclo de inflamación e isquemia produciendo dolor muscular postesfuerzo de aparición tardía.

1.2. Músculo Esquelético

Los músculos son los encargados, entre otros, de mantener posturas y de producir movimientos. Gracias a la contracción muscular, el músculo nos permite llevar a cabo las actividades de la vida diaria, labores profesionales y actividades físicas y deportivas.

1.2.1. Anatomía macroscópica ^{1, 10, 11}

El músculo está formado por **fascículos** de numerosas **fibras musculares**. Las fibras musculares están cubiertas por una delicada membrana de tejido conjuntivo (*endomysio*), los fascículos están envueltos por un tejido conjuntivo fuerte (*perimisio*), y todo el músculo está cubierto por una lámina más gruesa (*epimisio*). Estas envolturas se continúan con estructuras fibrosas para unir el músculo a los huesos o a otras estructuras, bien en forma de tendón o bien en forma de aponeurosis.

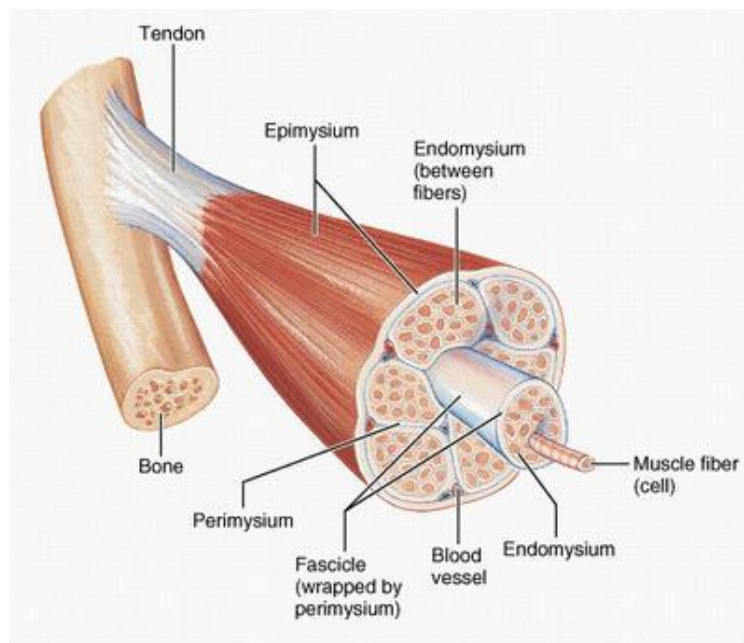


Fig. 1.1. Estructura macroscópica del músculo.

1.2.2. Anatomía microscópica ^{1, 10, 11}

Las **fibras musculares** son células gigantes multinucleadas, largas, cilíndricas, dispuestas paralelamente y altamente especializadas. Están compuestas por una membrana plasmática, que recibe el nombre de *sarcolema*, y un citoplasma, que recibe el nombre de *sarcoplasma*.

La membrana plasmática o sarcolema, presenta unas invaginaciones, denominadas *túbulos T*, que penetran hacia el interior de la fibra perpendicularmente a la superficie. Los túbulos T contienen en su interior líquido extracelular y se asocian íntimamente al retículo sarcoplásmico formando una estructura conocida como *triada* (muy importante para la contracción muscular).

El sarcoplasma, que contiene escaso citosol, está ocupado en su mayoría por unas estructuras complejas llamadas **miofibrillas**. El resto de estructuras son retículo sarcoplásmico, mitocondrias, aparato de Golgi, gránulos de glucógeno, depósitos de triglicéridos y mioglobina.

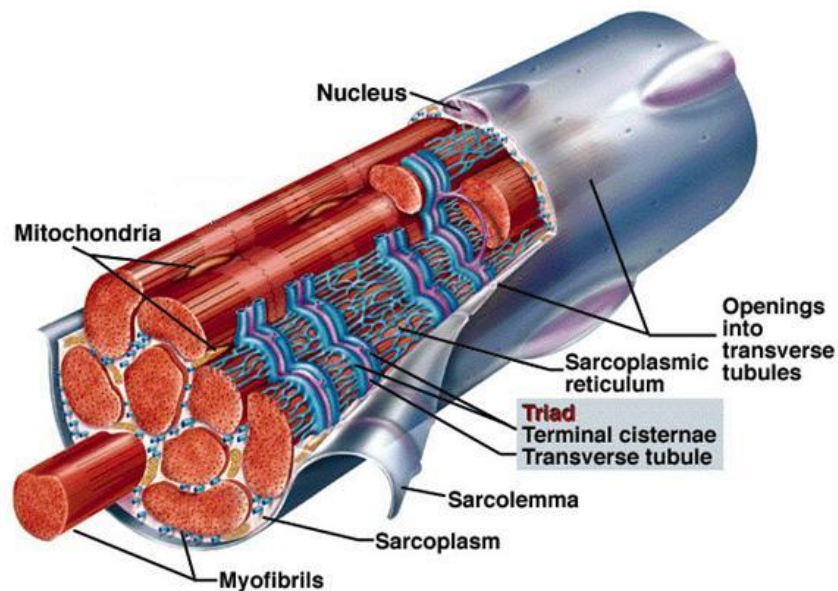


Fig. 1.2. Estructura de una fibra muscular.

Las miofibrillas son los elementos contráctiles de la fibra muscular. Presentan una alternancia regular de bandas oscuras y bandas claras, lo que da un aspecto estriado. Cada miofibrilla está constituida por una sucesión de **sarcómeros** (unidades funcionales), los cuales están formados por dos tipos de **miofilamentos** (los filamentos finos de actina y los filamentos gruesos de miosina). En el sarcómero distinguimos diferentes elementos:

-Discos Z: cada extremo de un sarcómero es un disco Z.

-Bandas I (isotrópicas): son las bandas claras, ocupadas solamente por filamentos finos, y en la mitad de la banda se encuentra un disco Z (cada mitad de una banda I pertenece a un sarcómero diferente).

-Bandas A (anisotrópicas): son las bandas oscuras, en los extremos se solapan los filamentos finos y los gruesos, en la zona central sólo hay filamentos gruesos.

-Zona H: zona central de la banda A, ocupada por filamentos gruesos.

-Líneas M: divide la banda A en dos mitades iguales y es la zona de inserción de los filamentos gruesos.

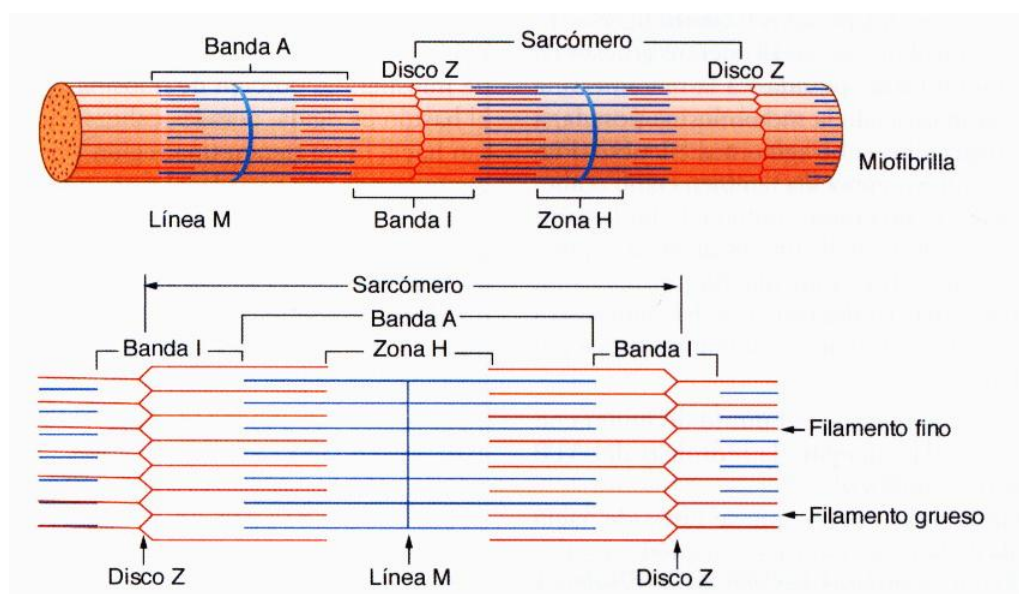


Fig. 1.3. Estructura de una miofibrilla.

1.2.3. Tipos de fibras musculares ^{1, 10, 11, 12}

Las fibras musculares poseen distintas características funcionales, metabólicas y moleculares. Podemos dividir a las fibras musculares, según el tipo de miosina presente en la fibra muscular, en *fibras tipo I* (de contracción lenta) y en *fibras tipo II* (de contracción rápida, que se subdividen a su vez en *fibras tipo II_A* y *II_B*).

Los tipos y subtipos de fibras musculares se diferencian unos de otros por la isoforma de miosina presente, la velocidad de contracción, el metabolismo, la capacidad de almacenamiento de calcio, la distribución, etc.

-Fibras rojas, de contracción lenta o tipo I: tienen un diámetro medio y su coloración roja se debe a que son fibras ricas en sarcoplasma y menos ricas en miofibrillas. Su metabolismo es esencialmente *oxidativo*, contiene numerosas mitocondrias, el retículo sarcoplásmico está poco desarrollado, y los capilares sanguíneos están muy desarrollados. Estas fibras están inervadas por motoneuronas α -2, producen contracciones lentas y de amplitud reducida, y son muy resistentes a la fatiga, por lo que permiten realizar esfuerzos de larga duración.

-Fibras blancas, de contracción rápida o tipo II: su coloración clara, pálida, se debe a la mayor presencia de miofibrillas y a la menor abundancia de sarcoplasma. Su metabolismo es predominantemente *glucolítico*, las mitocondrias son poco abundantes, el retículo sarcoplásmico está especialmente desarrollado, y los capilares sanguíneos están poco desarrollados. Estas fibras están inervadas por motoneuronas α -1, producen contracciones rápidas y de amplitud elevada, y se fatigan más rápidamente, por lo que permiten ejercicios breves e intensos.

-Fibras II_A: su diámetro es mayor que el de las fibras I y II_B. Su carácter es más oxidativo que glucolítico. La tensión que desarrollan es menor que la de las fibras II_B, pero son más resistentes a la fatiga que estas últimas.

-Fibras II_B: su diámetro es menor al de las fibras I. Presenta mayor capacidad glucolítica y menor capacidad oxidativa. La duración de la contracción es reducida y se fatigan rápidamente.

La cantidad de fibras musculares, y el tipo de éstas, por cada músculo varía considerablemente, dependiendo del tamaño y de la función de éste. También varía entre una persona y otra. Los músculos tónicos o posturales presentan mayor cantidad de fibras rojas (tipo I), mientras que los músculos fásicos o de fuerza y velocidad presentan mayor cantidad de fibras blancas (tipo II).

	Fibras tipo I	Fibras tipo IIa	Fibras tipo IIb
Color	Rojo	Intermedio	Pálido
Resistencia a la fatiga	Alta	Mediana	Baja
Diámetro	Pequeño	Mediano o pequeño	Grande
Actividad ATPasa de la Miosina	Lenta	Rápida	Rápida
Velocidad de contracción	Lenta	Rápida	Rápida
Consumo de ATP asociado a la actividad contráctil	Bajo	Mediano	Alto
Metabolismo	Oxidativo	Glucolítico/oxidativo	Glucolítico
Cantidad de mitocondrias	Alta	Intermedia	Baja
Desarrollo del retículo sarcoplásmico	Alta	Alta	Baja
Capilarización	Bajo	Alto	Alto
Tipo de contracción	Lenta	Rápida	Rápida

Tabla 1.1. Características de las fibras musculares.

1.2.4. Inervación del músculo esquelético ^{1, 10, 11, 12, 13}

Las fibras musculares se contraen tras ser estimuladas por un nervio motor. La *motoneurona*, su *axón* y las *fibras musculares* a las que está unida forman una unidad funcional llamada **unidad motora**. Las unidades motoras pueden ser:

-Unidades motoras tipo I (contracción lenta y resistentes a la fatiga): producen una tensión muy baja, el tiempo de respuesta es lento y tiene una baja pérdida de contracción tetánica al estímulo repetido. Las unidades motoras I son de pequeño tamaño, tienen una baja velocidad de conducción, un bajo umbral de excitación y están compuestas solamente por fibras I.

-**Unidades motoras tipo II_B** (contracción rápida y fatigables): producen mayor tensión, reducen la tensión al poco tiempo de estimulación tetánica intermitente. Las unidades motoras II_B son de gran tamaño, tienen una alta velocidad de conducción, un elevado umbral de excitación y están compuestas solamente por fibras II_B.

-**Unidades motoras tipo II_A** (contracción rápida y resistente a la fatiga): tienen una velocidad de contracción relativamente elevada, producen una fuerza moderada y tienen una fatiga baja. Las unidades motoras II_A combinan las propiedades de I y II_B y están compuestas por fibras II_A.

El número de fibras musculares que contiene una unidad motora varía con el tamaño del músculo y la precisión de acción del mismo. De esta forma, cuanto menor sea el número de fibras estimuladas por la unidad motora de un músculo más precisos serán los movimientos que puede realizar ese músculo. Mientras que cuantas más fibras sean estimuladas por la unidad motora de un músculo más globales (y menos precisos) serán los movimientos que realiza ese músculo.

La unidad motora inerva fibras musculares pertenecientes a distintos fascículos y se encuentra estrechamente imbricada con otras unidades motoras. Este hecho permite que la contracción tenga un carácter homogéneo, donde el reclutamiento progresivo de fibras musculares en una contracción de intensidad creciente afecta siempre a un mismo amplio sector del músculo en contracción.

	Unidad Motora tipo I	Unidad motora tipo IIa	Unidad Motora tipo IIb
Tamaño de las neuronas	Pequeña	Mediana	Grande
Velocidad de conducción	Lenta	Intermedia	Rápida
Frecuencia de tetanización	15 Hz	60 Hz	60 Hz
Reclutamiento	Muy frecuente	Intermedio	Poco frecuente
Numero de fibras por neurona	Bajo	Intermedio	Alto

Tabla 1.2. Características de las unidades motoras.

1.2.5. Reclutamiento de fibras ^{1, 11}

El hecho de que los músculos se contraigan con distintos grados de fuerza en diferentes momentos se denomina **principio de la fuerza gradual**. El músculo es capaz de crear contracciones graduadas de fuerza y duración variadas debido a que están compuestos por múltiples unidades motoras de diferentes tipos. Esta diversidad permite que el músculo varíe la contracción bien modificando los tipos de unidades motoras activas o bien cambiando el número de unidades motoras que están respondiendo en algún momento.

Uno de los factores que contribuyen al fenómeno de la fuerza gradual es el número de fibras que se contraen de forma simultánea, de forma que *cuantas más fibras musculares se contraigan al mismo tiempo mayor es la contracción del músculo*. Esto depende del número de unidades motoras que se activen o recluten, cuyo reclutamiento va a depender a su vez de la intensidad y frecuencia de la estimulación. De esta forma cuanto más intenso y frecuente sea un estímulo más unidades motoras se reclutarán y más intensa será la contracción.

El reclutamiento está controlado por el sistema nervioso y prosigue en una secuencia estandarizada, denominada **principio del tamaño** (Henneman). En primer lugar se reclutan las unidades motoras más pequeñas y sensibles, produciendo un incremento de la fuerza de contracción. *A medida que la intensidad del ejercicio aumenta y se supera el umbral de cada unidad motora adicional, se van reclutando unidades motoras de mayor tamaño y la intensidad de la contracción aumenta*. La fuerza de estimulación aumenta hasta que se alcanza el nivel máximo de contracción, momento en el que no se reclutan más unidades motoras y el músculo no se puede contraer con más energía.

Durante los ejercicios de baja intensidad la mayor parte de la fuerza muscular es generada por fibras I. Si la intensidad del ejercicio aumenta se activan las fibras II_A, y si el ejercicio necesita una fuerza máxima se activan las fibras II_B (sin llegar a reclutar todas las fibras musculares del músculo).

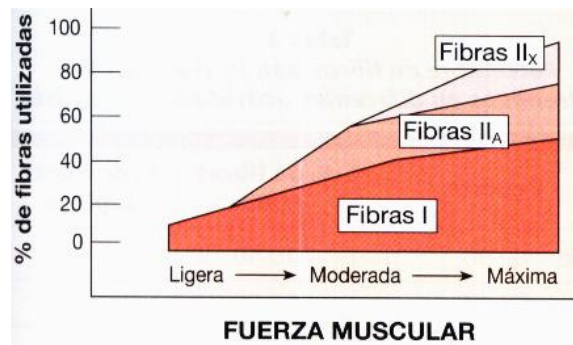


Fig. 1.4. Reclutamiento de fibras musculares según la intensidad de la fuerza muscular.

Las primeras investigaciones sobre el reclutamiento demostraron que a medida que las contracciones aumentaban, se iban reclutando unidades motoras adicionales, y la frecuencia de disparo de las unidades motoras aumentaba. Más tarde, Henneman (1957)¹⁴ demostró que las motoneuronas se reclutaban siguiendo un orden de tamaño creciente (principio del tamaño).

Bawa y cols. (1984)¹⁵ demostraron en sus investigaciones que, tanto en los músculos homogéneos como en los heterogéneos, se reclutaban en primer lugar las unidades motoras con la velocidad de conducción axonal baja (existiendo una alta correlación entre la secuencia de reclutamiento y la velocidad de conducción).

En estudios posteriores se ha observado una relación inversa entre el umbral de reclutamiento y la frecuencia de disparo.^{16, 17, 18, 19, 20, 21}

Los resultados obtenidos en el estudio realizado por De Luca y Hostage (2010)²⁰, describen un “punto de funcionamiento” para el grupo de motoneuronas que se mantiene constante en todos los niveles de fuerza y es modulado por la excitación. Estos resultados apoyan la propiedad de la “piel de cebolla” que sugiere un esquema de control básico codificado en las propiedades físicas de la motoneuronas que responden a un “impulso común” del grupo de motoneuronas.

En el estudio de De Luca y Contessa (2012)²¹ se observó que el “espectro de la frecuencia de disparo” presenta un esquema de control simple en el que, en cualquier momento dado o de fuerza, el valor de la frecuencia de disparo de las unidades motoras reclutadas en primer lugar es mayor que el de las unidades motoras reclutadas posteriormente. Este esquema jerárquico de control describe un

mecanismo que ofrece una economía eficaz de generación de fuerza para las unidades motoras de contracción baja reclutadas en primer lugar, y que reduce la fatiga en las unidades motoras de contracción alta reclutadas posteriormente.

Los principales factores que influyen en la fuerza de la contracción muscular son el estado metabólico, el reclutamiento de unidades motoras, la longitud inicial de las fibras musculares y la cantidad de carga.

La duración de las contracciones depende de factores como la naturaleza del músculo, la temperatura del músculo, las condiciones bioquímicas locales, las hormonas tiroideas, la sumación de contracciones.

1.2.6. Tipos de contracción muscular

El músculo se puede contraer de forma isotónica (concéntrica y excéntrica) e isométrica.

En las **contracciones isotónicas** se modifica la longitud del músculo, manteniéndose el tono o tensión de dicho músculo. En las contracciones **concéntricas** el músculo se acorta, mientras que en las **excéntricas** se alarga.

En las **contracciones isométricas** se modifica la tensión del músculo, manteniéndose la longitud del mismo.

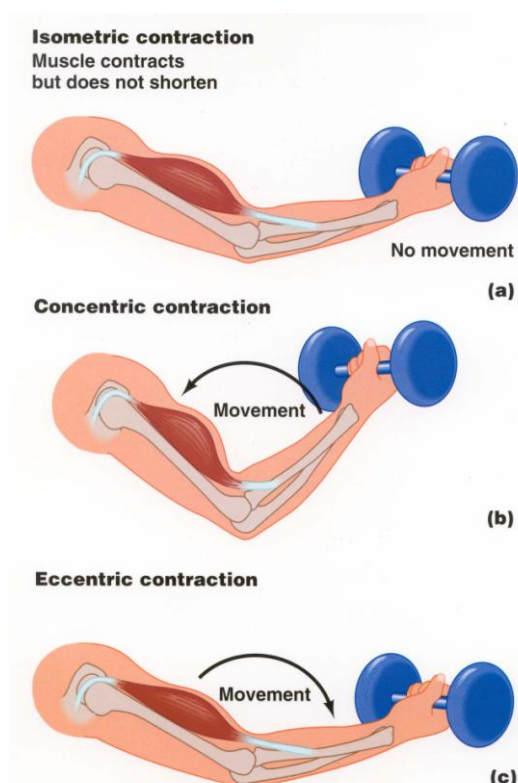


Fig. 1.5. Tipos de contracciones musculares.
a. Contracción isométrica.
b. Contracción concéntrica.
c. Contracción excéntrica.

1.3. Electromiografía

La **electromiografía** (EMG) consiste en el registro de los impulsos eléctricos de los músculos cuando éstos se activan.

La electromiografía se puede realizar de forma elemental (estudio de la actividad de una o varias unidades motoras mediante electrodos intramusculares) o de forma global (estudio de la actividad del músculo entero o de un amplio sector del mismo mediante electrodos superficiales).²⁹

1.3.1. Electromiógrafo²²

El **electromiógrafo** consta de tres componentes fundamentales: un transductor, una unidad de procesamiento y un dispositivo de salida.

a) Transductores: son los electrodos y se encargan de detectar la actividad eléctrica del músculo activo. Existen dos tipos de electrodos: los superficiales, que no son invasivos y permiten un registro global de músculos superficiales; y los intramusculares, que son invasivos y permiten un registro más localizado de músculos superficiales y profundos.

b) Unidad de procesamiento: se trata de un amplificador o voltímetro sensible que se encarga de amplificar, filtrar y digitalizar la señal eléctrica detectada por los electrodos.

c) Dispositivo de salida: se utiliza un ordenador para ver gráficamente la actividad eléctrica registrada. Además, permite guardar los datos y analizarlos posteriormente.

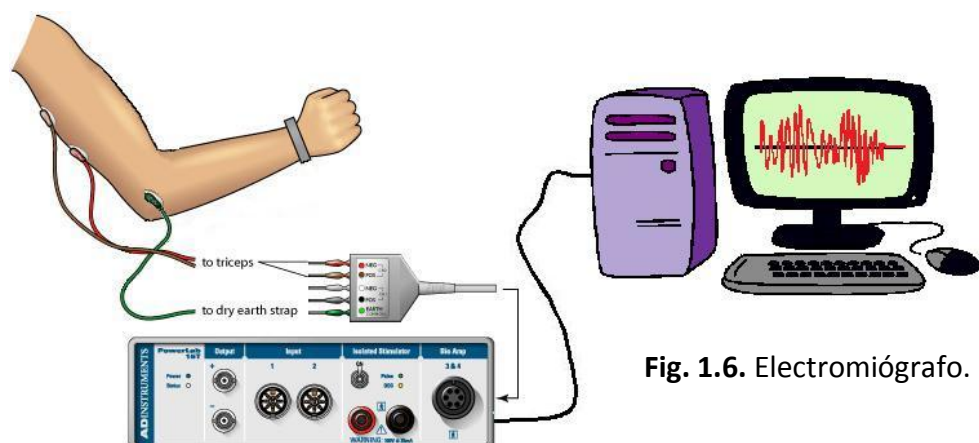


Fig. 1.6. Electromiógrafo.

1.3.2. Registro de la señal eléctrica ²³

Una unidad motora al activarse envía un *impulso o potencial de acción* que se desplaza de la motoneurona al músculo.

Cuando el potencial de acción alcanza el *electrodo negativo*, el voltímetro detecta una diferencia de potencial que se manifiesta en el registro como una *onda positiva*. Cuando el impulso llega al *electrodo positivo*, la diferencia de potencial se registra como una *onda negativa*.

Un *músculo* se contrae mediante la activación simultánea de varias unidades motoras, por lo que en el registro eléctrico se mezclan las ondas producidas por cada unidad motora, no siendo posible detectar la actividad de cada unidad motora por separado.

1.3.3. Parámetros ²⁴

De una electromiografía se pueden extraer varias medias, entre ellas la **amplitud** y la **frecuencia**.

a) Amplitud

La **amplitud** de la señal electromiográfica se usa como una medida del estímulo neural del músculo, donde la amplitud de pico a pico de una onda es *proporcional al número de unidades motoras activadas* por la estimulación eléctrica del nervio periférico.

La amplitud se puede calcular mediante dos detectores, como indican Kamen y Gabriel ²⁴. El Valor Promedio Rectificado (en inglés ARV, average rectified value) que es un detector lineal, y la Raíz Cuadrada Media (en inglés RMS, root-mean-square) que es un detector no lineal.

La amplitud calculada mediante la RMS se considera una medida mejor que la calculada mediante ARV para detectar cambios en la

actividad muscular, ya que la RMS no se ve afectada por la cancelación de amplitud.

b) Frecuencia

La **frecuencia** proporciona información fisiológica sobre la velocidad de conducción de las fibras musculares y la tasa de disparo de las unidades motoras, e información no fisiológica sobre ciertos tipos de contaminación de ruido de las interferencias eléctricas dentro de la señal electromiográfica.

1.3.4. Electromiografía de la contracción isométrica ¹²

En el electromiograma de una contracción isométrica, según la gradación de la fuerza muscular, se observa que:

- En las *contracciones débiles* las unidades motoras tienen un ritmo de actividad (frecuencia de disparo) bajo.

- En las *contracciones medianas* las unidades motoras aumentan el ritmo de actividad y aparecen nuevos potenciales, resultantes del reclutamiento de nuevas unidades motoras.

- En las *contracciones máximas* las unidades motoras tienen un ritmo muy alto.

1.3.5. Electromiografía de la contracción isotónica ¹²

En el electromiograma de una contracción submáxima concéntrica se puede observar que:

- Sobrepasa al electromiograma de una contracción isométrica con cargas idénticas.

- Sobrepasa al electromiograma de la contracción excéntrica, sea cual sea la velocidad de los movimientos, y teniendo en cuenta que en algunos casos los niveles de fuerza son más elevados.

1.4. Fuerza Muscular. Dinamometría

La **fuerza muscular**, desde un punto de vista mecánico, es la capacidad que tiene la musculatura para deformar un cuerpo o para modificar la aceleración del mismo. Mientras que la fuerza, desde un punto de vista fisiológico, es la capacidad de la musculatura de producir tensión al activarse (*fuerza interna*), y que puede tener relación o no con una resistencia externa.

De la interacción entre fuerzas externas e internas surge la **fuerza aplicada**, que es el resultado de la acción muscular sobre las resistencias externas, ya sea el propio peso corporal o una resistencia ajena al sujeto.

La fuerza muscular se puede medir de diferentes maneras: como la fuerza máxima que se puede generar durante una contracción isométrica, como la carga máxima que puede ser levantada una vez (1RM), o como el momento de fuerza máximo durante una contracción isocinética (concéntrica o excéntrica).¹²

1.4.1. Dinamómetros

Los **dinamómetros** son una herramienta que nos permite medir la fuerza muscular de un modo cuantificable, objetivo y preciso, eliminando el aspecto subjetivo de las pruebas musculares.

Los distintos dinamómetros nos permiten medir la fuerza muscular de forma isométrica, isotónica o isocinética.

Un tipo de dinamómetro es el **dinamómetro manual**, una herramienta útil y de fácil manejo que nos permite medir de una forma rápida la fuerza producida tanto de forma isométrica como isotónica.

En el mercado existen varios modelos de dinamómetros manuales (*microFET2 Handheld Dynamometer*²⁵ o *Lafayette Manual Muscle Test*²⁶, por ejemplo) que tienen un diseño ergonómico, caben en la palma de la mano del examinador y tienen varias almohadillas transductoras para acoplarse a prácticamente todos los músculos.



Fig. 1.7. Dinamómetros manuales.
Arriba microFET2 HHD. Abajo Lafayette MMT.

Estos dinamómetros se pueden utilizar con un software instalado en un ordenador, permitiendo la recogida de datos y su posterior análisis, y la realización de protocolos y test de una gran variedad de músculos. Además son capaces de cuantificar el estado del músculo y de generar informes comparativos.

Hoy en día la fiabilidad de los dinamómetros manuales sigue siendo una cuestión en estudio. Estudios como los realizados por Scott y cols. (2004)²⁷, Fulcher y cols. (2010)²⁸, Lu y cols. (2011)²⁹, han probado que estos dinamómetros son útiles y fiables para medir la fuerza de los músculos de la cadera y rodilla (excepto en los extensores de rodilla) en sujetos sanos.

También los estudios realizados por Arnold y cols. (2010)³⁰, Febrer y cols. (2010)³¹, Vanpee y cols. (2011)³², han demostrado la fiabilidad de los dinamómetros manuales para medir la fuerza de los miembros inferiores en adultos mayores, pacientes con enfermedad crítica, y pacientes con atrofia muscular espinal crónica, respectivamente.

1.6. Hipótesis del Estudio

Este estudio tiene como planteamiento (hipótesis) que las contracciones musculares de tipo excéntrico producen en muchas ocasiones un Dolor Muscular Postesfuerzo de Aparición Tardía (DOMPAT), conocido coloquialmente como “agujetas”; dicho dolor podría guardar relación con el grado de reclutamiento de unidades motoras durante la realización del esfuerzo.

De este modo los objetivos planteados son los siguientes:

- Realizar pruebas funcionales de contracción muscular (flexo/extensión) evaluando mediante determinaciones dinamométricas la fuerza muscular en contracciones concéntricas, isométricas y excéntricas.
- Realizar pruebas funcionales de contracción muscular (flexo/extensión) evaluando mediante registro electromiográfico la actividad eléctrica muscular en contracciones concéntricas, isométricas y excéntricas.
- Analizar la variable de amplitud de las respuestas electromiográficas relacionándolas con el tipo de contracción (concéntrica, isométrica y excéntrica) y con la fuerza ejercida.

2. METODOLOGÍA

Se trata de un **estudio piloto observacional**, que contó con la colaboración de 15 estudiantes voluntarios de la Universidad de Alcalá (13 estudiantes de Grado en Fisioterapia y 2 estudiantes de Grado de Biología). La muestra está formada por 8 hombres y 7 mujeres, con edades comprendidas entre los 18 y los 22 años, teniendo una edad media de 19,27 años.

El **criterio de inclusión** fue tener una edad comprendida entre los 18 y 24 años. Mientras que los **criterios de exclusión** fueron sufrir alguna lesión musculotendinosa, enfermedad o dolor que afecte al rendimiento en el momento de la recogida de datos. Los participantes cumplían con el criterio de inclusión y ninguno tuvo que ser excluido, por lo que la muestra seguía estando formada por 15 sujetos.

2.1. Variables a evaluar

Los aspectos a evaluar fueron la **actividad eléctrica** del *músculo tríceps braquial del miembro superior dominante* y la **fuerza producida** por el sujeto *durante una flexión de brazos o fondo* (en inglés push-up), es decir, durante la contracción concéntrica, isométrica y excéntrica del músculo tríceps braquial.

La **fuerza producida** es evaluada mediante *determinaciones dinamométricas* utilizando un dinamómetro digital portátil (*microFET2*) conectado a un ordenador por medio de un sistema inalámbrico de USB y el software (*Hoggan microFET Clinical*) instalado previamente en dicho ordenador, permitiéndonos obtener resultados precisos, objetivos y cuantificables, los cuales pueden ser exportados a una Hoja de Cálculo de Excel para su posterior análisis.

La **actividad eléctrica muscular** es evaluada mediante un *registro electromiográfico* utilizando un sistema de registro *Power Lab*. Mediante el uso del software específico (*Chart5 for Windows*) se procedió a la recogida de datos electromiográficos en un ordenador personal, para su posterior análisis. El registro de la actividad eléctrica muscular se llevó a cabo mediante dos electrodos de

superficie (positivo y negativo) dispuestos sobre el músculo tríceps braquial a registrar y un electrodo neutro (toma de tierra) situado sobre una eminencia ósea (véase más adelante).

2.2. Recogida de datos

El contacto con los participantes se realizó por medio del Profesor Pedro de la Villa, quién informó a los estudiantes y pidió colaboración para el estudio.

Se concertó una cita con los participantes en los laboratorios del Departamento de Fisiología, en la Facultad de Medicina de la Universidad de Alcalá. En primer lugar se les entregó un cuestionario a rellenar con sus datos personales, deportes que practica, horas de entrenamiento a la semana, mano dominante, estructura corporal y hábitos particulares.

Una vez recogidos los cuestionarios y comprobado que cumplen los criterios de inclusión y/o exclusión, se informó a los participantes sobre el estudio y se resolvieron todas aquellas dudas surgidas en el momento.

2.2.1. Explicación de la prueba

El sujeto parte de la posición de decúbito prono con el tórax, abdomen, miembros inferiores y los pies apoyados en el suelo. Las manos, que están sujetando los dinamómetros, se encuentran a la altura de la cabeza sin apoyarse en el suelo.

A continuación se apoyan las manos con los dinamómetros en el suelo y, manteniendo el tronco extendido, se extienden los codos (contracción concéntrica del tríceps braquial). Una vez arriba, se mantiene la posición un par de segundos (contracción isométrica del tríceps braquial); y se regresa a la posición inicial controlando el movimiento (contracción excéntrica del tríceps braquial).

Al finalizar la flexión de brazos se separan las manos del suelo antes de comenzar con la siguiente flexión. Cada sujeto repite la flexión 10 veces consecutivas.

2.2.2. Colocación de electrodos y dinamómetros

El participante permanece en bipedestación mientras le colocan tres electrodos en su brazo dominante. El electrodo negativo y el positivo se colocan en la parte distal del músculo tríceps braquial de forma longitudinal y separados entre sí por 2-3 cm, quedando el positivo proximal y el negativo distal. El electrodo neutro corresponde a la toma de tierra y se coloca en el epicóndilo humeral.

El dinamómetro que va a registrar la fuerza producida durante el esfuerzo lo sujeta el participante con su mano dominante, mientras que con la mano no dominante sujeta otro dinamómetro igual que el anterior (el cual se encuentra apagado puesto que se utiliza para que la prueba se desarrolle de forma simétrica y no para registrar ningún dato).

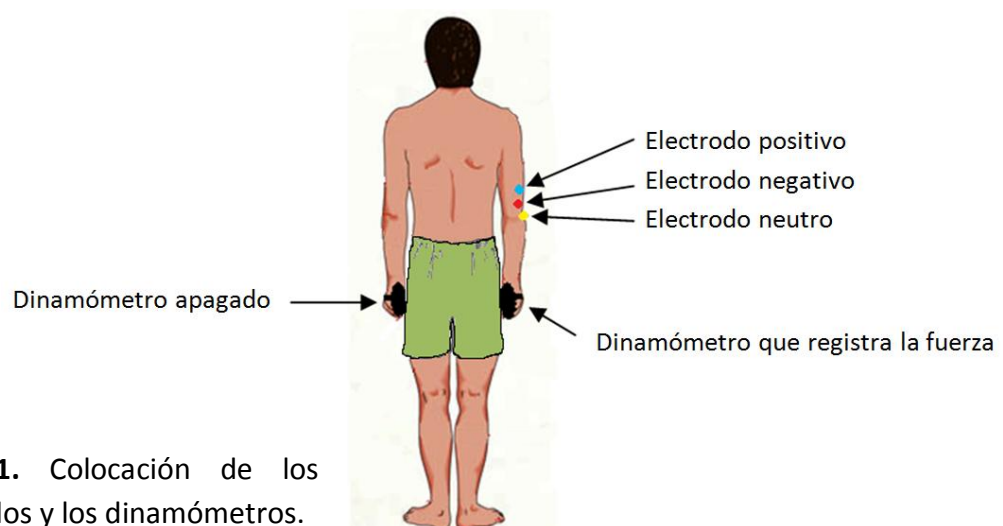


Fig. 2.1. Colocación de los electrodos y los dinamómetros.

2.2.3. Realización de la prueba

El fisioterapeuta introduce los datos personales del sujeto que va a realizar la prueba en el programa *TBS microFET™ Clinical*, y abre el módulo *MYOTEST* donde selecciona el test de extensión de codo (tríceps braquial).

En el programa de electromiografía *Chart5 for Windows* se ajustan los parámetros del registro electromiográfico siguiendo el protocolo básico de registro de actividad muscular. Las señales eléctricas procedentes del amplificador fueron

filtradas con un filtro pasa bajos (1 Hz) y pasa altos (30 Hz), y digitalizadas a una frecuencia de 20 kHz.

El participante se coloca en la posición inicial de la prueba y realiza dos flexiones de brazos para que el fisioterapeuta compruebe que ha entendido cómo debe realizar la prueba. A continuación el fisioterapeuta inicia el registro electromiográfico y el test del músculo tríceps braquial, e indica al sujeto que comience a realizar las 10 flexiones. Al finalizar la prueba el fisioterapeuta guarda los datos obtenidos.

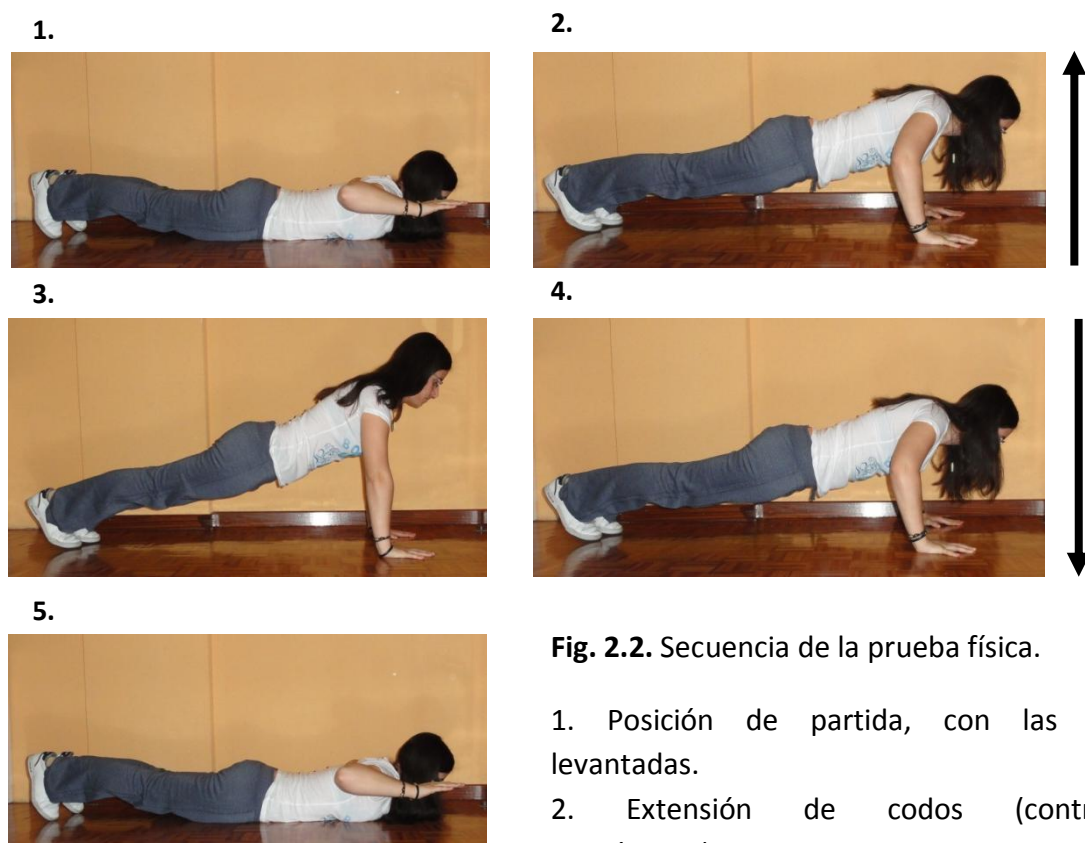


Fig. 2.2. Secuencia de la prueba física.

1. Posición de partida, con las manos levantadas.
2. Extensión de codos (contracción concéntrica).
3. Postura mantenida (contracción isométrica).
4. Flexión de codos controlada (contracción excéntrica).
5. Posición final, con las manos levantadas.

2.2.4. Recursos materiales

Material utilizado en el estudio:

- Dinamómetro digital portátil *microFET2* con una almohadilla transductora plana.
- Dinamómetro digital portátil *microFET2* con una almohadilla transductora plana, con el software *Hoggan microFET Clinical* y el *microFET USB*.
- Electromiógrafo *Power Lab* y el software *Chart5 for Windows*.
- Electrodo de superficie de tamaño pequeño y desechables (3M).
- Un ordenador de sobremesa y un ordenador portátil, ambos PC-compatibles con sistema operativo Windows XP.

3. RESULTADOS

3.1. Parámetros constitucionales

La muestra está formada por 8 hombres y 7 mujeres, siendo un total de 15 sujetos. Los parámetros constitucionales estudiados son el peso, la talla y el índice de masa corporal (IMC).

Los hombres presentan un mayor peso, talla e IMC que las mujeres, teniendo una media de 76,75 kg, 1,76 m, y 24,67 kg/m² los hombres frente a una media de 57,57 kg, 1,65 m, y 21,26 kg/m² las mujeres. (Tabla 3.1)

	Peso	Talla	IMC
Hombres	76,75	1,76	24,67
Mujeres	57,57	1,65	21,26

Tabla 3.1. Promedios de los parámetros constitucionales.

3.2. Grado de entrenamiento

Para considerar a una persona como entrenada o no entrenada se tuvo en cuenta el número de horas de entrenamiento dedicado a la semana.

De esta manera se consideró como **sujeto no entrenado** a aquella persona que no realiza *ninguna actividad física*, es decir, la que dedica 0 horas de entrenamiento a la semana; y como **sujeto entrenado** a aquella persona que realiza alguna *actividad física con entrenamiento*.

Para saber el grado de entrenamiento de cada sujeto se elaboró una escala que varía de 0 a 10, siendo 0 el valor de la persona que dedica 0 horas de entrenamiento a la semana y 10 el valor de la persona que dedica 20 horas de entrenamiento a la semana. (Tabla 3.2)

	Horas de entrenamiento	Grado de entrenamiento
Hombres:		
Sujeto 1	6,5	3,25
Sujeto 2	4	2
Sujeto 5	20	10
Sujeto 6	4,5	2,25
Sujeto 7	4,5	2,25
Sujeto 8	0	0
Sujeto 10	0	0
Sujeto 12	0	0
Mujeres:		
Sujeto 3	3	1,5
Sujeto 4	10	5
Sujeto 9	0	0
Sujeto 11	0	0
Sujeto 13	0	0
Sujeto 14	0	0
Sujeto 15	0	0

Tabla 3.2. Sujetos entrenados y no entrenados.

3.3. Prueba física

El sujeto debe realizar 10 flexiones de brazos o fondos de forma consecutiva, mientras se registra la actividad eléctrica del tríceps braquial y la fuerza ejercida por dicho sujeto.

Para ello el participante parte de la posición de decúbito prono con las manos levantadas. A continuación con los pies apoyados, se apoyan las manos con los dinamómetros en el suelo y se realiza una extensión de codos (contracción concéntrica); se mantiene la posición durante 2-3 segundos (contracción isométrica), y se regresa a la posición inicial de forma controlada (contracción excéntrica). Al finalizar cada flexión y antes de comenzar la siguiente se levantan las manos del suelo.

Los datos recogidos en la dinamometría se representan en una gráfica en función del tiempo, en la cual se observa la variación de la fuerza ejercida durante las contracciones concéntrica, isométrica y excéntrica (Fig. 3.1).

Cuando el sujeto comienza la prueba física (*contracción concéntrica* del tríceps braquial), a medida que los codos se van extendiendo y el cuerpo sube, **la fuerza ejercida aumenta hasta llegar a un pico máximo y disminuye un poco**. Este momento coincide con la extensión completa de codos, y a partir del cual **la fuerza se mantiene con pequeñas variaciones** mientras el sujeto permanece en la posición unos segundos (*contracción isométrica*).

Al iniciar el descenso mediante el control de la flexión de codos, se observa que al inicio de la *contracción excéntrica* **la fuerza aumenta alcanzando un pico máximo y desciende progresivamente** hasta que el sujeto entra en contacto con el suelo y deja de ejercer fuerza. (Fig. 3.1).

La fuerza máxima alcanzada en la contracción excéntrica puede ser mayor, menor o similar a la fuerza máxima alcanzada en la contracción concéntrica.

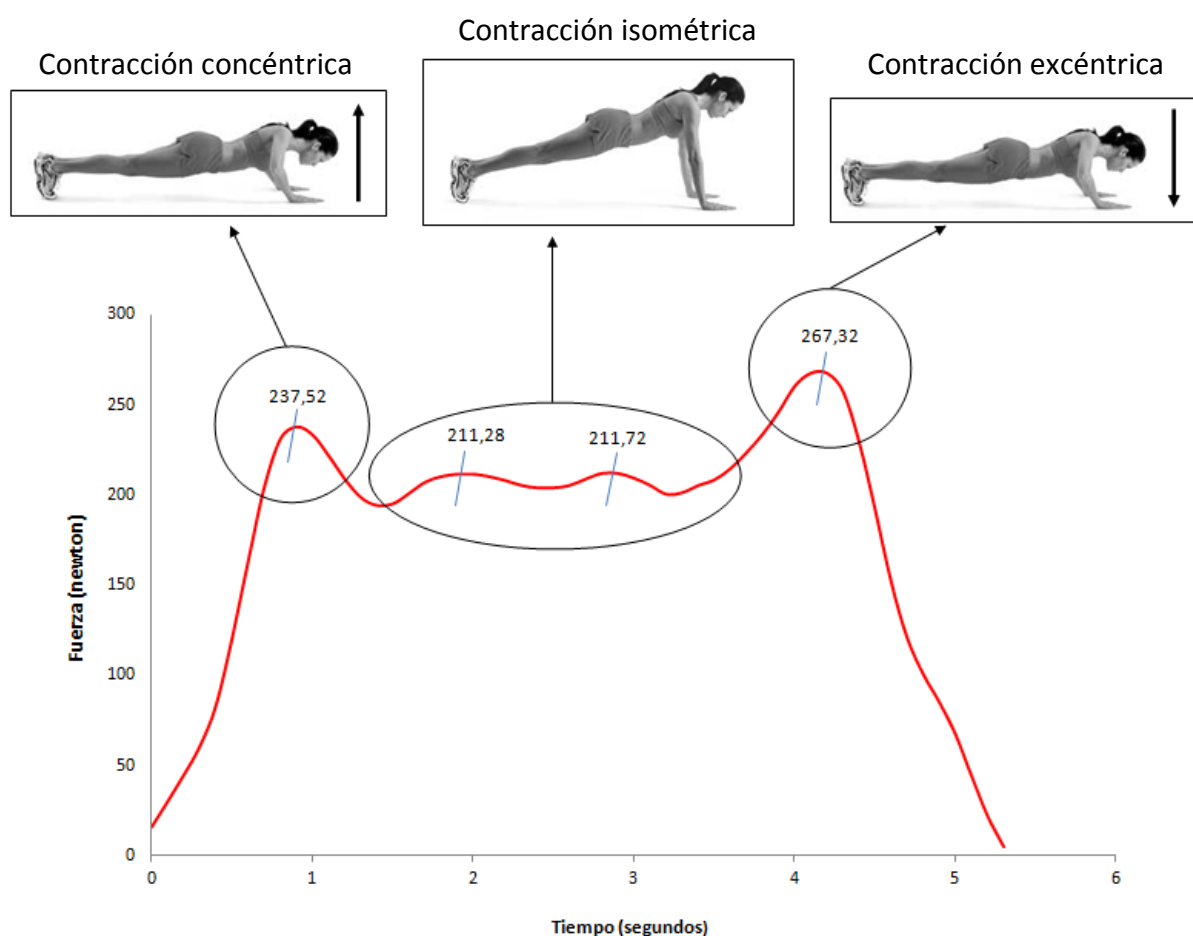


Fig. 3.1. Prueba física y curva fuerza-tiempo.

Las imágenes de arriba muestran los tres tipos de contracción (concéntrica, isométrica y excéntrica) que se producen al realizar una flexión de brazos.

La gráfica de abajo representa la curva fuerza-tiempo (línea roja) registrada por el dinamómetro en una flexión. En el eje de abscisas se encuentra el tiempo (medido en segundos) y en el eje de ordenadas se encuentra la fuerza (medida en newton).

Dentro de los círculos está representado el pico máximo de fuerza alcanzado en cada contracción.

3.4. Fuerza producida

Se registró, mediante un dinamómetro, los datos de la fuerza producida en cada flexión de cada sujeto y se calculó el promedio y la desviación estándar (SD) de las contracciones concéntrica, isométrica y excéntrica de cada flexión. (Tabla 3.3).

Así mismo se calculó el promedio y la desviación estándar de la fuerza producida de todos los sujetos. En la Tabla 3.4 se muestran los datos obtenidos divididos por género y grado de entrenamiento.

	Concéntrica	Isométrica	Excéntrica
Flexión 1	185,48	173,55	193,12
Flexión 2	208,09	198,90	203,87
Flexión 3	190,37	198,53	207,87
Flexión 4	198,01	188,67	201,72
Flexión 5	202,90	189,93	200,31
Flexión 6	201,05	188,00	204,68
Flexión 7	203,35	176,81	204,68
Flexión 8	198,01	180,96	208,69
Flexión 9	218,55	194,97	211,80
Flexión 10	211,80	181,48	195,27
Promedio	201,76	187,18	203,20
SD	9,72	8,83	5,83

Tabla 3.3. Fuerza producida por un sujeto en 10 flexiones. Se muestran los datos promediados de las contracciones concéntricas, isométricas y excéntricas.

	Grado entrenamiento	Concéntrica	Isométrica	Excéntrica	Fuerza media
Hombres entrenados:					
Sujeto 5	10	226,71	212,5	247,38	228,86
Sujeto 1	3,25	259,69	271,51	275,24	268,81
Sujeto 6	2,25	279,81	269,36	283,66	277,61
Sujeto 7	2,25	243,68	230,87	242,73	239,09
Sujeto 2	2	233,5	211,56	232,08	225,71
Promedio		248,678	239,16	256,218	
SD		21,38	29,58	22,12	
Hombres no entrenados:					
Sujeto 8	0	285,32	274,47	284,23	281,34
Sujeto 10	0	222,66	227,71	251,74	234,04
Sujeto 12	0	278,77	281,12	284,14	281,34
Promedio		262,25	261,1	273,37	
SD		34,44	29,11	18,73	
Mujeres entrenadas:					
Sujeto 4	5	201,76	187,18	203,2	197,38
Sujeto 3	1,5	192,25	178,75	198,54	189,85
Promedio		197,005	182,965	200,87	
SD		6,72	5,96	3,30	
Mujeres no entrenadas:					
Sujeto 9	0	216,08	212,16	214,88	214,37
Sujeto 11	0	165,36	160,53	169,72	165,2
Sujeto 13	0	174,98	172,31	184,37	177,22
Sujeto 14	0	189,86	177,51	200,82	189,4
Sujeto 15	0	180,77	172,91	200,82	184,83
Promedio		185,41	179,084	194,122	
SD		19,32	19,52	17,40	

Tabla 3.4. Fuerza media producida por cada sujeto en las tres fases de contracción, dividido por género y grado de entrenamiento. En la tabla también se muestran los datos promediados según el género y el grado de entrenamiento en las tres contracciones, y la fuerza media que produce cada sujeto (resultante del promedio de las contracciones concéntrica, isométrica y excéntrica).

3.5. Correlación entre peso corporal y fuerza ejercida

Se realizó una correlación entre el peso corporal y la fuerza ejercida de cada sujeto para observar la relación existente entre estas dos variables. El coeficiente de correlación (R^2) alcanzó un valor de 0,86. (Fig. 3.2)

La fuerza ejercida de cada sujeto utilizada para la correlación es la fuerza media que realiza dicho sujeto en las tres contracciones (véase tabla 3.4).

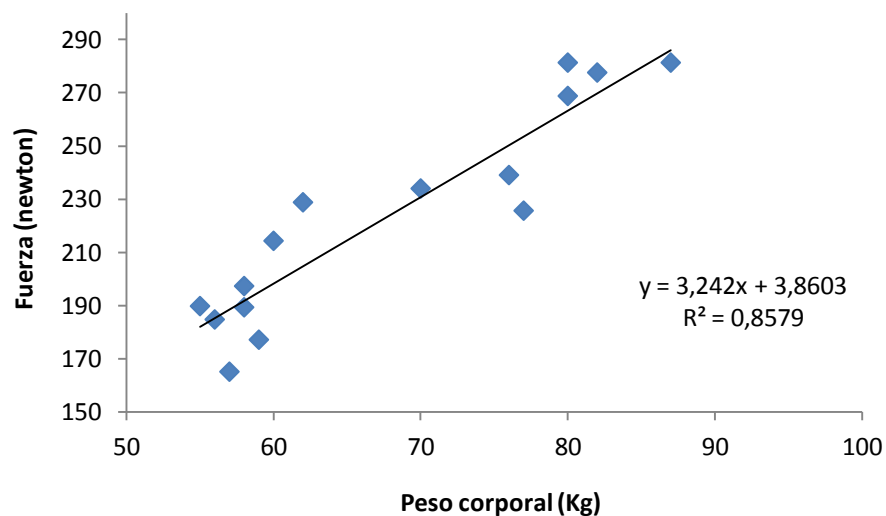


Fig. 3.2. Correlación entre peso corporal y fuerza ejercida. En el eje de abscisas se representa el peso corporal de los sujetos (medido en Kg) y en el eje de ordenadas la fuerza ejercida por los sujetos correspondientes (medida en newton). La línea recta negra muestra el ajuste de los valores a la correlación, cuyo R^2 alcanza un valor de 0,86.

3.6. Registro de actividad eléctrica muscular

El registro electromiográfico nos permite observar las variaciones de la actividad eléctrica en las contracciones concéntrica, isométrica y excéntrica.

Al solapar la gráfica de la curva de fuerza con la gráfica de la actividad eléctrica se observa como a medida que se inicia la flexión (contracción concéntrica) y la fuerza aumenta, **se produce una mayor actividad eléctrica.**

Durante la *contracción isométrica*, donde la fuerza ejercida es menor, **la actividad eléctrica disminuye**. Al comienzo de la *contracción excéntrica* **la actividad eléctrica aumenta y según va finalizando dicha contracción la actividad eléctrica disminuye**. (Fig. 3.3)

La actividad eléctrica producida en la contracción excéntrica es menor que la producida en la contracción concéntrica.

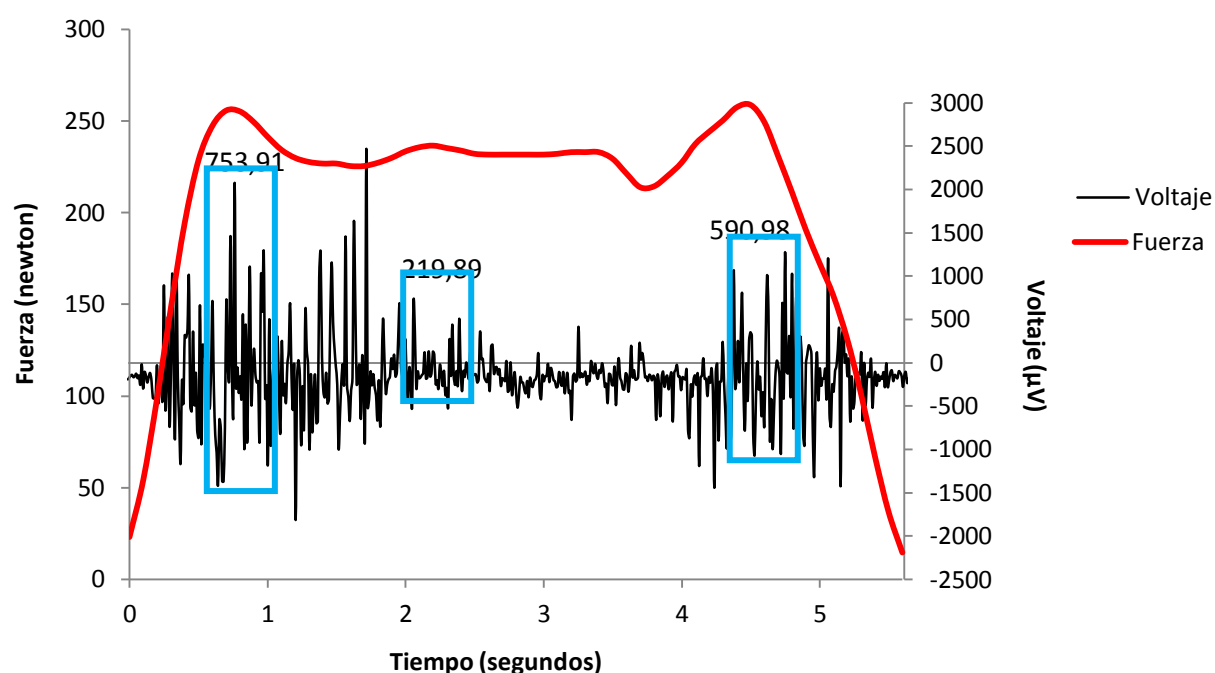


Fig. 3.3. Gráficas temporales de fuerza ejercida y actividad eléctrica.

La gráfica temporal de la fuerza ejercida tiene como eje de abscisas el tiempo (en segundos) y como eje de ordenadas la fuerza (en newton) situado a la izquierda de la gráfica. La curva de la fuerza producida se muestra en color rojo.

La gráfica temporal de la actividad eléctrica tiene como eje de abscisas el tiempo (en segundos) y como eje de ordenadas el voltaje (en μV) situado a la derecha de la gráfica. La actividad eléctrica está representada por la línea negra.

Los números situados encima de los rectángulos azules son los valores de la RMS calculada para la actividad eléctrica (encerrada por dichos rectángulos) de las contracciones concéntrica, isométrica y excéntrica.

3.7. Reclutamiento de unidades motoras, RMS

Para la valoración de los resultados electromiográficos se realizó un análisis de la amplitud media de la actividad eléctrica, mediante el cálculo de RMS. Dicho análisis nos permitió observar el grado de reclutamiento de unidades motoras durante las contracciones concéntrica, isométrica y excéntrica de cada una de las flexiones de todos los sujetos. En la Figura 3.3 se muestran los valores de RMS para las tres fases de la contracción.

En la Tabla 3.5 se muestra como ejemplo los valores promediados del reclutamiento de unidades motoras concéntrico, isométrico y excéntrico de uno de los sujetos del estudio.

	Concéntrica	Isométrica	Excéntrica
Flexión 1	475,12	185,98	375,31
Flexión 2	530,86	159,62	370,56
Flexión 3	554,94	105,29	344,31
Flexión 4	527,89	81,85	326,25
Flexión 5	556,79	93,74	328,39
Flexión 6	515,50	67,03	386,25
Flexión 7	578,58	162,61	384,61
Flexión 8	475,13	87,05	399,14
Flexión 9	530,23	150,40	367,00
Flexión 10	486,92	87,09	323,63
Promedio	523,20	118,07	360,55
SD	35,48	42,11	27,74

Tabla 3.5. RMS de un sujeto en 10 flexiones. Se muestran los datos promediados de las contracciones concéntricas, isométricas y excéntricas.

El análisis de la actividad eléctrica en cada sujeto permitió observar que el reclutamiento de unidades motoras es mayor en las contracciones concéntricas que en las excéntricas, y en éstas últimas es mayor que en las contracciones isométricas (Fig. 3.4).

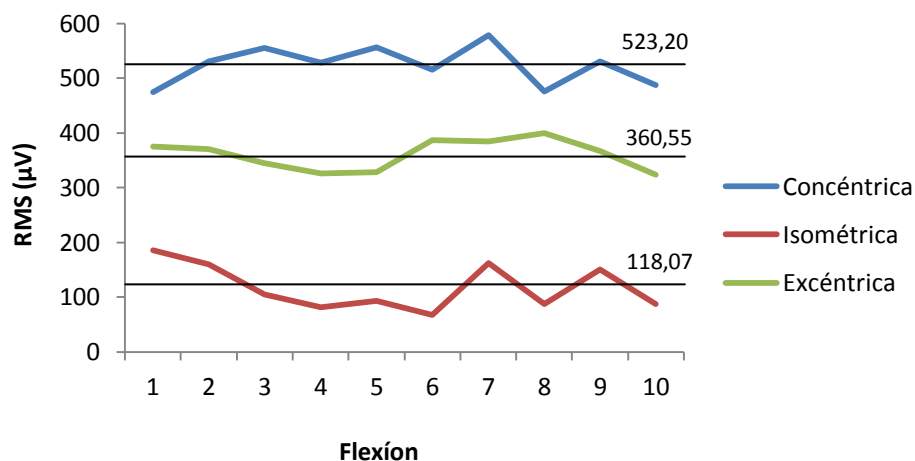


Fig. 3.4. RMS de un sujeto en 10 flexiones. El reclutamiento de unidades motoras es mayor en las contracciones concéntricas (línea azul), seguido de las contracciones excéntricas (línea verde) e isométricas (línea roja), siendo el reclutamiento de estas últimas el más pequeño. Las líneas rectas negras junto al número situado a la derecha de la gráfica indican el promedio de cada contracción.

En la Tabla 3.6 se muestra los valores promediados del reclutamiento motor concéntrico, isométrico y excéntrico de todos los sujetos del estudio. Se muestran los datos obtenidos divididos por género y grado de entrenamiento.

	Grado de entrenamiento	Concéntrica	Isométrica	Excéntrica
Hombres entrenados:				
Sujeto 5	10	651,97	208,13	588,20
Sujeto 1	3,25	754,60	261,76	494,00
Sujeto 6	2,25	929,36	208,87	818,00
Sujeto 7	2,25	777,98	209,34	551,66
Sujeto 2	2	731,97	251,41	475,84
Promedio		769,18	227,90	585,54
SD		101,33	26,44	137,48
Hombres no entrenados:				
Sujeto 8	0	1068,63	224,60	488,81
Sujeto 10	0	1500,99	565,12	704,81
Sujeto 12	0	1028,92	427,43	739,19
Promedio		1199,51	405,72	644,27
SD		261,84	171,30	135,73
Mujeres entrenadas:				
Sujeto 4	5	523,20	118,07	360,55
Sujeto 3	1,5	799,35	471,77	807,07
Promedio		661,28	294,92	583,81
SD		195,27	250,10	315,74
Mujeres no entrenadas:				
Sujeto 9	0	1803,46	727,53	1917,88
Sujeto 11	0	1296,47	395,69	1337,20
Sujeto 13	0	2055,08	503,86	1404,15
Sujeto 14	0	1155,79	212,43	1037,37
Sujeto 15	0	1090,41	726,11	1056,27
Promedio		1480,24	513,12	1350,57
SD		426,00	221,15	356,93

Tabla 3.6. Promedio de la RMS de cada sujeto en las tres fases de contracción, dividido por género y grado de entrenamiento. En la tabla se muestran los datos promediados según el género y el grado de entrenamiento en las tres contracciones.

3.8. Distribución de los sujetos según el reclutamiento de unidades motoras

Hemos dividido a los sujetos en *grupos en relación al comportamiento del reclutamiento de unidades motoras* en las contracciones concéntrica (CC), isométrica (CI) y excéntrica (CE). Los grupos establecidos son 4 (Tabla 3.7):

- Reclutamiento concéntrico mayor que el excéntrico, y este último que el isométrico. (Fig. 3.5A)
- Reclutamiento concéntrico similar al excéntrico, y estos dos son mayores que el isométrico. (Fig. 3.5B)
- Reclutamiento concéntrico mayor que el excéntrico y el isométrico, y estos dos últimos son similares. (Fig. 3.5C)
- Reclutamiento de unidades motoras similar en las tres contracciones. (Fig. 3.5D)

RMS-CC >RMS-CE >RMS-CI	RMS-CC=RMS-CE >RMS-CI
Sujeto 1	Sujeto 3
Sujeto 2	Sujeto 5
Sujeto 4	Sujeto 6
Sujeto 7	Sujeto 9
Sujeto 12	Sujeto 11
Sujeto 13	Sujeto 14
RMS-CC >RMS-CE=RMS-CI	RMS-CC=RMS-CE=RMS-CI
Sujeto 8	Sujeto 15
Sujeto 10	

Tabla 3.7. Distribución de sujetos en grupos según el reclutamiento de unidades motoras.

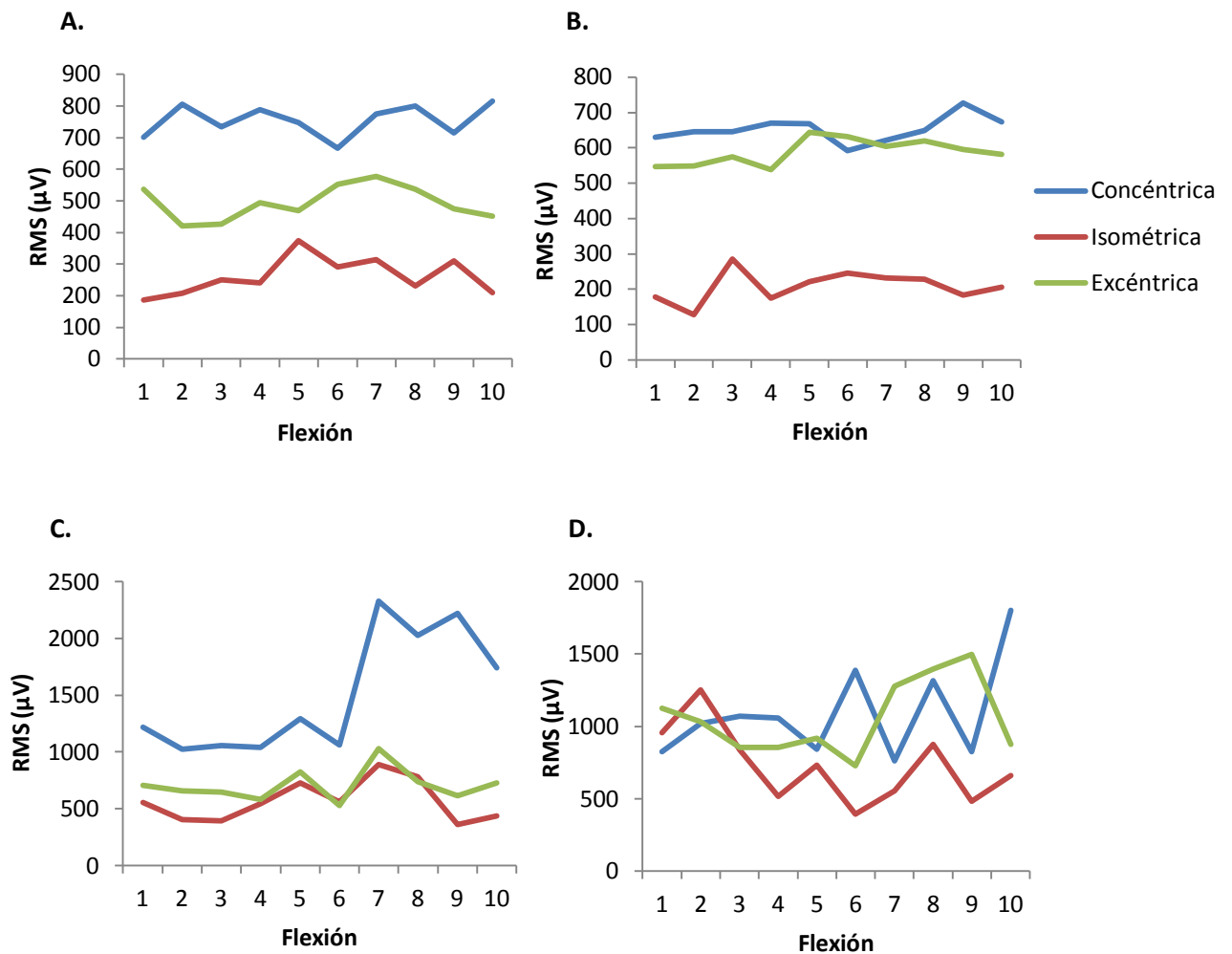


Fig. 3.5. Ejemplos del comportamiento del reclutamiento de unidades motoras. El grado de reclutamiento viene dado por la RMS (en el eje de ordenadas y medido en μV). La línea azul corresponde a la contracción concéntrica, la línea roja corresponde a la contracción isométrica y la línea verde corresponde a la contracción excéntrica. El comportamiento que puede adoptar el reclutamiento puede ser:

- A. El reclutamiento concéntrico es mayor que el excéntrico y éste que el isométrico.
- B. El reclutamiento concéntrico es similar al excéntrico y éstos mayores que el isométrico.
- C. El reclutamiento concéntrico es mayor que el excéntrico y éste similar al isométrico.
- D. El reclutamiento es similar en las tres contracciones.

3.9. Correlación entre la fuerza ejercida y el reclutamiento de unidades motoras

Se ha analizado correlativamente fuerza ejercida en cada contracción y el reclutamiento de unidades motoras correspondiente para las contracciones concéntrica, isométrica y excéntrica de cada sujeto. Dicha correlación nos permite observar que existe una aparente relación lineal entre ambos parámetros, sin que los resultados sean significativos para el número de sujetos estudiados. En la Figura 3.6 se muestran los datos de dicha correlación en dos de los sujetos estudiados.

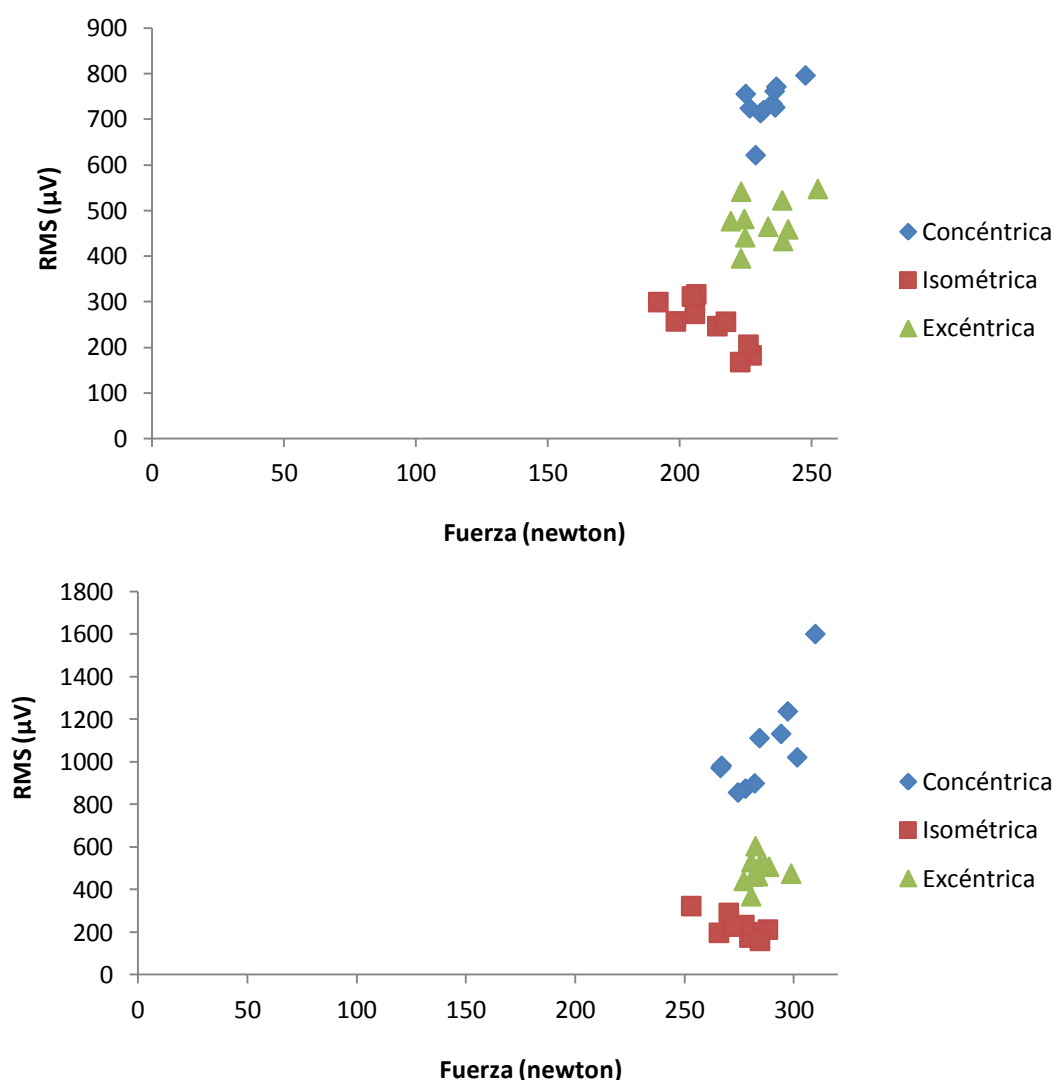


Fig. 3.6. Correlación entre fuerza y reclutamiento de dos de los sujetos. En el eje de abscisas se representa la fuerza media ejercida por los sujetos (medido en newton) y en el eje de ordenadas el grado de reclutamiento (RMS, medido en μV) de los sujetos correspondientes. Los marcadores azules corresponden a la contracción concéntrica, los marcadores rojos a la contracción isométrica y los marcadores verdes a la contracción excéntrica.

4. DISCUSIÓN

El DOMPAT es una dolencia que sufren más frecuentemente las personas no habituadas al ejercicio físico después de haber realizado un esfuerzo intenso, sobre todo si dicho esfuerzo tiene carácter excéntrico. Esto puede estar relacionado con el grado de reclutamiento de unidades motoras en las distintas contracciones.

Los datos obtenidos en la dinamometría nos permiten observar que la mayoría de los sujetos realiza **una mayor fuerza durante la fase excéntrica que en las fases concéntrica e isométrica**, mientras que una pequeña parte de los sujetos realiza una mayor fuerza durante la fase concéntrica que en las fases excéntrica e isométrica. En este último caso las fuerzas concéntrica y excéntrica son muy similares, siendo la concéntrica ligeramente mayor.

La fuerza media excéntrica realizada, tanto por todos los hombres como por todas las mujeres, es mayor que la concéntrica, y ésta que la isométrica. **Sin embargo no se aprecian diferencias significativas entre la fuerza ejercida por los sujetos entrenados y la fuerza ejercida por los sujetos no entrenados.**

Al realizar la **correlación entre el peso corporal y la fuerza ejercida**, se observa que existe una relación entre estos dos parámetros, donde **a mayor peso corporal mayor es la fuerza que tiene que ejercer el sujeto.**

En el análisis de la actividad eléctrica registrada durante la realización de las flexiones de brazos, se observa que *la actividad eléctrica es mayor durante la fase concéntrica y menor durante la fase isométrica, situándose la actividad eléctrica de la fase excéntrica entre las dos anteriores*. Estos resultados también fueron hallados en los estudios realizados por Bosco y col. (1982)³³, Viitasalo y Bosco (1982)³⁴ y Viitasalo (1984)³⁵ sobre el salto con contramovimiento y en el estudio realizado por Linnamo y cols. (2002)³⁶ sobre la electromiografía en contracciones voluntarias concéntricas y excéntricas.

Mediante el cálculo de RMS se puede saber el grado de reclutamiento de unidades motoras de un sujeto en un momento específico. Los sujetos, de forma general, tienen **un mayor grado de reclutamiento de unidades motoras en las**

contracciones concéntricas, seguido de las excéntricas y en último lugar las isométricas.

Si atendemos al grado de reclutamiento de unidades motoras según el grado de entrenamiento de los sujetos, podemos observar que **los sujetos entrenados presentan un valor de RMS inferior del que presentan los sujetos no entrenados**. Esto podría deberse a que los sujetos entrenados tienen un mejor control del movimiento y no necesitan reclutar tantas unidades motoras para realizarlo.

Estas diferencias encontradas entre los sujetos entrenados y no entrenados son mayores en las mujeres que en los hombres, sobre todo en las fases concéntrica y excéntrica.

El grado de reclutamiento de unidades motoras puede adoptar varios comportamientos. Los observados en este estudio son que el reclutamiento concéntrico es mayor que el excéntrico y éste que el isométrico, el reclutamiento concéntrico es similar al excéntrico y éstos mayores que el isométrico, el reclutamiento concéntrico es mayor que el excéntrico y éste similar al isométrico, y el reclutamiento es similar en las tres contracciones.

En este estudio no se aprecia relación entre el comportamiento del reclutamiento de unidades motoras y el grado de entrenamiento de los sujetos.

En la **correlación realizada entre la fuerza ejercida y el reclutamiento de unidades motoras** en cada fase de contracción de cada sujeto, se aprecia **una aparente relación lineal** entre los dos parámetros, pero debido al pequeño tamaño muestral **estos resultados no son significativos**.

Debido a que se trata de un estudio piloto observacional con una muestra de sujetos pequeña, *no se ha podido confirmar la hipótesis* de la relación entre la aparición de DOMPAT tras un esfuerzo intenso y las contracciones excéntricas, pues los resultados obtenidos en la correlación entre la fuerza producida y el grado de reclutamiento unidades motoras no fueron significativos.

Sería interesante profundizar más sobre este tema, ya que no se han encontrado estudios previos que estudien las diferencias del grado de reclutamiento en las contracciones concéntrica, isométrica y excéntrica.

5. CONCLUSIONES

Las conclusiones que se pueden extraer de este estudio son las siguientes:

1. Existe una correlación entre el peso corporal del sujeto y la fuerza ejercida por éste, donde a mayor peso corporal mayor es la fuerza ejercida por el sujeto.
2. Los sujetos entrenados presentan un mejor control del reclutamiento de unidades motoras que los sujetos no entrenados, pudiéndose observar en los valores inferiores de RMS obtenidos tanto en los hombres como en las mujeres entrenados.
3. No existe una correlación entre la fuerza ejercida y el reclutamiento de unidades motoras para los sujetos estudiados.
4. Este estudio nos permite calcular el tamaño muestral para el cual serían significativos los resultados obtenidos en este estudio.

6. BIBLIOGRAFÍA

- (1) López Chicharro J, Fernández Vaquero A. Fisiología del ejercicio. 3ª ed. Madrid: Editorial Médica Panamericana; 2006.
- (2) Armstrong RB. Mechanisms of exercise-induced delayed onset muscular soreness: a brief review. *Med Sci Sports Exerc* 1984 Dec;16(6):529-538.
- (3) Byrnes WC, Clarkson PM. Delayed onset muscle soreness and training. *Clin Sports Med* 1986 Jul;5(3):605-614.
- (4) MacIntyre DL, Reid WD, McKenzie DC. Delayed muscle soreness. The inflammatory response to muscle injury and its clinical implications. *Sports Med* 1995 Jul;20(1):24-40.
- (5) Friden J, Lieber RL. Eccentric exercise-induced injuries to contractile and cytoskeletal muscle fibre components. *Acta Physiol Scand* 2001 Mar;171(3):321-326.
- (6) Yu JG, Malm C, Thornell LE. Eccentric contractions leading to DOMS do not cause loss of desmin nor fibre necrosis in human muscle. *Histochem Cell Biol* 2002 Jul;118(1):29-34.
- (7) Lieber RL, Friden J. Morphologic and mechanical basis of delayed-onset muscle soreness. *J Am Acad Orthop Surg* 2002 Jan-Feb;10(1):67-73.
- (8) Cheung K, Hume P, Maxwell L. Delayed onset muscle soreness : treatment strategies and performance factors. *Sports Med* 2003;33(2):145-164.
- (9) Friden J, Lieber RL. Segmental muscle fiber lesions after repetitive eccentric contractions. *Cell Tissue Res* 1998 Jul;293(1):165-171.
- (10) Merí Vived A. Fundamentos de fisiología de la actividad física y del deporte. 1ª, 1ª reimp ed. Madrid: Editorial Médica Panamericana; 2005.
- (11) Thibodeau GA, Patton KT. Anatomía y fisiología. 6ª ed. Madrid: Elsevier; 2007.

- (12) Monod H, Flandrois R. Manual de fisiología del deporte bases fisiológicas de las actividades físicas y deportivas. Barcelona /etc./: Masson; 1986.
- (13) Silverthorn DU. Fisiología humana un enfoque integrado. 4ª ed. Buenos Aires: Medica Panamericana; 2010.
- (14) HENNEMAN E. Relation between size of neurons and their susceptibility to discharge. Science 1957 Dec 27;126(3287):1345-1347.
- (15) Bawa P, Binder MD, Ruenzel P, Henneman E. Recruitment order of motoneurons in stretch reflexes is highly correlated with their axonal conduction velocity. J Neurophysiol 1984 Sep;52(3):410-420.
- (16) De Luca CJ, LeFever RS, McCue MP, Xenakis AP. Control scheme governing concurrently active human motor units during voluntary contractions. J Physiol 1982 Aug;329:129-142.
- (17) De Luca CJ, LeFever RS, McCue MP, Xenakis AP. Behaviour of human motor units in different muscles during linearly varying contractions. J Physiol 1982 Aug;329:113-128.
- (18) De Luca CJ, Erim Z. Common drive of motor units in regulation of muscle force. Trends Neurosci 1994 Jul;17(7):299-305.
- (19) De Luca CJ, Foley PJ, Erim Z. Motor unit control properties in voluntary isometric isotonic contractions. J Neurophysiol 76: 1503–1516, 1996.
- (20) De Luca CJ, Hostage EC. Relationship between firing rate and recruitment threshold of motoneurons in voluntary isometric contractions. J Neurophysiol 2010 Aug;104(2):1034-1046.
- (21) De Luca CJ, Contessa P. Hierarchical control of motor units in voluntary contractions. J Neurophysiol 2012 Jan;107(1):178-195.
- (22) DALCAME. Proyecto Electromiografía [sede Web]. Colombia: dalcame.com; [acceso el 26 de abril de 2012]. Disponible en: <http://www.dalcame.com/emg.html>

- (23) Ángel Luis García Villalón. Electromiograma [sede Web]. Madrid: uam.es; [acceso el 26 de abril de 2012]. Disponible en:
http://www.uam.es/personal_pdi/medicina/algvilla/seminarios/musculo.html
- (24) Kamen G, Gabriel DA. Essentials of Electromyography. 1ª ed. Estados Unidos: Human Kinetics; 2010.
- (25) Hoggan Health Industries. microFET2 [sede Web]. Utah: hogganhealth.com; [acceso el 26 de abril de 2012]. Disponible en:
<http://www.hogganhealth.com/microfet-healthcare-old.php?product= microFET2>
- (26) Lafayette Instrument. Lafayette Manual Muscle Test System [sede Web]. Lafayette: lafayetteevaluation.com; [acceso el 26 de abril de 2012]. Disponible en:
http://www.lafayetteevaluation.com/product_detail.asp?ItemID=26
- (27) Scott DA, Bond EQ, Sisto SA, Nadler SF. The intra- and interrater reliability of hip muscle strength assessments using a handheld versus a portable dynamometer anchoring station. Arch Phys Med Rehabil 2004 Apr;85(4):598-603.
- (28) Fulcher ML, Hanna CM, Raina Elley C. Reliability of handheld dynamometry in assessment of hip strength in adult male football players. J Sci Med Sport 2010 Jan;13(1):80-84.
- (29) Lu YM, Lin JH, Hsiao SF, Liu MF, Chen SM, Lue YJ. The relative and absolute reliability of leg muscle strength testing by a handheld dynamometer. J Strength Cond Res 2011 Apr;25(4):1065-1071.
- (30) Armstrong RB. Mechanisms of exercise-induced delayed onset muscular soreness: a brief review. Med Sci Sports Exerc 1984 Dec;16(6):529-538.
- (31) Febrer A, Rodriguez N, Alias L, Tizzano E. Measurement of muscle strength with a handheld dynamometer in patients with chronic spinal muscular atrophy. J Rehabil Med 2010 Mar;42(3):228-231.
- (32) Vanpee G, Segers J, Van Mechelen H, Wouters P, Van den Berghe G, Hermans G, et al. The interobserver agreement of handheld dynamometry for muscle strength assessment in critically ill patients. Crit Care Med 2011 Aug;39(8):1929-1934.

- (33) Bosco C, Viitasalo JT. Potentiation of myoelectrical activity of human muscles in vertical jumps. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 1982 Dec;22(7):549-562.
- (34) Viitasalo JT, Bosco C. Electromechanical behaviour of human muscles in vertical jumps. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1982;48(2):253-261.
- (35) Viitasalo JT. Electromechanical behaviour of the knee extensor musculature in maximal isometric and concentric contractions and in jumping. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 1984 May;24(4):293-303.
- (36) Linnamo V, Strojnik V, Komi PV. EMG power spectrum and features of the superimposed M-wave during voluntary eccentric and concentric actions at different activation levels. *Eur J Appl Physiol* 2002 Apr;86(6):534-540.

7. ANEXOS

7.1. Cuestionario



Nombre y Apellidos:

Edad:

Sexo: ☐ Masculino ☐ Femenino

Nacionalidad:

Estudios que realiza:

Altura: cm

Peso: kg

Deporte que practica:

Número de horas de entrenamiento a la semana:

Mano dominante: ☐ Derecha ☐ Izquierda

Estructura corporal: ☐ Media ☐ Obesa ☐ Pesada
☐ Muscular ☐ Delgada

Fumador: ☐ Si ☐ No

En caso afirmativo, indique el paquete/día: ☐ < 1 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ >3