

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE ENFERMERÍA

TERAPIA FÍSICA

“Comparación de la efectividad de la elongación de los músculos Isquiotibiales mediante la facilitación por electroestimulación del cuádriceps vs estiramiento estático pasivo, en los jugadores de la selección masculina de fútbol de la PUCE en las edades de 18 a 25 años, durante el periodo de Febrero – Abril 2011”

DISERTACIÓN DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE LICENCIADA EN TERAPIA FÍSICA.

**ELABORADO POR:
LILIANA ARACELY CÁRDENAS OROZCO**

QUITO, SEPTIEMBRE 2011.

ÍNDICE.

ÍNDICE.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	iv
DEDICATORIA.....	v
INTRODUCCIÓN.....	vi
ANTECEDENTES.....	1
JUSTIFICACIÓN.....	8
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
OBJETIVOS.....	12
Objetivo General.....	12
Objetivos Específicos.....	12
METODOLOGÍA.....	14
CAPITULO I: ASPECTOS BIOMECÁNICOS Y FISIOLÓGICOS DEL MÚSCULO ESQUELÉTICO.....	16
1.1 Composición y estructura del músculo esquelético.....	16
1.1.1 Estructura y Organización del músculo.....	16
1.2 Bases moleculares de la contracción muscular.....	21
1.2.1 La unidad motora.....	22
1.2.2 La unidad músculo tendinosa.....	23
1.3 Tipos de acción muscular.....	25
1.4 Producción de fuerza en el músculo.....	27
1.4.1 Relación tensión-longitud de fibras musculares.....	27
1.4.2 Relación carga- velocidad de fibras musculares.....	28
1.4.3 Relación tiempo-fuerza de las fibras musculares.....	29
1.4.4 Efectos de la arquitectura del músculo esquelético.....	29
1.4.5 Efecto del preestiramiento.....	30
1.4.6 Efecto de la temperatura.....	31
1.4.7 Efecto de la fatiga.....	32
1.5 Diferenciación de la fibra muscular.....	35
CAPÍTULO II: CONTROL NERVIOSO DEL SISTEMA MOTOR.....	38
2.1 Organización funcional de la médula espinal.....	38
2.1.1 Las motoneuronas espinales.....	40
2.1.2 Las motoneuronas alfa.....	40
2.2 Actividad refleja.....	41
2.2.1 La actividad de los mecanorreceptores musculares.....	42
2.2.2 El reflejo miotático.....	44
2.2.2.1 Contribución de reflejo miotático a la resistencia de un músculo a la distensión.....	46
2.2.3 El reflejo miotático inverso.....	46

4.5.1 METABOLISMO DE LOS FOSFÁGENOS (ATP Y FOSFOCREATINA) Y EJERCICIO DE ALTA INTENSIDAD	94
CAPITULO V: ENTRENAMIENTO CON ELECTROESTIMULACION	
NEUROMUSCULAR vs ESTIRAMIENTOS.....	96
5.1 Fundamentos de la electroestimulación neuromuscular	96
5.1.1 Contracción muscular voluntaria y contracción muscular con electroestimulación	96
5.1.2 Ley de lapique	99
5.1.3 Niveles de estimulación	100
5.2 Parametros de la corriente eléctrica	101
5.2.1 Tipos de impulso o de onda	101
5.2.2 Ancho de impulso	103
5.2.3 Frecuencia.....	104
5.2.4. Tiempo de Contracción.....	107
5.2.5 Tiempo de reposo.....	107
5.2.6 Intensidad o amplitud del impulso eléctrico.....	109
5.3 Características del protocolo de entrenamiento	111
5.3.1 Angulo de trabajo.....	111
5.3.2 Ubicación de los electrodos y punto motor	112
5.4 Efectos agudos de la electroestimulación neuromuscular sobre la función muscular	114
5.4.1 Tipos de unidades motrices reclutadas.....	114
5.4.2 Consumo energético.....	116
5.4.3 Flujo sanguíneo	116
5.4.4 Fatiga	117
5.5 Efectos crónicos de la estimulación eléctrica neuromuscular sobre la función muscular	118
5.5.1 Estimulación eléctrica neuromuscular superpuesta sobre contracciones voluntarias	118
5.5.1.1 Fuerza isométrica.....	118
5.5.1.2 Fuerza dinámica.....	119
5.5.2 EENM de baja frecuencia	119
5.6 Estiramientos	120
5.6.1. Definición.....	121
5.6. 2. Factores de los que depende	122
5.6.3. Estiramiento Pasivo	123
5.6.3.1. Técnica del estiramiento pasivo	126
5.6.3.2 Acciones implicadas en los estiramientos	127
5.7 Biomecánica de la musculatura Isquiotibial	128
5.6.5 Evaluación de la Flexibilidad.....	132
5.6.5.1 Medidas Angulares	133
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	135
CONCLUSIONES	158
RECOMENDACIONES	161
BIBLIOGRAFÍA	163
ANEXOS	166

AGRADECIMIENTOS

La presente Tesis es un esfuerzo en el cual, directa o indirectamente, participaron varias personas leyendo, opinando, corrigiendo, teniéndome paciencia, dando ánimo, acompañando en los momentos de crisis y en los momentos de felicidad. Primero quiero agradecer a Dios por permitirme llegar hasta este momento tan importante de mi vida y lograr otra meta más en mi carrera.

Agradezco al Lcdo. Fernando Iza por haber confiado en mi persona, por la paciencia y por la dirección de este trabajo.

Gracias también a la selección de fútbol masculino de la PUCE, que me apoyaron y me permitieron entrar en su vida durante estos casi siete meses de convivir dentro y fuera de la cancha.

Gracias a todos.

DEDICATORIA

Este esfuerzo quiero dedicarle a mi madre Cecilia Orozco por su comprensión y apoyo sin condiciones ni medida. Gracias por guiarme sobre el camino de la educación, responsabilidad y conocimientos.

Gracias mamita este logro es tuyo, a mi hermana Nathalie que es una persona muy importante en mi vida, con este ejemplo de dedicación lucha y esfuerzo anhelo que ella sigue sus metas como yo lo hice; También quiero dedicarle a mi abuelita Rosa Sánchez no podrá estar conmigo en este paso tan importante de mi vida pero fue una promesa que le hice y siempre estará en mi corazón.

INTRODUCCIÓN.

La flexibilidad es una cualidad física que con base en la movilidad articular y elasticidad muscular, permite el máximo recorrido de las articulaciones. Con frecuencia los deportistas se preocupan en ser más fuertes, mucho más rápidos, en ser capaces de resistir un partido de larga duración, pero no suelen prestar mucha atención a una cualidad que puede ser igual de importante o más que todas las demás, la flexibilidad. Además, hay que tener en cuenta que la flexibilidad es la única de las Cualidades Físicas cuya evolución es inversa al resto, es decir, se parte de un grado máximo en la niñez para, a medida que avanzan los años, ir disminuyendo hasta poder llegar a limitar de forma considerable cierto tipo de movimientos.

Los músculos poco a poco se van poniendo más rígidos, pierden elasticidad e incluso se pueden hacer más fuertes, pero más cortos. Esto determina un déficit de la funcionalidad que influye negativamente sobre nosotros tanto física como psíquicamente. Si sumamos a esto que existen patologías que exigen un periodo de reposo más o menos prolongado manteniendo miembros o parte de ellos en posturas fijas, nos encontramos con una grave afectación de la elasticidad de parte o de la totalidad del cuerpo que van a determinar un serio obstáculo en la recuperación del individuo.

Los estiramientos constituyen una técnica preventiva y terapéutica ampliamente utilizada y sobre la que además han escrito multitud de autores. Entre todos ellos, se encuentra la tensión activa, y será la técnica que utilizare en este estudio.

Por otro lado, la electroestimulación, como medio fundamental para el fortalecimiento muscular ha sido ampliamente estudiada y, de hecho, en las últimas décadas su uso se ha extendido a la mejora de la condición física en sujetos sanos y atletas con el fin de obtener mejoras en su rendimiento deportivo.

La electroestimulación ha sido utilizada con fines terapéuticos desde hace muchos años. Con el avance de la ciencia y la tecnología, la aplicación de estímulos eléctricos con fines terapéuticos se ha hecho más sencilla, incluso su uso ha pasado a tomar parte no sólo en el ámbito de la salud, sino también al deportivo. Más recientemente, la electroestimulación ha seguido utilizándose para mejorar la condición física y el rendimiento deportivo obteniendo ganancias de la fuerza, también se registra aumento del perímetro muscular.

Los isquiotibiales son músculos también llamados posturales. Es decir que tienen una acción activa en el mantenimiento de la postura. Una de las peculiaridades que unen a los músculos posturales es la tendencia a la rigidez, a la tonicidad y al retraimiento en personas sedentarias que pasan muchas horas de pie o sentadas y a deportistas o aficionados al deporte mal entrenados. Estos es debido a que al pasar muchas hora de pie estos músculos siempre se encuentran en tensión realizando sus funciones y esto con el paso del tiempo hace que pierdan flexibilidad y se acorten o retraigan.

En la mayoría de equipos se le da la importancia debida al trabajo de elongación muscular de estos importantes músculos. (Semimembranoso, semitendinoso y bíceps crural). El acortamiento de los músculos isquiotibiales provocara una postura incorrecta, un dorso curvo, hipercifosis dorsal, disminuida extensión rodilla, disminuida flexión cadera, restringe la rotación anterior del Iliaco, aplanamiento lumbar. Por lo tanto la disminución de la extensibilidad de la musculatura isquiotibial y la consecuente cortedad puede ser responsable de dolor lumbar, dorsal, espondilólisis o espondilolistesis, hernias discales, lesiones

musculares e incluso puede favorecer la aparición de una pubalgia, por lo que es importante mantener una adecuada extensibilidad de este grupo muscular.

Los nuevos profesionales que se encuentran involucrados en el ámbito del deporte y por ende en la salud trabajan con la idea del equilibrio de fuerzas y flexibilidad entre los músculos de la parte posterior y los músculos de la parte delantera. Sería como las cuerdas que ayudan a un mástil a mantenerse recto, cada tira del mástil jala hacia su lado y la fuerza conjunta de todas las cuerdas mantiene el mástil recto. Con la musculatura de la columna y la cadera pasa algo parecido, pero tenemos el problema que los músculos de la parte posterior (isquiotibiales) tienen a ponerse más fuertes y tirar más hacia su lado lo que provoca que el mástil (la columna) pierda su estabilidad y forma original. Por todo esto el trabajo de flexibilidad de los músculos isquiotibiales mediante ejercicios programados, planificados, progresivos y adaptados ayuda tanto a personas sedentarias como a deportistas de competición.

ANTECEDENTES

El fútbol es considerado como el mejor espectáculo del mundo, es tal vez uno de los deportes que más masificación publicitaria y comercial recibe. Además la globalización lo hace muy conocido y popular; no tiene distinciones sociales, económicas, raciales ni culturales y su práctica se ha mantenido vigente desde sus orígenes hasta nuestra época contemporánea. En nuestro país este deporte ha trascendido a través del tiempo y se ha posicionado como deporte nacional por reunir la mayor cantidad de aficionados, algunos como practicantes y otros como espectadores, que han sido testigos de su evolución (mundial y nacional) a nivel físico, técnico, táctico, estratégico y psicológico (sin olvidar el poder que implica ganar campeonatos). Uno de los factores, a nivel físico, que más se ha estudiado en los últimos tiempos y que ha demostrado gran relevancia y utilidad en la planificación del entrenamiento de las diversas disciplinas deportivas es la fuerza; que en el fútbol se ha constituido como uno de los factores decisivos para lograr esa gran dinámica colectiva que se vislumbra en las diferentes competiciones a nivel mundial, no olvidemos la influencia de los factores biomecánicos que en la actualidad nos sirve para definir las características de las destrezas, para entender mejor la efectividad mecánica de su ejecución e identificar los factores que subyacen al rendimiento exitoso.

El fútbol profesional Ecuatoriano muestra hoy en día un desarrollo estructurado y sistemático en el proceso de entrenamiento acorde a la vanguardia de las nuevas teorías, y metodologías de entrenamiento mundial. En la actualidad los equipos de primera división cuentan con profesionales en áreas interdisciplinarias del conocimiento (médicos, deportólogos, terapeutas físicos, psicólogos, preparadores físico, nutricionistas, etc.), que refuerzan de forma variada y objetiva el proceso a través del cual los deportistas logran una buena forma deportiva para afrontar las competencias. Los futbolistas se enfrentan a diferentes problemáticas que comprometen su vida deportiva. No es extraño encontrar en futbolistas agravios en sus extremidades inferiores, producto de la combinación de factores propios del individuo y otras consecuencias de un inadecuado entrenamiento, como por ejemplo el errado manejo de la flexibilidad. De esta manera la flexibilidad pasa a ser un objetivo importante en el entrenamiento de un deportista

Estudios demuestran que los futbolistas sufren principalmente de acortamiento en su musculatura flexora de rodilla, lo cual conduce a múltiples lesiones por sobre estiramientos. Además muchas investigaciones avalan la importancia de mantener una óptima flexibilidad, reconociéndola como un componente importante de la condición física de los deportistas, destacando los beneficios que tiene en la prevención y rehabilitación de lesiones.¹

Es por esto que los ejercicios de estiramientos en los distintos grupos musculares pasan a cumplir un rol fundamental en la vida de un futbolista. El

¹ Ayala, F.; Sainz de Baranda, P. 2008, Murcia, European Journal of Human Movement, **“Efecto del estiramiento activo sobre el rango de movimiento de la flexión de cadera: 15 vs 30 segundos”**

Arriagada Masse, Fernando Arturo, Mendoza Rosende, Francisco Javier, Agosto 2008, Chile, **“Comparación de la efectividad temporal en la técnica de estiramiento estático pasivo aplicada en la musculatura isquiotibial acortada de futbolistas sub 16 y sub 17”.**

Osorio F. Cesar, Rossi S. Rafael, Hidalgo N. Rodolfo, Lizana R. Marcelo, Junio 2008, Chile, **“Relación entre flexibilidad y fuerza muscular en isquiotibiales y su incidencia en lesiones musculares de jóvenes futbolistas”.**

desarrollo o mantención de una óptima flexibilidad se debe en gran parte a la forma en que es trabajada, siendo la elongación estática una de las técnicas más utilizadas, por su fácil ejecución, para el estiramiento de isquiotibiales y otros grupos musculares. Sin embargo, no existe un consenso claro acerca del tiempo que debe ser ejecutada, existiendo variada información sobre el tiempo necesario para mantener una posición y la carga total que se debe aportar de estiramiento en un estudio, considerando las repeticiones en el día por un determinado número de semanas.

Toda esta controversia se puede traducir en prácticas sin efectos o con menos beneficios debido a que el tiempo empleado en la realización de la técnica es insuficiente. Una de las nuevas técnicas para un óptimo estiramiento es mediante la electro estimulación que consiste en estimular el musculo antagonista (o sea, opuesto) al musculo sometido al estiramiento (en este caso el musculo estirado serán los isquiotibiales y el musculo estimulado será el cuádriceps), para aprovechar un mecanismo fisiológico bien conocido como es el reflejo de inhibición recíproca. Este reflejo, en el que interviene la sensibilidad propioceptiva de los músculos, consiste en un muy marcado relajamiento muscular. Esto permitirá un estiramiento más eficaz porque se realiza sobre un musculo relajado. De ahí la importancia de determinar cual es el mejor tiempo de elongación para el desarrollo de una óptima flexibilidad en futbolistas, previniendo la aparición de lesiones que limiten la carrera de estos deportistas. De esta manera un adecuado entrenamiento de la flexibilidad, se va a reflejar en un aumento de su rendimiento deportivo. Aun así, en años pasados se pudo observar cómo, a pesar de aplicar las nuevas técnicas de estiramiento, continuaban apareciendo lesiones musculares en la práctica deportiva. Las contracturas musculares continúan siendo el problema central entre los deportistas y los no deportistas. Actualmente podemos afirmar: el hecho de realizar más ejercicios de estiramiento no significa gozar automáticamente de mejor salud.

Los estudios que a continuación están descritos fueron realizados en diversos países de América Latina y Europa, destacando que mediante un buen estiramiento se puede prevenir lesiones y hasta incluso mejorar el rendimiento deportivo.

Osorio F. Cesar, Rossi S. Rafael, Hidalgo N. Rodolfo, Lizana R. Marcelo, Junio 2008, Chile, “**Relación entre flexibilidad y fuerza muscular en isquiotibiales y su incidencia en lesiones musculares de jóvenes futbolistas**”. El objetivo de este estudio fue asociar el factor de fuerza, flexibilidad muscular o ambas a la incidencia de lesiones musculares en los isquiotibiales, para intentar determinar cuál de los dos prepondera sobre el otro. Los resultados obtenidos demuestran que no existe relación alguna entre flexibilidad adecuada y la prevención de lesiones musculares de los isquiotibiales de futbolistas jóvenes. Sin embargo se observó una leve tendencia en los jugadores lesionados a presentar mayores valores de flexibilidad en ambos test de flexibilidad activa (AKE) y flexibilidad pasiva (SLR) con mayor influencia en el componente activo.

Arriagada Mase, Fernando Arturo, Mendoza Rosende, Francisco Javier, Agosto 2008, Chile, “**Comparación de la efectividad temporal en la técnica de estiramiento estático pasivo aplicada en la musculatura isquiotibial acortada de futbolistas sub 16 y sub 17**”. El objetivo de esta investigación fue determinar el tiempo de estiramiento estático pasivo más efectivo entre 30 y 60 segundos para la musculatura isquiotibial acortada de futbolistas de divisiones inferiores. Para los resultados obtenidos se calcularon medidas estadísticas de resumen y se compararon las ganancias de ROM de rodilla mediante la Prueba T. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas al comparar los grupos A y B ($p < 0,05$). Al comparar los grupos A y B con el control se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$), para la desviación estándar y promedio.

Lorena Borobia Lafuente, Laura Cuadra Giménez (Máster en Terapia Manual Ortopédica según el concepto Kaltenborn-Evjenth), Julio 2008, España, “**Comparación de tres tipos de estiramientos de la musculatura isquiotibial en individuos saludables**” Los objetivos de esta investigación fueron: comparar la duración del efecto de mantenimiento de las ganancias logradas a corto y largo plazo y la efectividad de los siguientes estiramientos en la musculatura isquiotibial en individuos saludables: El estático pasivo, el de contracción-relajación y el propuesto por O. Evjenth. Los resultados de esta investigación fueron: Los resultados del estudio demostraron que todos los protocolos de estiramiento utilizados en el estudio fueron efectivos en la ganancia de grados de flexión pasiva de cadera (longitud de los isquiotibiales) a corto y a largo plazo. Ésto corroboró los resultados de otros estudios de investigación como los siguientes: *DePino G.M., Webright W.G. y Arnold B.L., 1997; William D. Bandy, Jean M. Irion, Michelle Briggler, 1997; J.B. Feland, H.N. Marin, 2004; B. Dadebo, J. White, K.P. George, 2004*). Atendiendo a la ganancia de grados máximos de flexión pasiva de cadera, observamos, a corto plazo, que tanto el protocolo de contracción-relajación como el protocolo de Evjenth fueron más efectivos que el protocolo pasivo en los beneficios logrados justo después del estiramiento. Sin embargo, no existía diferencia significativa entre la aplicación de ambos protocolos, ya que produjeron ganancias similares.

A.L. Rodríguez Fernández, Javier López Andrino, Juan Carlos Zuil Escobar, Carmen Martínez Cepa, 2004, España “**Estudio de la relación entre la práctica del fútbol y el acortamiento muscular**”. La práctica del fútbol provoca acortamientos musculares que pueden alterar la postura del jugador, siendo posible causa de lesiones. Se presenta un estudio comparativo con 2 grupos de 30 personas cada uno: uno de futbolistas y otro control. Se han realizado valoraciones posturales utilizando el método de Reeducción Postural Global (RPG). Después de comparar los datos obtenidos, se observa que la diferencia más importante radica en que el grupo de futbolistas presenta mayor acortamiento de la cadena maestra

posterior, especialmente en el miembro inferior, destacando el acortamiento de la musculatura isquiotibial.

José Luis González Montesinos, M^a del Mar López Herrero, David Ramos Espada, Jesús Mora Vicente, Revista Española de Educación Física y Deportes - N.º 10. Enero-Marzo, 2009, España, “Propuesta de tests de evaluación de la movilidad articular y estudio de los acortamientos musculares en una población universitaria” El estudio que aquí se presenta, tiene como objeto valorar la adecuada movilidad articular de una población universitaria (n=139) con edades comprendidas entre 19 y 25 años mediante una batería de tests que evaluó las articulaciones escápulo-humeral, la cadera y la rodilla. De este modo, se han cuantificado los acortamientos musculares y las disimetrías bilaterales encontrados en dichas articulaciones. Los resultados obtenidos muestran acortamiento de la musculatura implicadas en el movimiento de tales articulaciones en la población universitaria, así como disimetrías bilaterales, que deben ser corregidas mediante un trabajo de flexibilidad adecuado y una mejora en la planificación y estructuración de la actividad física.

Ayala, F.; Sainz de Baranda, P. 2008, Murcia, European Journal of Human Movement, **“Efecto del estiramiento activo sobre el rango de movimiento de la flexión de cadera: 15 vs 30 segundos”** El objetivo principal de este estudio fue valorar la eficacia de un programa de estiramientos activos con una duración de 12 semanas para aumentar el rango de movimiento de la flexión de cadera en adultos jóvenes, así como comparar la eficacia de dos duraciones diferentes del estiramiento, 15 y 30 segundos. Los resultados muestran que la técnica empleada es eficaz para aumentar la flexibilidad isquiosural independientemente de la duración del estiramiento ($p < 0,05$). No hubo diferencias estadísticamente significativas entre los distintos grupos de trabajo ($p > 0,05$). Conclusión: la técnica activa es eficaz para aumentar el rango de movimiento de la flexión de la articulación

coxo-femoral, siendo igual de efectiva la duración del estiramiento de 15 y 30 segundos.

Por todo lo mencionado anteriormente es necesario que las nuevas técnicas y los profesionales preparados adecuadamente con conocimientos demos un aporte para el mejoramiento deportivo y prevención de lesiones en los jugadores del equipo de futbol masculino de la PUCE a que sus músculos tengan flexibilidad y estén preparados para comenzar a trabajar en el deporte.

En la actualidad la Terapia Física es una rama muy importante en ámbito de la salud ya que se trabaja como equipos multidisciplinarios, por este motivo el rol actual del terapeuta físico en todas las aéreas de salud cada día es más importante. Es primordial por esta razón analizar la necesidad de incorporar a la terapia física en el ámbito deportivo amateur.

JUSTIFICACIÒN

Los músculos isquiotibiales son aquellos tres que cubren la parte posterior del muslo. Dos más internos, el semitendinoso y el semimembranoso, y uno más externo, el bíceps femoral. Son masas musculares largas y de gran fuerza tendinosa, lo que facilita las tendinitis y las contracturas, dando molestias desde los bordes inferiores de los glúteos hasta el hueco posterior de la rodilla. Cuando se estira la pierna completamente en la zancada, los músculos isquiotibiales de la pierna adelantada están estirados y se contraen cuando el pie toca el suelo y la otra pierna empieza a ser levantada del suelo, hacia adelante. Por ello, estos músculos recogen o flexionan la pierna y extienden la cadera. Para mantener la postura erguida, estos músculos ayudan a estabilizar el cuerpo contra la influencia de la gravedad. Trabajan acoplados al cuádriceps. Cuando hacemos un movimiento hacia adelante nos protegen de no caernos hacia esa zona.

La flexión del tronco y la cadera con la rodilla extendida (zancada larga) se ve limitada por la extensibilidad acortada de estos músculos, por lo que la exploración de los isquiotibiales es crucial cuando duele en la parte posterior del muslo. Lo cierto es que un acortamiento mantenido del muslo posterior ocasionará, con el tiempo, un aumento de la curvatura dorsal (cifosis torácica) y alteraciones de la zona lumbo-sacra con afectación de los discos intervertebrales (protrusiones y hernias discales lumbares). Además, durante la flexión del tronco y la posición de sentado, la cortedad funcional de esta musculatura ocasiona retroversión de la pelvis y con ello una inversión o cambio de la curvatura lumbar normal (pérdida de lordosis).

La condición poliarticular de la musculatura isquiotibial, su diversidad de funciones, su carácter tónico-postural, y el elevado número de fuerzas tensionales a las que se ve sometido, hacen que esta musculatura presente una fuerte tendencia al acortamiento. En este sentido, numerosos estudios han tratado de analizar qué parámetros del estiramiento (técnica, duración, series,...) son más adecuados para el diseño de programas sistemáticos de estiramiento, con la finalidad de aumentar la flexibilidad de la musculatura isquiotibial y en consecuencia, conseguir un rango de movimiento de la articulación coxofemoral mayor. Los incrementos en la flexibilidad han sido comúnmente asociados con el tiempo de aplicación de la fuerza tensional sobre la musculatura estirada. Son muchos los autores que sugieren la duración más apropiada del estiramiento, y sin embargo, no hay una evidencia científica clara sobre que duración del estiramiento es la más adecuada.

Los estudios epidemiológicos que a continuación se presentan han remarcado la importancia de las lesiones deportivas como medio para prevenir y tratar efectivamente las mismas. Sin embargo algunos autores proponen que el conocimiento sobre la etiología de las lesiones en el fútbol aun es limitado, existiendo desacuerdo sobre las lesiones más comunes y su etiopatología.

“El departamento de Terapia física en las olimpiadas del 2004 durante los últimos 15 días de los Juegos Olímpicos (períodos B y C) de la culminación fueron: Las lesiones más comunes fueron las lesiones por sobreuso o desgarros musculares (47,3%). La patología más común para la asistencia de fisioterapeuta fue el dolor miofascial o espasmo muscular (32,5%), seguido de la tendinitis (19,2%) y el esguince (18,7%). El sitio más frecuente de lesión fue el muslo (21%), seguido de la rodilla (14,1%) y la columna lumbar (13,5%). La mayoría de las lesiones presentaban síntomas de duración <7 días. La región geográfica con la mayor demanda de servicios de fisioterapia fue África (40,6%). La mayoría de los pacientes eran deportistas (74,8%), aunque los oficiales de equipo representaron un número considerable (14%)”.²

² Spyridon Athanasopoulos, Eleni Kapreli, Aikaterini Tsakoniti (2007). The 2004 Olympic Games: physiotherapy services in the Olympic Village polyclinic. Originally published online May 14, 2007. Páginas:603-609

“Durante la Copa Mundial de la FIFA Alemania 2006, se informó que hubo un promedio de 2,3 lesiones por partido. Más de la mitad de éstas ocasionaron pérdidas de tiempo de diferente duración, en las cuales el jugador quedó imposibilitado para entrenar, competir o realizar ambas actividades. Como sucede siempre en el fútbol, los mejores jugadores del mundo a menudo también se lastiman las extremidades inferiores: el tobillo, la pierna, el muslo y la rodilla.”³

El desarrollo de esta investigación se enfocará en una propuesta metodológica está destinada a toda persona deportista profesional como no profesional para mejorar la flexibilidad, la resistencia, coordinación, velocidad y la calidad de vida todo esto nos llevara a prevenir lesiones a través de las diferentes estructuras que intervienen en el movimiento en los deportistas.

El trabajo de flexibilidad es realmente importante a cualquier edad, ayuda a relajar los músculos rígidos y tensos, puede llegar a mejorar la técnica en algunas actividades deportivas. Es importante saber que una disminución de la flexibilidad puede aumentar el riesgo de lesiones por sobreentrenamiento, desgarros y distensiones durante la práctica deportiva, debemos recordar que una adecuada elongación mejora el rendimiento deportivo en los atletas, puesto que el músculo trabaja a una longitud óptima.

La flexibilidad es una capacidad fundamental e indispensable para lograr una buena condición física y deportiva, tanto los individuos deportistas como a personas no deportistas que practican actividad física habitualmente, los cuales se verán beneficiados de acuerdo al nivel de flexibilidad que experimenten a nivel osteomuscular sus respectivas articulaciones.

³ La FIFA. En línea 1994- 2010.
10 Junio 2010. <http://es.fifa.com/aboutfifa/developing/medical/newsid=528193.html>

En la actualidad aun podemos darnos cuenta que no solo en el futbol sino también en diversas aéreas deportivas no le dedican el tiempo de estiramiento que realmente es necesario; más triste aún, es que en estos tiempos todavía escuchamos a algunos entrenadores “No pierdan tanto tiempo realizando esos ejercicios y empiecen a entrenar en serio”, como si el entrenamiento de la flexibilidad fuera una pérdida total de tiempo. Realmente es terriblemente la falta de flexibilidad que poseen la mayoría de los deportistas y en especial los futbolistas (ejemplificando este deporte por ser el que más simpatizantes y seguidores posee). La necesidad de estirarse es una necesidad fisiológica, cualquier actividad física repetitiva lleva a la larga a la hipertonia, retracción muscular, a la rigidez muscular de los músculos estáticos, limitando el movimiento, disminuyendo la fuerza y generando compresiones en otras partes del cuerpo.

Esta investigación trae beneficios a todas aquellas personas interesadas en el deporte y su prevención, no solo a profesionales de la salud como Terapistas Físicos, Fisiatra, Deportologos, Estudiantes sino además a personas que de una u otra manera quieran mejorar su rendimiento deportivo o quieran conocer de qué forma evitar lesiones o dolores musculares.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿Cuál es el método más efectivo para la obtención de mayor elasticidad en la musculatura de los isquiotibiales mediante la facilitación por electroestimulación del cuádriceps vs el estiramiento estático pasivo en los jugadores de la selección de fútbol de la PUCE?

OBJETIVOS

Objetivo General

- Determinar la efectividad de la elongación de los músculos isquiotibiales mediante la facilitación por electro estimulación del cuádriceps vs el estiramiento estático pasivo, en los jugadores de la selección de fútbol de la PUCE

Objetivos Específicos

- Determinar los grados de acortamiento de los músculos isquiotibiales de los jugadores de la selección de fútbol de la PUCE con el Test del ángulo poplíteo.
- Identificar los conceptos básicos desde el punto de vista de la fisiología y la biomecánica del músculo.

- Conocer la estructura y función de los motores moleculares en las fibras musculares esqueléticas y sus propiedades biomecánicas.

- Cuidar los hábitos posturales en la ejecución de los diferentes ejercicios de estiramiento y en los posibles sistemas de ayuda o colaboración que se establezcan.

- Investigar la técnica, forma de trabajo, método y medio para la propuesta de ejercicios de estiramiento en los jugadores de la selección de fútbol de la PUCE.

METODOLOGÍA

Tipo de estudio: Es descriptiva longitudinal prospectiva

- Es una investigación descriptiva porque describe las características de elasticidad, flexibilidad y elongación en los jugadores del equipo masculino de la PUCE en las edades de 18 a 25 años
- Es longitudinal porque la investigación se realizó a lo largo del periodo de tiempo entre Febrero – Marzo 2011.
- Y es prospectiva ya que los resultados de la evaluación de elasticidad muscular se registraron en el momento de su ejecución

Universo: 22 Futbolistas de la selección de fútbol de la PUCE cuyas edades fluctúan entre 18 y 25 años.

Muestra: 15 (Hombres) Es una muestra por conveniencia. Se los escogió por las siguientes características:

- Sexo masculino.
- No tengan lesiones ni en rodilla ni en espalda
- No posean hiperlaxitud
- Tengan buena fuerza muscular en cuádriceps y en isquiotibiales
- Pertenecer a un equipo de fútbol amateur y entrenen mínimo 4 días a la semana
- Edad entre los 18 y 25 año

Técnica:

- La técnica que se efectuara es observación directa
- Entrevista.

Instrumento

- Guía de observación
 - Test ángulo poplíteo
- Guía de entrevista
 - Edad
 - Peso
 - Estatura
 - Tipo de lesión que le excluya de la investigación

Fuente:

- Primaria: Fichas de registro de variación del ROM de los jugadores del equipo masculino de la PUCE
- Secundaria:
 - Documentos y libros de SGA (Stretching Global Activo)
 - Páginas web:
 - <http://www.esgrima.cl>
 - <http://www.esgrimagranada.org/lesiones.php>
 - <http://www.bodyhelp.es/lesiones>
 - <http://www.tusalud.com/deporte/html/lestp/lt4.htm>
 - <http://www.vi.cl/secciones/deporte/esgrima.htm>[pic]

CAPITULO I: ASPECTOS BIOMECÁNICOS Y FISIOLÓGICOS DEL MÚSCULO ESQUELÉTICO

1.1 Composición y estructura del músculo esquelético

Un entendimiento de la biomecánica de la función muscular requiere un amplio conocimiento de la estructura anatómica, de la función de la unidad musculo-tendinosa, de la estructura microscópica básica y la composición química de la fibra muscular.

1.1.1 Estructura y Organización del músculo

La unidad estructural del músculo esquelético es la fibra muscular, una célula cilíndrica alargada con muchos cientos de núcleos. “Las fibras musculares oscilan en su espesor desde aproximadamente 10 a 100 μm y en su longitud desde aproximadamente 1 a 30 cm”. Una fibra muscular se constituye de muchas miofibrillas las cuales están recubiertas por una delicada membrana plasmática llamada sarcolema. El sarcolema está conectado a través de costámeras ricas en vinculina y distrofina con las líneas Z, de la sarcómera la cual representa una parte del citoesqueleto extramiofibrilar. La miofibrilla está constituida por varias sarcómeras que contienen filamentos delgados (actina), gruesos (miosina), elásticos (titina), e inelásticos (nebulina).

“La actina y la miosina son la parte contráctil de las miofibrillas, mientras que la titina y la nebulina son parte del citoesqueleto intramiofibrilar; Las miofibrillas son la unidad básica de la contracción.”⁴

Cada fibra está recubierta por tejido conectivo laxo llamado endomisio y las fibras se organizan, en haces de varios tamaños, que están revestidos en cambio por una vaina de tejido conectivo denso conocido como perimisio. El músculo se compone de varios fascículos envueltos por una fascia de tejido conectivo fibroso llamada epimisio.

En general cada extremo, de un músculo se inserta al hueso por tendones, que no tienen propiedades contráctiles activas. Los músculos forman el componente contráctil y los tendones el componente elástico en serie. Las fibras de colágeno en el perimisio y el epimisio son continuas con las de los tendones; esas fibras juntas actúan como un armazón estructural para la inserción de huesos y fibras musculares.

“El perimisio, endomisio, epimisio, y el sarcolema actúan como componentes elásticos paralelos. Las fuerzas producidas por las contracciones musculares se transmiten al hueso a través de estos tejidos conectivos y tendones.”⁵

Cada fibra muscular está compuesta por un gran número de delicados filamentos, las miofibrillas. Estas son los elementos contráctiles del músculo. Su estructura y función se han estudiado exhaustivamente con microscopios ópticos y electrónicos.⁶

⁴ Nordi, M y Frandel, V (2004). Biomecánica básica del sistema musculoesquelético .(1 Ed). Madrid. Editorial McGraw Hill Interamericana, p. 153

⁵ Kasser, J.R (1996). General Knowledge. IN, J.R Kasser (ed). Orthopaedic Knowledge

⁶ Arvidson, I., Eriksson , E., (1984). Rehabilitación básica neuromuscular. St. Louis Mosby, p. 210

Aproximadamente con $1 \mu m$ de diámetro, las miofibrillas se encuentran paralelas unas a otras dentro del citoplasma (sarcoplasma) de la fibra muscular y extendida en toda su longitud. Estas varían en número de unas pocas a varios miles dependiendo del diámetro de la fibra muscular, que depende, en cambio, del tipo de fibra muscular. El modelo de bandas transversales en el músculo estriado se repite a lo largo de la longitud de la fibra muscular, siendo cada repetición conocida como sarcómera. Estas estriaciones se producen por las miofibrillas individuales, las cuales se alinean de manera continua a lo largo de toda la fibra muscular. La sarcómera es la unidad funcional del sistema contráctil el músculo y los sucesos que tienen lugar en una sarcómera se duplican en las otras. Varios sarcómeras forman una miofibrilla, varias miofibrillas constituyen una fibra muscular y varias fibras musculares forman el músculo.

Cada sarcómera se compone de lo siguiente:

1. Los filamentos delgados (aproximadamente 5nm de diámetro) compuestos por la proteína actina.
2. Los filamentos gruesos (aproximadamente 15 nm de diámetro) compuestos por la proteína miosina.
3. Los filamentos elásticos compuestos por la proteína titina
4. Los filamentos inelásticos compuestos por la proteína nebulina y titina

La actina es el componente principal del filamento delgado, tiene forma de doble hélice y se presenta como dos hebras de rosario en espiral una alrededor de otra. Dos proteínas adicionales la troponina y la tropomiosina son importantes constituyentes de la hélice de actina porque parece regular la formación y destrucción de puentes entre los filamentos de actina y miosina durante la contracción. La troponina es una molécula globular insertada a intervalos regulares con la tropomiosina.

Los filamentos gruesos se localizan en la región central de la sarcómera donde su organización paralelamente ordenada da lugar a bandas

negras conocidas como bandas A porque son fuertemente anisotrópicas. Los filamentos finos están unidos en cada extremo de la sarcómera a una estructura conocida como la Línea Z que consiste en elementos cortos que unen los filamentos finos con sarcómeras adyacentes, definiendo los límites de cada sarcómera. Los filamentos finos se extienden desde la línea Z hacia el centro de la sarcómera, donde se superponen con los filamentos gruesos. Se ha demostrado que hay una tercera disposición de los filamentos miofibrilares en los músculos estriados vertebrados. Este filamento de conexión, llamado titina, une los filamentos gruesos con la Línea Z (banda I elástica de la región de titina) y es parte de los filamentos gruesos (banda A de la región de titina). Este filamento mantiene la posición central de la banda A a lo largo de toda la contracción y relajación *que* debería actuar como un patrón durante el montaje de la miosina.

La miosina, el filamento más grueso, está compuesto de moléculas individuales cada una de las cuales se parece a un bastoncillo con una « cabeza, globular proyectada desde un largo mango o -cola-. Algunos cientos de estas moléculas están empaquetadas cola a cola en una formación con sus cabezas apuntando en una dirección a lo largo de la mitad del filamento y en dirección opuesta a lo largo de la otra mitad, dejando una región libre de cabezas (zona H) en medio. Las cabezas globulares se mueven en espiral alrededor del filamento de miosina en la región donde la actina y la miosina se superponen (banda A) y se extienden como puentes de cruce para interdigitales en puntos sobre los filamentos de actina formando de esta manera la unión estructural y funcional entre los dos tipos de filamento.

El citoesqueleto intramiofibrilar incluye filamentos inelásticos de nebulina, que se extienden desde la Línea Z hasta los filamentos de actina. La nebulina debería también actuar como un patrón para el montaje de los filamentos finos.

La titina tiene 1µm de longitud. Es el polipéptido más grande y se extiende desde la Línea Z hasta la Línea M. La titina es un filamento elástico. La parte entre la Línea Z y la miosina tiene una apariencia como de cuerda.

“Se ha sugerido que la titina contribuye de gran manera al desarrollo de la fuerza pasiva del músculo durante el estiramiento. También debería actuar como patrón para el montaje del filamento grueso”⁷

La banda I esta bisegmentada por las líneas Z que contienen la porción de los filamentos finos que no se superponen con los filamentos gruesos y la parte elásticas de la titina. En el centro de la banda A, en el espacio entre los extremos de los filamentos finos, la zona H, una ligera banda que contiene solo filamentos gruesos y esa parte de la titina que está integrada en los filamentos gruesos. Un área estrecha y oscura en el centro de la zona H es la Línea M, producida por proteínas orientadas transversalmente y longitudinalmente que unen los filamentos gruesos adyacentes manteniendo su posición paralela.

Los túbulos del retículo sarcoplasmático descansan paralelos a las miofibrillas y tienden a ampliarse y fusionarse al nivel de las uniones entre las bandas A e I formando sáculos transversos, o las cisternas terminales que rodean completamente las miofibrillas terminales.

Las cisternas terminales rodean un túbulo más pequeño que está separado de él por su propia membrana. El túbulo más pequeño y la cisterna terminal por arriba y por debajo, se conocen como una tríada. El túbulo englobado es parte del sistema de túbulos transversos, o sistema T, que son invaginaciones

⁷ Linke W.A., Ivemeyer M., (1998). Nature of PEVK-titin elasticity in skeletal muscle. Proc Natl Acad Sci USA, 95(14)

de la membrana superficial de la fibra. Esta membrana, el sarcolema, es una membrana plasmática que recubre cada músculo estriado.

1.2 Bases moleculares de la contracción muscular

La teoría más ampliamente mantenida de la contracción muscular es la teoría del filamento deslizante, propuesta simultáneamente por A. F. Huxley y H. E. Huxley en 1964 y posteriormente perfeccionada (Huxley, 1974). De acuerdo con esta teoría, el acortamiento activo de la sarcómera, y por lo tanto del músculo, es resultado del movimiento relativo de los filamentos de actina y miosina uno en relación al otro mientras cada uno mantiene su longitud original. La fuerza de contracción se desarrolla por las cabezas de miosina, o puentes cruzados, en la región de superposición entre la actina y la miosina (la banda A).

Estos puentes cruzados giran en un arco alrededor de sus posiciones fijas sobre la superficie del filamento de miosina, muy similar a los remos de un barco. Este movimiento de los puentes cruzados en contacto con los filamentos de actina produce el deslizamiento de los filamentos de actina hasta el centro de la sarcómera. Una fibra muscular se contrae cuando todas las sarcómeras se acortan simultáneamente según un modelo todo o nada, lo que se llama contracción.

“Debido a que el movimiento individual de un puente cruzado produce solo un pequeño desplazamiento relativo del filamento de actina respecto al filamento de miosina, cada puente cruzado individual se separa por sí mismo desde un lugar receptor en el filamento de actina y se vuelve a unir a otro lugar más lejos, repitiendo el proceso cinco o seis veces, con una acción similar a un hombre tirando de una cuerda mano sobre mano”⁸

⁸ Wilkie, D.R., (1995). Las propiedades mecánicas del músculo. Br. Med Bull. p. 177

Los puentes cruzados no actúan de manera sincronizada; cada uno actúa independientemente. Por eso, en un momento dado solo aproximadamente la mitad de los puentes cruzados generan fuerza y desplazamiento activamente, y cuando estos se separan, otros se encargan de la tarea para que el acortamiento se mantenga. El acortamiento se refleja en la sarcómera tanto con una disminución en la banda I como con una disminución en la zona H a medida que las líneas Z se acercan entre sí; la anchura de la banda A permanece constante.

Una clave del mecanismo de deslizamiento es el ion calcio (Ca^{2+}), el cual activa o desactiva la actividad contráctil. La contracción muscular se inicia cuando el calcio se pone a disposición de los elementos contráctiles y cesa cuando éste es retirado. Los mecanismos que regulan la disponibilidad de los iones de calcio a la maquinaria contráctil están asociados a procesos eléctricos que tienen lugar en la membrana muscular (sarcolema). Un potencial de acción en el sarcolema proporciona la señal eléctrica para el inicio de la actividad contráctil. El mecanismo por el cual la señal eléctrica desencadena los sucesos químicos de la contracción se conoce como acoplamiento de contracción-excitación. Cuando la neurona motora estimula el músculo en la unión neuromuscular y el potencial de acción propagado despolariza la membrana de la célula muscular (sarcolema), existe una transmisión hacia adentro del potencial de acción a lo largo del sistema T.

1.2.1 La unidad motora

La unidad funcional del músculo esquelético es la unidad motora, la cual incluye una única neurona motora y todas las fibras musculares inervadas por ella. Esta unidad es la parte más pequeña del músculo que puede contraerse independientemente. Cuando son estimuladas, todas las fibras

musculares en la unidad motora responden como una unidad. Las fibras de una unidad motora se dice que muestran una respuesta de todo o nada a la estimulación: se contraen de forma máxima o no se contraen.

El número de fibras musculares que forman una unidad motora está muy relacionado con el grado de control requerido del músculo. En músculos pequeños que realizan movimientos muy finos, como el músculo extraocular, cada unidad motora podría contener menos de una docena de fibras musculares; en los músculos largos que realizan movimientos gruesos; como el gastrocnemio, la unidad motora podría contener de 1000 a 2000 fibras musculares.

Las fibras de cada unidad motora no están contiguas sino dispersadas a lo largo del músculo con fibras de otras unidades. Por eso, si se estimula una única unidad motora, una gran porción de músculo parece contraerse. Si se estimula unidades motoras adicionales del nervio que inerva el músculo, el músculo se contrae con mayor fuerza. La llamada de unidades motoras adicionales en respuesta a una mayor estimulación del nervio motor se llama reclutamiento.

1.2.2 La unidad músculo tendinosa

Los tendones y los tejidos conectivos dentro y alrededor del vientre muscular son estructuras viscoelásticas que ayudan a determinar las características mecánicas de todo el músculo durante la contracción y la extensión pasiva.

Hill (1970) mostró que los tendones representan un componente elástico a modo de muelle localizados en serie con el componente contráctil (las proteínas contráctiles de la miofibrilla, actina y miosina),

mientras que el epimisio, perimisio, endomisio y el sarcolema representan un segundo componente elástico localizado en paralelo con el componente contráctil.

“Cuando los componentes elásticos paralelos y en serie se estiran durante la contracción activa o el alargamiento pasivo del músculo, se produce la tensión y se almacena la energía; cuando se retraen con la relajación muscular, esta energía se libera. Las series de fibras elásticas son más importantes en la producción de tensión que las fibras elásticas paralelas”⁹

“Muchos investigadores han sugerido que los puentes cruzados de los filamentos de miosina tienen una propiedad de tipo muelle y esto también contribuye a las propiedades elásticas del músculo”¹⁰

La distensibilidad y elasticidad de los componentes elásticos son valiosos para el músculo por muchos motivos:

1. Tienen a mantener al músculo en buena disposición para la contracción y asegura que la tensión muscular sea producida y transmitida suavemente durante la contracción

2. Asegura que los elementos contráctiles vuelvan a sus posiciones originales (de reposo) cuando cesa la contracción

3. Pueden ayudar a prevenir el sobreestiramiento pasivo de los elementos contráctiles cuando estos elementos están relajados, reduciendo así el riesgo de lesión muscular.

⁹ Wilkie, D.R., (1995). Las propiedades mecánicas del músculo. Br. Med Bull. p.187

¹⁰ Hill, D.K. (1968). Tension due to interaction between the sliding filaments of resting striated muscle. P. 637

4. La propiedad viscosa de los componentes elásticos y en serie y en paralelo les permite absorber la energía proporcional a la tasa de aplicación de fuerza y disipar la energía de manera dependiente al tiempo.

La propiedad viscosa, combinada con las propiedades elásticas de la unidad músculo- tendinosa se demuestra en las actividades de la vida diaria. Por ejemplo, cuando una persona intenta estirarse y tocarse los pies, el estiramiento es inicialmente elástico. A medida que el estiramiento es mantenido, la elongación adicional del músculo se produce a partir de la viscosidad de la estructura músculo-tendinosa y los dedos lentamente se aproximan al suelo.

1.3 Tipos de acción muscular

Durante la contracción, la fuerza ejercida por un músculo lo contrae sobre las palancas óseas esto se conoce como la tensión muscular, y la fuerza externa ejercida sobre el músculo se conoce como la resistencia, o carga. Cuando los músculos ejercen su fuerza, se genera un efecto rotatorio o momento (torque), sobre la articulación implicada porque la línea de aplicación de la fuerza muscular normalmente se encuentra a una distancia del centro del movimiento de la articulación.

“El momento se calcula como el producto de la fuerza muscular y la distancia perpendicular entre su punto de aplicación y el centro de movimiento (esta distancia se conoce como brazo de palanca, o brazo del momento, de la fuerza). Las contracciones musculares y el trabajo muscular resultante puede clasificarse de acuerdo con la relación entre la tensión muscular y la resistencia a ser vencida o el momento del músculo generado y

la resistencia a ser vencida. “¹¹

A pesar de que en una contracción isométrica no se realiza movimiento ni se desarrolla trabajo mecánico, si se realiza trabajo muscular (trabajo fisiológico): se gasta energía y principalmente se disipa en forma de calor, lo que se conoce también como producción isométrica de calor. Todas las contracciones dinámicas implican que puede considerarse una fase inicial estática (isométrica) cuando el músculo primero desarrolla una tensión igual a la carga que se espera vencer. La tensión en un músculo varía con el tipo de contracción. Las contracciones isométricas producen mayor tensión que las contracciones concéntricas.

“Los estudios sugieren que la tensión desarrollada en una contracción excéntrica pueden incluso exceder al desarrollo durante una contracción isométrica. Se piensa que estas diferencias son debidas, en gran parte, a las cantidades variables de tensión suplementaria producidas en los componentes elásticos en serie del músculo y a las diferencias en el tiempo de contracción. El tiempo de contracción más largo de las contracciones isométricas y excéntricas permite una mayor formación de puentes cruzados por parte de los componentes contráctiles, por lo tanto, permite que se genere una mayor tensión.”¹²

Se dispone de más tiempo para que esta tensión sea transmitida a los componentes elásticos en serie y así se estira la unidad músculo-tendinosa. El mayor tiempo de contracción permite el reclutamiento de unidades motoras adicionales.

¹¹ Kroemer, K.H.E., Marras, W.M., et al. (1990). On the measurement of human strength. Int J Indust Ergonomics, p. 210

¹² Kroll, p.g. (1987). The effect of previous contraction condition on subsequent eccentric power production in elbow flexor muscle. Unpublished doctoral dissertation, New York University, pg 241

Komi (1986) ha señalado que las contracciones musculares concéntricas isométricas y las excéntricas, rara vez ocurren solas en los movimientos humanos normales. En su lugar, un tipo de contracción o carga se precede por otro tipo diferente. Un ejemplo es la carga excéntrica previa a la contracción concéntrica que ocurre en el tobillo desde la fase de medio apoyo hasta la fase de despegue del dedo durante la marcha.

1.4 Producción de fuerza en el músculo

La fuerza total que un músculo puede producir está influenciada por sus propiedades mecánicas, que pueden describirse mediante la valoración de las relaciones de tensión-longitud, carga-velocidad y fuerza-tiempo del músculo y de la arquitectura muscular esquelética. Otros factores principales en la producción de fuerza son la temperatura del músculo, la fatiga del músculo y el preestiramiento.

1.4.1 Relación tensión-longitud de fibras musculares

El mecanismo intrínseco para la generación de fuerza es el deslizamiento de los filamentos delgados, con la carga a la que estén unidos (generalmente fuerza elástica, como titina, tendones y peso), sobre los filamentos gruesos anclados en el centro de la sarcómera; esto permite el acercamiento de algunas décimas a un par de micrómetros, como mucho, de los discos Z. Evidentemente, para el desplazamiento de todas estas masas y resortes o muelles se requiere energía.

Esta energía se obtiene de las moléculas del ATP que son hidrolizadas por las enzimas de ATPasa miofibrilar en un proceso cíclico que se lo conoce con el nombre de “ciclo de los puentes cruzados”. De acuerdo con este esquema, la fuerza generada por una fibra está relacionada con el número de

puentes cruzados activos en un momento determinado, de tal forma que, a mayor grado de fuerza, más números de puentes cruzados se necesitan para sostenerla. En la medida que la longitud de la sarcómera se modifica (se acorta o se elonga), el grado de solapamiento de los filamentos gruesos y delgados también lo hace, determinar el número de sitios activos de los filamentos de actina que pueden entrar en contacto con las cabezas de la miosina.

1.4.2 Relación carga- velocidad de fibras musculares

La relación entre la velocidad de acortamiento o elongación excéntrica de un músculo y las diferentes cargas constantes pueden determinarse trazando la velocidad de movimiento del brazo de palanca muscular para distintas cargas externas, generando por tanto una curva de carga – velocidad.

“La velocidad de acortamiento de un músculo contrayéndose concéntricamente es inversamente proporcional a la carga externa aplicada”¹³

La velocidad de acortamiento es máxima cuando la carga externa es cero, pero a medida que la carga incrementa el músculo se acorta cada vez más lentamente. Cuando la carga externa iguala la fuerza máxima que el músculo puede ejercer, la velocidad de acortamiento se convierte en cero y el músculo se contrae isométricamente.

Cuando se incrementa la carga todavía más, el músculo se contrae excéntricamente: se elonga durante la contracción. La relación carga-velocidad se invierte dependiendo de si el músculo se contrae concéntricamente; el

¹³ Guyton, A.C. (1986). Tratado de fisiología médica. (10 ed.)Madrid. McGraw-Hill Interamericana. P.48

músculo se alarga de forma excéntrica más rápidamente con el incremento de la carga.

1.4.3 Relación tiempo-fuerza de las fibras musculares

La fuerza (tensión) generada por un músculo es proporcional al tiempo de contracción: cuanto mayor sea el tiempo de contracción, mayor será la fuerza desarrollada, hasta el punto de máxima tensión. Una contracción mas lenta produce una mayor producción de fuerza porque el tiempo permite que la tensión producida por los elementos contráctiles sea transmitida a través de los componentes elásticos paralelos al tendón. Aunque la producción de la tensión en los componentes contráctiles puede alcanzar el máximo en tan sólo 10 ms, podrán necesitarse hasta 300 ms para que la tensión sea transferida a los componentes elásticos.

“La tensión en el tendón alcanzara la máxima tensión desarrollada por el elemento contráctil solo si el proceso de contracción activa tiene suficiente duración”¹⁴

1.4.4 Efectos de la arquitectura del músculo esquelético

Los músculos están constituidos por el componente contráctil (la sarcómera), que produce la tensión activa. La disposición de los componentes contráctiles afecta a las propiedades contráctiles del músculo de forma dramática. Cuantas más sarcómeras se dispongan en serie, mayor será la longitud de la miofibrilla. Estos dos patrones arquitectónicos básicos de las miofibrillas (larga o gruesa) afectan a las propiedades contráctiles de los músculos de la siguiente forma:

¹⁴ Ottoson, D. (1983). Fisiología del sistema nervioso. New York. McGraw-Hill p.78

1. La fuerza que el músculo puede producir es proporcional a la sección transversal de la miofibrilla

2. La velocidad y la excursión (rango de trabajo) que el músculo puede producir son proporcionales a la longitud de la miofibrilla.

Los músculos con fibras más cortas y un área de sección transversal más grande están diseñados para producir fuerza, mientras que los músculos con fibras largas están diseñados para la excursión y velocidad.

“El músculo cuádriceps contiene miofibrillas más cortas y parece estar especializado para la producción de fuerza. El músculo sartorio tiene fibras más largas y un área transversal más pequeña y está más adaptado para la excursión elevada”¹⁵

1.4.5 Efecto del preestiramiento

“Se ha demostrado en anfibios y en humanos que un músculo realiza más trabajo cuando se acorta inmediatamente después de ser estirado en el estado de contracción concéntrica que cuando se acorta desde un estado de contracción isométrica.”¹⁶

Este fenómeno no ocurre por completo por la energía elástica acumulada en los componentes elásticos en serie durante el estiramiento sino que debería también estar causado por la energía acumulada en el componente contráctil. Se ha sugerido que los cambios en las propiedades mecánicas intrínsecas de las miofibrillas son importantes en el aumento de la producción de trabajo inducido por el estiramiento.

¹⁵ Baratta, R.V., Solomonow, M., *et al.*, Electroterapia (1998); Lieber y Bodine-Fowler, p. 91

¹⁶ Cuillo, J.V. & Zarins, B. Biomecánica de los musculostendinosos. (1983). Clin Sport Med p. 71

1.4.6 Efecto de la temperatura

“Un aumento en la temperatura del músculo causa un incremento en la velocidad de conducción a través del sarcolema, incrementando la frecuencia de estimulación y por ello la producción de fuerza muscular.”¹⁷

Un aumento en la temperatura también provoca una mayor actividad enzimática del metabolismo muscular no por ello incrementando la eficacia de la contracción muscular. Un efecto más allá del aumento de la temperatura es la elasticidad incrementada del colágeno en los componentes elásticos paralelos y en serie, lo cual incrementa la extensibilidad de la unidad músculo-tendón. Este preestiramiento incrementado aumenta la producción de fuerza en el músculo.

La temperatura muscular se incrementa por medio de dos mecanismos:

1. El incremento en el flujo sanguíneo, que tiene lugar cuando un atleta (caliente) sus músculos.
2. La producción del calor de la reacción generada por el metabolismo, por la liberación de la energía de la contracción y por la fricción a medida que los componentes contráctiles deslizan unos sobre otros.

“Sin embargo, a baja temperatura (10 °C), se ha de mostrado que la máxima velocidad de acortamiento y tensión isométrica están inhibidas significativamente. Esto se debe a un pH disminuido (acidosis) en el músculo. El pH desempeña un papel mucho menos importante a temperaturas cercanas al nivel fisiológico”¹⁸

¹⁷ Phillips , C.A. & Petrofsky, J.S. Mecanica del esqueleto y de los musculos cardiacos. (1983) Springfield

¹⁸ Pate, E. Bhimani, M. Cook, R., et al., Implications for fatigue. J. Physiol (Lond).(1995).p.689

1.4.7 Efecto de la fatiga

La capacidad de un músculo para contraerse y relajarse depende de la disponibilidad del adenosin trifosfato (ATP).

Si un músculo tiene un adecuado aporte de oxígeno y nutrientes que pueden romperse para proporcionar ATP, puede mantener una serie de respuestas de contracción de baja frecuencia por un tiempo prolongado. La frecuencia debe ser lo bastante baja para permitir al músculo sintetizar ATP a un nivel suficiente para continuar con la tasa de rotura de ATP durante la contracción. Si la frecuencia de estimulación incrementa y supera la tasa de reposición de ATP, las respuestas de contracción pronto se producirán de forma más débil progresivamente y finalmente caerán hasta cero. Esta caída en la tensión siguiendo a la estimulación prolongada es la fatiga muscular. Si la frecuencia es bastante alta para producir contracciones tetánicas, la fatiga se produce incluso antes. Si se permite un periodo de descanso antes de que continúe la estimulación, la concentración de ATP aumenta y el músculo recupera brevemente su capacidad contráctil antes de experimentar de nuevo la fatiga.

Tres fuentes aportan ATP al músculo: el fosfato de creatina, la fosfoliración oxidativa en las mitocondrias, y la fosfoliración del sustrato durante la glicólisis anaeróbica. Cuando comienza la contracción, la miosina ATPasa rápidamente rompe el ATP.

El incremento en las concentraciones de difosfato de adenosina (ADP) y fosfato (Pi) que resulta de esta ruptura finalmente proporciona tasas incrementadas de fosfoliración oxidativa y glicólisis. Después de un corto periodo, sin embargo, estas vías metabólicas comienzan a repartir ATP a una tasa elevada. Durante este intervalo, la energía para la formación de ATP es proporcionada por el fosfato de creatina, el cual ofrece los modos más rápidos de formar ATP en la célula muscular.

La mayoría del ATP requerido puede formarse por el proceso de fosforilación oxidativa. Durante el ejercicio intenso, cuando el ATP está comenzando a romperse rápidamente, la capacidad celular para reemplazar el ATP mediante la fosforilación oxidativa puede estar limitada, principalmente por un suministro inadecuado del oxígeno al músculo por el sistema circulatorio. Incluso cuando el suministro de oxígeno es adecuado, la tasa a la cual la fosforilación oxidativa puede producir ATP puede ser insuficiente para mantener el ejercicio intenso debido a que la maquinaria enzimática de esta vía es relativamente lenta. Entonces la glicólisis anaeróbica comienza a aportar una porción incrementada de ATP. La vía glicolítica, aunque produce mucha menos cantidad de ATP de la ruptura de glucosa, actúa a una tasa de velocidad mucho mayor. Puede también continuar en ausencia de oxígeno, con la formación de ácido láctico como producto final. Por ello, durante el ejercicio intenso, la glicólisis anaeróbica puede llegar a ser una fuente adicional para el suministro rápido de ATP al músculo. La vía glicolítica tiene la desventaja de requerir grandes cantidades de glucosa para la producción de pequeñas cantidades de ATP.

Por ello, incluso aunque el músculo almacene glucosa en forma de glucógeno, los suministros de glucógeno existentes pueden agotarse rápidamente cuando la actividad muscular es intensa. Finalmente, la miosin ATPasa puede romper ATP más rápidamente incluso de lo que la glicólisis pueda reponer, y la fatiga aparece rápidamente ya que las concentraciones de ATP disminuyen.

Después de un periodo de ejercicio intenso, los niveles de fosfato de creatina quedan bajos y mucho del glucógeno muscular puede haber sido convertido en ácido láctico. Para que el músculo retorne a su estado original, el fosfato de creatina debe ser resintetizado y los almacenes de glucógeno repuestos. Debido a que ambos procesos requieren energía, el músculo continuara consumiendo oxígeno a una tasa rápida incluso aunque la contracción pare. Este elevado e ininterrumpido consumo de oxígeno está

demostrado por el hecho de que una persona continúa respirando brusca y rápidamente después de un periodo de ejercicio vigoroso.

“Cuando se tiene en cuenta la energía necesaria para devolver el glucógeno y el fosfato de creatina a sus niveles originales, la eficiencia con la que el músculo convierte la energía química en trabajo (movimiento) no es normalmente más del 20-25 %, la mayoría de la energía se disipa como calor. Incluso cuando el músculo está trabajando en su estado más eficiente, un máximo de solo aproximadamente el 45% o de la energía se usa para la contracción”¹⁹

En la biomecánica del crecimiento, la fatiga muscular se observa en principio por la falta de coordinación del movimiento y su efecto en el incremento de las cargas en los tejidos.

Investigadores, incluyendo a Bates et al. (1977), han indicado que la técnica de la persona que realiza una acción dada se afecta por la fatiga. Ellos estudiaron el efecto de la fatiga en corredores y observaron que éstos disminuyan su extensión de rodilla cuando tenía lugar la fatiga (Bates et al., .1997). Parnianpour (1988) estudió el movimiento acoplado de la columna a la flexión extensión exhaustiva. Este estudio mostró que cuando un individuo llegaba a estar fatigado, el movimiento acoplado incrementaba y por eso el torque vertebral aumentaba. El mayor componente de deterioro de la adaptación neuromuscular al estado de fatiga fue la reducción en el control de la precisión y la velocidad de contracción, lo cual podría predisponer a un individuo a la lesión si tiene lugar la fatiga muscular.

¹⁹ Guyton, A.C. (1986). Tratado de fisiología médica. (10 ed.)Madrid. McGraw-Hill Interamericana. P.60

1.5 Diferenciación de la fibra muscular

Los tipos de fibras se distinguen principalmente por las vías metabólicas por las cuales pueden generar ATP y la tasa a la cual su energía se hace disponible para el sistema contráctil de la sarcómera, que determina la velocidad de contracción. Los tres tipos de fibras se llaman tipo I, fibras oxidativas de contracción lenta (LO); tipo IIA, fibras glucolíticas - oxidativas de contracción-rápida (ROG); y tipo IIB, fibras glucolíticas de contracción-rápida (RG).

Las fibras tipo I (LO) se caracterizan por una baja actividad de la miosina ATPasa en la fibra muscular y, por ello, un tiempo de contracción relativamente lento. La actividad glucolítica (anaeróbica) es baja en este tipo de fibras, pero su alto contenido en mitocondrias produce un alto potencial para la actividad oxidativa (aeróbica). Las fibras tipo I son difíciles de fatigar porque la elevada tasa de flujo sanguíneo de estas fibras distribuye oxígeno y nutrientes a un nivel suficiente para mantener la tasa relativamente baja de ruptura de ATP por la miosina ATPasa. Por todo lo antes mencionado, las fibras están adaptadas para el trabajo prolongado de bajas intensidades. Estas fibras son relativamente pequeñas en diámetros y por eso producen relativamente poca tensión y por el alto contenido de mioglobina de las fibras tipo I da al músculo un color rojo.

Las fibras musculares tipo II se dividen en IIA y IIB estos tipos de fibras se caracterizan por una elevada actividad de la miosina ATPasa, que esta da como resultado una contracción rápida.

La fibra de tipo IIA (ROG) tiene la capacidad para la actividad aeróbica (oxidativa) y anaeróbica (glucolítica), también tienen un aporte sanguíneo bien desarrollado, pueden mantener su actividad contráctil por largos periodos. Las altas tasa de actividad, el alto nivel de división del ATP excede la capacidad oxidativa y de la glucólisis para aportar ATP, por esta razón estas fibras se

fatigan debido a que el contenido de mioglobina es elevado en este tipo de músculo (músculo rojo).

La fibra de tipo IIB (RG) cuentan principalmente con la actividad glucolítica (anaeróbica) para la producción de ATP. Se encuentran pocos capilares y debido a su bajo contenido en mioglobina se denomina a menudo músculo blanco. Aunque las fibras tipo IIB son capaces de producir ATP rápidamente, se fatigan fácilmente porque su alto índice de división del ATP rápidamente agota el glucógeno necesitado para la glucólisis. Estas fibras generalmente son de gran diámetro y son por ello capaces de producir gran tensión, pero solo por cortos periodos antes de fatigarse.

Algunos músculos realizan predominantemente una forma de actividad contráctil y están compuestos en su mayoría de un tipo de fibra muscular. Un ejemplo es el músculo soleo en la pierna, el cual principalmente mantiene la postura y está compuesto de un alto porcentaje de fibras tipo I, sin embargo, un músculo se requiere para realizar actividad de tipo resistencia bajo algunas circunstancias y actividad de fuerza de alta intensidad en otras. Estos músculos generalmente contienen una mezcla de los tres tipos de fibras musculares.

En un músculo mixto típico ejerciendo baja tensión, algunas de las pequeñas unidades motoras, compuestas de fibras tipo I, se contraen. A medida que la fuerza del músculo se incrementa, se reclutan más unidades motoras y su frecuencia de estimulación incrementa. Cuando la frecuencia llega a ser máxima, una fuerza muscular mayor se alcanza mediante el reclutamiento de unidades motoras más grandes compuestas por fibras de tipo IIA (ROG) y finalmente de fibras tipo IIB (RG). A medida que la fuerza muscular pico disminuye, las unidades más grandes son las primeras en cesar la actividad.

En el promedio de la población, aproximadamente del 50 al 55 % de las fibras musculares son de tipo I, del 30 al 35% son tipo IIA, y aproximadamente el 15 % son tipo IIB, pero estos porcentajes varían ampliamente entre los individuos.

“En atletas de elite, el porcentaje relativo de los tipos de fibras difiere del de la población en general y parece depender de si la actividad principal del atleta requiere un esfuerzo corto, explosivo, máximo o implica una resistencia submáxima. Los lanzadores de peso, por ejemplo, tienen un alto porcentaje de fibras tipo II, mientras que los corredores de fondo y esquiadores de fondo tienen un alto porcentaje de fibras tipo I. Los atletas de resistencia pueden tener tantas como el 80 % de fibras tipo I, y aquellos implicados en esfuerzos cortos, explosivos, tan pocas como un 30 % de estas fibras”²⁰

El tipo de fibras genéticamente determinado puede ser responsable del proceso de selección natural por el cual los atletas están diseñados para un tipo de deporte para el que están más capacitados. Debido a que los tipos de fibras se determinan por el nervio que inerva la fibra muscular, puede existir cierto control cortical sobre esta inervación, que influyera en un atleta para elegir el deporte en el que él o ella es genéticamente capaz de sobresalir.

²⁰ Saltin , B. et al., Fiber types and metabolic potentials of skeletal muscle in sedentary man and endurance runners. (1977). AnnNY Acad Sci p.301

CAPÍTULO II: CONTROL NERVIOSO DEL SISTEMA MOTOR

2.1 Organización funcional de la médula espinal

La médula espinal es la parte más caudal del sistema nervioso central (SNC). Está formado por ocho segmentos cervicales, doce torácicos, cinco lumbares, cinco sacros y uno coccígeo. La unión de sus raíces anteriores y posteriores origina un nervio espinal que se dirige hacia la periferia.

“Las neuronas espinales forman la sustancia gris interior, que está rodeada por la sustancia blanca formada por los axones de vías sensoriales ascendentes, de vías motoras descendentes y neuronas del sistema propioespinal, que se disponen ocupando los cordones anteriores, laterales y posteriores.”²¹

Las fibras aferentes primarias de los receptores cutáneos, articulares y musculares tienen sus cuerpos celulares en los ganglios raquídeos, entran en la médula espinal por las raíces posteriores y se ramifican antes de terminar haciendo sinapsis sobre los cuatro tipos de neuronas de la sustancia gris:

- Neuronas sensoriales de proyección, con axones que forman las vías sensoriales hacia la corteza.

²¹ Lopez Chicharron, J. Fernández Vaquero, A.(2006). Fisiología del ejercicio. (3 ed). España. Editorial Médica Panamericana S.A .p. 53

- Interneuronas con axones que acaban en su mismo segmento o segmentos adyacentes sobre otras interneuronas o sobre motoneuronas
- Motoneuronas cuyos axones abandonan la médula por las raíces anteriores y se incorporan al nervio espinal correspondiente para dirigirse hacia los músculos esqueléticos a los que inerva.

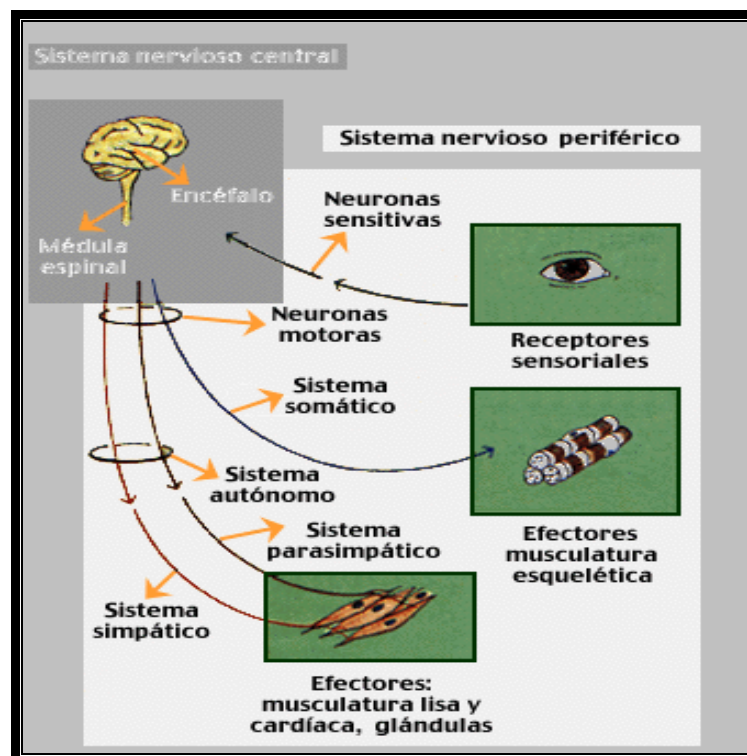


FIGURA 2. 1: La médula espinal y Sus funciones principales son transmitir impulsos hacia y desde el encéfalo y controlar muchas actividades reflejas

2.1.1 Las motoneuronas espinales

El conjunto de motoneuronas que forman las unidades motoras de cada músculo se disponen formando columnas que se denominan núcleos motores. Hay uno por cada músculo, y suele ocupar entre uno y cuatro segmentos medulares. Los núcleos motores de diferentes músculos o grupos musculares se localizan en zonas distintas del asta anterior con una organización somatotópica que mantiene un orden especial. Así, los que inervan la musculatura axial del cuerpo se localizan en la parte medial del asta anterior. La relación de inervación de las unidades motoras en estos músculos es elevada, ya que la función de la musculatura axial consiste en actividades amplias, como el mantenimiento de la postura, el apoyo para los movimientos de las extremidades y la respiración. Por otra parte, los núcleos motores que inervan las extremidades se encuentran en la parte lateral del asta anterior a nivel de los engrosamientos cervicales y lumbosacro, en estos engrosamientos, las motoneuronas que inervan los músculos distales se sitúan lateralmente respecto a las que inervan los músculos proximales. Las relaciones de inervación de estos músculos son menos para los músculos distales y mayores para los proximales.

La organización especial sigue una regla próximo-distal: los núcleos motores de los músculos proximales se sitúan medialmente, mientras que los más distales se sitúan progresivamente más lateral en el seno de la médula. Además, los núcleos motores que inervan músculos flexores se sitúan dorsalmente respecto a los que inervan los músculos extensores, dentro de cada núcleo y según su tamaño se distinguen motoneuronas alfa y gamma.

2.1.2 Las motoneuronas alfa

Las motoneuronas alfa, que gobiernan el trabajo de los músculos esqueléticos, son de gran tamaño y alta velocidad de conducción.

“Cada motoneurona recibe del orden de 5000-10000 botones sinápticos en su zona de recepción. La sumación espacial y temporal de los efectos postsinápticos de todas ellas determinan la descarga o no de potenciales de acción desde su colina axónica y, en consecuencia, la contracción o no de las fibras musculares de su unidad motora.”²²

Las aferencias provienen de:

1. Aferentes primarias sensoriales de los husos neuromusculares
2. Neuronas corticales: se trata de aferencias excitadoras que derivan de la corteza motora y acaban directamente sobre las motoneuronas que inervan los músculos más distales
3. Neuronas vestibulares: algunos axones de los fascículos vestibuloespinales acaban directamente sobre las motoneuronas que controlan los músculos axiales
4. Interneuronas: son las más abundantes y a través de ellas las motoneuronas reciben información del resto de aferencia cutánea, musculares y articulares, y de las vías descendentes, pero no ya de forma directa sino a través de circuitos di, tri o polisinápticos, con interneuronas interpuestas. Estas aferencias pueden ser excitadoras o inhibitorias.

2.2 Actividad refleja

Los reflejos medulares sirven de base a las respuestas motoras. Los circuitos que se localizan en la médula espinal constituyen el soporte de la mayoría de las actividades motoras. Un reflejo es una respuesta estereotipal a una información sensitiva determinada. Los reflejos espinales son las actividades motoras más elementales y se originan por los circuitos que establecen las aferencias sensoriales sobre las motoneuronas. En

²² Bear, MF. Connors, BW. Paradiso, MA. (2001). Neuroscience: exploring the Brain. Lippincott William & Wilkinns.p.201

condiciones normales, los centros supraespinales modulan el estado funcional de estos circuitos

2.2.1 La actividad de los mecanorreceptores musculares

Los músculos esqueléticos y sus tendones contienen receptores sensitivos especializados. Estos propioceptores son los husos neuromusculares y los órganos tendinosos de Golgi. Su actividad genera sensaciones cinestésicas y son de importancia funcional en el control motor:

- **Husos neuromusculares:** Están formados por haces alargados de fibras musculares finas llamadas fibras intrafusales, contenidas dentro de una cápsula de tejido conjuntivo y dispuestas en paralelo respecto a las fibras musculares extrafusales. Estos husos están inervados por terminaciones tanto sensitivas como motoras. El huso neuromuscular se dispone dentro del espacio existente entre fibras musculares extrafusales o de trabajo; esta disposición en paralelo es importante para sus funciones. Las fibras intrafusales son de dos tipos: fibras nucleares en bolsa (dos-tres en cada huso), las hay dinámicas y estáticas; y fibras nucleares en cadena (unas cinco en cada huso), denominadas así por la disposición de sus núcleos. Las terminaciones sensitivas de un huso neuromuscular son de dos tipos: una terminación principal y una o más terminaciones secundarias. La terminación principal es la fibra la o primaria, única, de diámetro grande y velocidad de conducción elevada. Acaba en la zona central de todas las fibras del huso y es un mecanorreceptor sensible al estiramiento y a la velocidad con la que éste se produce. Las terminaciones secundarias se presentan en número variable, son fibras tipo II y acaban cerca de la zona central de las fibras en bolsa y de las fibras en cadena. Son mecanorreceptores sensibles al estiramiento, pero más en estado estacionario que en la fase dinámica de cambio de longitud del músculo.

“Cuando el músculo se estira, también lo hacen las fibras intrafusales, y las terminaciones Ia y II aumentan su descarga. Por el contrario, al acortarse el músculo la descarga de las aferentes sensoriales disminuye. Así, los husos detectan los cambios en la longitud muscular y en la velocidad del cambio.”²³

Por su parte, las motoneuronas gamma suministran la innervación motora a los husos neuromusculares. Los axones de esta motoneurona inervan los extremos contráctiles de las fibras intrafusales, provocando su contracción. El efecto de la activación por las motoneuronas gamma es el acortamiento de los extremos de las fibras intrafusales y la distensión de la zona central, lo que lleva a un aumento en la actividad de las fibras Ia y II. Este mecanismo es esencial para evitar la inactivación de los husos neuromusculares durante las contracciones. Se denomina coactivación alfa-gamma al hecho de que en los movimientos voluntarios se activen simultáneamente ambos tipos de motoneuronas, lo que permite al SNC recibir información constante sobre los cambios de longitud del músculo, aunque éste se acorte porque se está contrayendo. Las motoneuronas gamma varían la sensibilidad de los husos para conseguir que estén activos en todo momento, pero pueden regular de forma independiente la sensibilidad dinámica y estática: la estimulación de las motoneuronas gamma dinámicas y estática: la estimulación de las motoneuronas gamma dinámicas aumentan la sensibilidad de las terminaciones Ia, que genera una mejor detección de la velocidad de cambio.

La estimulación de las motoneuronas gamma estáticas aumentan la sensibilidad de Ia y II en estado estacionario, y disminuye la sensibilidad dinámica de Ia, por lo que mejora la detección de la longitud muscular pero no de su cambio. El SNC puede así regular de forma independiente las respuestas dinámicas y estáticas de los husos neuromusculares.

²³ Agnati, L. F.; Zoli, M.; Strömberg, I. Y Fuxe, K. (1995). Intercellular communication in the brain: wiring versus volume transmission. *Neuroscience*, 69 (3) p. 711-726.

- **Órganos tendinosos de Golgi:** Son estructuras encapsuladas que se disponen en serie con las fibras musculares a nivel de su inserción en fascias y tendones. Cada órgano tendinoso está innervado por un axón de tipo Ib, que es un mecanoreceptor. Durante la contracción muscular, la fuerza que se transmite a los tendones deforma las terminaciones Ib y provoca su activación. Así, su estímulo natural es la tensión desarrollada a causa de la contracción muscular y, por tanto, son sensores que detectan cambios de la tensión, a diferencia de los husos neuromusculares, que detectan cambios en la longitud.

2.2.2 El reflejo miotático

Está mediado por las fibras Ia de los husos, que acaban directamente sobre las motoneuronas alfa del mismo músculo del que provienen.

“Es un reflejo monosináptico, como se ha comprobado al medir la latencia de la respuesta; ésta se produce en menos de un milisegundo.”²⁴

Las fibras Ia al entrar en la médula se bifurcan: una rama entra en los cordones posteriores y lleva la información cinestésica a la corteza, y otra la lleva a la sustancia gris. Esta última hace sinapsis sobre todas las motoneuronas alfa del núcleo motor del propio músculo. El estiramiento del músculo produce descarga de las fibras Ia y éstas la activación de las neuronas del propio músculo que, en consecuencia, se contrae. El estiramiento de un músculo facilita e incluso activa, a las motoneuronas alfa de los músculos sinérgicos mediante proyecciones monosinápticas; además, provoca inhibición de las motoneuronas alfa de los músculos antagonistas, inhibición mediada por proyecciones disinápticas a través de una interneurona inhibitoria. Esta organización de las vías de los reflejos miotáticos se llama innervación recíproca. El reflejo miotático estabiliza por retroacción la longitud muscular y es la base del tono muscular. Si se

²⁴ Rumelhart, D y McClelland, J. (1986). *Parallel explorations in the microstructure of cognition: psychological and biological models*. Press, Cambridge: Ed. MIT.

secciona las raíces dorsales se pierde el reflejo y se provoca una pérdida de tono muscular.

En el sistema de retroacción, fijado el punto de ajuste, es decir, la longitud muscular adecuada, las fibras la son los sensores que detectan las posibles desviaciones, y la motoneurona alfa y las fibras musculares extrafusales, los efectos que compensan las desviaciones para devolver al músculo la longitud prefijada. Por su parte, las motoneuronas gamma permiten cambiar el punto de ajuste: su descarga no afecta a las fibras extrafusales que generan la fuerza muscular, pero provoca contracción en las fibras intrafusales y genera potenciales de acción en las fibra la poniendo en funcionamiento el arco reflejo, con lo que las fibras extrafusales se contraerán con el desarrollo consiguiente de fuerza. Como las motoneuronas gamma son activadas por órdenes de vías descendentes, el SNC tiene un mecanismo adicional para controlar las motoneuronas alfa y las contracciones musculares a través de este circuito gamma. En la mayoría de movimientos voluntarios existe una coactivación alfa-gamma.

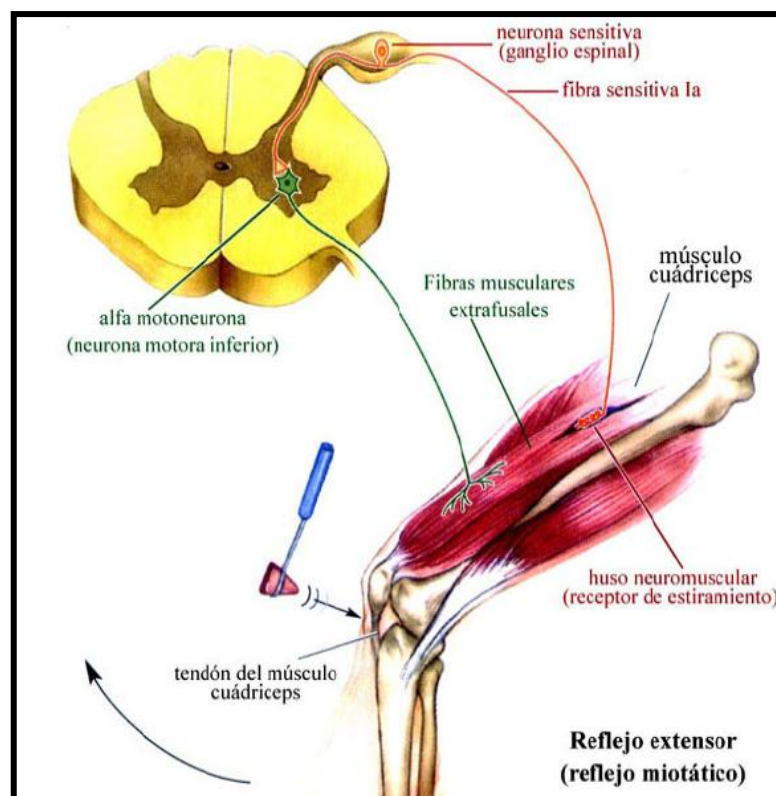


FIGURA 2.2: Ilustración del reflejo miotático

2.2.2.1 Contribución de reflejo miotático a la resistencia de un músculo a la distensión

El tono muscular depende parcialmente de las propiedades mecánicas de los músculos, de su elasticidad, pero sobre todo del circuito reflejo miotático, que se opone al estiramiento produciendo la contracción refleja del músculo. La intensidad de este reflejo está controlada tanto a nivel espinal como supraespinal. A nivel espinal, las lesiones que afectan a los componentes del arco reflejo producen hipotonía e hiporreflexia. Pero la intensidad de los reflejos miotáticos está también regulada por centros superiores, como se pone de manifiesto en las lesiones de otros componentes del sistema motor.

2.2.3 El reflejo miotático inverso

La contracción de un músculo provoca reflejamente su distensión o relajación. Este efecto está mediado por las fibras Ib de los órganos tendinosos de Golgi, que al entrar en la médula se ramifican y acaban sobre interneuronas. Se dan proyecciones disinápticas a través de una interneurona inhibidora a las motoneuronas alfa del propio músculo y de los sinérgicos, que resultan también inhibidos. Se encuentran también proyecciones di o trisinápticas excitadoras sobre las motoneuronas alfa de los músculos antagonistas, facilitando su descarga. Hay asimismo proyecciones amplias a grupos musculares que afectan a otras articulaciones y forman parte de los circuitos medulares que controlan movimientos de toda una extremidad.

“La función básica de este reflejo es la de protección de lesiones ante el desarrollo de tensiones elevadas, pero esto sólo ocurre en circunstancias excepcionales. Como las fibras Ib responden a pequeñas variaciones de tensión, su función normal es la de ofrecer la posibilidad de un control por retroacción preciso del desarrollo de la tensión en actividades motoras que así lo requieran, como sujetar un objeto frágil; sobre todo, considerando que

las interneuronas de su circuito reflejo reciben aferencias de los husos neuromusculares y de receptores articulares y cutáneos.”²⁵

“Los reflejos miotáticos y miotático inverso son ejemplos de circuitos de retroalimentación negativa. Se compara la respuesta del sistema con la respuesta deseada.”²⁶

Cualquier diferencia implica el regreso a su entrada para efectuar una acción correctora. En el reflejo miotático la variable controlada es la longitud del músculo; en el miotático inverso es la tensión muscular. La regulación simultánea de la longitud y la tensión del músculo permite controlar la rigidez muscular. En las articulaciones cuya posición está controlada por grupos de músculos agonistas y antagonistas, pueden llegar a conseguirse un determinado ángulo articular o punto de equilibrio por diversos procesos. Debido a la inervación recíproca de los músculos flexores y extensores, hay circuitos nerviosos que producen la activación de un músculo y la relajación de su antagonista. La combinación de estos dos procesos determina el punto de equilibrio de esta articulación.

“Otra posibilidad es la contracción simultánea de los músculos agonistas y antagonistas que pueden proporcionar la estabilidad necesaria en el caso de un cambio imprevisto de carga, debido al aumento en la rigidez de la articulación.”²⁷

²⁵ Self, D. y Nestler, E. (1995). Molecular mechanisms of drug reinforcement and addiction. Annu. Rev. *Neurosci.* 18, p.463-495.

²⁶ Kandel, E., (1992). Chemically gated ion channels at central synapses. En Kandel, E., Schwartz, J. y Jessell, T., (Eds.), *Principles of Neural Science*. New York: Ed. Elsevier.

²⁷ Perlemuter L.(1999). Anatomo-Fisiología. Masson, Barcelona. p. 230

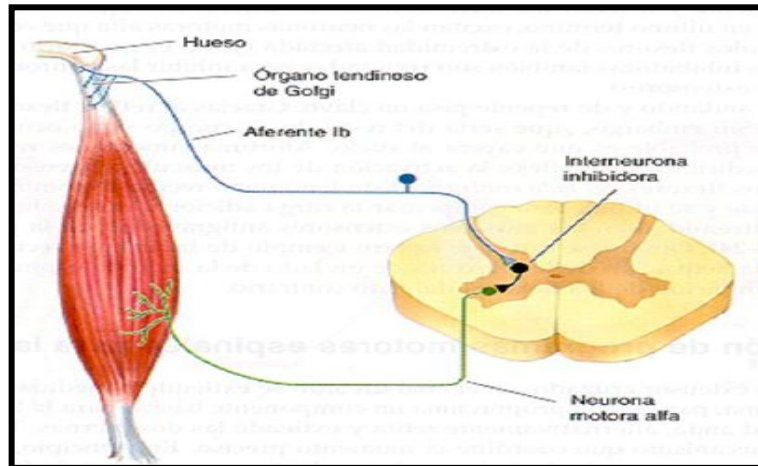


FIGURA 2.3: Ilustración del reflejo miotático inverso

2.2.4 Los reflejos de flexión-extensión

La estimulación de distintos receptores musculares y cutáneos (mecano, termo y nociceptores) provoca la actividad refleja de los músculos flexores. La estimulación nociceptiva es la más eficaz para evocar este reflejo, por lo que se llama también reflejo de retirada porque se retira la extremidad del estímulo nociceptivo aplicado. Las aferentes de este reflejo al entrar en la médula establecen circuitos polisinápticos con interneuronas excitadoras e inhibitorias a través de las cuales se origina la respuesta. El efecto es mayor sobre los músculos próximos al lugar de la estimulación, pero si el estímulo es suficientemente grande puede afectar a todos los músculos de la extremidad ipsilateral, con flexión de la misma e incluso a los de la contralateral, en la que el efecto será inverso (extensión de la extremidad); esta respuesta se llama reflejo de flexión y extensión cruzada. La descarga de las aferentes del reflejo produce estimulación de las motoneuronas alfa de los flexores ipsilaterales y de los extensores contralaterales, e inhibición de los extensores ipsilaterales y de los flexores contralaterales. Éste es otro ejemplo de inervación recíproca.

“El reflejo de extensión cruzada sirve para corregir la postura y facilitar el apoyo del cuerpo para compensar la pérdida de soporte antigravitatorio que origina la flexión de la extremidad estimulada.”²⁸

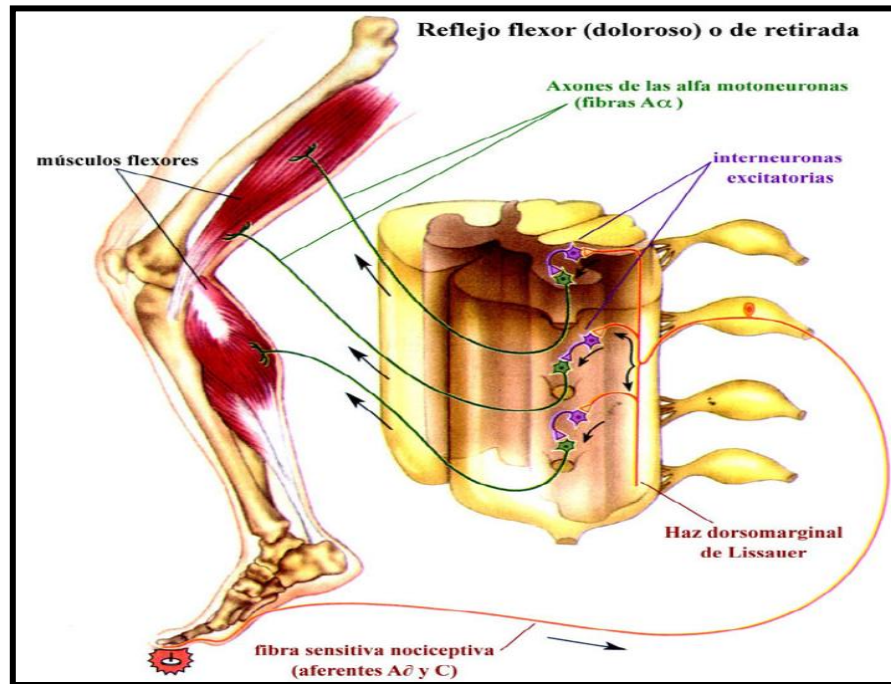


FIGURA 2.4: El esquema muestra los componentes de un arco reflejo extensor de la rodilla. Observar la activación de una interneurona inhibitoria del músculo flexor.

2.3 Tracto espinal descendente

El cerebro se comunica con las motoneuronas de la médula espinal a través de dos sistemas principales: las vías laterales y ventromedial. El inicio de un movimiento voluntario requiere instrucciones que descienden desde la corteza motora a lo largo del sistema lateral, que se encuentra en el cordón lateral de la médula espinal, y participa en los movimientos voluntarios de la musculatura distal bajo control directo de la corteza cerebral. El otro sistema está formado por axones que descienden en posición ventromedial; se origina a partir de varias regiones del tronco cerebral y participa en el mantenimiento de la posición y la locomoción.

²⁸ Sobotta.(2000). Atlas de Anatomía Humana. (21ª edición) Madrid.Editorial Panamericana.p. 163

“La corteza motora también comunica con los núcleos de la vía ventromedial, de modo que puede activar directamente las motoneuronas a través del sistema lateral y también modificar el control a través del tracto ventromedial.”²⁹

Los efectos de ambos sistemas afectan por igual a las motoneuronas alfa y gamma, de forma que se producirá la coactivación alfa-gamma, que es funcional en todos los actos motores. La ejecución de un movimiento voluntario pone en marcha ambos sistemas, cuya coordinación reside en los comandos descendentes desde la corteza cerebral. El sistema ventromedial permitiría estar de pie, pero no lanza una pelota con las manos, que es función del lateral.

2.3.1 Tracto corticoespinal

El fascículo corticoespinal se origina en la corteza, es el más largo y uno de los más anchos del SNC. La mayor parte de los axones de este sistema se originan en áreas del lóbulo frontal que se llaman, en conjunto, corteza motora. Los axones restantes derivan de áreas somatosensoriales del lóbulo parietal. En su trayecto, los axones originan la cápsula interna que separa los ganglios basales y el tálamo, y descienden hasta el bulbo, donde forman las pirámides bulbares, que le han dado el nombre clásico de vía piramidal. Casi todas las fibras de esta vía piramidal se decusan en la parte caudal del bulbo: la corteza motora derecha ordena el movimiento del lado izquierdo del cuerpo, la corteza motora izquierda controla directamente los músculos del lado derecho. Los axones descienden en posición lateral y terminan en la región dorsolateral de las astas anteriores y la sustancia gris intermedia, sobre interneuronas y motoneuronas que controlan los músculos distales, implicados en los movimientos voluntarios más especializados. Las fibras de

²⁹ Kandel, E. and Siegelbaum, S. (1992). Principles underlying electrical and chemical synaptic transmission. En: Kandel, E.; Schwartz, J. y Jessell, T. (Eds.). *Principles of Neural Science*. New York: Ed. Elsevier.

este tracto corticoespinal, que proyectan monosinápticamente sobre las motoneuronas de los músculos distales, producen un control individual directo de esos músculos.

El tracto rubroespinal es otro componente de este sistema. Los axones proceden del núcleo rojo, se decusan en la protuberancia y se unen con los corticoespinales en la columna lateral de la médula. El papel de este haz rubroespinal ha ido perdiendo importancia en el transcurso de la evolución.

2.3.2 El sistema ventromedial

Estas vías terminan en las interneuronas espinales que controlan los músculos proximales y axiales. Los cuatro tractos son: el vestibuloespinal, el tectoespinal, el reticuloespinal pontino y reticuloespinal bulbar. Funcionalmente pueden dividirse en dos grupos: los tractos vestibuloespinales y tectoespinal, que controlan la posición de la cabeza, cuello y extremidades, y los retículoespinales pontino y bulbar, que controlan la posición del tronco y de los músculos antigravitatorios de las extremidades.

- Tracto vestibuloespinales y tectoespinales: Estas vías funcionan para mantener la cabeza equilibrada sobre los hombros a medida que el cuerpo se mueve a través del espacio, y gira la cabeza como respuesta a estímulos sensoriales nuevos. Los tractos vestibulares se originan en los núcleos vestibulares y se proyectan bilateralmente; tienen una acción facilitadora sobre las motoneuronas de los músculos axiales y de los proximales de las extremidades, activando circuitos medulares que compensan el movimiento de la cabeza y espalda.

- Tracto reticuloespinales pontino y bulbar: Se origina en formación reticular del tronco cerebral y su actividad está controlada por señales que descienden desde la corteza. El tracto reticuloespinal pontino facilita los reflejos antigravitatorios de la médula espinal. Su actividad contribuye a mantener la postura erguida, resistiendo los efectos de la gravedad. Esto se

logra facilitando la actividad de los músculos extensores de la extremidad inferior y los flexores de la extremidad superior. Se trata de un control motor importante ya que la mayor parte del tiempo las motoneuronas mantienen más cambian la longitud y tensión muscular. El tracto retículoespinal bulbar inhibe los reflejos miotático y libera los músculos antigravitatorios del control reflejo, con efecto opuesto al anterior; desciende por el cordón lateral de la médula espinal y funcionalmente pertenece al sistema lateral.

2.3.3 Los tractos motores descendentes

El sistema ventromedial está formado por los fascículos vestíbulo y reticuloespinal pontino y su acción general es la de facilitar las motoneuronas de los músculos extensores e inhibir las de los músculos flexores, con acción preponderante sobre la musculatura axial y la próxima de las extremidades. Contribuye de manera fundamental al control de la postura y de la locomoción. El sistema lateral está formada por los fascículos corticoespinal, rubroespinal y reticuloespinal bulbar, y su acción general es la opuesta: facilita las motoneuronas de los músculos flexores inhibe las de los extensores.

“La vía reticuloespino bulbar afecta más a la musculatura axial, proximal, las córtico y rubroespinales, más a la dista. La actividad del sistema lateral se correlaciona (en especial la del fascículo corticoespinal) con la producción de movimientos voluntarios.”³⁰

“Un jugador de futbol situado en la banda para efectuar un saque se mantiene en pie es una postura adecuada gracias a la actividad del sistema ventromedial. Pero para patear el balón se necesita la estimulación del sistema lateral y en especial la del fascículo corticoespinal ya que se trata de

³⁰ Self, D. y Nestler, E. (1995). Molecular mechanisms of drug reinforcement and addiction. *Annu. Rev. Neurosci.* 18: p.463-495.

un movimiento balístico que requiere órdenes específicas desde la corteza motora cerebral para que contraigan los músculos seleccionados “³¹

2.4 Centros motores tronco encefálicos

“Los principales centros del tronco del encéfalo que influye en la actividad motora son los núcleos vestibulares, la formación reticular, el núcleo rojo y los colículos superiores o tubérculos cuadragésimos superiores. Todos ellos, junto con la corteza cerebral, poseen neuronas cuyos axones descienden a lo largo de la médula espinal y acaban sobre motoneuronas e interneuronas para organizar los actos motores complejos.”³²

2.4.1 Núcleo rojo (activación músculos flexores e inhibición de los extensores)

Este núcleo se encuentra a nivel mesencefálico. Las proyecciones espinales del núcleo se dirigen especialmente a los engrosamientos cervical y lumbar. Sus efectos generales son la activación de las motoneuronas de los músculos flexores y la inhibición de las motoneuronas de los músculos extensores.

2.4.2 Los núcleos vestibulares

Los núcleos se localizan en la parte dorsal de la protuberancia y el bulbo raquídeo. Sus aferencias principales provienen del órgano vestibular, que informa de la posición de la cabeza en el espacio y de la orientación del cuerpo a la fuerza de la gravedad, así como de los movimientos de rotación de la cabeza. También integran señales del cerebelo y de la médula espinal. Sus proyecciones se dirigen a diferentes partes del sistema nervioso:

³¹ Pellionisz, A. y Linás, R. (1979). Brain modeling by tensor network theory and computer simulation. The cerebellum: distributed processor for predictive coordination. *Neuroscience*, 4 (3):p.323-48.

³² Guyton, A.C. (1986). Tratado de fisiología médica. (10 ed.)Madrid. McGraw-Hill Interamericana. p.120

- a. A los núcleos motores oculares del mesencéfalo, para los reflejos de estabilización de los ojos. Los reflejos vestíbulo oculares mantienen quietos los ojos durante el movimiento de cabeza, lo que es fundamental para mantener una imagen estable del entorno.
- b. Proyecciones al tálamo, y de él a la corteza somato sensorial que conducen señales para la percepción de la posición y rotación de la cabeza.
- c. Proyecciones al lóbulo Floculonodular del cerebro.
- d. Proyecciones a la médula espinal a través de los fascículos vestibuloespinales.

2.5 Control de la postura y locomoción

La postura se define como la posición de las diferentes partes del cuerpo con respecto a sí mismas y al medio ambiente. A diferencia de otra especie, en la humana la postura fundamental es la erguida en la bipedestación; esta postura mantiene al individuo en condiciones idóneas para iniciar la actividad voluntaria. La bipedestación se mantiene por un tono muscular mayor en los grupos musculares antigravitatorios que soportan el peso del cuerpo.

“El tono muscular está basado en el reflejo miotático que estabiliza la longitud del músculo, al ser distendido, mediante su contracción refleja.”³³

Los centros supraespinales pueden influir sobre los reflejos miotáticos y sobre el tono muscular en diferentes niveles:

- a. Por estimulación de las motoneuronas gamma, que modifican la sensibilidad de los husos neuromusculares

³³ Harrison, Bernardo H. (1984). fisiología humana. (5ª edición). Guanabara Koogan. p. 230

- b. Por estimulación directa de la motoneurona alfa, a través de los fascículos descendentes.
- c. Por estimulación o inhibición de las motoneuronas alfa, a través de interneuronas sobre las que terminan las vías descendentes.

“Las vías del sistema ventromedial aumentan el tono de los extensores, mientras que las del sistema lateral aumentan el tono de los flexores. Así, el tono muscular depende del balance entre las señales que llegan a los núcleos motores de los músculos a través de todas las vías descendentes.”³⁴

El control postural debe operar en dos sentidos; en primer lugar, mantener la posición actual, equilibrando todas las fuerzas que actúan en nuestro cuerpo en especial, la fuerza de la gravedad cuando estamos quietos (equilibrio estático). En segundo lugar ejecutar movimientos sin desequilibrios ni caernos (equilibrio dinámico). Las alteraciones en el equilibrio que introducen las actividades motoras se compensan por dos tipos de respuestas:

- *Correcciones por retroacción:* La información visual, vestibulares y en general, somatosensorial genera respuestas correctoras. Estas correcciones se producen ante desequilibrios inesperados y solo la información aferente del suceso que produce el desequilibrio dará al SNC la posibilidad de corregirlo.
- Acciones de anticipación que necesitan aprendizaje pero que, una vez aprendida, se ejecutan de forma automática el efectuar determinados movimientos, preparando al cuerpo para la alteración previsible e inmediata de su equilibrio. Esta correcciones por anticipación prevén el desequilibrio y

³⁴ Dr. Fernando D. Saraví. “Funcionamiento del organismo”. En línea 23/06/2005. 11/11/2010. <http://fcm.uncu.edu.ar/medicina/area/fisica>

antes de que ocurra se ponen en funcionamiento, ya que una vez aprendidas se incorpora al mismo programa motor que se va a ejecutar. Por ejemplo levantar una pierna al momento de realizar un estiramiento se producen movimientos compensatorios del cuerpo para la nueva posición que se va a adoptar. Prácticamente todos los movimientos voluntarios se acompañan de este tipo de acciones. El cerebelo tiene un papel fundamental en el aprendizaje de respuestas de control postural.

2.6 Control cortical del movimiento

La corteza cortical tiene tres funciones generales sensoriales, motoras y de asociación. Así, se distinguen la corteza somatosensorial primaria, la corteza visual primaria o la corteza auditiva primaria. La corteza cerebral recibe la información sensorial del organismo y la integra y correlaciona entre sí, y con los datos de experiencias anteriores en la llamada área de asociación. La corteza asociativa ocupa la mayor parte del neocórtex; en ellas se realizan las funciones integradoras y es donde se generan las funciones superiores, como el pensamiento abstracto y el lenguaje. Tres zonas dentro de ella son relevantes en el control motor. El área asociativa límbica, correlacionada con la memoria y las emociones, formada por las circunvoluciones cingular, el hipocampo y la amígdala. El área de asociación posterior o de integración sensorial, situada entre los lóbulos parietal, temporal y occipital, integra información sensorial para la percepción del espacio extrapersonal. Y el área de asociación anterior o de integración motora, formada por la zona de la corteza prefrontal que queda por delante de las áreas premotoras, en el lóbulo frontal donde reside la capacidad de juicio, la previsión de acontecimientos, la producción del lenguaje y la planificación motora.

“En estas áreas se deciden los movimientos voluntarios: en ellas se procesa y transforma la información sensorial y se generan los planes motores que se envían a la corteza motora para su ejecución.”³⁵

“Los movimientos voluntarios difieren en casi todos los reflejos. En primer lugar, no dependen de sucesos externos, de estímulos, sino que los podemos realizar a nuestro gusto. En segundo lugar, es indudable que un estímulo pueda desencadenar una respuesta voluntaria, pero también varía el tipo de respuesta. Por último la repetición del aprendizaje permite mejorar el rendimiento y su eficacia: el entrenamiento mejora la técnica en la disciplina deportiva.”³⁶

2.6.1 Las áreas corticales motoras

- La corteza motora primaria se localiza en el área 4 de Brodman, en la circunvolución precentral del lóbulo frontal. “Es el área de menor umbral a la estimulación eléctrica, la cual provoca contracciones de los músculos del lado contralateral del cuerpo. La zona de corteza que ocupa cada zona corporal no es proporcional a su tamaño, sino a la calidad y cantidad de los movimientos a realizar.”

- En el área 6 de la corteza existen otros dos mapas motores organizados somatotópicamente, uno en la región lateral, que se denomina corteza premotora (CPM), y otro en una zona más medial, el área motora suplementaria (AMS). Su estimulación eléctrica no produce movimientos de grupos musculares aislados como en la corteza primaria, sino movimientos complejos contralaterales y bilaterales en los que se involucran músculos que afectan a varias articulaciones. Estas dos áreas en conjunto se denominan áreas premotoras, las mismas que llevan a cabo funciones similares sobre

³⁵ Calderón, J. y Legido, Arce, J.C. (2002). Neurofisiología aplicada al deporte. (2ed).p.68

³⁶ Donskoi, D. y Zatsiorski, V. (1988) Biomecánica de los Ejercicios Físicos. Editorial Raduga. Moscú.p.119

diferentes grupos de músculos. Los axones de sus neuronas contribuyen al fascículo corticoespinal: la zona AMS manda axones que inervan más directamente las unidades motoras distales y los de CPM conectan con las neuronas que controlan los músculos proximales.

- La corteza somatosensorial (área 3, 1 y 2 de Brodman) también provocan movimientos al ser estimulada, aunque se necesita una intensidad mayor que en área 4.
- La corteza parietal posterior (área 5 y 7) es una zona de asociación que integra información motora y sensorial. El área 5 recibe información somatosensorial y el área 7 información visual.

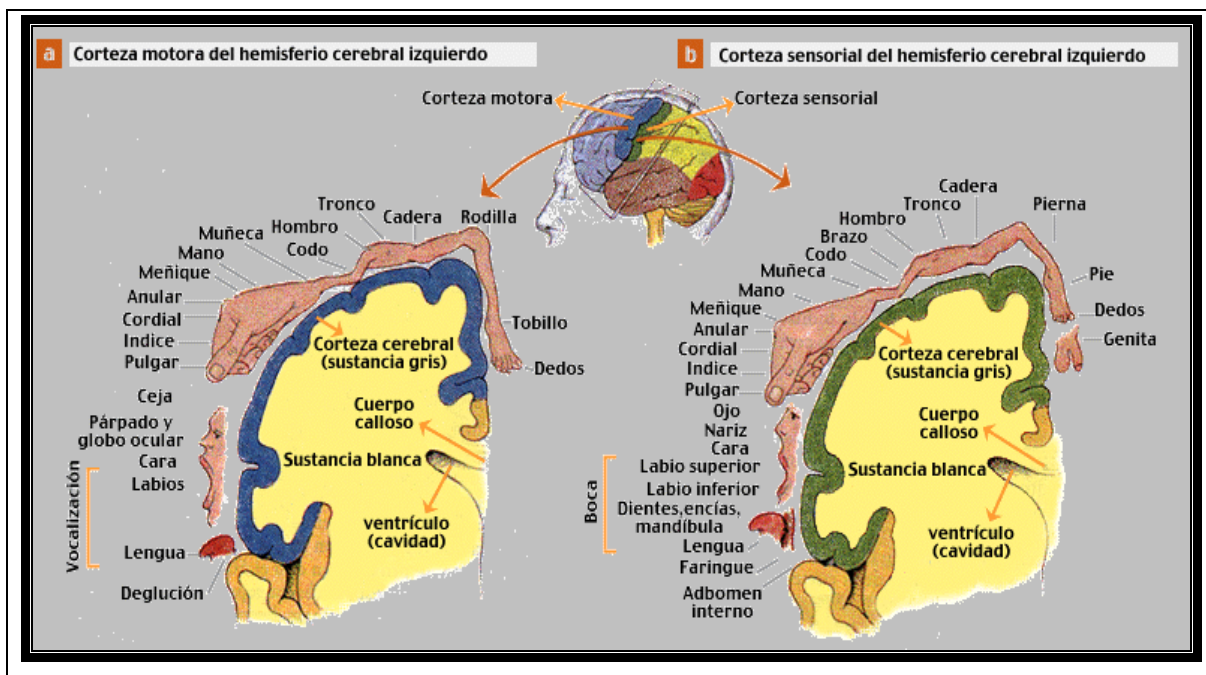


Figura 2. 5: Organización somatotópica de la corteza motora primaria. La deformación del “homúnculo” es proporcional a la inervación motora. (Modificada de Bear MF, Connors BW, Paradiso MA, Neuroscience. Exploring the Brain.Lippincott Williams 2001). En esta figura se identifica las distintas aferencias (A) y eferencias (B).

2.6.2 Las neuronas corticales

Los axones procedentes de la corteza motora y premotora acaban sobre las interneuronas medulares, pero parte de ellos terminan de forma directa sobre las motoneuronas, particularmente las que inervan los músculos más distales, ejecutores de los movimientos voluntarios especializados. Sin embargo en conjunto, las neuronas corticales, más que estimular músculos individuales, siguiendo el mapa somatotópico, son capaces de estimular motoneuronas de distintos núcleos motores medulares produciendo movimientos que afectan a varias articulaciones, con la finalidad de dirigir toda una extremidad hacia el objeto deseado.

“La actividad de las neuronas de la corteza motora primaria codifica la fuerza y la dirección de movimiento. La fuerza esta codificada por la frecuencia de descarga del potenciales de acción, y la dirección no se codifica por neuronas individuales, sino por la resultante de la descarga de una población amplia de neuronas.”³⁷

Cada neurona individual tiene una descarga máxima cuando el movimiento se produce en una dirección y un sentido determinado, y descarga en menor proporción para movimientos en direcciones de más 45 grados a menos 45 grados con respecto a la preferida.

“Si se representa con un vector al grado de actividad de cada célula en diferentes movimientos, al calcular el vector promedio de la población se han comprobado que se ajusta a la dirección real de movimiento.”³⁸

³⁷ Esnault, Michele y Vilel, Eric. (1998) Stretcing. Estiramientos Miotendinosos. Ed. Masson. París.p.89

³⁸ Geoffroy, Christophe. (2001) Alongamento para todos. Ed. Manile. Tamboré (Brasil),p.143

La corteza motora primaria organiza cada movimiento voluntario por la actividad de gran parte de la corteza y no de sectores aislados según el mapa somatotópico. En el caso de los movimientos de los dedos, cada neurona del fascículo cortico espinal influye sobre diferentes unidades motoras y cada unidad motora puede recibir fibras de un número elevado de estas neuronas; cada movimiento estaría controlado por una población grande de neuronas corticales y esta redundancia favorece la multiplicidad de movimientos individuales posibles. Cuantas más neuronas contribuyen al movimiento, su ejecución se regula con más precisión; esto explica que la representación de los dedos y la cara en la corteza motora primaria sea desproporcionadamente mayor que la del resto del cuerpo.

2.7. Sistema de los Ganglios Basales (SGB)

2.7.1 La funciones de las GB sobre el movimiento

Durante la actividad motora voluntaria las neuronas del pálido pueden aumentar, como ocurre la mayoría de veces, o disminuir su descarga respecto a un nivel tónico espontáneo. Cuando la actividad del pálido disminuye, la señal de salida de los ganglios basales facilita y refuerza el patrón motor seleccionado. El aumento de las actividades en AMC Y SPM que se produce podría servir como una señal de ejecución del movimiento cuando se eleva por encima de un nivel determinado.

“Cuando la actividad del pálido aumenta, la función global de este sistema sería la de suprimir los patrones motores que interfieren con el movimiento deseado, con inhibición de los músculos antagonistas o competitivos para la acción seleccionada. El hecho de que exista actividad previa al movimiento indica que los ganglios basales también intervienen en la planificación motora.”³⁹

³⁹ Lamb, David R. (1985) Fisiología del ejercicio. ED. Pila Teleña. Madrid.p.90

Puede almacenar programas motores que son puestos en marcha según nuestros deseos por activación desde la corteza asociativa. Se propone la existencia de subcircuitos con funciones diferentes. Unos dedicados a la planificación, otros que den a la corteza premotora la orden de la salida para la ejecución motora, otros que eliminen movimientos que puedan alterar el elegido, y otros más que favorezcan y refuercen la acción motora seleccionada. El sistema de los ganglios basales, a través de sus proyecciones reticulares, también tiene un papel funcional en el control de la actividad postural durante la locomoción o cuando se realiza un movimiento balístico.

2.8. Cerebelo

Es un órgano complejo estructural y funcional mente; sus neuronas representan la mitad del número total de las del cerebro y su volumen es la décima parte. Las alteraciones del cerebelo afectan a la coordinación de los músculos durante los movimientos.

2.8.1. Tres divisiones funcionales en el cerebelo

- *El vestibulocerebelo:* Comprende el lóbulo floculonodular. Recibe información de los núcleos vestibulares y de núcleos pontinos que relevan información de la corteza visual (vía corticopontocerebelosa).

“Las células del lóbulo floculonodular se proyectan sobre los núcleos vestibulares a través de uno de los núcleos profundos, el fastigial, pero también con eferencias directas.”⁴⁰

El vestibulocerebeloso es necesario para que la información de origen visual y vestibular se aproveche, y evitar que la imagen se desplace sobre la

⁴⁰ Akataki K, Mita K, Watakabe M, Ito K. Age-related change in motor unit activation strategy in force production: a mechanomyographic investigation. *Muscle Nerve*. 2002; 25: 505-512.

retina cuando se mueva la cabeza. Su función es importante para la estabilización de la postura y para coordinar la marcha.

- El espinocerebeloso: Incluye la corteza del vermis, la región media de los hemisferios y los núcleos profundos fastigial e interpuesto. recibe aferencias de la medula espinal; entre estas son especialmente importantes para el control motor las que llevan información de receptores musculares y articulares, y la relativas al estado de actividad de los circuitos de las interneuronas espinales; también proyectan a esta zona, de forma ordenada topográficamente, la corteza sensitiva y motora. Las eferencias del espinocerebelose dirige al tronco del encéfalo a los núcleos vestibulares, reticulares y núcleo rojo (origen de los tractos motores descendentes), y la corteza motora a través del tálamo.

“El espinocerebelo dispone de gran contingente de información sensorial y sus proyecciones se dirigen a las zonas de origen de los haces descendentes, incluida la corteza motora primaria.”⁴¹

Interviene en el control de la postura y la locomoción durante los movimientos voluntarios. En general desempeña un papel importante en la regulación del movimiento por señales sensoriales.

- El cerebrocerebeloso: Comprende la corteza lateral de los hemisferios y el núcleo dentado. A esta zona llega información de la corteza motora, de la corteza parietal posterior y de la corteza premotora. La salida principal se dirige a la corteza motora a través del tálamo. El cerebrocerebelo integra un circuito corteza-cerebelo-corteza que al carecer de entrada sensorial relevante, sugiere que esta zona interviene en la fase preparatoria de los movimientos, en la planificación motora, las representaciones o ensayos mentales de actos motores y la estimación de los errores cometidos en la ejecución de movimientos.

⁴¹ Perea, Bartolomé. (1989). Fundamentos de neuropsicología ED. U. de Salamanca.p.45

“Cuando llega desde la corteza el plan del movimiento, el cerebrocerebelo devuelve a la corteza un programa motor que incluye los músculos a emplear, la secuencia temporal de su activación y fuerza a desarrollar.”⁴²

Esta función, como se ha indicado, también se propone para los ganglios basales: pero el cerebelo, además de guardar los programas motores, se ocupa de mejorarlos con la práctica, especialmente aquellos que se utilizan para los movimientos de tipo balístico, no modificable durante su ejecución.

⁴² Schmidt, R.F. & Thews, G. (1993). Fisiología Humana. (2ed) Ed. Interamericana. McGraw-Hill. Madrid. p. 120

CAPITULO III: TIPOS DE FIBRAS MUSCULARES

3.1 Definición

El músculo esquelético es un tejido capaz de hacer frente un amplio rango de demandas funcionales, desde realizar movimientos de gran precisión para los que se requiere poca fuerza, hasta contracciones máximas, pasando por el mantenimiento de la postura del cuerpo. Esta versatilidad del músculo esquelético se debe, en parte, a la existencia de varios tipos de células o fibras musculares, que poseen características funcionales, metabólicas y moleculares distintas.

“Los diferentes tipos de fibras se encuentran en proporciones variables dentro de cada músculo. Así, cada uno de ellos es un mosaico con diversas proporciones de los distintos tipos de fibras, lo que le confiere propiedades especiales y una perfecta adaptación a la tarea funcional para la que está destinado”⁴³

“Actualmente la clasificación de las fibras musculares se realiza en función del tipo de miosina presente en la célula y de la velocidad de acortamiento de la fibra. “⁴⁴

⁴³ Petter D, Dusterhoft S. (1992). Altered Gene Expression in Fast- Twitch Muscle Induced by Chronic Low frequency Stimulation. American Journal Of Physiology ; 262:R333

⁴⁴ Schiaffino S y Reggiani C. (1996). Molecular Diversity of Myofibrillar proteins. Physiological Reviews; 76, 371

Bottinelli y Reggiani en el 2000 mencionaron que estos dos parámetros están íntimamente relacionados entre sí, ya que es el tipo (o isoforma) de miosina presente en la fibra el principal determinante de la velocidad de contracción de la célula, debido a que la miosina es el motor de la contracción.

Las moléculas de miosina se compone de seis proteínas más pequeñas; dos de ellas reciben el nombre de cadenas pesadas, y las otras cuatro el de cadenas ligeras. Es precisamente el tipo o isoforma de cadena pesada de la miosina la que determina en mayor medida la velocidad de acortamiento de las fibras. Hoy en día, las distintas isoformas de miosina se pueden diferenciar por medio de técnicas histoquímicas, inmunológicas y electroforéticas sumamente precisas. Así, se reconoce en los mamíferos cuatro tipos de fibras musculares: fibras de tipo I, que son de contracción lenta, y las fibras de tipo II, que son de contracción rápida, de las cuales existen tres subtipos: IIA, IID o IIX y IIB.

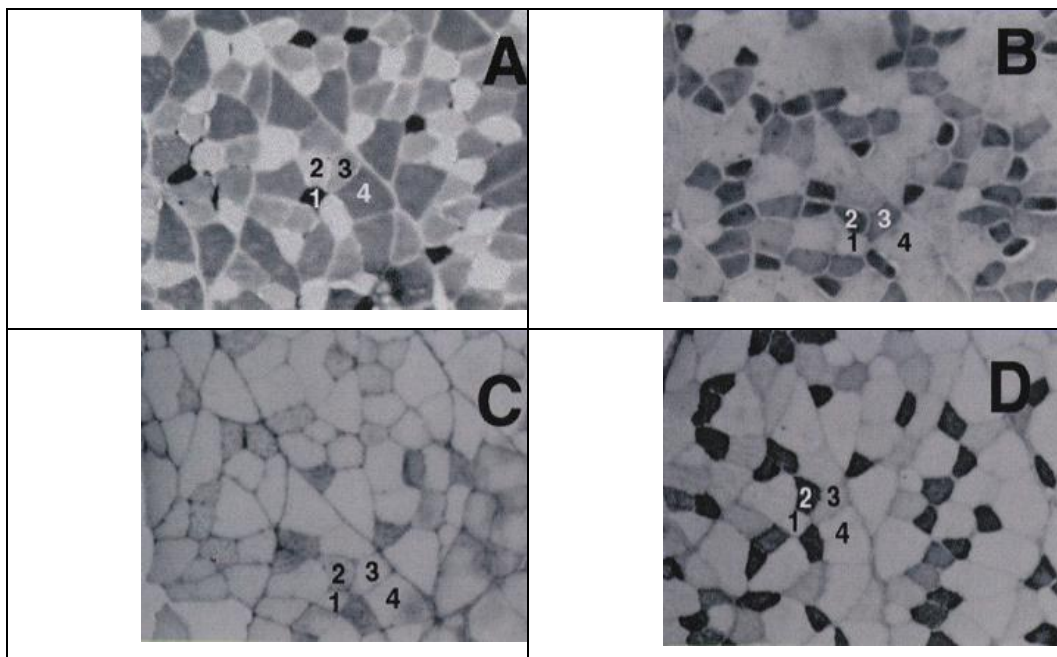


Figura 3.1: Secciones transversales de una biopsia de músculo vao lateral. En la ilustración podemos observar que la fibra 1 (fibra de tipo I), la fibra 2 (fibra de tipo IIA), la fibra 3 (fibra tipo IIX), la fibra 4 (fibra tipo IIB).

En el ser humano sólo encontramos fibras de los tipos I, IIA, y IIX. Se ha comprobado que las fibras que antes se clasificaban como IIB son realmente fibras IIX. Los diferentes tipos y subtipos de fibras, además de presentar diferentes isoformas de miosina y velocidad de contracción, se diferencian en diversos aspectos, como su metabolismo, capacidad de almacenamiento de calcio, distribución, etc.

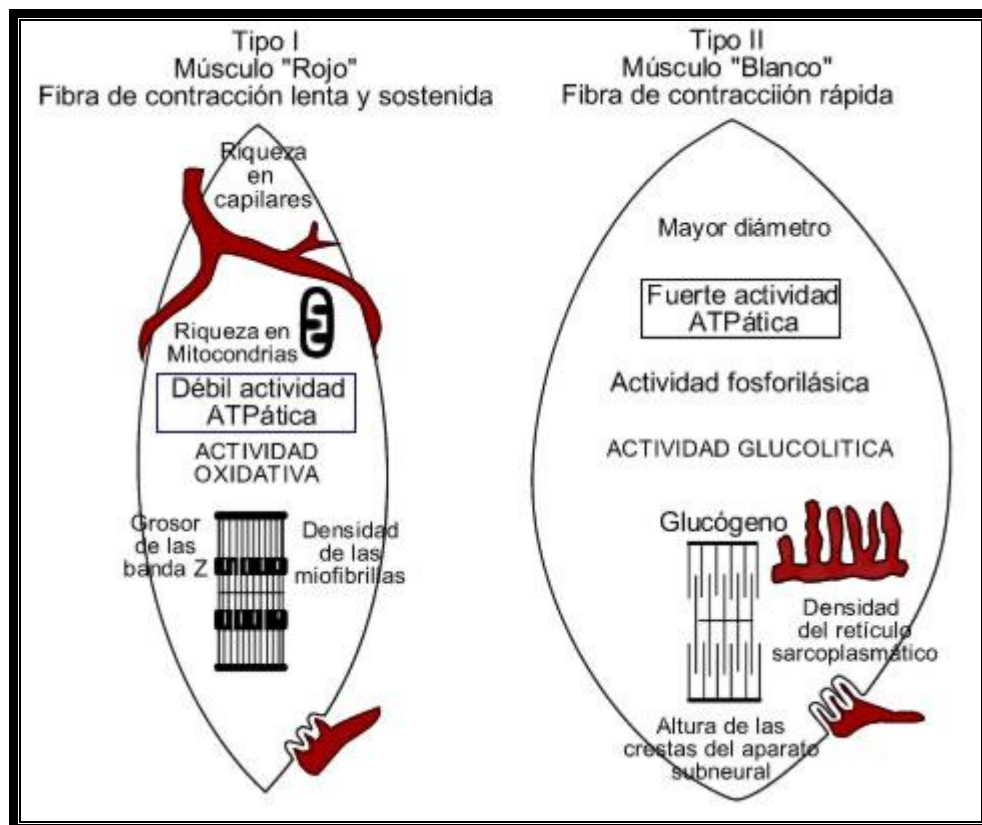


Figura 3.1: Detalle de fibra muscular *tipo I* y *tipo II*

3.1 Fibras tipo I

3.1.1 Aparato contráctil de las fibras tipo I

Las fibras musculares tipo I presentan una isoforma de cadena pesada denominada MHC- B/show (MCH en inglés Myosin Heavy Chain), cuya actividad ATPasa es la de menor velocidad máxima dentro de la familia de las

MCH. Es decir, las fibras tipo I son las que más despacio hidrolizan el ATP para contraerse. Este fenómeno determina a su vez que la velocidad máxima de acortamiento de las fibras sea la menor dentro de los distintos tipos de fibras, y es por esta razón por lo que se han denominado fibras lentas. Asimismo, fibras I expresan cadenas ligeras de la miosina características de este tipo de fibra, ya que existe una estrecha coordinación entre la expresión de las cadenas pesadas y ligeras dentro de una misma célula muscular.

Otras proteínas componentes de la maquinaria contráctil también presentan isoformas características del tipo de fibra. Éste es el caso de las proteínas reguladoras troponina y tropomiosina. Sin embargo, la principal proteína de los filamentos finos, la actina, no presenta distintas isoformas según el tipo de fibra musculoesquelética. En general podemos decir que existe una coordinación entre la expresión de la MHC y del resto de proteínas miofibrilares de la célula muscular con el objetivo de que haya una perfecta asociación funcional entre ellas.

El sistema contráctil de las fibras tipo I se dispone en miofibrillas, que son más escasas que en las fibras II, con lo que queda una mayor proporción de sarcoplasma libre.

3.1.2 Sistema de acoplamiento excitación – contracción

Este tipo de fibras presenta un menor desarrollo de los componentes celulares que intervienen en el acoplamiento excitación-contracción (túbulos transversales, retículo sarcoplásmico y proteínas asociadas a ellos).

“Esto es así debido a que los potenciales de acción son transmitidos con menos frecuencia en estas unidades motoras, por lo que las fibras disponen de un período de tiempo más largo para relajarse tras cada contracción, de modo que no necesitan un gran desarrollo de estos sistemas para relajarse a

gran velocidad. Dicho fenómeno permite un ahorro energético y una mayor resistencia a la fatiga.”⁴⁵

Los túbulos transversales o túbulos T, son invaginaciones del sarcolema que penetran radialmente en el interior de las fibras, constituyendo una red llamada sistema de túbulos T. Su función es transmitir el potencial de acción desde el sarcolema (SL) al interior de la fibra, induciendo la liberación al sarcoplasma del Ca acumulado en el retículo sarcoplásmico (RS). A su vez, este Ca liberado al sarcoplasma se une a la troponina C e induce la contracción de las miofibrillas. En las fibras lentas, los túbulos T presentan menor superficie de membrana y suponen un menor porcentaje del volumen celular que en las fibras de tipo II. Una de las principales proteínas de los túbulos T es el receptor de dihidropiridinas (DHPR), que actúa como sensor de potencial de las fibras. Los DHPR son menos abundantes en estas fibras tipo I que en las de tipo II.

Las fibras tipo I presentan un retículo sarcoplásmico menos abundante que las fibras tipo II, por lo que poseen una menor capacidad de almacenamiento de Ca. La proteína Ca ATPasa es una enzima que se localiza en la membrana del RS, y cuya función es volver a introducir el ión Ca en el retículo sarcoplásmico (hidroliza el ATP a ADP y Pi para obtener la energía necesaria para el bombeo del ión) para que tenga lugar la relajación de la máquina contráctil. En las fibras lentas se presenta una isoforma de Ca ATPasa (SERCA 2a) que existe sólo en estas fibras y en células cardíacas. Estas SERCA 2a se diferencia de la presente en las fibras tipo II, en que está regulada por su interacción con la proteína fosfolambano que la inhibe.

“El fosfolambano también se expresa únicamente en las fibras tipo I y en cardiomiocitos, y su fosforilación por estimulación B-adrenérgica conduce al

⁴⁵ Nordi, M y Frandel, V (2004). Biomecánica básica del sistema musculoesquelético . (1 Ed). Madrid. Editorial McGraw Hill Interamericana, p. 203

cese de la interacción de éste con la Ca ATPasa, con lo que la enzima se activa.”⁴⁶

Otras proteínas que están implicadas en la homeostasis del Ca, y que se localizan en el lumen del RS, son las calsecuestrina y la parvalbúmina. Ambas son proteínas que se unen Ca y que ayudan a acumularlo en el interior de este orgánulo. La primera de ellas, la calsecuestrina, es la misma que se encuentra en las fibras de tipo II, pero además se halla una cierta cantidad de la isoforma de calsecuestrina cardíaca. Respecto a la parvalbúmina, en las fibras lentas prácticamente es inexistente. El receptor de rianodina (RyR) es otro componente fundamental del RS que se localiza en la membrana de éste, y que actúa como canal a través del cual el Ca sale del RS al sarcoplasma. El tipo de RyR presente en las fibras I es la misma isoforma que se encuentra en las fibras de tipo II; no obstante, parece que el funcionamiento de este canal no es igual en fibras rápidas y lentas.

3.1.3 Metabolismo energético de las fibras tipo I

Las fibras de tipo I obtienen la mayor parte del ATP para la concentración del metabolismo aeróbico; es decir, de las vías metabólicas dependientes de la presencia de O₂ en la célula. Para disponer de un adecuado aporte de este gas presentan una serie de adaptaciones, como por ejemplo estar irrigadas por capilares tortuosos y muy anastomosados, lo que permite aumentar la superficie de intercambio gaseoso y de sustratos energéticos y deshechos con la sangre. Asimismo, presentan elevadas concentraciones de mioglobina que les permiten captar gran cantidad de O₂ sanguíneo. Dicho O₂ se emplea en este tipo de fibras para la oxidación de los sustratos energéticos a través del ciclo de los ácidos tricarboxílicos o ciclo de Krebs y de la fosforilación oxidativa, mientras que la utilización de la glucólisis para la obtención de ATP es menor. Por esta razón presentan mitocondrias relativamente grandes y

⁴⁶Hämäläinen, N. & Pette, D. (1993) The histochemical profiles of fast fiber types IIB, IID, and IIA in skeletal muscles of mouse, rat and rabbit. *J. Histochem. Cytochem.*, 41:733-43

numerosas en su sarcoplasma, con elevado contenido de enzima de la cadena respiratoria y del ciclo de Krebs.

El importante desarrollo del metabolismo oxidativo en estas fibras hace que los sustratos utilizados preferentemente sean los triglicéridos y los hidratos de carbono, de los cuales poseen importantes almacenes. Las fibras de tipo I han sido muchas veces clasificadas como SO (del inglés *slow oxidative*) precisamente por su baja velocidad de contracción y su metabolismo altamente oxidativo.

“La velocidad de propagación del impulso nervioso en el axón que inerva a estas fibras es relativamente baja (60-70 m frente a los 80-98 en las neuronas que inervan a la fibras II), siendo el axón de pequeño calibre con un bajo nivel de excitación, al contrario de lo que ocurre en las fibras tipo II (principio de tamaño).”⁴⁷

3.2 Fibras tipo II

Las fibras tipo II presentan una velocidad de contracción de tres a cinco veces mayor que las de tipo I. Dentro de este grupo de fibras tipo II, encontramos distintos subgrupos que se diferencian fundamentalmente en el tipo de miosina que expresan, y por tanto en su velocidad de contracción. En general, las fibras IIB constituirían la forma más rápida, con un metabolismo más glucolítico, las IIA serían las más lentas y de carácter más oxidativo de todas las rápidas, mientras que las IIX o IID presentarían características intermedias.

3.2.1 Aparato contráctil de las fibras tipo II

Pueden presentar varias isoformas de cadena pesada de miosina, que son las denominadas MHC-2A, MHC-2B y MHC-2X. Según la forma expresada, las fibras rápidas se subdividen en fibras IIA, IIB y IIX. La

⁴⁷ SCHMIDT, R.F. y THEWS, G. (1993). Fisiología Humana. (Ed.3). Interamericana.Mcgraw-Hil. Madrid. p. 167

velocidad ATPasa de estas isoformas es mayor en la IIB, menor en la IIA e intermedia en las IIX. Por lo tanto, la velocidad de contracción de las fibras rápidas es mayor en las IIB, menor en las IIA e intermedias en las IIX.

“En las fibras rápidas, también se encuentran isoformas características de las fibras rápidas de las cadenas ligeras de la miosina. En las fibras IIB, existe un mayor porcentaje de forma llamada MLC-3f, lo que se ha sugerido que tendría relación con la mayor velocidad de contracción de estas fibras.”⁴⁸

“Como se ha mencionado, en las fibras rápidas encontramos *isoformas rápidas* tanto de la tropomiosina como de los tres componentes del complejo troponina, mientras que la actina presente es la misma que la se encuentra en las fibras I.”⁴⁹

Las fibras IIA son las de mayor grosor, incluso mayor que las de tipo I. No obstante, con respecto a la maquinaria contráctil podemos decir que la principal diferencia entre los tres subtipos de fibras rápidas es la isoforma de MHC.

3.2.2 Sistema de acoplamiento excitación – contracción de las fibras tipo II

“El sistema de acoplamiento excitación – contracción se encuentra mas desarrollado en las fibras rápidas. Prueba de ello es que los túbulos T representan un mayor volumen respecto al volumen celular total, y que presentan mayores niveles de DHPR (entre tres y cinco veces más) que las fibras tipo I.”⁵⁰

⁴⁸ Gorza, L. (1990). Identification of a novel Type 2 fiber in population in mammalian skeletal muscle by combined use of histochemical myosin Atpase and anti-myosin monoclonal antibodies. *J. Histochem. Cytochem.*, 38: 257-65

⁴⁹ Schiaffino S y Reggiani C. (1996). Molecular Diversity of Myofibrillar proteins. *Physiological Reviews*; 423

⁵⁰ Guth, L. & Samaha, F. J.(1970). Procedure for the histochemical demonstration of actomyosin ATPase. *Exp Neurol.*, 28:365-367,

Así mismo el RS se encuentra mucho más desarrollado en las fibras II. Las isoforma presente de Ca ATPasa es la SERCA 1a. Que se encuentra en todos los subtipos de fibras rápidas. Además de ser una isoforma distinta de la existente en las fibras I, es entre cinco y siete veces más abundantes. La principal proteína ligante de Ca, es la calsecuestrina, es la misma que la de las fibras I. Respecto a la parvalbúmina, ésta es mucho más abundante en las fibras II, y su concentración disminuye en el siguiente orden: IIB>IIX>IIA. Estas características permiten que las fibras de tipo II sean capaces de almacenar más cantidad de Ca y liberarlo al sarcoplasma más rápido, que sus miofibrillas se contraigan con más rapidez, y por último que el Ca liberado se introduzca de nuevo en el RS más rápidamente, con lo que la relajación de las fibras es también más rápida. En definitiva, el proceso de contracción – relajación es más rápido que en las fibras tipo I.

3.2.3 Metabolismo energético de las fibras tipo II

“Las fibras de tipo II son más dependientes de la glucólisis como fuente de energía que las de tipo I por tanto poseen elevadas actividades glucogenolíticas y glucolíticas, con menor importancia relativa respecto al metabolismo oxidativo, razón por la que presentan una menor densidad mitocondrial y mitocondrias más pequeñas.”⁵¹

Dentro de los subtipos de fibras rápidas, son las IIB las que poseen mayor capacidad glucolítica y menor capacidad oxidativa, frente a las IIA, que tienen un carácter más oxidativo que glucolítico, y las IIX, que presentan características intermedias entre ambas. Por esta razón, antes se denominaba FOG a las fibras que hoy conocemos como IIA, nombre que procede del inglés: *fast oxidative glycolitic*, y FG (del inglés *fast glycoliti*) a las IIB.

⁵¹ Taylor AW, Bachman L. (1999). The effects of endurance training on muscle fibre types and enzyme activities. Canadian Journal of Applied Physiology;34-45.

En función de las características mencionadas podemos concluir que las fibras II son aquellas de las que se obtiene una respuesta más rápida y con mayor tensión cuando se activan, aunque debido a su metabolismo son más rápidamente fatigables. Así pues, parecen particularmente adaptadas a participar en actividades físicas breves e intensas, como levantamiento de peso o aquellas que implican numerosos cambios de ritmo, como el fútbol sobre hierba. El reclutamiento de las fibras II durante el ejercicio físico ocurre a elevadas intensidades de trabajo, y siempre va precedido por el reclutamiento de las fibras I. Dentro de las fibras II, son las IIA las que primero se reclutan, seguidas de las IIX de las IIB. Hay que resaltar que es la cantidad de fuerza que se requiere y no la velocidad de contracción lo que determina el reclutamiento de uno u otro tipo de fibras. Ambos tipos de fibras, lentas y rápidas, actúan durante la realización de actividades submáximas y en ejercicios anaeróbicos, como en el fútbol, actividades en las que se combinan altos niveles de ejercicio aeróbico y anaeróbico.

3.3 Formas de transición

La clasificación general de las fibras no tiene en cuenta la existencia de las denominadas *fibras musculares híbridas*, que contienen más de una isoforma de cadena pesada de la miosina. Algunas fibras contienen tanto la MHC-IIX como la MHC-IIB: son las fibras IIXB o IIBX, según posean una mayor cantidad de una o de otra isoforma, respectivamente. Otras fibras contienen las MHC-IIX y MHC-IIA: son las fibras IIXA y IIAX, respectivamente. Por último, existen fibras que expresan tanto la MHC-IIA como la MHC-I, denominadas fibras IIC y IC. La existencia de esta continuidad entre tipos de fibras demuestra la gran plasticidad y dinamismo muscular. Aunque estas fibras híbridas se han considerado una población minoritaria, pueden aumentar cuando se induce experimentalmente la transformación de unos tipos de fibras en otros, como en el caso de la electro estimulación crónica de baja frecuencia de los músculos rápidos.

3.3.1 Influencias sobre la distribución de los tipos de fibra muscular

“La dotación genética es un factor fundamental a la hora de definir el patrón de distribución de las fibras musculares de un individuo. En personas sedentarias de mediana edad, el porcentaje de fibras I es de un 45-55%, siendo el citado porcentaje ligeramente superior en el sexo femenino.”⁵²

Es importante tener en cuenta que la composición distribución de los distintos tipos de fibras musculares no es igual en todos los tipos de fibras musculares no es igual en todos los tipos de músculos de un individuo. Así, existen músculos en los seres humanos que presentan siempre el predominio de un tipo de fibra: es el caso del soleo, que posee un elevadísimo porcentaje de fibras tipo I, o del braquial anterior, en el que predominan las fibras II. Los músculos antigravitorios, por otra parte, casi siempre están compuestos por elevados porcentajes de fibras I, lo cual es lógico si pensamos que están encargados de mantener la postura, por lo que necesitaran ser poco fatigables. No obstante, la composición fibrilar de un músculo determinado dependerá de diversos factores además del factor genético, entre ellos del patrón de use de ese músculo. Las fibras musculares son muy adaptables y capaces de cambiar su fenotipo, aunque estos cambios no necesariamente han de afectar de la misma forma a los distintos sistemas celulares. Esto explica el hecho de que, por ejemplo, puedan aumentar su capacidad oxidativa antes de expresar nuevas isoformas de miosina.

“La electroestimulación crónica de baja frecuencia es una técnica consistente en incrementar la actividad contráctil, estimulando a la vez todas las unidades motoras, de forma que se consigue inducir transiciones de unos tipos de fibras a otros. Esta técnica se ha utilizado en numerosas ocasiones para estudiar en animales el proceso de transición de las fibras rápidas a lentas (otra técnica utilizada con este fin es la inervación cruzada).

⁵² Taylor, AW y Bachman, L, (1999). The effects of endurance training on muscle fibre types and enzyme activities. Canadian Journal Of Applied Physiology. Vol 23. Pg. 41-53

Se ha comprobado que, de forma gradual, las fibras rápidas van expresando isoformas lentas de los distintos componentes celulares, a la vez que se producen cambios en la fisiología y morfología de la fibra que la va acercando al fenotipo de fibra lenta.”⁵³

“Todas estas alteraciones ocurren siguiendo un patrón temporal determinado. Inicialmente, comienzan a expresar isoformas lentas de MHC y posteriormente aparecen las MLC lentas. Otro proceso de muy rápida aparición tras el inicio de la electroestimulación lo constituye el descenso en la captura de Ca^{2+} por parte del RS (probablemente por modificación de la Ca^{t+} -ATPasa) y una gran disminución del contenido en parvalbumina de este orgánulo. En el proceso de electroestimulación, comienza a expresarse la isoforma de Ca^{t+} -ATPasa de fibras lentas junto al fosfolambano. El sistema metabólico también experimenta alteraciones. Progresivamente van elevándose los niveles de enzimas del ciclo de los ácidos tricarboxílicos, cadena respiratoria, 3-oxidación, etc. Estos aumentos son paralelos a un aumento en el volumen mitocondrial y a un descenso de las actividades glucogenolíticas y glicolíticas”⁵⁴

Por este mismo procedimiento, se ha conseguido reforzar el carácter glucolítico de un músculo mediante estimulación de corta duración y elevada potencia. Aun así, no se ha conseguido demostrar que con este sistema un músculo lento se convierta en uno rápido. Hay que destacar que la electroestimulación induce un reclutamiento de todas las unidades motoras, por lo que su efecto no es del todo comparable al del ejercicio físico, el cual, como sabemos, provoca un reclutamiento de forma jerárquica de las distintas unidades motoras en función de la intensidad de trabajo. Algunos de los factores fisiológicos que inciden en el tipo de fibras son el envejecimiento y el entrenamiento.

⁵³ Pette D y Dusterhoft, S, (1993). Altered Gene Expression in Fast- Twitch Muscle Induced Chronic. American Journal of Physiology, Vol.262, Pg. 338

⁵⁴ Pette D y Dusterhoft, RS, (1992). The Molecular Diversity of Mammalian Muscle Fibers. NIPS, Vol.8, Pg. 153-156

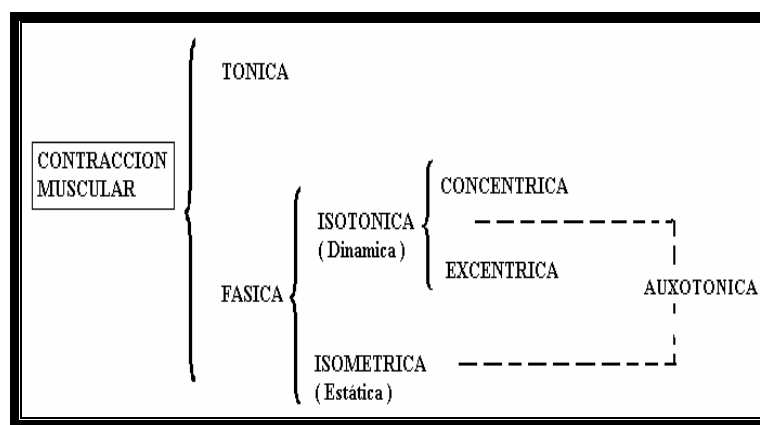
3.4 Tipos de contracciones musculares

3.4.1 Definición

Las contracciones musculares ocurren siempre que el músculo genera tensión, este puede acortarse y modificar su longitud o no, he aquí la confusión no siempre que un músculo que se acorta genera tensión, este puede generar tensión muscular sin modificar su longitud y permanecer en forma estática, por lo cual diríamos que:

"La contracción muscular ocurre siempre que las fibras musculares generan una tensión en sí mismas, situación que puede ocurrir, cuando el músculo está acortado, alargado, moviéndose, permaneciendo en una misma longitud o en forma estática"⁵⁵

La fuerza física se manifiesta a través de la contracción muscular entendiendo como tal el desarrollo de la tensión dentro del músculo y no necesariamente el claro acortamiento del mismo. En función de la relación existente entre tensión desarrollada y la resistencia a vencer, podemos establecer los siguientes tipos de contracción muscular:



Mentefacto 3.4.1 Explicación gráfica sobre la división de los diferentes tipos de contracciones musculares

⁵⁵ López, J. & Fernández, A. (2006). Fisiología del ejercicio. (3era Edición). Edición médica Panamericana. Pg. 91

3.4.2. Contracciones isotónicas

Se define contracciones isotónicas, desde el punto de vista fisiológico, a aquellas contracciones en la que las fibras musculares además de contraerse, modifican su longitud.

Las contracciones isotónicas son las más comunes en la mayoría de los deportes, actividades físicas y actividades correspondientes a la vida diaria, ya que en la mayoría de las tensiones musculares que ejercemos suelen ser acompañadas por acortamiento y alargamiento de las fibras musculares de un músculo determinado

Las contracciones isotónicas se dividen en:

- Concéntricas
- Excéntricas

3.4.2.1. Contracciones Concéntricas

Una contracción concéntrica ocurre cuando un músculo desarrolla una tensión suficiente para superar una resistencia, de forma tal que este se acorta y moviliza una parte del cuerpo venciendo dicha resistencia. Un claro ejemplo es cuando llevamos un vaso de agua a la boca para beber, existe acortamiento muscular concéntrico ya que los puntos de inserción de los músculos de juntan, se acortan o se contraen.

3.4.2.2. Contracción Excéntrica:

Cuando una resistencia dada es mayor que la tensión ejercida por un músculo determinado, de forma que éste se alarga se dice que dicho músculo ejerce una contracción excéntrica, en este caso el músculo desarrolla tensión alargándose es decir extendiendo su longitud, un ejemplo claro es cuando

llevamos el vaso desde la boca hasta apoyarlo en la mesa, en este caso el bíceps braquial se contrae excéntricamente. En este caso juega la fuerza de gravedad, ya que si no se produciría una contracción excéntrica y se relajaran los músculos del brazo, el vaso caerían hacia el suelo a la velocidad de la fuerza de gravedad, para que esto no ocurra el músculo se extiende contrayéndose en forma excéntrica.

En este caso podemos decir que cuando los puntos de inserción de un músculo se alargan se producen una contracción excéntrica

Aquí se suele utilizar el término alargamiento bajo tensión, este vocablo "alargamiento" suele prestarse a confusión ya que si bien el músculo se alarga y extiende lo hace bajo tensión y yendo más lejos no hace más que volver a su posición natural de reposo.

3.4.3. Contracción Isométrica

En este caso el músculo permanece estático sin acortarse ni alargarse, pero aunque permanece estático genera tensión, un ejemplo de la vida cotidiana sería cuando llevamos a un niño en brazos, los brazos no se mueven mantienen al niño en la misma posición y generan tensión para que el niño no se caiga al piso, no se produce ni acortamiento ni alargamiento de las fibras musculares.

Con lo cual podríamos decir que se genera una contracción estática cuando generando tensión no se produce modificación en la longitud de un músculo determinado.

3.4.3.1 Contracciones auxotónicas

En este caso es cuando se combinan contracciones isotónica con contracciones isométricas, al iniciarse la contracción se acentúa más la parte isotónica, mientras que al final de la contracción se acentúa más la isométrica

Un ejemplo práctico de este tipo de contracción lo encontramos cuando se trabaja con "extensores" el extensor se estira hasta un cierto, el músculo se contrae concéntricamente, mantenemos unos segundos estáticamente (Isométricamente) y luego volvemos a la posición inicial con una contracción en forma excéntrica

3.4.3.2. Contracciones Isocinéticas

Se trata más bien de un nuevo tipo de contracción por lo menos en lo que refiere a su aplicación en la práctica deportiva. Se define como una contracción máxima a velocidad constante en toda la gama de movimiento, son comunes en aquellos deportes en lo que no se necesita generar una aceleración en el movimiento, es decir por el contrario en aquellos deportes que lo que necesitamos es una velocidad constante y uniforme como puede ser la natación o el remo, el agua ejerce una fuerza constante y uniforme, cuando aumentamos la fuerza el agua aumenta en la resistencia, para ello se diseñaron los aparatos isocinéticos para desarrollar a velocidad constante y uniforme durante todo el movimiento

Aunque las contracciones isocinéticas e isotónicas son ambas concéntricas y excéntricas, no son idénticas sino por el contrario son bastante distintas, ya que como dijimos anteriormente las contracciones isocinéticas son a velocidad constante regulada y se desarrolla una tensión máxima durante todo el movimiento. En las contracciones isotónicas no se controla la velocidad del movimiento con ningún dispositivo y además no se ejerce la misma tensión durante el movimiento, ya que por una cuestión de palancas óseas varía la tensión a medida que se realiza el ejercicio, por ejemplo, en extensiones de cuádriceps cuando comenzamos el ejercicio ejercemos mayor tensión que al finalizar por varias razones

- Una es porque vencemos la inercia
- La otra porque al acercarse los puntos de inserción muscular el músculo ejerce menor tensión.

En el caso de los ejercicios isocinéticos, estas máquinas están preparadas para que ejerzan la misma tensión y velocidad en toda la gama de movimiento

Para realizar un entrenamiento con máquinas isocinéticas se necesitan equipos especiales, dichos equipos contienen básicamente un regulador de velocidad, de manera que la velocidad del movimiento se mantiene constante, cualquiera que sea la tensión producida en los músculos que se contraen. De modo que si alguien intenta que el movimiento sea tan rápido como resulte posible, la tensión engendrada por los músculos será máxima durante toda la gama de movimiento, pero su velocidad se mantendrá constante.

CAPITULO IV: MECANISMOS DE FATIGA NEUROMUSCULAR EN LOS DEPORTISTAS

4.1 Mecanismos de fatiga neuromuscular en los deportistas

Todos conocemos los síntomas asociados con la aparición de la fatiga muscular: nuestros músculos se cansan, se debilitan, aparece el dolor y, en última instancia, tenemos que reducir la intensidad a la que estamos realizando la actividad o cesarla por completo. Es un hecho común en nuestra vida cotidiana. A pesar de la importante acción investigadora que rodea el fenómeno de la fatiga muscular, los procesos responsables de la misma aún están lejos de ser identificados.

4.1.1 Posibles mecanismos de fatiga neuromuscular en humanos

Para entender la fatiga, deberemos considerar el ejercicio voluntario como una variable que está controlada por muchos sistemas fisiológicos que regulan la producción de trabajo por el músculo esquelético. La producción de trabajo es la variable dependiente del esfuerzo aplicado que está controlada por factores motivacionales (tanto internos como externos) y por *feedback* proveniente de los sistemas motores.

“Las contracciones musculares intensas imponen demanda en un gran número de sistemas fisiológicos. Para generar los altos niveles de fuerza que acompañan a una actividad física intensa es fundamental una activación máxima o casi máxima de los músculos sinergistas implicados en la acción⁵⁶ “

⁵⁶ Ferrándiz, S & Font, F (1992). Atlas de Fisiología. Barcelona: edibook. Pg. 123

A nivel muscular esta activación depende de un reclutamiento completo de todas las unidades motoras y de que la frecuencia de descarga de las mismas sea lo más alta posible. La generación de fuerza durante una contracción voluntaria es el resultado de una secuencia de eventos siendo cada uno de estos un posible factor limitante en la producción de fuerza. La importancia relativa que cada uno de estos factores puede tener a la hora de explicar los mecanismos responsables de la fatiga muscular depende de los detalles de la tarea realizada. El primer proceso incluye los llamados aspectos centrales que influyen en la activación de las motoneuronas y que incluyen factores motivacionales, así como la integración de las diferentes informaciones sensoriales, que terminarían en última instancia en la generación de los potenciales de acción que viajarían a través de la vía motora del sistema nervioso central hasta el sarcolema.

“Una vez el impulso nervioso ha llegado al músculo esquelético (sarcolema), el neurotransmisor acetilcolina es liberado en la unión neuromuscular (la acetilcolina se une a los receptores que existen en la membrana y sarcolema de las células musculares), lo que resulta en una despolarización de la misma que permite que el impulso eléctrico se propague a lo largo del músculo y dentro del sistema de túbulos T”⁵⁷

Desde la perspectiva de la célula muscular individual, el poder responder con éxito a las altas frecuencias de descarga asociadas al ejercicio intenso depende en gran medida de la capacidad del sistema de túbulos T y del sarcolema para trasladar los potenciales de acción a altas velocidades al interior de la célula.

“La capacidad para mantener la alta frecuencia de transferencia de los potenciales de acción depende principalmente de la habilidad para devolver los iones de potasio (K⁺) de vuelta a la célula desde el espacio intersticial, así como expulsar los iones de sodio (Na⁺), los cuales penetran dentro de la célula durante el potencial de acción, de vuelta al espacio intersticial”⁵⁸

⁵⁷ Gowitzke, B. (1982). El cuerpo y sus movimientos. Bases científicas. (3 ediciones). España. Editorial Paidotribo. Pg 142

⁵⁸ Guyton y Hall. (2006). Tratado de Fisiología médica. (11 Edición) España: Elsevier. Pg 167

Una vez el impulso eléctrico está dentro de la célula, debe ser también conducido rápidamente desde los túbulos T hasta el retículo sarcoplasmático (RS), lo que se conoce como (acoplamiento del proceso de excitación-contracción muscular). Específicamente este proceso está relacionado con la integridad de los canales de liberación de calcio (Ca^{2+}), localizados en la cisterna terminal en aposición a los túbulos T. Dentro de estos canales, el potencial de acción activa dos tipos de canales de Ca^{2+} con el objeto de liberar Ca^{2+} desde el RS. Los canales receptores de dihidropiridina (DHP) se encuentran en una alta concentración en las membranas de los túbulos T. Los canales DHP parecen actuar principalmente con sensores de voltaje (carga eléctrica) transmitiendo la señal a un segundo tipo de canal de Ca^{2+} ubicado en la membrana del RS, el receptor ryanodina (RyR). Los RyR afectados permiten así el rápido escape de Ca^{2+} (alcanzándose concentraciones citoplasmáticas de Ca^{2+} de aproximadamente 100 veces respecto a las observadas en estado de reposo) desde el lumen del RS hasta el citoplasma, donde se difunden a las miofibrillas para fijarse a la troponina C. Esto resulta en el movimiento de la tropomiosina del sitio activo de la actina. Las cabezas de la miosina (puentes cruzados) pueden entonces unirse a la actina, permitiendo el inicio de la contracción muscular.

“Cuando la activación cesa, la liberación de iones Ca^{2+} se detiene y la concentración citoplasmática de Ca^{2+} baja rápidamente, disociándose el Ca^{2+} de la troponina C. Esta disociación causa que los puentes cruzados se separen de los filamentos de actina y las fibras musculares se relajen”⁵⁹

Durante la realización de ejercicios físicos intensos y repetidos, el rendimiento muscular máximo se puede mantener sólo durante un período de tiempo breve antes de la aparición de la fatiga muscular. Por ejemplo, durante un esfuerzo máximo en cicloergómetro la producción de potencia alcanza su pico en los primeros 2-3 segundos y luego desciende. Si el esfuerzo máximo continúa hasta los 30 segundos, la potencia generada cae hasta el 50%.

⁵⁹ Guyton y Hall. (2006). Tratado de Fisiología médica. (11 Edición) España: Elsevier. Pg 251

4.2 Activación Neural

Los causantes fisiológicos de la fatiga muscular se han dividido históricamente en aspectos periféricos y aspectos centrales. La fatiga originada por factores periféricos es definida como una disminución en la capacidad de generar fuerza del músculo esquelético como resultado de alteraciones en los potenciales de acción en la unión neuromuscular, fallos en el proceso de excitación-contracción o alteraciones en los mecanismos contráctiles, no habiendo una disminución y pudiendo haber incluso un aumento en el impulso neural. Por el contrario, la fatiga central se ha definido como una reducción en el impulso neural hacia los músculos que resulta en una disminución en la producción de fuerza o en el índice de manifestación de ésta, que ocurre independientemente de los cambios en la capacidad contráctil de los músculos. En humanos la estimulación eléctrica supra máxima del nervio motor, o del propio músculo, responsable del control de un músculo o grupo de músculos (por ejemplo, el nervio femoral controla el músculo cuádriceps), se puede usar para dividir la fatiga muscular en estos dos componentes.

“La fatiga central se puede detectar cuando se observa un aumento en los niveles de fuerza del músculo estudiado en respuesta a la estimulación supra máxima. Esto se consigue normalmente aplicando el estímulo (estimulación eléctrica) al músculo cuando este está realizando una contracción isométrica máxima. Es decir, se pide al sujeto realizar una contracción voluntaria máxima y, sobre esta contracción voluntaria, se «supe impone» un estímulo eléctrico máximo que reclute todas las unidades motoras del músculo examinado. Ésta técnica se conoce como twitch interpolation. Un incremento en la fuerza en respuesta a esta contracción < artificial > (descarga eléctrica) indicaría que algunas unidades motoras no se han podido reclutar de forma voluntaria o que se han reclutado pero su velocidad de descarga no es suficiente para lograr la máxima producción de fuerza. Esto querría decir que la activación voluntaria no alcanza el 100% lo que indicaría la presencia de fatiga central.”⁶⁰

En términos más simples, esto significa que el sistema nervioso central no envía a los músculos los impulsos necesarios para que éstos mantengan los niveles de fuerza requeridos.

⁶⁰ CR, Laursen PB.(2005). Models to explain fatigue during prolonged endurance cycling Sports .Med. Pg.865-898.

“Es un hecho que la velocidad de descarga de las motoneuronas disminuye durante la realización de una contracción voluntaria isométrica máxima. Es decir, cuando el ejercicio progresa en el tiempo, existen adaptaciones en el sistema nervioso (fatiga central). Sin embargo, en parte esta disminución en la velocidad de descarga de las motoneuronas no tiene efectos negativos en la producción de fuerza.”⁶¹

Es decir, aunque la velocidad de descarga, que se supone máxima en una contracción de estas características, esté disminuida, este hecho no se acompaña de forma inmediata de un descenso en la producción de fuerza. Este fenómeno también se ha observado en contracciones isométricas submáximas.

“Esta paradoja se conoce en la bibliografía científica como la sabiduría muscular) o muscular wisdom. La hipótesis de la «sabiduría muscular» fue inicialmente desarrollada por Marsden et al. (1983), quienes proponían que la disminución en la velocidad de descarga de las motoneuronas durante una contracción máxima servía para minimizar la fatiga. La principal premisa en la hipótesis de la sabiduría muscular es que hay una correspondencia entre la velocidad de descarga de las motoneuronas y los cambios asociados a la fatiga en las características contráctiles del músculo.”⁶²

⁶¹ Babault N, Desbrosses K, Fabre M, Michaut A, Pousson M. (2006). Neuromuscular fatigue development during maximal concentric and isometric knee extensions. J Appl Physiol. Pg 345

⁶² Allen DG, Westerblad H. (2006). Lactic acid -the latest performance- enhancing drug. Scien. Pg. 305

El aumento en el tiempo de relajación muscular y el descenso en la velocidad contráctil del músculo, a medida que éste se va fatigando, hacen que no sean necesarios tanto impulsos nerviosos como al principio, cuando el músculo estaba fresco. Esto haría que menos impulsos nerviosos fueran necesarios para mantener el mismo nivel de fuerza. El mantenimiento de la misma velocidad de descarga cuando la capacidad contráctil del músculo empeora sería un hecho que, además de ser poco económico, podría poner en peligro el mantenimiento de la excitabilidad muscular o dificultar los procesos de excitación-contracción. Por lo tanto, se ha sugerido que esto podría ser un ejemplo de cómo el sistema nervioso central optimiza el rendimiento en el músculo fatigado eligiendo el patrón de contracción muscular más económico y seguro en todo momento. Si el esfuerzo se mantuviera en el tiempo, esta disminución en la activación neural de las motoneuronas podría ser, sin embargo, la responsable de una parte de la fatiga muscular observada, ya que la presencia de fatiga central siempre implica que la activación neural de las motoneuronas está disminuida.

La velocidad de descarga de las motoneuronas parece estar gobernada por una compleja combinación de factores que incluyen información tanto excitatoria como inhibitoria que se origina en receptores musculares aferentes que operan a nivel reflejo, las características intrínsecas de las propias motoneuronas (inhibición recurrente) y, posiblemente el factor más importante, el impulso descendente de los centros cerebrales superiores (corteza motora o cerebelo).

“Los dos principales mecanismos de acción de la fatiga central: la inhibición de la actividad de las motoneuronas debido a la actividad aferente de los receptores musculares y la disminución en el impulso nervioso en la corteza motora”⁶³

4.2.1 Información muscular aferente y fatiga muscular

Los receptores musculares son estructuras especializadas que se ubican en el complejo musculotendinoso y cuya misión es enviar información sobre el estado del músculo al sistema nervioso central. Los aferentes musculares se pueden agrupar según su función y la velocidad de conducción de sus fibras. Los aferentes del grupo Ia y algunos del grupo II inervan los husos musculares, se disponen de forma paralela a las fibras musculares y se encargan de recoger información sobre los cambios en la longitud (grado de estiramiento) del músculo.

“Los órganos tendinosos de Golgi (aferentes del grupo Ib) se ubican en el tendón y se encargan de medir la tensión desarrollada por el músculo. Los otros receptores del grupo II (un subgrupo que no son husos musculares) y muchas de las fibras del grupo III son sensibles a estímulos mecánicos y responden durante las contracciones musculares y/o los estiramientos. Las otras fibras del grupo III y los receptores del grupo IV responden a los cambios bioquímicos/metabólicos que se producen dentro del músculo durante el ejercicio o a los niveles extremos de tensión mecánica “⁶⁴

⁶³ DeGroot, J (1993). Neuroanatomía Correlativa. (9 Edición). México: El manual moderno. Pg 105

⁶⁴ Nordi, M y Frandel, V (2004). Biomecánica básica del sistema musculoesquelético . (1 Ed). Madrid. Editorial McGraw Hill Interamericana, p. 160

Según Garlan y Kaufman, en 1995 dicen que “es ampliamente aceptado que la actividad de los receptores musculares aferentes III y IV, sensibles por ejemplo a la isquemia y a la acumulación de metabolitos, inhiben de forma refleja las motoneuronas en la médula espinal. Si después de una contracción hasta la fatiga se mantiene el músculo en isquemia, lo que haría que los aferentes musculares de los grupo III y IV sigan activos y continúen descargando y por lo tanto enviando información sobre el estado del músculo al sistema nervioso central, la velocidad de descarga de las motoneuronas, que desciende como antes vimos, no se recupera hasta que la circulación es restaurada”.⁶⁵

El reflejo de Hoffman o reflejo-H, que mide, mediante una estimulación eléctrica, la proporción de motoneuronas que pueden ser activadas de forma refleja, también se ha visto reducido en ejercicios fatigantes. Estos estudios sugieren que el feedback aferente que los receptores musculares de los grupos III y IV envían al sistema nervioso central puede inhibir o reducir, de forma refleja, la velocidad de descarga de las motoneuronas, lo que puede ser un mecanismo importante en la aparición de la fatiga central. Los impulsos de la información aferente que los receptores musculares envían al sistema nervioso central podrían no ser tan importantes en el control del rendimiento muscular durante el ejercicio, encontraron que la disminución en el impulso neural (fatiga central) que acompañó a una contracción máxima realizada con el músculo bíceps braquial se normalizó (volvió a ser máxima alcanzando sus valores de reposo) rápidamente durante la recuperación, a pesar de que el músculo fue mantenido en isquemia durante este tiempo.

4.2.2 Disminución del impulso nervioso a nivel cortical

La implicación de factores supraespinales, aquellos situados proximales a la médula espinal, en la etiología de la fatiga muscular en humanos durante la realización de contracciones voluntarias. Esto ha sido posible gracias a una técnica denominada estimulación magnética transcraneal>> (transcranial magnetic stimulation)

⁶⁵ Garlan y Kaufman (1995). Role of muscle afferents in the inhibition of motoneurons during fatigue. Adv Exp Med Biol. Pg 49

Con esta técnica es posible, mediante la estimulación artificial de la corteza motora, generar potenciales de acción que viajen hasta las motoneuronas alfa en la espina dorsal. En palabras sencillas, el cerebro (concretamente la corteza motora) no es capaz de enviar el número de estímulos suficientes para que los músculos se sigan contrayendo con la fuerza demandada. El responsable, o uno de los responsables, del deterioro en el rendimiento muscular sería entonces una disminución del impulso nervioso originado a nivel cortical. Los mecanismos responsables de esta pérdida de excitabilidad de la corteza motora en respuesta a un ejercicio fatigante permanecen sin aclararse en la actualidad. Aunque existen varios posibles candidatos, unos de los más sugeridos son las alteraciones metabólicas y humorales en el cerebro en respuesta al ejercicio intenso. En este sentido, se ha señalado que el vaciado de los depósitos de glucógeno ubicados en el cerebro, acumulación excesiva de amoníaco en las regiones cerebrales, el aumento de los niveles de serotonina, la disminución de los niveles cerebrales de o el aumento de la concentración de podrían afectar a la función del sistema nervioso central y por lo tanto atenuar la activación de las motoneuronas.

4.3 Propagación neuromuscular.

Una vez que el impulso nervioso sale del cerebro y viaja por la rama motora del sistema nervioso, el siguiente paso importante es trasladar esa descarga eléctrica al interior del músculo. A nivel periférico, la incapacidad de generar potenciales de acción de forma repetida a una alta frecuencia podría resultar en una pérdida de la excitabilidad muscular o en una imposibilidad de trasladar completamente el impulso nervioso al interior de la fibra, lo que finalmente resultaría en una menor fuerza. A esta forma de fatiga se la conoce habitualmente como «fatiga de alta frecuencia».

“La excitación repetida de un músculo o grupo muscular podría causar una reducción progresiva en los gradientes transmembrana de Na^+ y K^+ , lo

que resultaría en un potencial de membrana menos negativo (despolarización) y en un consiguiente descenso en la excitabilidad de la fibra muscular”⁶⁶

“Por ejemplo, durante el ejercicio en los músculos la concentración intracelular de Na⁺ podría duplicar su valor pasando de 13 mM en reposo a 24 mM en situación de fatiga, mientras que la concentración intracelular de K⁺ podría reducirse en un 20%, de aproximadamente 160 mM en reposo a 130 mM en fatiga. Este hecho, que se ha relacionado con los cambios en la propagación del potencial de acción en la fibra muscular (sarcolema), se ha asociado frecuentemente con la aparición de la fatiga muscular.”⁶⁷

Durante el ejercicio intenso se observa una rápida pérdida de K⁺ desde el músculo en contracción hasta el espacio extracelular y luego al torrente sanguíneo, lo que resultaría en un descenso de la concentración de K⁺ intracelular. Esto resultaría en una despolarización de la membrana, lo que reduciría la capacidad de excitación del músculo y por lo tanto su capacidad contráctil. Para prevenir estos acontecimientos, la bomba Na⁺-K⁺ entraría en acción. Sin embargo, la capacidad de esta bomba para mantener el equilibrio iónico entre los fluidos intra y extracelulares podría verse superada incluso a los pocos segundos de trabajo intenso donde una alta frecuencia de estimulación sea requerida. Sin embargo, la acumulación de K⁺ podría tener como responsable de la fatiga muscular.

4.4 Acoplamiento del proceso de Excitación- Contracción

Los iones Ca²⁺ son esenciales en el proceso de contracción muscular. Una vez que la excitación está dentro de la fibra muscular, el Ca²⁺ es liberado por el RS, iniciándose así la contracción muscular; la subsecuente vuelta del Ca²⁺ desde las proteínas contráctiles hasta el RS, que se realiza por medio del RS Ca²⁺ ATPasa, resultaría en la relajación del músculo. Aunque cada uno de estos tres aspectos relacionados con el control del Ca²⁺ (liberación de Ca²⁺, recuperación de Ca²⁺ y Ca²⁺-ATPasa) por parte del RS podrían

⁶⁶ Arvidson, I., Eriksson, E., (1984). Rehabilitación básica neuromuscular. St. Louis Mosby, p. 240

⁶⁷ Stephenson DG, Lamb GD (2003). Events of the excitation-contraction relaxation. Acta Physiol Scand. Pg 245

desempeñar un papel importante en el desarrollo de la fatiga muscular, la reducción en la liberación de Ca^{2+} desde el RS parece ser un aspecto de especial interés que hay que tener en cuenta durante el ejercicio de alta intensidad. A este respecto, una disminución en la cantidad de Ca^{2+} liberado por el RS se ha asociado a una rápida reducción en la fuerza y se ha señalado este fenómeno como uno de los mecanismos más importantes en la etiología de la fatiga muscular. De hecho, si la cantidad de Ca^{2+} liberada desde el RS al citosol disminuye, esto reduciría el número de posibles uniones entre Ca^{2+} y troponina C, lo que conllevaría un menor número de puentes de cruzados entre las moléculas de actina y miosina y, por lo tanto, una pérdida en la capacidad muscular de generar fuerza o potencia

“Una disminución en el número de iones de Ca^{2+} liberados desde el RS pudiera desempeñar un papel relevante en el desarrollo de la fatiga muscular está apoyada por el hecho de que determinados agentes, como la cafeína (sustancia que incrementa la apertura de los canales de liberación de Ca^{2+} desde el RS), son capaces de revertir en gran parte la pérdida de fuerza observada en los músculos fatigados”⁶⁸

Sin embargo los mecanismos por los cuales la liberación del Ca^{2+} se ve disminuida con la fatiga permanecen sin aclarar en su mayoría. Algunas evidencias sugieren un origen metabólico en esta reducción. La depleción localizada de determinados sustratos energéticos (ATP o glucógeno) o la presencia de metabolitos como fósforo inorgánico, iones de hidrógeno, lactato o magnesio se han relacionado de forma mecanicista con una reducción en la liberación de Ca^{2+} desde el RS. Además, el descenso en la liberación de iones Ca^{2+} ocurre más tarde en las fibras musculares que tienen una alta capacidad oxidativa y ocurre más rápido cuando las fibras musculares se fatigan en condiciones anaeróbicas. Durante la realización de ejercicio físico han mostrado que la vuelta de Ca^{2+} al RS y/o la actividad de la Ca^{2+} ATPasa se retarda en respuesta a un ejercicio submáximo prolongado y después de un ejercicio de alta intensidad.

⁶⁸ *Cuillo, J.V. & Zarins, B. Biomecánica de los musculostendinosos. (1983). Clin Sport Med p. 80*

En cuanto a los efectos de la fatiga en la capacidad para liberar Ca^{2+} por el RS en el músculo esquelético humano, Hill et al (2001) fueron los primeros autores en encontrar una asociación entre deterioro en la liberación de Ca^{2+} y la fatiga de baja frecuencia. Estos autores encontraron una depresión del 35% ($P < 0,01$) en la liberación de Ca^{2+} inmediatamente después de 7 minutos de un ejercicio isocinético de extensión de rodilla de alta intensidad, que estuvo acompañada por una reducción del 33% en la fuerza voluntaria isométrica máxima. Li et al. (2002) han informado que la liberación de Ca^{2+} desde el RS se redujo de forma significativa con la fatiga en respuesta a un ejercicio de extensiones de rodilla a máxima intensidad en tres grupos de sujetos con diferente condición física y que esta reducción estuvo relacionada con el nivel de fatiga muscular observado. Es interesante señalar que ni el estudio de Hill et al. (2001) ni el de Li et al. (2002) se pudo encontrar relación alguna entre aspectos metabólicos, a pesar de las profundas alteraciones en el metabolismo muscular observadas después del ejercicio, y los descensos en la liberación de Ca^{2+} . Por ejemplo, Hill et al. (2001) observaron unas concentraciones de lactato 15 veces superiores a las de reposo y un descenso en los valores de fosfocreatina del 32% al final del ejercicio. Aunque los estudios realizados con animales han señalado las disrupciones metabólicas como mecanismos potenciales responsables de la disminución de la liberación del Ca^{2+} desde el RS los resultados de Hill et al. (2001) y Li et al. (2002) parecen sugerir que la regulación de la liberación de Ca^{2+} en seres humanos no está directamente relacionada con la carga metabólica muscular. Estudios recientes en humanos han sugerido, sin embargo, una relación entre los niveles de glucógeno muscular y la capacidad para regular los niveles de Ca^{2+} por el RS (ver la sección sobre el metabolismo de los hidratos de carbono y el ejercicio de resistencia).⁶⁹

4.5 Metabolismo energético y fatiga muscular

“La contracción muscular depende de una cascada de eventos que culminan en la interacción de las cabezas de actina y miosina (puentes cruzados). Cuando el músculo es activado, la actina y miosina interaccionan

⁶⁹ Steele DS, Duke AM. (2003). Metabolic factors contributing to altered Ca^{2+} regulation in skeletal muscle fatigue. Acta Physiol Scand. Pg. 48

de forma cíclica, utilizando fosfato de adenosina (ATP) y produciendo fuerza”⁷⁰.

Es un hecho bien conocido que la transición del estado de reposo del ejercicio va acompañada de un incremento significativo en las demandas energéticas del músculo esquelético en contracción. Para satisfacer esta demanda de energía, el músculo pone en funcionamiento diferentes procesos bioquímicos para asegurar el aprovisionamiento de ATP. En la mayoría los casos el músculo esquelético responde a las elevadas demandas energéticas impuestas por el ejercicio de forma muy precisa, manteniendo remarcable equilibrio entre la demanda y la provisión de energía. Sin embargo el ejercicio intenso y/o de larga duración resulta en cambios metabólicos en el ambiente intracelular que se han relacionado con la fatiga muscular. Es más, las limitaciones en el aporte energético representan la hipótesis clásica de la fatiga muscular durante la práctica de ejercicio físico. Las reservas de determinados sustratos energéticos (por ejemplo glucógeno muscular o fosfocreatina) y/o la acumulación de ciertos metabolitos (por ejemplo, lactato o fosforo inorgánico) y la aparición de la fatiga.

“El ejercicio intenso demanda velocidades extremadamente altas de hidrólisis de ATP para satisfacer las demandas energéticas, tanto para procesos contráctiles (unión de los puentes de actina y miosina) como para procesos no contráctiles (bomba de Na⁺/K⁺ o bomba de Ca²⁺). Una fracción muy alta de la energía necesaria para satisfacer las demandas metabólicas del ejercicio de alta intensidad se obtiene con la participación del metabolismo anaeróbico (por ejemplo, glucólisis o fosfocreatina)”⁷¹

Aunque los mecanismos que pudieran relacionar la fatiga y el metabolismo muscular permanecen sin aclararse en seres humanos realizando ejercicio, se piensa que algunas de las consecuencias asociadas al metabolismo anaeróbico son las causantes del descenso en la función contráctil del músculo. Concretamente, las limitaciones en el aporte energético o la acumulación intramuscular de ciertos metabolitos tales como lactato, iones de hidrógeno, fósforo inorgánico o adenosín monofosfato se

⁷⁰ Cooker, R. (1997). Actomyosin interaction in striated muscle. *Physiol Rev*. Pg. 671

⁷¹ Guyton, A.C. (1986). Tratado de fisiología médica. (10 ed.)Madrid. McGraw-Hill Interamericana. P.120

han relacionado con alteraciones en el acoplamiento del proceso de excitación-contracción muscular o en el aparato contráctil.

4.5.1 METABOLISMO DE LOS FOSFÁGENOS (ATP Y FOSFOCREATINA) Y EJERCICIO DE ALTA INTENSIDAD

“Durante un ejercicio intenso de corta duración (10 segundos o menos), el sistema anaeróbico aporta hasta el 94% de la energía.”⁷²

Por mecanismos que hoy en día se desconocen, la concentración de ATP muscular parece preservarse relativamente bien, a pesar de las demandas extremas en el metabolismo celular que un ejercicio breve y de intensidad máxima impone.

Las muestras de tejido muscular obtenidas de biopsias musculares en humanos muestran que como máximo los depósitos de ATP se pueden reducir, en respuesta a un ejercicio de hasta 30 segundos de duración a intensidad máxima, entre un 30 y un 45% respecto a sus valores de reposo Bogdanis et al. (1998). Sin embargo, en un estudio más reciente, Karatzaferi et al. (2001) encontraron una disminución más acusada de las concentraciones de ATP en las fibras de contracción rápida después de un ejercicio en cicloergómetro de 25 segundos de duración, alcanzando valores de menos del 20% de los obtenidos en reposo.⁷³

Las fibras musculares de contracción rápida parecen gobernar gran medida la producción de potencia durante los ejercicios de alta intensidad, la reducción de los depósitos de ATP de forma selectiva en esta población de fibras musculares podría explicar en parte la fatiga observada durante la realización de ejercicios de corta duración y alta intensidad.

Giannesini et al. (2001) realizaron algunas observaciones muy importantes en músculos de ratas estudiados in vivo que debemos considerar. La primera es que el músculo esquelético necesitó menos energía

⁷² Lopez Chicharrón, J. Fernández Vaquero, A. (2006). Fisiología del ejercicio. (3 ed). España. Editorial Médica Panamericana S.A .p. 70

⁷³ Bogdanis GC, Nevill ME, Lakomy HKA. (1995). Contribution of phosphocreatine of aerobic metabolism to energy supply during exercise. J Appl Physiol 480

(ATP) para producir la misma cantidad de fuerza al final del ejercicio que al principio del mismo y la segunda fue que el costo energético de la contracción muscular no tuvo ninguna relación con la fatiga observada. De hecho, el costo energético fue menor en los protocolos más fatigantes. Los autores sugieren que el músculo tendría la capacidad de, sistemáticamente, regular la producción de ATP, evitando o atenuando la fatiga muscular. Esto sugeriría que éste no es el principal mecanismo de fatiga muscular y/o que al menos existen otros mecanismos involucrados.⁷⁴

Dado que el músculo esquelético podría tener la capacidad de preservar, en gran medida, el ATP muscular, para poder continuar con el trabajo muscular demandado, el ATP debe ser resintetizado mediante la participación de otros procesos metabólicos. Por ejemplo, durante un esfuerzo de 6 segundos a intensidad máxima, aproximadamente el 50% de la energía obtenida por medio del metabolismo anaeróbico se consigue a partir de la degradación de los depósitos musculares de fosfocreatina, por lo que después de un ejercicio de estas características habrá una importante disminución de los niveles de fosfocreatina, que puede alcanzar valores del 60-80% de los observados en reposo. En paralelo con estas reducciones en los niveles de fosfocreatina muscular se ha observado un descenso en la producción de potencia. Además, se ha encontrado una alta correlación entre la disponibilidad de fosfocreatina y la potencia muscular. También se ha encontrado una relación entre la fuerza máxima y los niveles de fosfocreatina muscular, tanto durante la contracción como durante el período de recuperación, en contracciones isométricas submáximas hasta la fatiga.

Estos hallazgos se ven reforzados por las investigaciones que demuestran que después de la suplementación de creatina se mejora el rendimiento muscular mediante el aumento de los niveles iniciales de fosfocreatina. Estos resultados parecen sugerir que, desde una perspectiva energética, mantener una alta producción de potencia está altamente correlacionado con la disponibilidad de fosfocreatina muscular, lo que parece sugerir que una reducción en la disponibilidad de fosfocreatina contribuye a la aparición de la fatiga muscular. La ruptura y utilización de las moléculas de fosfocreatina está asociada a un aumento estequiométrico de la concentración de fósforo inorgánico dentro de la célula muscular.⁷⁵

⁷⁴ Giannesini B, Izquierdo M.(2001). Introducción del ATP en niveles de fatiga mediante la estimulación. J Physiol. 536

⁷⁵ Calderón, J. y Legido, Arce, J.C. (2002). Neurofisiología aplicada al deporte. (2ed).p.80

CAPITULO V: ENTRENAMIENTO CON ELECTROESTIMULACION NEUROMUSCULAR vs ESTIRAMIENTOS

5.1 Fundamentos de la electroestimulación neuromuscular

5.1.1 Contracción muscular voluntaria y contracción muscular con electroestimulación

Los tejidos vivos poseen la capacidad de reaccionar frente a cambios en su medio interno o frente a variaciones energéticas del medio extremo (estimulo). Existen diferentes tipos de estímulos: mecánicos, térmicos, químicos, eléctricos y luminosos. Los tejidos nervioso y muscular son los más aptos para recibir estímulos y reaccionar frente a ellos, por lo que se les califica como excitables.

Nuestro organismo crea estímulos eléctricos para excitar estos dos tipos de tejido; de esta forma, cuando se quiere realizar una contracción muscular de forma voluntaria, se suceden los siguientes pasos:

1. Creación de una orden (estimulo) en una determinada zona (corteza cerebral) del sistema nervioso central (SNC) en forma de potencial de acción.

2. Conducción de este potencial de acción a través de impulsos desde las áreas motoras del SNC hacia los músculos esqueléticos por relevos de neuronas eferentes denominadas vías motoras somáticas. Solo las neuronas motoras del asta gris anterior de la médula (Aa) conducen impulsos a los músculos esqueléticos.

3. El impulso llega por las distintas terminaciones axónicas hasta las sinapsis localizadas entre terminaciones nerviosas y sarcolema de la fibra muscular, separadas por un espacio donde el estímulo genera la liberación de la acetilcolina. Las neuronas que llegan a las fibras musculares, denominadas «motoneuronas», gobiernan un número determinado de fibras musculares; se denomina a este conjunto unidad motriz. A la unión entre la motoneurona y las fibras musculares se le llama placa motora.

4. La acetilcolina produce cambios químicos en la membrana de la fibra muscular, liberándose iones de Ca^{2+} que generan la contracción muscular. Una de las características de la unidad motriz es responder al estímulo de forma global (nervio y fibras musculares inervadas); esta peculiaridad se conoce como principio de todo o nada; esto significa que en función de la intensidad del estímulo se activan un mayor o menor número de unidades motrices y, en consecuencia, se produce una mayor o menor fuerza en la contracción.

La electroestimulación puede producir potenciales de acción en el nervio y en el músculo, ambos indistinguibles de los generados por el sistema nervioso. Cuando se aplica la electroestimulación sobre el organismo con el fin de producir contracciones de la musculatura esquelética, podemos hacerlo de forma directa o indirecta. La estimulación indirecta consiste en producir la excitación de las fibras musculares como consecuencia de la estimulación de las motoneuronas que las inervan, es decir, la corriente actúa sobre las ramas terminales de los axones neurales.

“A esta modalidad de estimulación se le denomina estimulación eléctrica neuromuscular (EENM) y se define como la aplicación de impulsos eléctricos para producir contracciones en la musculatura esquelética como resultado de la estimulación percutánea de nervios periféricos.”⁷⁶

Cuando el estímulo eléctrico se aplica sobre el nervio, todo el proceso de despolarización y repolarización de la membrana celular tiene lugar en la fibra nerviosa; la transmisión del impulso llega a la placa motora del músculo, lo que pone en marcha el proceso de excitación sobre las fibras musculares, prácticamente como una reacción en cadena.

“La estimulación directa consiste en excitar directamente las fibras musculares. Esta modalidad de estimulación solo se utiliza cuando los músculos están denervados y su objetivo primordial es mantener su trofismo. Tres son las razones por las cuales esta estimulación no se lleva a cabo en músculos inervados. En primer lugar, la duración de los estímulos eléctricos necesaria para estimular el nervio es mucho menor que para estimular el músculo (0,2 ms frente a 100 ms, respectivamente). En segundo lugar, el potencial de membrana en reposo de las motoneuronas es de -70 mv, mientras que el de las fibras musculares es de -90 mV, por lo que la motoneurona precisa menos intensidad de corriente para excitarse. En último lugar, y como consecuencia de los dos puntos anteriores, resulta mucho más confortable y menos doloroso para la persona que recibe la corriente que se estimule el nervio.”⁷⁷

La estimulación directa de las fibras musculares tiene objetivos estrictamente terapéuticos o estéticos y se utiliza en el caso de lesiones, parciales o totales, de la vía neuromotora que normalmente transporta al músculo la capacidad motora. En todos los estudios que analizan los efectos de la electroestimulación sobre el rendimiento físico en sujetos sanos, la estimulación se aplica de forma indirecta. Por este motivo, de aquí en adelante se utilizan las siglas EENM para referirse a este tipo de estimulación.

⁷⁶ Herrero IA. (2006). Efectos inducidos por el entrenamiento de fuerza con electroestimulación neuromuscular en la fuerza y potencia muscular. Tesis doctoral. Universidad Lc Leon.

⁷⁷ Hamada T, Sasaki H, Hayashi T, Moritani T, Nakao K. (2003). Enhancement of whole body gl core uptake during and after human skeletal muscle low-frequency electrical sti mutation. J Appl Physiol, 94: pg. 2107-2012.

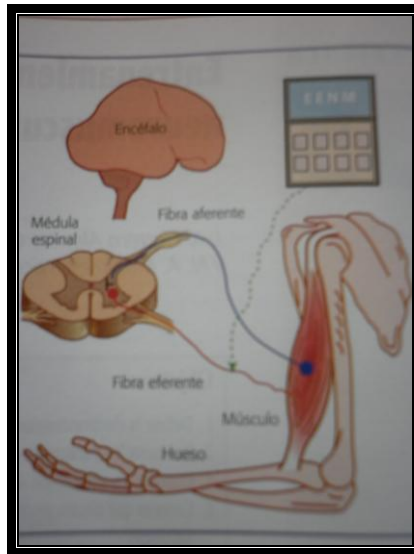


Figura 5.1.1: Componentes del sistema nervioso y muscular que intervienen en la contracción muscular y esquema del lugar donde actúa la electroestimulación EENM

5.1.2 Ley de Lapique

Para provocar una respuesta en los tejidos excitables, el estímulo eléctrico debe poseer una adecuada intensidad y duración, capaz de producir un potencial de acción. Esta intensidad mínima necesaria se denomina umbral de excitación. El estímulo de intensidad mínima se denomina «estímulo umbral. Si la intensidad de un estímulo eléctrico es demasiado débil para producir un umbral de despolarización, el potencial de acción no se produce. Para un determinado tejido excitable, una curva intensidad-tiempo demuestra que existe un número infinito de combinaciones de intensidad y duración de estímulo suficientes para excitar el tejido. Cualquier combinación intensidad-tiempo que se encuentre por debajo a la izquierda de la curva no produce un potencial de acción.

Cualquier estímulo con combinaciones intensidad-tiempo que se sitúe por encima a la derecha de la curva activa el tejido excitable en cuestión. Existen dos parámetros importantes que se obtienen en una curva intensidad-tiempo y que fueron definidos por Louis Lapique en 1909:

- **Reobase.** Es la intensidad mínima (medida en mA) que debe tener un pulso eléctrico para ser capaz de excitar el tejido diana, independientemente de la duración del estímulo.

- **Cronaxia.** Es la duración que ha de tener un estímulo, cuya intensidad es el doble de la reobase, para lograr la excitación del tejido diana.

La cronaxia de un nervio intacto (músculo sano inervado) es mucho más baja que la de un músculo denervado. Por lo tanto, el músculo inervado es mucho más excitable que el músculo denervado.

5.1.3 Niveles de estimulación

Cuando se aplica la EENM en el organismo, al ir aumentando la intensidad se van superando una serie de umbrales o niveles que se deben conocer. Estos niveles son los siguientes:

- **Nivel sensible:** Cuando la intensidad o la duración del estímulo son muy bajas, no se aprecia ninguna respuesta en el sujeto que recibe la EENM. A esta estimulación se le denomina subumbral o subsensorial. Cuando la intensidad es ligeramente superior pero aun relativamente baja, la primera respuesta apreciable es sensible en forma de hormigueo, vibración o sensación de pinchazos.

- **Nivel motor:** Conforme se aumenta la intensidad de la EENM, se alcanza un instante en el que aparecen contracciones musculares visibles. Si la intensidad sigue incrementándose, las contracciones musculares inducidas serán capaces de producir movilidad articular.

- **Nivel doloroso:** Al llegar a este nivel, la intensidad de estimulación es tan elevada que se activan las fibras que transmiten impulsos nociceptivos. A este nivel también se producen intensas contracciones musculares.

- **Nivel del máximo dolor:** Representa el momento en el que el sujeto no es capaz de incrementar más la intensidad de la estimulación debido a las sensaciones dolorosas que induce la corriente. Varios autores defienden que es el nivel en el que se debe trabajar cuando se pretende conseguir grandes mejoras en la fuerza e hipertrofia muscular.

5.2 Parámetros de la corriente eléctrica

Parece que el factor más importante que determina la fuerza generada por la EENM en la musculatura está relacionado con las características intrínsecas de los tejidos humanos. La mayoría de los estudios analizados aplican la EENM en el cuádriceps, por lo que muchas de las conclusiones establecidas se centran en la fisiología de este grupo muscular. En un segundo plano también son importantes la adecuada configuración de los parámetros de la corriente o las características de los electrodos, aspectos en los que se deben seguir unas pautas generales, como las que se comentan a continuación, ya que, en función de cómo se programen y modifiquen, se orientara el tipo de trabajo de la musculatura hacia un determinado objetivo.

5.2.1 Tipos de impulso o de onda

Hace referencia a la forma que tiene la onda eléctrica aplicada. En el entrenamiento con EENM los tipos de onda más frecuentes son: rectangular monofásica, rectangular bifásica simétrica, rectangular bifásica asimétrica y sinusoidal bifásica simétrica.

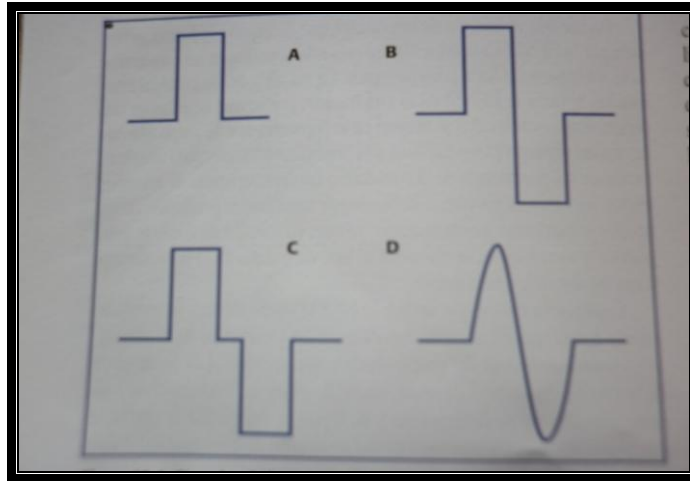


Figura 5.2.1: Ejemplos de los cuatro tipos de ondas utilizados en el entrenamiento con EENM; A: rectangular monofásica, B: rectangular bifásica simétrica, C: rectangular bifásica asimétrica, D: sinusoidal bifásica simétrica.

El tipo de onda influye tanto en la confortabilidad del entrenamiento como en los niveles de fuerza producidos cuando se fijan el resto de parámetros de la corriente. Todavía no se ha demostrado que existe un tipo de onda que sea la más confortable, ya que esto está condicionado por las diferentes respuestas de cada sujeto a un mismo tipo de onda. No obstante, varios estudios parecen indicar que el tipo de onda sí influye en la fuerza producida durante la contracción.

Laufer et al. (2001) observó que la onda polifásica (varias ondas rectangulares bifásicas y simétricas consecutivas) producía menos fuerza y menos fatiga respecto a otra onda monofásica o bifásica y simétrica en una sesión de entrenamiento.⁷⁸

⁷⁸ Laufer. Y, Kelly. MJ. (1993). Factors influencing quadriceps femoris muscle torque using transcutaneous neuromuscular electrical stimulations. Phys Ther 81. Pg. 307-316

A su vez, Stefanovska y Vodovnik (1985) reflejaron mayores incrementos en la máxima contracción voluntaria isométrica (MCV) al utilizar una onda bifásica rectangular respecto a una onda bifásica sinusoidal.⁷⁹

Por último, Bowman y Baker (1985) constataron que la onda bifásica y simétrica se toleraba mejor que la onda bifásica asimétrica. A la vista de estos resultados, la onda rectangular parece la más efectiva para la mejora de la fuerza muscular; la onda rectangular, bifásica y simétrica resulta la más documentada en la bibliografía específica sobre el entrenamiento con EENM.⁸⁰

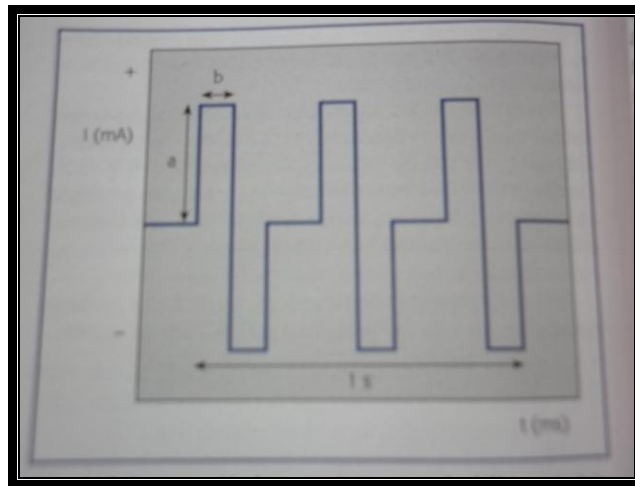


Figura 5.2.1.1: Representación de una corriente: a: amplitud del impulso o intensidad, b: anchura del impulso y la frecuencia

5.2.2 Ancho de pulso

Es la duración de cada pulso de corriente y normalmente se expresa en microsegundos (μs). Según la Ley de Lapique para producir una contracción apreciable el tiempo de actuación del estímulo debe ser por lo

⁷⁹ Stefanovska A, Vodovnik L. (1985). Chance in muscle forcé following electrical stimulation. Scand J Rehabil Med 7. Pg 141-146

⁸⁰ Bowman BR, Baker LL. (1985). Effects of waveform parameters on comfort during transcutaneous neuromuscular electrical stimulations. Ann Biomed Eng. 13. Pg 455-460

menos igual a la cronaxia nerviosa. Se ha sugerido que las anchuras de impulso óptimas para la estimulación percutánea están entre los 300 y 400 μ s, aunque para otros autores las mayores contracciones se logran con anchuras de impulso entre los 500 y 1.000 μ s. Basas (200) sugiere que las fibras rápidas necesitan tiempos de impulso de alrededor de 300 μ s, mientras que las fibras lentas requieren un tiempo de impulso superior. No obstante, estos valores dependen de la musculatura objeto de entrenamiento, refiriéndose estos anchos de impulsos óptimos, por lo que en grupos musculares de menor tamaño la anchura del impulso óptima es inferior.

Tanto la cronaxia muscular como la nerviosa se elevan a lo largo de un entrenamiento. Este incremento de ambas cronaxias supone que la velocidad de contracción muscular disminuye conforme la carga de trabajo es mayor. Por lo tanto, en el entrenamiento con EENM, siempre y cuando sea posible, hay que utilizar corrientes cuyo ancho de impulso aumente progresivamente durante la sesión de entrenamiento. De no ser posible, hay que utilizar anchos de impulso ligeramente superiores a las cronaxias nerviosas de los grupos musculares que se van a entrenar para que la estimulación fuese más eficaz en las demás repeticiones del entrenamiento. El principal problema de utilizar corrientes con anchos de impulso de excesiva duración es la confortabilidad de la corriente; se han documentado que las ondas de menor duración se toleran mejor, además de minimizar la irritación de la piel y el daño tisular. No obstante, aunque se pretendan utilizar anchos de impulso que se toleren mejor, también debemos conocer que algunos autores han achacado la ausencia de beneficios sobre la fuerza muscular en programas de entrenamiento con EENM a los reducidos tiempos del ancho de impulso utilizados en determinados trabajos (5100 μ s).

5.2.3 Frecuencia

Es el número de veces que se repite el impulso en un segundo y se expresa en hertzios (Hz). En el cuerpo humano las frecuencias: de descarga de las unidades motrices lentas (predominantes en músculos tónicos) están

por debajo de 40 Hz (corrientes de baja frecuencia), mientras que las frecuencias de descarga de las unidades motrices rápidas (predominantes en músculos fásicos) están por encima de 40 Hz (corrientes de alta frecuencia). Las primeras se utilizan para la recuperación postesfuerzo, así como para la mejora de los procesos aeróbicos, mientras que las corrientes de alta frecuencia se utilizan en el entrenamiento de la fuerza muscular. En este apartado se habla de corrientes continuas, si bien se debe mencionar que en el entrenamiento de la fuerza también se utilizan corrientes alternas. Las famosas corrientes rusas son corrientes alternas con una frecuencia de 2,5 kHz moduladas a una frecuencia de 50 Hz. En general, las corrientes alternas tienen una frecuencia bastante elevada (de 1 a 15 kHz) y para su administración se modulan en trenes (burst modulation) de menor frecuencia.

Actualmente muchos investigadores utilizan este tipo de corrientes debido a que determinados trabajos sugieren que resultan más cómodas.

Las frecuencias de electroestimulación bajas (ej. 20 Hz) hacen que el músculo se contraiga y relaje con cada pulso o ciclo, pudiendo obtenerse con ellas el 65% de la fuerza máxima alcanzada con corrientes de frecuencias más elevadas. Por el contrario, cuanto mayor es la frecuencia de estimulación, mayores son la fatiga muscular, la fuerza generada por la corriente y el daño muscular. Existe una relación positiva entre el momento de fuerza generado por un grupo muscular y la frecuencia de estimulación; sin embargo, parece que dicha relación no es siempre lineal.

En la figura 5.2.3 se muestra un test de fuerza-frecuencia, el cual consiste en aplicar una intensidad constante e incrementar progresivamente la frecuencia de estimulación, registrándose la fuerza producida por la contracción. Esta figura muestra que cuanto mayor es la frecuencia de estimulación, mayor será la fuerza producida por la corriente para una misma intensidad.⁸¹

⁸¹ Herrero JA, Izquierdo M, Maffmletti NA, Garcia J. (2006) Electromyostimulation and plyometric training effects on jumping and sprint time. Int J Sports Med. 27 (7). Pg. 533 539.

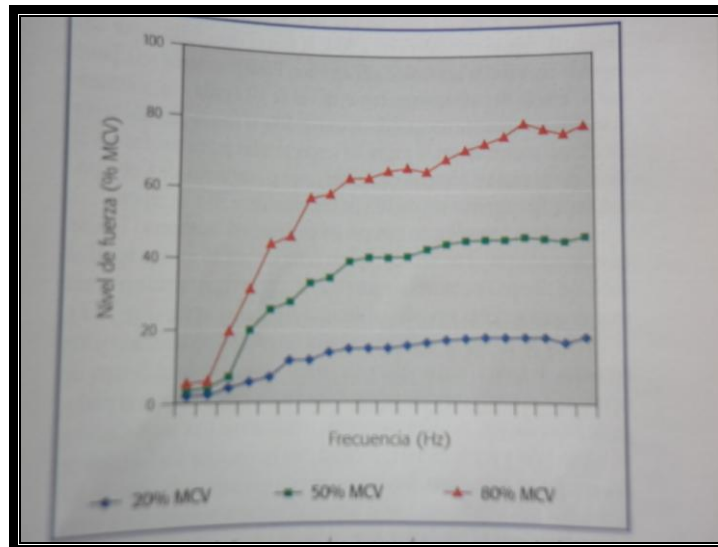


Figura 5.2.3: Niveles de fuerza generados, expresados como porcentaje de la máxima contracción voluntaria (MCV), durante un test de fuerza-frecuencia al aplicar intensidades de 20, 50 y 80%

La razón por la cual frecuencias bajas producen menor fuerza que frecuencias altas está relacionada, en primer lugar, con la sumación temporal de estímulos, y en segundo lugar, con la frecuencia de tetanización de las unidades motrices de contracción rápida, las cuales se excitan a las frecuencias de estimulación. Frecuencias de estimulación más elevadas de las que se han comentado (2.000-2.500 Hz) reducen la impedancia entre los electrodos y la piel, aumentando el grado de confort. Sin embargo, el período refractario (tiempo que tarda el músculo o el nervio en poder responder a un nuevo estímulo)⁸² del nervio en determinados grupos musculares es lo suficientemente corto para que una frecuencia de 2500 Hz produzca el fenómeno fisiológico conocido como Wedensky inhibition. Este fenómeno supone una pérdida de intensidad en la transmisión neuromuscular y ocasiona una disminución de la fuerza de contracción. Todo esto denota la importancia de prefijar adecuadamente la frecuencia de estimulación para conseguir contracciones máximas en la musculatura esquelética durante el entrenamiento. De forma general, para que cualquier músculo desarrolle su máxima fuerza, la frecuencia de estimulación debe estar comprendida entre 50 y 120 Hz.

⁸² Hainaut K, Duchateau J (1992). Neuromuscular electrical stimulation and voluntary exercise Sports Med, 14. Pg. 100-113.

5.2.4. Tiempo de Contracción

Es el tiempo durante el cual se mantienen los impulsos eléctricos a una determinada frecuencia y se expresa en segundos (s).⁸³ Las primeras corrientes que se utilizaron para el entrenamiento de fuerza con EENM, las corrientes rusas, utilizaban tiempos de contracción de 10 s. Actualmente, los tiempos de contracción utilizados con EENM son bastante inferiores, debido principalmente a la búsqueda de la especificidad de las contracciones entre el entrenamiento y los gestos deportivos o los test de valoración realizados. La mayoría de los aparatos del mercado no permiten que estos tiempos de contracción se equiparen. La razón radica en que el tiempo de contracción se descompone en tres fases: un tiempo de subida de la intensidad eléctrica (rise time), un tiempo durante el cual se mantiene la intensidad y un tiempo de bajada (fall time).

La duración de cada una de estas fases hace que las contracciones con EENM sean bastante inespecíficas para mejorar la fuerza muscular en determinadas disciplinas deportivas donde las acciones de fuerza tienen una duración menor. Aunque los tiempos de subida y de bajada son necesarios porque hacen que la corriente se tolere mejor y disminuya el riesgo de lesión durante el entrenamiento, no se ha publicado ningún estudio científico sobre estos parámetros.

5.2.5 Tiempo de reposo

Es el tiempo que transcurre entre cada dos contracciones consecutivas (s), durante el cual el músculo no se estimula o se le aplica una corriente de baja frecuencia (< 10 Hz).⁸⁴

⁸³ Abardia F, Medina D. (2004). Estar en forma con la electroestimulación neuromuscular. un estudio sobre las posibles aplicaciones de la electroestimulación. Palencia: Asociación Cultural Cuerpo, Educación y Motricidad

⁸⁴ Basas, A. (2001). "Metodología de la electroestimulación en el deporte". Revista Fisioterapia (23); pg. 36-47.

Los autores rusos (Kots y Xvilon, 1971) observaron que al aplicar corrientes de 10 s de contracción, cuando los tiempos de reposo eran inferiores a 30 s, la fuerza desarrollada por una segunda contracción era menor a la anterior. Posteriormente reflejaron que, al aplicar 10 contracciones consecutivas de 10 s cada una, solamente cuando se utilizaban tiempos de reposo de 50 s la fuerza producida por las últimas contracciones se mantenía respecto a las primeras. Esta es la razón por la cual las pioneras corrientes rusas o corrientes de Kots consistían en 10 contracciones de 10 s de contracción y 50 s de reposo.⁸⁵

Cuando se han utilizado tiempos de contracción inferiores (1 s), se ha observado que el tiempo de reposo debe ser por lo menos igual al doble del tiempo de contracción para que la fuerza desarrollada por una serie de contracciones repetidas no disminuya excesivamente. El tiempo de reposo determina el sistema energético utilizado y los depósitos de energía disponibles para cada contracción. Si el tiempo de reposo es demasiado corto, se produce una mayor fatiga durante el período de estimulación, posiblemente como resultado de una mayor acidosis intracelular y por la escasa capacidad para resintetizar los fosfatos de alta energía en ese tiempo.

Basándose en esta circunstancia, uno de los parámetros más importantes que se debe configurar adecuadamente antes del entrenamiento es la relación entre el tiempo de contracción y el tiempo total de un ciclo contracción-reposo, denominado ciclo útil, que se expresa como un porcentaje. Así, una corriente que aplique contracciones de 10 y 40 s de relajación tiene un ciclo útil del 20%. Esta relación entre ambos tiempos puede expresarse mediante el on-off ratio, (Que se define como la relación entre el tiempo de contracción y el tiempo de reposo en una corriente y se expresa como una razón simplificada. En el ejemplo anterior, el on-off ratio es 1:4. El ciclo útil debe ser aquel que minimice los efectos de la fatiga. Algunos estudios han propuesto que el ciclo útil óptimo con EENM es del 20% que debería incrementarse gradualmente con la disminución de la fatiga; sin

⁸⁵ Kots, L. Xvilon Jk.(1971) Las técnicas de alomgamento estático e por facilitação Neuromuscular Propioceptiva no desenvolvimento da flexibilidade em jogadores de futsal. Universidade Federal de Santa Maria RS. Brasil. Pg 321

embargo, cuando las frecuencias de estimulación son muy elevadas. 50 Hz), este parámetro debe ser menor a fin de permitir a la musculatura recuperarse adecuadamente para cada contracción.⁸⁶

El ciclo útil de estipularse en función de los objetivos que se persigan con el entrenamiento. Así, cuando el objetivo del entrenamiento sea producir una elevada fatiga intramuscular, debería utilizarse un ciclo útil elevado (-50% mientras que si la producción de fuerza es el factor importante que hay que tener en cuenta (como en el caso de la rehabilitación o del entrenamiento), debería utilizarse un ciclo útil reducido (del 10 al 20%) a fin de desarrollar la máxima fuerza posible en cada contracción.

5.2.6 Intensidad o amplitud del impulso eléctrico

La intensidad se identifica con la altura de la onda. Algunos equipos de electroestimulación gradúan esta intensidad en milivoltios (mV), si bien lo más normal es que se haga en miliamperios (mA). En el cuerpo humano la relación entre ambos conceptos es la impedancia o resistencia que ofrecen los diferentes tejidos al paso de la corriente eléctrica (Ley de Ohm). Como se ha comentado con anterioridad, aplicar la EENM e ir aumentando la intensidad de la corriente se van superando cuatro umbrales: sensitivo (cuando se nota la corriente), motor (cuando se aprecia movimiento), dolor (cuando empieza a resultar muy desagradable la sensación de la corriente) y máximo dolor (cuando no puede subir más la intensidad por el sufrimiento del sujeto). De forma general los hombres toleran más intensidad que las mujeres y los sujetos los entrenados más que los no entrenados. No obstante, si la intensidad tolerada por el músculo se pondera respecto a la cantidad de masa muscular de cada sujeto, desaparecen las diferencias respecto al género y al nivel de entrenamiento. Además, ha observado que, pese a que los sujetos entrenados toleren más intensidad que los no entrenados, la

⁸⁶ Maya, J. (2001). "Potenciación y Elongación eléctrica". IX Jornadas Nacionales de Fisioterapia en el Deporte. Murcia.

fuerza relativa generada por la musculatura al ser estimulada es similar en ambos grupos. Se puede afirmar que dentro de una misma sesión de entrenamiento, cuanto mayor intensidad de corriente se administra a la musculatura mayor es la fuerza desarrollada. Aunque se ha expuesto que la fuerza de las contracciones producidas por la EENM es proporcional a la intensidad de estimulación, no existe una correlación entre la intensidad administrada y las modificaciones obtenidas en la fuerza muscular tras un estiramiento. Sin embargo, existe una correlación directa entre el momento de fuerza producida por la EENM y la ganancia de fuerza. Por esta razón se ha establecido que el elemento determinante de la eficacia en un entrenamiento con EENM no es la intensidad de corriente, sino la respuesta provocada, lo cual implica que la carga de trabajo no puede ser fijada a priori como en las contracciones voluntarias. Así, cuando se pretende prefijar una determinada carga de entrenamiento, hay que basarse en la fuerza producida por la contracción (respuesta producida) y no en la intensidad de corriente (estimulo administrado). Se ha sugerido que la intensidad mínima que debe tolerar una persona para que la EENM produzca incremento en la fuerza debe ser la que desarrolle, como mínimo, el 35% de la MCV.

El principal problema a la hora de entrenar con EENM es que no se suele contar con los medios necesarios que permitan cuantificar la fuerza desarrollada en cada contracción. Para que la EENM suponga un estímulo suficiente y sea efectiva como método de entrenamiento, sobre todo en sujetos entrenados, es necesario (sufrir). Este hecho hace que el entrenamiento con EENM se aleje del término gimnasia pasiva o de lo que comúnmente muestran los anuncios televisivos.

En diversos estudios se han observado que los sujetos toleran progresivamente más intensidad de corriente durante una sesión de entrenamiento con EENM. Esto implica que no se puede acabar la sesión con la misma intensidad con la que se comenzó, sino que se debe aumentar en cada una de las contracciones por dos motivos:

1. Para ajustar la intensidad de corriente a los niveles de máxima tolerancia (umbral de máximo dolor) de cada sujeto.

2. Porque las fibras estimuladas debajo de los electrodos se van fatigando y deberán reclutarse fibras más distantes de los electrodos para mantener la fuerza de la contracción. Además, los sujetos toleraran mayores niveles de intensidad si son animados verbalmente e irán aumentando su tolerancia a la intensidad eléctrica durante cada entrenamiento.

Por último cuando en el entrenamiento con EENM se comienza administrando la máxima intensidad tolerable por cada sujeto, se ha descrito la aparición de dolor muscular tardío (agujetas) durante la primera semana de entrenamiento; estos síntomas desaparecen a partir de la segunda semana. También se ha especulado que el reflejo miotático inverso no puede actuar durante la aplicación de la EENM y puede intervenir entonces un mecanismo que intente inhibir por otra vía esa contracción mediante la activación de la musculatura antagonista, y como consecuencia de ello es probable padecer también agujetas en esta musculatura⁸⁷

5.3 Características del protocolo de entrenamiento

5.3.1 Angulo de trabajo

Actualmente la manera más extendida de entrenar con EENM es de forma isométrica. Las ventajas que presenta este tipo de trabajo respecto al entrenamiento dinámico son:

1. Menor riesgo de lesión.

⁸⁷ Pérez, J.L. y Álamo, D.D. (2001). "Estudio comparativo entre los estiramientos musculares mediante tensión activa y electroestimulación". Revista Fisioterapia (23); pg. 10-14.

2. Mayor control de la carga de entrenamiento, principalmente porque es posible cuantificar la intensidad de cada contracción en función de una MCV.

Por el contrario, la principal desventaja de esta forma de entrenamiento es la falta de especificidad entre las condiciones de entrenamiento y las utilizadas en la práctica deportiva. Al entrenarse habitualmente de forma isométrica, un aspecto esencial al utilizar la EENM es el ángulo en el que deben permanecer las articulaciones durante cada sesión de trabajo, que influye en la intensidad de corriente que ese músculo puede tolerar. Apenas existen estudios que hayan analizado cuales son los ángulos articulares óptimos de entrenamiento para cada grupo muscular, así como cual es la secuencia idónea de combinación de ángulos dentro de un entrenamiento con EENM.

El trabajo empírico de Abardía y Medina (2004) es la única referencia bibliográfica que ha indagado en esta problemática. En el músculo cuádriceps se ha sugerido que el ángulo óptimo de la articulación de la rodilla para entrenar con EENM es de 60° de flexión (considerando 0° la extensión completa) debido a la capacidad de la musculatura para generar fuerzas concéntricas, isométricas y excéntricas en ese estado de acortamiento y debido a su enorme fiabilidad. Además, este ángulo de trabajo es el más utilizado en el entrenamiento del cuádriceps.⁸⁸

5.3.2 Ubicación de los electrodos y punto motor

5.3.3 Grupo muscular estimulado

El cuádriceps es el grupo muscular por excelencia para utilizar entrenamiento con EENM. Este grupo es el elegido por la mayoría de los estudios científicos, quizás por ser el que más demanda los métodos de fortalecimiento o por ser uno de los que mejor se adapta a este método de entrenamiento.

⁸⁸ Abardía F, Medina D. (2004). Estar en forma con la electroestimulación neuromuscular. un estudio sobre las posibles aplicaciones de la electroestimulación. Palencia: Asociación Cultural Cuerpo, Educación y Motricidad. Pg. 109

Independientemente del músculo o grupo muscular elegido para entrenar con EENM, siempre se debe tener en cuenta que pese a que una corriente determinada pueda suponer amplios beneficios en un músculo, no tiene por que producir esos mismos beneficios en otros músculos diferentes. A la hora de electroestimular un músculo o grupo muscular en concreto, también debe tenerse en cuenta la posible activación de la musculatura antagonista. Así, cuando se trabaja con niveles de intensidad máximos se puede producir una coactivación inconsciente de la musculatura antagonista lo que reduce la fuerza total generada por la musculatura antagonista. Esta activación de la musculatura antagonista es inevitable cuando la EENM se aplica de forma isométrica sin fijar los segmentos corporales implicados en la contracción.

La musculatura isquiotibial, siendo un grupo muscular de la postura tiene una tendencia al acortamiento ya sea por la falta de estiramiento y las contracturas que afectaran al deportista. Estos músculos son más resistentes a la fatiga, tienen un umbral más bajo y se atrofian lentamente.⁸⁹

Desde el punto de vista estático, el acortamiento provocara un descenso en el isquion con una retroversión, disminución del ángulo lumbosacro, rectificación de la lordosis lumbar y un desplazamiento hacia delante del eje de gravedad con lo que nos llevara a un aumento en la cifosis dorsal.

Desde el punto de vista dinámico el acortamiento de la musculatura isquiotibial puede producir una limitación de la flexión de la pelvis, que en el deportista compensara aumentando la flexión del raquis lumbar y dorsal, al momento en que realice movimientos de flexión de tronco. Por lo tanto la disminución de flexibilidad de la musculatura isquiotibial puede desencadenar dolores lumbares, dorsales, espondilosis, hernias discales, espondilolistesis,

⁸⁹ Sánchez L. (2004). La necesidad de los estiramientos y del trabajo de la flexibilidad. Disponible en: www.federremo.org. Mayo 10 del 2004

lesiones musculares e incluso favorece a la aparición de la tan temida Pubalgia en los futbolistas.

El realizar estiramientos mediante electroestimulación tiene una ventaja mayor al realizar solo estiramientos estáticos pasivos, ya que se contrae y trabaja el grupo agonista en una tensión activa, del grupo antagonista. La acción de la inhibición recíproca libera un transmisor inhibitorio en la médula espinal para reducir la actividad del músculo que se estira.

5.4 Efectos agudos de la electroestimulación neuromuscular sobre la función muscular

Diferentes estudios han analizado cual es la respuesta del cuerpo humano frente a la EENM durante una sesión de entrenamiento. En este sentido, en los siguientes apartados se muestran las conclusiones más importantes obtenidas en diferentes facetas, como el tipo de unidad, motrices reclutadas con EENM, el tipo de metabolismo demandado e influencia de este método de entrenamiento en el flujo sanguíneo y en fatiga.

5.4.1 Tipos de unidades motrices reclutadas

En el organismo el patrón de reclutamiento de unidades motrices durante gestos voluntarios se rige por el principio de Hennemann o principio del tamaño (Size Principle). Este principio postula que el SNC al ir reclutando unidades motrices comienza por las de menor tamaño (tipo II)⁹⁰

⁹⁰ Hamada T, Sasaki H, Hayashi T, Moritani T, Nakao K. (2003). Enhancement of whole body gl core uptake during and after human skeletal muscle low-frequency electrical sti mutation. J Appl Physiol, 94. Pg. 2107-2012.

Con EENM el orden de activación de las unidades motrices es diferente al que se produce en contracciones voluntarias. La EENM tiene una predisposición por reclutar las fibras rápidas.

Estudios basados en pruebas histoquímicas, electromiografía (EMG) y resonancia magnética nuclear afirman que con la utilización de frecuencias de corriente elevadas se pueden reclutar aisladamente las fibras tipo II. Esta circunstancia ha hecho que se describa un patrón de reclutamiento inverso producido por la EENM (Heyters et al., 1994). Los defensores de esta teoría argumentan que la EENM recluta en primer lugar las unidades motrices rápidas debido a la relación inversa entre el diámetro del axón y su umbral de excitabilidad; así, los axones de mayor diámetro son más fácilmente excitables.⁹¹

Con intensidades bajas de corrientes se reclutan preferentemente unidades motrices rápidas, mientras que cuando la intensidad de EENM es muy elevada se activan las unidades motrices lentas.

Sin embargo, Kubiak et al. (1987) defienden la opinión contraria al establecer que la EENM recluta preferentemente unidades motrices de tipo rápido siempre que la intensidad de estimulación produzca contracciones cercanas a la MCV, ya que son bajos niveles de intensidad se reclutan preferentemente las unidades motrices lentas⁹².

Una tercera opinión es aquella que defiende que las unidades motrices reclutadas con EENM dependen de la topografía muscular, mientras que en las contracciones voluntarias el orden de reclutamiento depende del tipo de unidades motrices.⁹³

⁹¹ Heyters M, Carpentier A, Duchateau J, Hainaut K. (1994). Twitch analysis as an approach w motor unit activation during electrical stimulation. Can J Appl Physiol 19. Pg. 461.

⁹² Kubiak RJ, Whitman KM, Johnston Rm. (1987). Change in the quadriceps femoris muscle strength using isometric exercise verssus electrical stimulations. Orthop Sports Phys 8. Pg 541

⁹³ Astrand, Rodall. (1997). Fisiología del trabajo físico. 3ª ed. Buenos Aires: Editorial Medica Panamericana. Pg. 65

Así, se ha sugerido que las unidades motrices reclutadas con EENM son aquellas que se encuentran más cerca de los electrodos. Dentro de esta última opinión, Feiereisen et al. (1997) opinan que la razón por la cual las unidades motrices rápidas se reclutan antes con la EENM es que se encuentran mayoritariamente en la capa más superficial de la musculatura.⁹⁴

5.4.2 Consumo energético

Parece que la EENM produce un mayor consumo energético, acumulación de lactato y consumo de oxígeno que el ejercicio voluntario de las mismas características. Las razones por las cuales sucede esto son varias. En primer lugar, la EENM produce una actividad contráctil continua y agotadora en el mismo grupo de unidades motrices durante toda la duración del ejercicio, mientras que el sistema nervioso regularmente adapta el reclutamiento de unidades motrices durante el esfuerzo. En segundo lugar, cuando se utilizan frecuencias de estimulación altas (> 50 Hz) se produce un mayor reclutamiento de unidades motrices tipo II a la vez que tipo I, lo que provoca un reclutamiento temporal supramáximo de estas unidades motrices. En tercer lugar, con EENM las unidades motrices se reclutan de manera sincrónica, mientras que lo hacen de forma asincrónica durante contracciones voluntarias.⁹⁵

5.4.3 Flujo sanguíneo

La EENM produce un aumento del flujo sanguíneo en las zonas próximas a los electrodos, observándose mayores incrementos del flujo sanguíneo mediante contracciones inducidas por EENM respecto a contracciones voluntarias. Esto puede ser a que las contracciones titánicas inducidas por la EENM producen un colapso de los capilares locales, reduciendo el aporte de oxígeno durante la contracción. Así, los metabolitos

⁹⁴ Feiereisen P. Hainaut K. (1997). Motor unit recruitment order during voluntary and electrically induced contractions in the tibialis anterior. Exp Brain Res 114- 117

⁹⁵ Díaz E. Cristian, Droguett A. Hernán, Henríquez P. Juan, Escobar C. (2002). Máximo. Musculatura Isquiotibial: Referencias Anatómicas, Sobreestiramiento y Flexibilidad. Revista Kinesiología. Chile, N° 67

liberados durante las contracciones producen progresivamente una vasodilatación local y un incremento en el flujo sanguíneo y aporte de oxígeno local durante el periodo entre contracciones. De la misma forma se ha observado que la combinación de EENM y contracciones voluntarias acelera el retorno venoso en mayor medida que las propias contracciones voluntarias.⁹⁶

5.4.4 Fatiga

Como consecuencia de la demanda metabólica y del particular reclutamiento de unidades motrices asociado a la EENM, aparece la fatiga. La fatiga se puede definir como una disminución en la producción de fuerza en presencia de un incremento en la percepción del esfuerzo.⁹⁷

Las causas de la fatiga se han asociado tradicionalmente a un origen periférico o central. La fatiga central se define como una reducción en el nivel de activación de la musculatura que causa una disminución de la producción de fuerza o de la tensión desarrollada. La fatiga periférica se define como una disminución en la capacidad de generar fuerza de la musculatura esquelética debida a un fallo en el potencial de acción, a un fallo del binomio excitación-contracción o a un daño en el mecanismo de los puentes cruzados en presencia de un creciente o invariable control neural. Así, la fatiga central se asocia con procesos acaecidos en la propia motoneurona, la médula espinal o los centros supraespinales y la fatiga periférica se refiere a los sucesos acontecidos en la unión neuromuscular o por debajo de ella.

Uno de los métodos mas utilizados para conocer a que nivel se ha producido la fatiga tras un determinado ejercicio estriba en la administración

⁹⁶ Fowles JR., Sale DG. MacDougall JD. (2000). *Reduced strength after passive stretch of the human plantarflexors*. J. Appl. Physiol. 89: 1179-1188.

⁹⁷ Hidalgo Edgardo C. (2004). *Técnicas de stretching para la kinesiología. La educación física y las artes del movimiento*. Universidad de Chile, Santiago de Chile.

de un estímulo eléctrico sobre el músculo o sobre su nervio motor, lo que induce una contracción muscular.

Una sesión de entrenamiento con EENM implica una disminución de la fuerza máxima voluntaria, la cual se asocia a mecanismos periféricos y centrales. El reflejo de Hoffman es un reflejo monosináptico producido cuando un estímulo eléctrico activa las fibras aferentes la. La *M-wave* es el potencial de acción de un músculo obtenido como respuesta a un estímulo eléctrico máximo aplicado sobre el tronco neural.⁹⁸

5.5 Efectos crónicos de la estimulación eléctrica neuromuscular sobre la función muscular

Los efectos de la EENM sobre el reclutamiento físico se han centrado en el análisis de algún aspecto de la condición física. Debemos analizar los efectos crónicos que produce este método de entrenamiento en diferentes facetas de la condición física

5.5.1 Estimulación eléctrica neuromuscular superpuesta sobre contracciones voluntarias

5.5.1.1 Fuerza isométrica

Está ampliamente documentada la eficacia de la EENM para incrementar la fuerza máxima isométrica (FMI) tras un periodo de entrenamiento.

Por ejemplo, vemos que en el estudio de Selkowitz (1985) el grupo experimental incremento su FMI un 44%, sin embargo el grupo control también incremento de manera significativa su FMI (18%). No obstante, sí

⁹⁸ Hutton. S. (1992). Neuromuscular basis of stretching exercises. 1ª ed. Oxford, UK: Blackwell Science; 29-38.

existen diferencias significativas entre los incrementos de cada uno de los grupos de entrenamiento, por lo que la EENM resultó efectiva como método de desarrollo de la fuerza. Estas observaciones muestran la importancia de controlar el grado de activación de la musculatura antagonista durante las sesiones de entrenamiento con EENM siempre que sea posible.⁹⁹

5.5.1.2 Fuerza dinámica

Igual que sucede con la FMI también ha sido ampliamente referenciado la eficacia que tiene la EENM para mejorar la fuerza máxima concéntrica y excéntrica a diferentes velocidades de contracción tras un período de entrenamiento con EENM. Especialmente, estas mejoras son más acentuadas bajo condiciones excéntricas y bajo condiciones concéntricas a elevadas velocidades.

5.5.2 EENM de baja frecuencia

La estimulación crónica de baja frecuencia (entre 10 y 20 Hz) se ha utilizado en numerosos estudios para estudiar las adaptaciones moleculares producidas como consecuencia de una conversión de unidades motrices rápidas en lentas. Esta transformación produce cambios en la expresión de las isoformas de varias proteínas miofibrilares (por ejemplo, las cadenas pesada y ligera de miosina, las subunidades de troponina, etc.). Además, esta estimulación crónica implica un cambio en las propiedades metabólicas como consecuencia de un aumento de la densidad capilar, del volumen mitocondrial, de la actividad de las enzimas oxidativas y del consumo máximo de oxígeno.

En deportistas la estimulación crónica de baja frecuencia parece tener un efecto positivo para retardar la aparición de la fatiga.

⁹⁹ Pérez, J.L. y Álamo, D.D. (2001). "Estudio comparativo entre los estiramientos musculares mediante tensión activa y electroestimulación". Revista Fisioterapia (23); 10

Al aumentar el volumen de entrenamiento con EENM de baja frecuencia no se producen mayores adaptaciones que con el protocolo anteriormente citado. Se puede decir que la estimulación crónica incrementa la capacidad oxidativa de la musculatura esquelética pero disminuye la capacidad para generar fuerza tras tres o cuatro semanas de entrenamiento. Por lo tanto, la EENM crónica de baja frecuencia aumenta significativamente el potencial aeróbico oxidativo de la musculatura esquelética.

En el ámbito deportivo las corrientes de baja frecuencia son utilizadas principalmente por los atletas para la recuperación tras los entrenamientos o la competición. Se ha especulado que este tipo de corrientes acelera la recuperación debido a un mayor ritmo en la eliminación del ácido láctico, a un incremento en la cantidad de sangre que llega a la musculatura, a una mayor secreción de endorfinas o al efecto masajeo que producen este tipo de contracciones sobre la musculatura.

5.6 Estiramientos

La flexibilidad es considerada como una cualidad física importante, sin embargo no es planificada de la misma manera en los entrenamientos, ni en la competición, asumiendo pocos que quizás sea la cualidad más importante a la hora de su trabajo diario. Se configura como un elemento esencial para salvaguardar la integridad de los diferentes núcleos articulares y estructuras musculares, así como en algunos deportes, se considera un factor determinante del rendimiento. Requisito elemental para poder ejecutar movimientos en cantidad y calidad, su óptimo desarrollo afecta de forma muy positiva al desarrollo físico de los factores de rendimiento (fuerza, velocidad) y las capacidades deportivas (técnicas). Además tiene una influencia muy significativa sobre el desarrollo del entrenamiento y especialmente para prevenir lesiones de tipo muscular.

5.6.1. Definición

Tanto en el campo deportivo como en el clínico se acostumbra a emplear términos tales como flexibilidad, movilidad, elasticidad, estiramientos, movilidad articular, stretching, entre otros. La flexibilidad como cualidad básica es susceptible de ser mejorada con el entrenamiento y supone la unión de los conceptos de movilidad articular (posibilidad de movimiento en las articulaciones) y extensibilidad muscular (capacidad de elongación ante fuerzas de tracción y recuperación de la forma y longitud inicial tras haber cesado dichas fuerzas). El término de movilidad articular hace referencia tanto a los tejidos blandos como a la articulación en sí, y es definida como la capacidad que posee el sujeto de llevar a cabo movimientos en un determinado núcleo articular, interviniendo como factores clave, las condiciones morfológicas de la articulación y las propiedades elásticas de la musculatura y tejidos periarticulares directamente implicados en la acción. Weineck (1988) habla del término “movilidad” definiéndolo como “la capacidad y cualidad que el deportista tiene, para poder ejecutar movimientos de gran amplitud articular por si mismo, o bajo la influencia de fuerzas externas”.

Por elasticidad se entiende la capacidad que posee un tejido para recuperar su forma original tras haber sido deformado por un estímulo de tracción. De esta manera, a la variación que experimenta el músculo tras la aplicación de una fuerza deformante en tracción se denomina estiramiento muscular y, atendiendo a la naturaleza del mismo, los tejidos responderán de forma variable siguiendo el trazado de una curva tensión / deformación. De esta forma, el efecto resultante de las fuerzas de tracción generará una elongación en la musculatura y tejidos de envoltorio musculares y articulares, siendo ésta una cualidad propia de dichos tejidos.

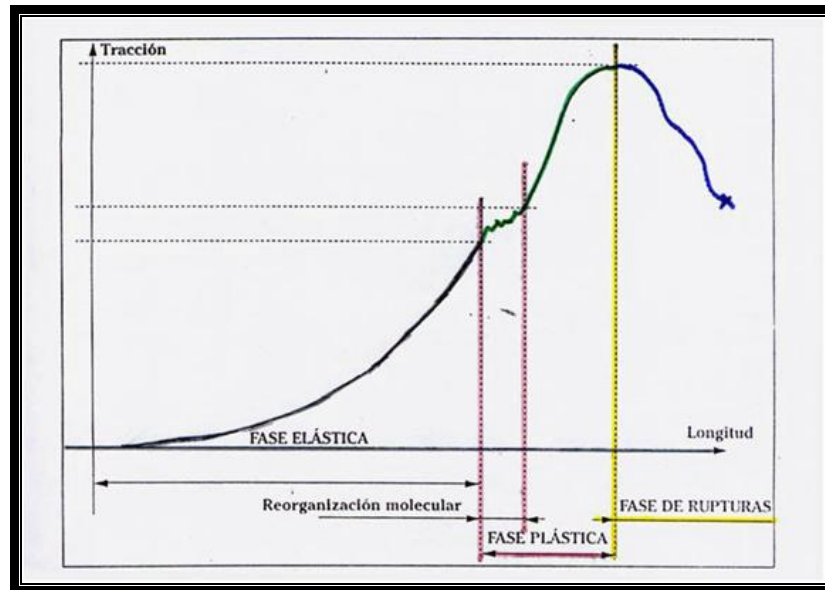


Figura 5.6.1. Curva de Tensión / deformación en la tracción de un cuerpo homogéneo.

Dependiendo de su naturaleza histológica, cada tejido posee unas propiedades concretas de elongación que van a depender de la mayor o menor presencia de colágeno y/o elastina en sus fibras.

Estructura	% más alto de colágeno o elastina	% Resistencia total al movimiento pasivo
Tendón	Colágeno	10%
Ligamento	Colágeno - Elastina	47%
Fascias	Elastina	41%

Tabla 5.6.1. Resistencia total al movimiento pasivo de las distintas estructuras.

5.6. 2. Factores de los que depende

Para realizar un correcto trabajo de flexibilidad es aconsejable conocer los factores que influyen de forma directa o indirecta en su desarrollo, los cuales deberán ser tenidos en cuenta y saber utilizarlos para optimizar sus intervenciones. Se pueden clasificar en tres grupos:

a) Factores mecánicos o intrínsecos:

- Movilidad articular, características de los núcleos articulares.
- Propiedades mecánicas y dinámicas de los tejidos blandos.
- Tejidos conjuntivos densos.
- Elongación Tendino – Músculo – Ligamentosa.
- Estructura muscular.

b) Factores neurológicos:

- Actividad de receptores propioceptivos.
- Función Reticular: Hipotálamo y rinoencefalo, médula y aparato vestibular.

c) Factores extrínsecos:

- Sexo.
- Edad.
- Costumbres.
- Temperatura corporal.

5.6.3. Estiramiento Pasivo

En el estiramiento pasivo, el individuo no hace ninguna contribución o contracción activa, y el movimiento es realizado por un agente externo responsable del estiramiento. Este agente externo puede ser un compañero (asistido), el propio sujeto (autoasistido), o bien cualquier instrumento o aparato (mesa, muro, banco, espaldera, elementos de tracción, etc.). Por medio del estiramiento pasivo se puede conseguir elongar la musculatura hasta los límites fisiológicos (un 150% de la longitud de reposo). Así, las técnicas pasivas, prudentemente ejecutadas, pueden otorgar resultados rápidos y satisfactorios

Músculo	Acción fisiológica	Acción para el estiramiento
Bíceps femoral	1.- Cabeza larga: extensión de la cadera. 2.- Ambas cabezas: flexión de rodilla y rotación externa con la rodilla flexionada.	1.- Cabeza larga: flexión de la cadera. 2.- Ambas cabezas: extensión de rodilla y rotación interna con la rodilla flexionada
Semimembranoso. y Semitendinoso	1.- Extensión de la cadera. 2.- Flexión de rodilla y rotación interna con la rodilla flexionada.	1.- Flexión de la cadera. 2.- Extensión de rodilla y Rotación externa con la rodilla Flexionada.

Tabla 5.6.3.- Acción de la musculatura isquiosural y movimiento a realizar para su estiramiento.

Músculo Acción Estiramiento Pasivo

Mecanismos. Toda fuerza que no proviene de la musculatura antagonista al músculo que queremos estirar. La fuerza puede ser por acción de la gravedad, de otra persona, de autotracción pasiva o de mecanoterapia.

Particularidades. A destacar:

- No existe actividad muscular, luego no existe fatiga muscular.
- No existen problemas de irrigación.
- Más analíticos y precisos.
- Obtenemos mayor alargamiento y tensión.
- Mayor duración del tiempo de estiramiento: 1-2 minutos.
- Pueden ser peligrosos, porque no existe inhibición del antagonista.

A continuación se detalla la metodología adecuada para realizar un entrenamiento de la flexibilidad basada en la evidencia científica. Se engloba el contenido en diferentes aspectos como el tipo, la intensidad, el tiempo y la frecuencia:

- Tipo: Existen varias formas de elongar el músculo como son el estiramiento pasivo, el estiramiento activo, el estiramiento de “rebotes” o balístico y el estiramiento FNP (facilitación neuromuscular propioceptiva). Se ha demostrado científicamente grandes beneficios con el estiramiento pasivo. El único método que se desaconseja es el estiramiento balístico por su alto riesgo de lesión.

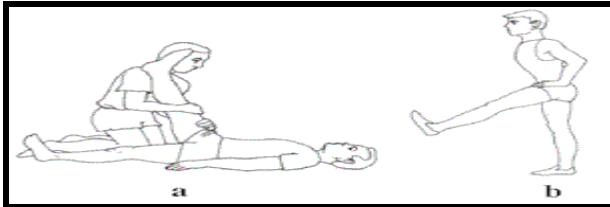

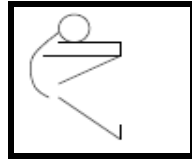
- Intensidad: Realizar estiramientos puede ser perjudicial si se realizan a una intensidad que no es la adecuada, sobre todo a nivel de la estructura músculo-tendinosa. La medición de la intensidad de un estiramiento se determina a través de la sensación subjetiva del sujeto durante la realización del estiramiento. La intensidad apropiada se debe alcanzar de forma lenta y continua, recordando siempre no sobrepasar los límites de dolor.

- Tiempo: La duración de una sesión de flexibilidad, dependerá principalmente de la cantidad de grupos musculares que se estiren en la sesión y de la técnica empleada. La recomendación clave para la realización de los estiramientos es que el debe ser mantenido entre 1 y 2 minutos. Estiramientos de menos duración no producirán un aumento en la flexibilidad. Respecto a las repeticiones, el ACSM (American College of Sports Medicine) recomienda de 3 a 5 repeticiones por cada serie de estiramiento de un grupo muscular.

- Frecuencia: todo lo que no se practica se pierde, y un buen ejemplo lo encontramos en la flexibilidad. Es una cualidad que experimenta un claro detrimento desde que nacemos hasta la vejez. Después de una semana sin entrenar, podemos observar una pérdida en nuestra flexibilidad. Aún así, es una de las cualidades que más rápido se mejora o recupera. No existe mucha bibliografía científica respecto a la frecuencia de entrenamiento, pero se recomienda que al menos se realicen desde 3 sesiones a la semana, hasta lo realmente efectivo que sería todos los días.

5.6.3.1. Técnica del estiramiento pasivo

Los estiramientos de la musculatura isquiosural se pueden realizar en diferentes posiciones: decúbito supino (a), en bipedestación (b) y en sedentación, en el suelo (c)

		
1. (a) flexión de cadera con pierna extendida con el apoyo del fisioterapeuta..... (b) Flexión de cadera con pierna extendida sobre una grada.	2.(c) Las dos rodillas al frente extendidas con la ayuda de la Thera Band	3. (c) Las dos rodillas extendidas separadas con la ayuda del Thera Band a un pie.

En el primer caso (a) se realizará una flexión de cadera, contraindicada en caso de irritación radicular (lumbociáticas o cialgias). Cuando se realicen estiramientos desde decúbito supino, se debe utilizar un soporte lumbar que evite la basculación de la pelvis (retroversión), así como para estandarizar el grado de basculación pélvica y el de la lordosis lumbar . Si no se dispone de un dispositivo se puede utilizar una toalla o las manos del deportista, que se colocarán bajo el raquis lumbar, ayudando a percibir el inicio de la retroversión pélvica y por tanto, a detener el estiramiento.

En bipedestación (b) es conveniente no elevar la pierna excesivamente porque deriva en retroversión pélvica e inversión lumbar. La altura donde se coloca el pie debe permitir que el pie de apoyo se dirija hacia delante, la rodilla esté extendida, la pelvis en posición neutra o ligera anteversión y su eje transversal perpendicular a la pierna que se estira. Por último el raquis debe conservar sus curvaturas fisiológicas.

En sedentación (c), aquellas personas con cortedad isquiosural marcada se disponen con una evidente inversión lumbar y si realizan un

movimiento de flexión del tronco, aumentan considerablemente su cifosis dorsal

5.6.3.2 Acciones implicadas en los estiramientos

El desarrollo de la elasticidad muscular es un proceso lento ya que merced a la estimulación del reflejo miotático, el músculo se resiste activamente al estiramiento. La magnitud de la contracción que se opone al estiramiento es proporcional a la magnitud del mismo. Conviene saber que un estiramiento rápido e intenso favorece la deformación elástica, recuperable, del tejido. Ello puede convenir a un saltador o a un lanzador para obtener un impulso más potente durante la ejecución del gesto técnico, pero no es recomendable para mejorar la elasticidad. Para ello es mejor aplicar una fuerza débil y de larga duración que intensificará la deformación plástica. Por otro lado, la aplicación de una fuerza elevada tiene un grado mayor de riesgo de provocar una posible ruptura del tejido. La temperatura tiene una influencia importante sobre el comportamiento mecánico del tejido conjuntivo bajo una carga de tensión. Mientras se eleva la temperatura del tejido, decrece la rigidez y se incrementa la extensibilidad. Ello está relacionado con el aumento progresivo de las propiedades de fluidez viscosa del colágeno cuando es calentado, lo cual aumenta su tolerancia al estiramiento y reduce la posibilidad de sufrir lesiones estructurales. Debemos añadir, al respecto, que a la luz de las informaciones que poseemos, constituye un error plantear calentamientos basándose en los estiramientos, ya que éstos por sí solos no elevan la temperatura corporal lo suficiente para hacer frente a demandas físicas elevadas. Así mismo, como ya se ha dicho, estirar un músculo frío puede dañarlo seriamente. Otro dato interesante es el hecho de que un músculo que ha sido estirado, previo calentamiento, y que se deja enfriar mientras se mantiene la fuerza tensora de estiramiento, mantiene un grado significativo de deformación plástica en comparación con la retirada de la fuerza tensora mientras su temperatura es elevada. Evidentemente, el enfriamiento del tejido antes de la liberación de la tensión permite a la microestructura colágeno reestabilizarse más en relación con su nueva longitud estirada.

Acción mecánica

Destacan las siguientes características:

- Alargamiento de las partes blandas.
- Liberación de adherencias.
- Reorientación de fibras de colágeno.
- Movimiento de los fluidos intersticiales.
- Facilitan el retorno venoso.

Acción térmica

La tensión aumenta su temperatura y, por lo tanto, el músculo estará más preparado para su estiramiento durante la actividad muscular, lo que disminuye el riesgo de lesión.

Acción neurológica

El estiramiento de las fibras musculares provoca la estimulación de fibras nerviosas para mandar información, lo que hace que se entrene la coordinación. Cuando hacemos un ejercicio por primera vez no estamos muy seguros, pero cuanto más lo hacemos, más nos inhibimos y lo hacemos con más seguridad, ya que hemos entrenado nuestros circuitos nerviosos. Al estimular los grupos musculares agonistas y antagonistas estimulamos los propioceptores y mejoramos la coordinación del gesto y el control muscular y articular, evitando las lesiones. El estiramiento no mejora la fuerza del músculo, pero sí el rendimiento muscular, ya que mejora el tiempo de reacción.

5.7 Biomecánica de la musculatura Isquiotibial

Los músculos isquiosurales se originan en la apófisis isquiática del coxal, y desde ahí se insertan en la tibia y en el peroné. Están formados por el bíceps crural, semimembranoso y semitendinoso, todos biarticulares a excepción de la cabeza corta del bíceps. En el plano sagital su acción es la

flexión de rodilla y la extensión de cadera en valores que se modifican en función de la posición de la rodilla. Sobre la pelvis son retroversores, actuando sinérgicamente con el glúteo mayor fundamentalmente, y extensores indirectos de la columna por las implicaciones que su retracción o acortamiento pueden producir sobre el plano sagital de la columna vertebral. A nivel de la rodilla se comportan como ligamentos activos al limitar las rotaciones, y poseen una función sinergista con el ligamento cruzado anterior para prevenir el desplazamiento anterior de la tibia.¹⁰⁰

Su condición biarticular, su carácter tónico-postural, su diversidad de funciones y su alto porcentaje de fibras tipo II favorecen su acortamiento que, con frecuencia, se asocia a una disminución de la capacidad de la movilidad coxofemoral. Cuando su extensibilidad es inadecuada, todas sus funciones se ven mermadas, pudiendo ocasionar el síndrome de isquiosurales cortos, una vez que la cortedad de la musculatura ha ocasionado alteraciones sobre la pelvis y el raquis lumbar.

Diversas investigaciones apuntan que la disminución de la extensibilidad de la musculatura isquiosural y la consecuente cortedad puede ser responsable de dolor lumbar, hipercifosis dorsal, inversiones del raquis lumbar, espondilólisis o espondilolistesis, hernias discales, lesiones musculares e incluso puede favorecer la aparición de una pubalgia. Las repercusiones que este síndrome puede originar son de tipo estático y dinámico.¹⁰¹

Desde el punto de vista estático, el acortamiento provocará un descenso del isquión con una basculación posterior de la pelvis (retroversión), una disminución del ángulo lumbosacro, la rectificación de la lordosis lumbar y un

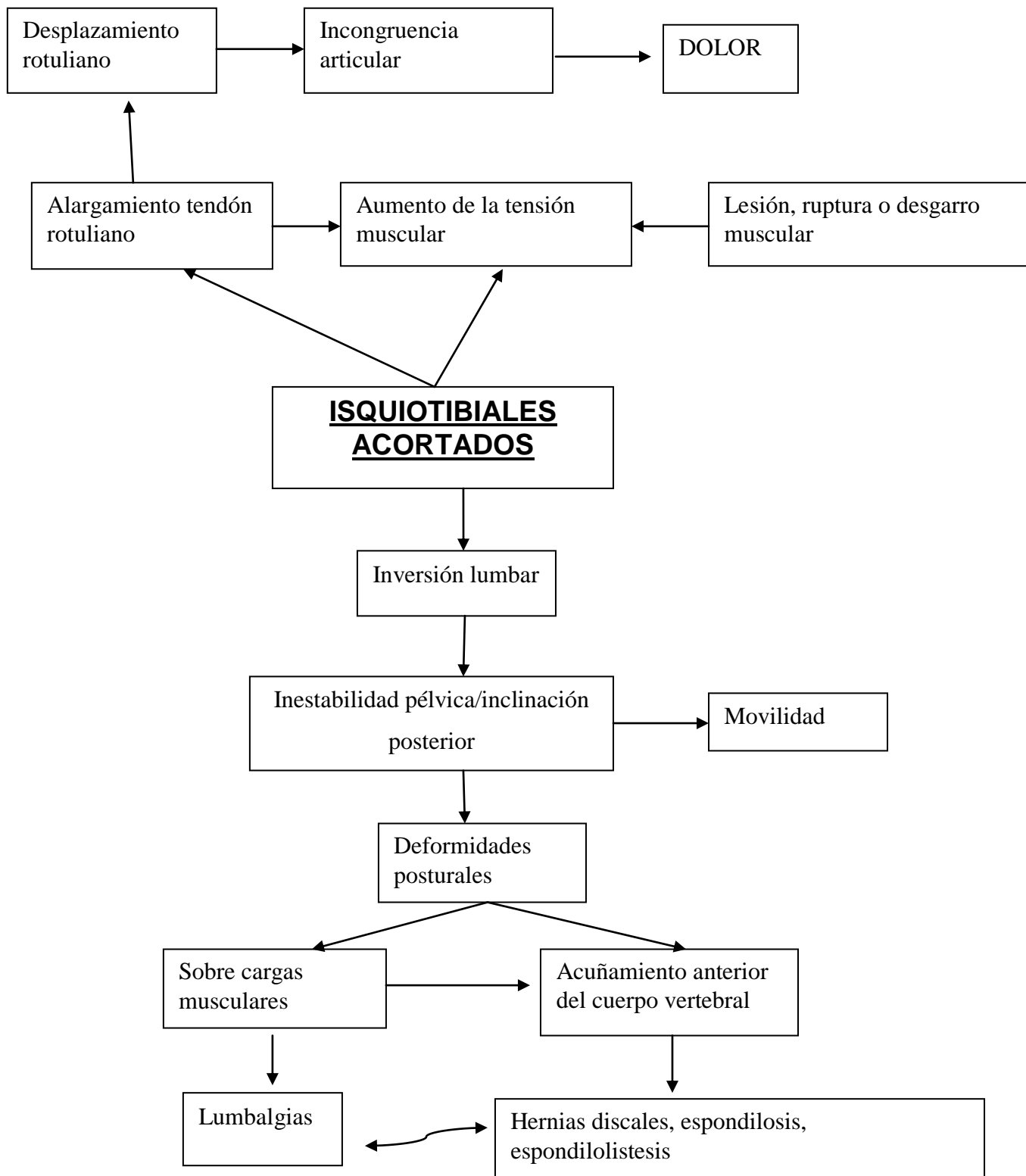
¹⁰⁰ Rodríguez, P L.; Santoja, F. (2000). " *Los estiramientos en la práctica físico deportiva*". Selección 9 (4): 191-205

¹⁰¹ Perelló, I. (2004). " *Estudio de la musculatura de la región posterior del muslo tras programa de estiramientos*". Tesis Doctoral. Universidad de Valencia. Departamento de anatomía y embriología humana.

desplazamiento hacia delante del eje de gravedad con el consiguiente aumento de la cifosis dorsal.

A nivel dinámico, la cortedad de la musculatura isquiosural puede producir una limitación de la flexión de la pelvis, que el deportista compensará aumentando la flexión del raquis lumbar y dorsal, cuando realice movimientos de flexión de tronco.

La acción fisiológica de la musculatura isquiosural es la flexión de rodilla, la extensión de cadera y retroversión pélvica, por lo que para estirar dicha musculatura habrá que realizar una extensión de rodilla y una flexión de cadera disponiendo la pelvis en posición neutra o ligera anteversión que asegure una lordosis lumbar fisiológica.



ESQUEMA 5.7: CONSECUENCIAS DEL ACORTAMIENTO DE LOS ISQUIOTIBIALES

5.6.5 Evaluación de la Flexibilidad

Al igual que la fuerza muscular, la flexibilidad es específica para cada músculo, por lo tanto no se puede generalizar el resultado final de una prueba de flexibilidad para determinado músculo, como el indicativo de la flexibilidad general de un sujeto. La longitud de la musculatura isquiotibial es medida indirectamente a través de pruebas clínicas. Los métodos clínicos para valorar los isquiotibiales consisten en la elongación del músculo a sentido contrario a la acción que realiza dicho músculo. Existen diferentes test para valorar la extensibilidad de los isquiotibiales como los que mencionaremos a continuación:

- Los que están basados en medidas de recorrido articular (angulares) como son: ángulo poplíteo y de la elevación de la pierna recta.
- Las longitudinales (centimétricas) como es la de sit and reach test y de pie touch (manos pies sentado y de pie)

En este estudio nos basaremos sobre las medidas angulares ya que científicamente tienen mejores resultados. Las medidas centimétricas como el test sit-and-reach supone un movimiento corporal global y los resultados están influidos por algunos factores antropométricos, por la amplitud de movimiento de los diferentes núcleos articulares implicados, y por la disposición de la columna vertebral. En este sentido, Hoeger y Hopkins (1992) plantean que una persona con piernas largas y brazos proporcionalmente más cortos, tendría una desventaja estructural y lograría menor distancia que una persona con menor extensibilidad isquiosural que tuviera los miembros superiores proporcionalmente más largos que los miembros inferiores. Por todo esto diversos autores cuestionan su validez para la evaluación de la flexibilidad en isquiotibiales y zona baja de la espalda ya que hay que tomar en cuenta que un limitante es la basculación de la pelvis.¹⁰²

¹⁰² HOEGER, W. W. K., y HOPKINS, D. R. (1992). A comparison of the sit and reach and the modified sit and reach in the measurement of flexibility in women. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 63:191-195.

5.6.5.1 Medidas Angulares

5.6.5.1.1 Test del Ángulo Popliteo (AP)

La posición de partida es en decúbito supino sobre la camilla de exploración, con flexión de cadera y rodilla a 90 grados. El miembro inferior contrario debe mantenerse en una completa extensión, ya que si se mantiene en flexión se altera el ángulo pélvico femoral facilitando la extensión de la rodilla experimento. Durante la prueba el pie de la pierna experimento debe estar en posición neutra o relajada, anulando de esta manera la acción de los gemelos en la articulación de la rodilla.¹⁰³

El valor de la flexibilidad considerado normal para el ángulo poplíteo es de 180 grados de extensión de rodilla, en el eje formado entre el trocánter mayor, el cóndilo lateral de fémur y el maléolo lateral. De esta manera un grado de limitación en los isquiotibiales a tomarse cuenta será a partir de los 20 grados dividiendo de la siguiente manera:

- Grado leve: 0 -15 grados
- Grado moderado: 16 - 34 grados
- Grado severo: 35 a mas grados

Se tomara en cuenta en este estudio acortamientos desde los 20 grados, es decir de grado moderado a severo esto se lo hace por la edad de los pacientes que están entre los 18 a 25, una edad donde su flexibilidad estará afectada según sus hábitos.

Hacemos coincidir el centro del goniómetro (de brazos largos) con el eje de movimiento de la rodilla Desde esta situación procedemos a realizar una extensión de la rodilla, manteniendo flexionada la cadera y evitando la basculación de la pelvis, hasta conseguir la máxima extensión posible, momento en el que se anotará la medición en grados.

¹⁰³ F. Santonja Medina, V. Ferrer López, I. Martínez González. (1995). Exploración clínica del síndrome de isquiosurales corto. Ortopedia y Deporte Vol 4. Pg. 81-91

El movimiento de la pierna durante el SLR y AP, puede ser realizado activamente, por el propio sujeto o pasivamente es decir por el profesional que este valorando. De acuerdo a la literatura la cantidad de tensión debe ser aplicada o el punto final de extensión podrá ser definido cuando el sujeto evaluado refiera incomodidad, tensión sin dolor, ligera sensación de tirantez o bien cuando el sujeto sienta rigidez o resistencia al movimiento.

Tanto la evaluación de la amplitud articular como su cuantificación es de vital importancia para el diagnóstico, planificación y control de la evolución de los resultados de un tratamiento fisioterapéutico.

La goniometría es considerablemente utilizada en el ámbito de la fisioterapia y de investigaciones científicas, y fue descrita en la literatura en 1914. Es un instrumento fiable para medir ángulos de desplazamiento de las articulaciones, es decir, su amplitud. El goniómetro estándar o manual es un transportador de ángulos con dos brazos, un fijo que forma el cuerpo del goniómetro con el transportador, y un móvil unido al cuerpo con un remache. Durante la aplicación, se hace coincidir el eje del instrumento sobre el fulcro de la articulación y los brazos del goniómetro con los segmentos móviles de la misma.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

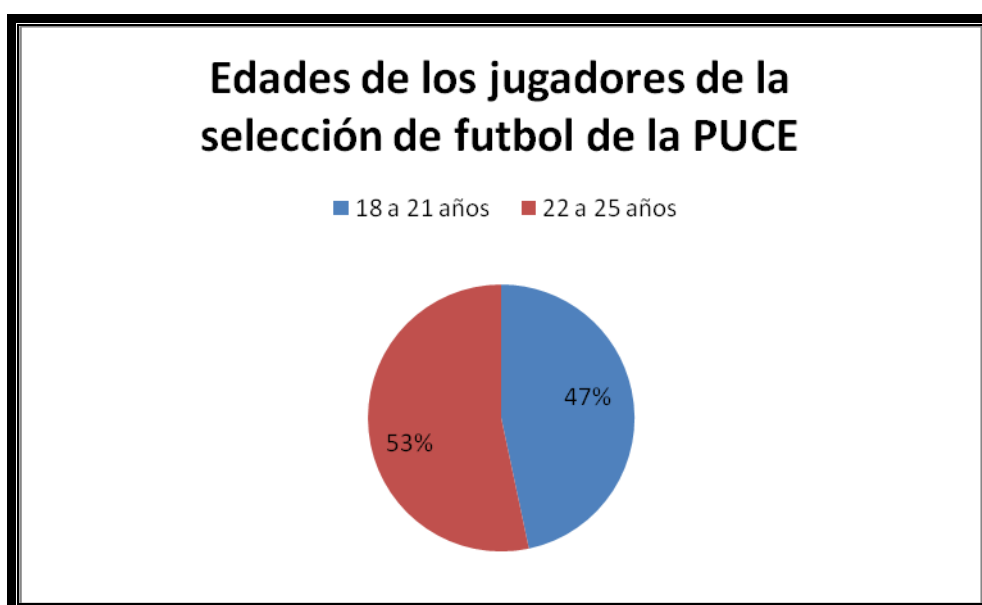
ENTREVISTA:

Datos de Filiación

Antes de realizar la evaluación inicial se le explica al jugador de fútbol de la PUCE en que consiste el trabajo y se le hizo firmar una información consentida, esta comienza con datos relevantes como son:

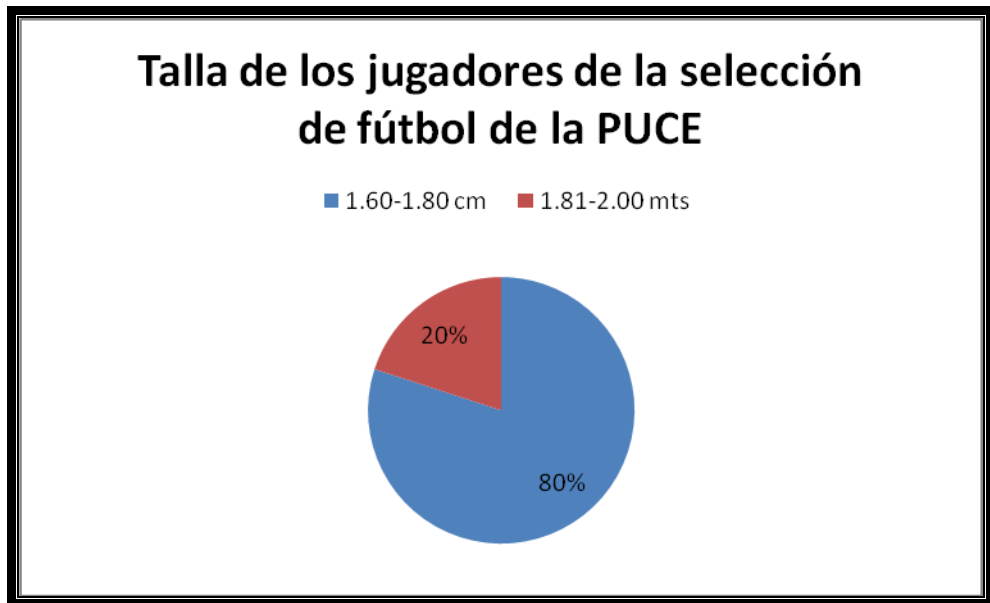
- Los deportistas fueron seleccionados en base a muestreo secuencial. El equipo de fútbol masculino de la PUCE está conformado por 22 deportistas, de los cuales 15 fueron tomados en cuenta para este estudio, 7 no cumplieron los criterios de inclusión. Entrenan 5 días a la semana (de lunes a jueves) de 5:00 pm hasta las 9:00 pm y corren en la pista de los chasquis como preparación física (los viernes de 3 a 7pm). Los deportistas de la selección de futbol de la PUCE entrenan alrededor de 20 horas a la semana. Los días sábados juegan oficialmente en el torneo amateur interuniversitario.

- Las edades que se tomaron en cuenta para este estudio fluctúan entre los 18 años hasta los 25 años. Los deportistas de la PUCE son estudiantes universitarios que les gusta el deporte. De los cuales 7 de los jugadores de la selección de fútbol de la PUCE se encuentra entre los 18 a los 21 años de edad, esto equivale al 53%, y de los 22 a los 25 años de edad, corresponden a 8 jugadores con un equivalente del 47%. Dándonos un promedio de edad de 21.6 años.

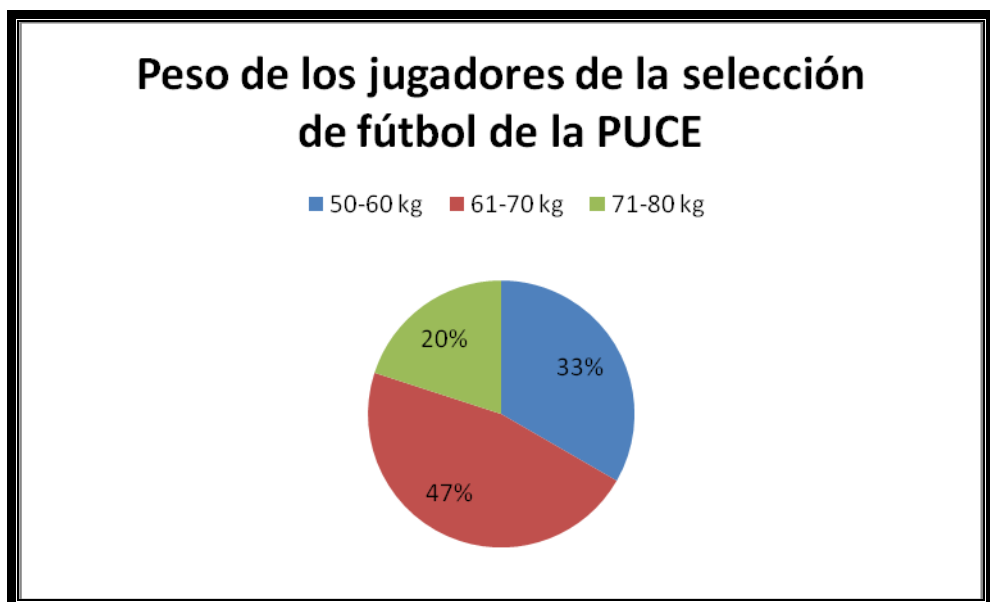


- Es muy posible que la talla no limite a los jugadores de fútbol en el rendimiento general, pero un mayor tamaño corporal absoluto favorecería a un futbolista en ciertas acciones individuales tales como el juego aéreo, técnica con el balón y/o cubrimiento del balón. La talla de los jugadores de la selección de fútbol de la PUCE es del 80%, que corresponde a 12 jugadores que miden de 1.60 a 1.80 cm y el 20% corresponde a 3 jugadores que va desde 1.81 cm a los 2.00 mts. La mayoría de los jugadores de la selección de fútbol de la PUCE evaluados posiblemente no hayan completado su desarrollo biológico total, pero queda claro que, el menor tamaño corporal podría ser un impedimento para algunos jugadores en determinadas posiciones dentro del campo de juego, para acceder a un mayor nivel de competencia. Pero cabe remarcar que no siempre el tamaño corporal del

jugador es proporcional al resultado deportivo, debido a la gran variabilidad en la composición corporal y al nivel de entrenamiento y/o técnica



- El peso de los jugadores de la selección de fútbol de la PUCE es del 33% corresponde a 5 jugadores de 50 a 60 kg, el 47% corresponde a 7 jugadores de los 61 a 70 kg y el 20% corresponde a 3 jugadores es de los 71 a 80 kg.



- La lateralidad de la mayoría de los futbolistas, presentan preferencias motoras establecidas desde la niñez para la realización de sus movimientos, por esta razón el 73% corresponde a 11 jugadores que son diestros, el 27% corresponde a 4 jugadores que son zurdos.

Bilbao y Oña (2000) consideran que la lateralidad puede entenderse como un conjunto de conductas, que se adquieren cada una de ellas de forma independiente, por un proceso particular de entrenamiento y aprendizaje, el volumen de práctica es un factor decisivo para el aprendizaje y la posterior integración de cualquier habilidad, incluyendo como tal la lateralidad y siendo considerada en todo momento como un aspecto dinámico de la motricidad humana. Desde un punto de vista práctico y funcional, se puede optimizar el rendimiento en la lateralidad no dominante sin que el entrenamiento pierda su equilibrio y multilateralidad, lo cual es básico para la progresión del deportista.

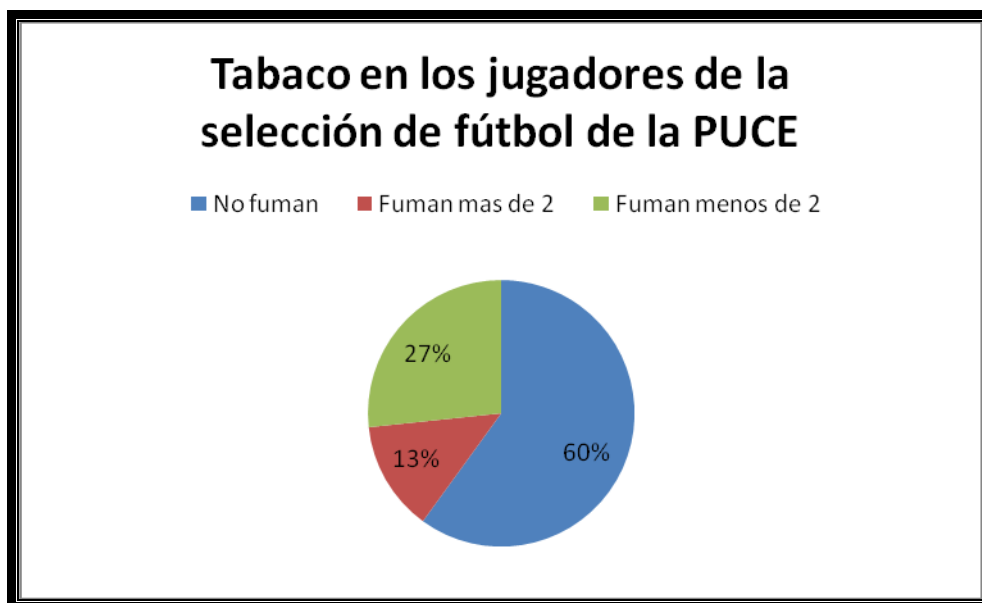


8.1.2 Antecedentes Clínicos

8.1.2.1 Hábitos de los jugadores de la selección de fútbol de la PUCE.

Los hábitos de vida saludables son favorecedores como medio de prevención de roturas o aceleración en los procesos de recuperación y readaptación al esfuerzo. Buena alimentación, descanso óptimo, no beber alcohol, no pasar muchas horas de pie, son factores que inciden sobre este proceso.

➤ **Tabaco en los deportistas de la selección de fútbol de la PUCE**



En la actividad deportiva es muy importante el estado físico, es un factor fundamental para la resistencia en el deporte. Este estudio nos demostró que el 60% de los jugadores no fuman, por cuidar su estado físico por mantener un buen nivel y rendimiento deportivo; El 13% fuman más de 2 cigarrillos al día , es una estadística donde vemos los efectos tóxicos del tabaco son multisistémico porque afecta prácticamente a todos los órganos y sistemas de nuestro cuerpo, estos deportista saben que su nivel físico disminuye a comparación del 76% de jugadores que no fuman, pero ellos

creen que al hacer más ejercicio es cuestión de tiempo el llevar a un mejor nivel, pero si esa adicción lo disminuye no lo podrán hacer; El 27% de los deportistas de la PUCE fuman menos de 2 cigarrillos al día, la mayor parte de las enfermedades asociadas al consumo de tabaco provocan enfermedades que, invariablemente limita el rendimiento físico en grados diferentes. Este hecho en realidad preocupa poco a la población, particularmente a los jóvenes

El tabaquismo es una causa común de enfermedades y muertes prematuras. Sin embargo, pocas veces se analiza el fenómeno desde la perspectiva de estar provocando daños inmediatos a la salud. No es frecuente que se asocie su consumo con efectos agudos en el rendimiento físico de los deportistas. De hecho existe la creencia popular de que el ejercicio elimina los efectos nocivos asociados al tabaquismo. Nada más alejado de la realidad. En aquellos individuos fumadores que hacen ejercicio, se observa un daño a su organismo, similar al que se observa en aquellos fumadores que no hacen ejercicio. Afecta sus sistemas cardiovascular y respiratorio con la misma intensidad con la que fuman. Sin embargo, una diferencia entre ellos radica en que los que hacen ejercicio, tienen una mejor condición física que los que fuman y no hacen ejercicio. No obstante, una vez que el daño progresa, y esto suele ocurrir en forma paralela al incremento en el grado de la adicción, los individuos que fuman abandonan el ejercicio.

La OMS advierte que su uso puede dañar seriamente la salud. De sobra conocidos son los efectos nocivos del consumo de tabaco para el organismo. La disminución de la capacidad pulmonar en un fumador habitual es obviamente constatable. Aparece la fatiga, mayor riesgo de afecciones respiratorias, tos, expectoraciones, pérdida de apetito, arritmias cardíacas, afecciones cardiovasculares. Los fumadores, además, tienen una tasa de mortalidad superior en un 70% a los no fumadores como consecuencia del desarrollo de distintas patologías.

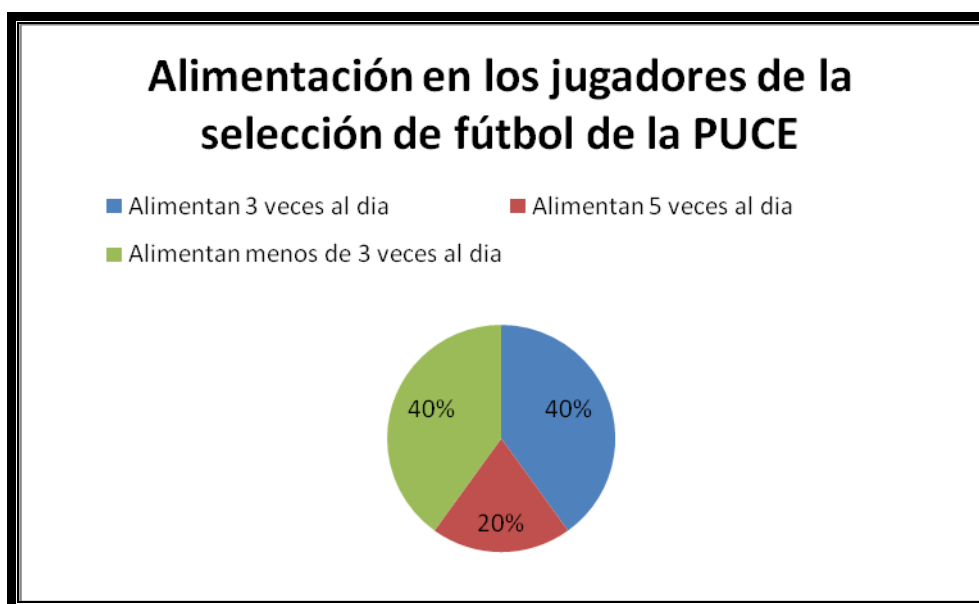
➤ **Alcohol en los deportistas de la selección de fútbol de la PUCE**



La peligrosa relación entre los futbolistas y el alcohol no es un tema nuevo. Desde hace muchos años, grandes estrellas de la pelota se vieron en la encrucijada de tener que elegir entre su carrera y una adicción difícil de superar. Según la FIFA el consumo de alcohol a menudo se relaciona íntimamente con el deporte y en especial con el fútbol. El alcohol influye en el metabolismo, el corazón y los vasos sanguíneos, en la capacidad para regular la temperatura del cuerpo, así como también en los músculos y los nervios en una forma que puede afectar el rendimiento en los ejercicios.

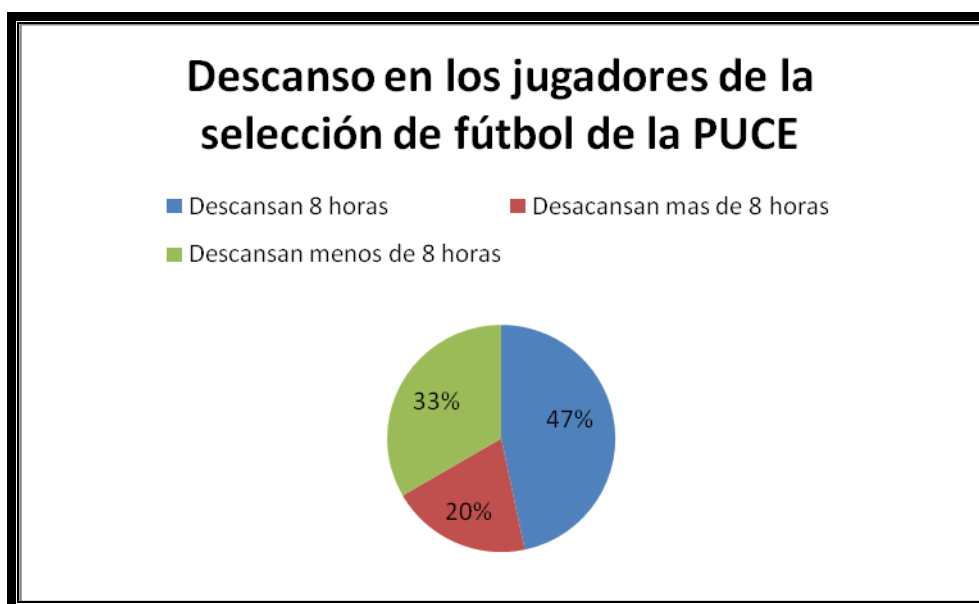
En los deportistas de la PUCE el alcohol es un factor no se puede dejar de lado el 67% corresponde a 10 jugadores que no toman, el 20% corresponde a 3 jugadores que toman menos de dos días a la semana y el 13% corresponde a 2 jugadores que toman más de dos días a la semana.

➤ **Alimentación en los deportistas de la selección de fútbol de la PUCE**



Cuando jugadores talentosos, motivados y bien entrenados se enfrentan en competencias futbolísticas, el margen entre la victoria y la derrota es pequeño. La atención al detalle puede representar una diferencia fundamental. La dieta afecta el rendimiento, los alimentos que elige consumir durante el entrenamiento y la competencia afectan el desempeño en ambas situaciones. El 40% corresponde a 6 jugadores que se alimentan tres veces al día, el otro 40% corresponde a 6 jugadores que se alimenta menos de tres veces al día y el 20% corresponde a 3 jugadores que se alimenta cinco veces al día. Una alimentación equilibrada contribuirá a que el futbolista se mantenga en un buen estado de salud y aproveche sus capacidades físicas al máximo. El nivel nutricional de todos los jugadores de la selección de fútbol de la PUCE que se los evaluó no se encuentran bajo un régimen nutricional a cargo de un profesional (Nutricionista). Seguramente nos hubiera aportado una enorme ayuda en la interpretación de los datos de este estudio.

➤ **Descanso en los deportistas de la selección de fútbol de la PUCE**



El descanso de un deportista es fundamental, pero en este caso los jugadores de la selección de fútbol de la PUCE tienen una variable adicional son estudiantes esto afecta en su descanso. El 47% corresponde a 7 jugadores que descansan ocho horas, el 33% corresponde a 5 jugadores que descansan menos de 8 horas y el 20% corresponde a 3 jugadores que descansan más de 8 horas. Es muy importante resaltar las cualidades del descanso, pues muchas personas creen que realizar ejercicio continuo es la mejor manera de estar en forma, debido a este error es bueno resaltar cosas como:

- El descanso permite al cuerpo disminuir la tensión muscular y articular, los cuales son elementos muy importantes para evitar la aparición de las molestas y dolorosas lesiones musculares.
- El descanso contribuye a que el músculo asimile más rápida y fácilmente el ejercicio.
- El descanso sirve en gran medida como ahorrador de energía, lo cual puede significar un mayor y mejor desempeño en una actividad cercana

Según la FIFA estos son las cuatro formas de recuperar a un futbolista mas eficaz:

1. **Alimentación:** Debe existir un balance entre las calorías que aporta la ración diaria y el gasto energético experimentado, además, incluir alimentos de los diferentes grupos (energéticos, plásticos y reguladores). Debe tenerse en cuenta el suministro de factores dietéticos antes de la arrancada, durante el evento y al concluir el mismo (hasta 15 minutos después es efectivo).

2. **Descanso activo:** El más efectivo, propone ejercicios de relajamiento de los músculos lo cual produce un incremento relativo de la circulación para el transporte del ácido láctico de los músculos a los lugares de eliminación. Siendo recomendables ejercicios cíclicos al día siguiente de las grandes cargas pues liquida más rápidamente el agotamiento.

3. **Descanso pasivo:** Sueño nocturno pues en la corteza cerebral se propaga una inhibición protectora que forma una regeneración de las células nerviosas, acostarse o sentarse entre los ejercicios de entrenamiento.

4. **Medios médicos biológicos:** Que eliminan más rápidamente las formas agudas de fatiga general y local, restauran eficazmente los recursos energéticos Ej. Baños de vapor y aire seco, masajes generales, manuales o por chorros de agua, etc.

8.1.2.2 Historial de actividad física

- La edad en la que empiezan a jugar futbol es un factor importante en el desenvolvimiento y evolución; ya que van adquiriendo destrezas,

características morfológicas individuales y la técnica. Si bien se sabe que el deporte es positivo para la salud, los especialistas estiman que los niños deben practicarlo de acuerdo a su edad y también a sus intereses, ya que de lo contrario podrían sufrir lesiones o perder el interés por la práctica deportiva. Jacqueline Andalaft, jefa del Departamento de Formación para el Deporte de Chiledeportes, explica que antes se iniciaba a los pequeños a temprana edad a practicar competitivamente, pero ahora la tendencia es que desde chicos experimenten la mayor cantidad de actividad física a modo de juego, de forma natural y lúdica. Luego, en la adolescencia, se pueden especializar, ya que no existe correlación entre precocidad y excelencia. Y en ello, la ayuda de los padres es fundamental: "Deben llevar al niño desde chiquitito a caminar, subir cerros, escalar, salir de paseo, ir al río, en fin, hacer que haga actividad física desde pequeño". Agrega que en una primera etapa "el niño debe ser preparado desde el punto de vista físico y motriz, a través de una serie de ejercicios recreativos, para luego comenzar a practicar una disciplina. Que haga todas las actividades posibles, antes de la especialización".

Hay que realizar actividad física de acuerdo a la capacidad motora que tienen por su edad y el grado de madurez física y psicológica.

Etapas del deporte:

1. Etapa Formativa

- Hasta los seis años el niño debe realizar actividad física a modo de juego, es decir, lo más libre y espontáneamente posible.

- A partir de los seis años puede hacer ejercicios más dirigidos, pero no especializarse en un deporte. Se recomienda que el niño asista a una escuela polideportiva, a un estadio de club o colonia, donde realice distintos deportes.

- Desde los nueve años en adelante, los niños están en condiciones de

aprender reglamento y técnica de un deporte. Es probable que el pequeño se incline por unos dos o tres deportes y está bien que los practique todos. Eso sí, no debe exigirse rendimiento. La idea es que se diviertan.

- Ya desde los doce años, los jóvenes pueden someterse a un entrenamiento con exigencia para desarrollar potencia, resistencia, fuerza y velocidad, entre otras capacidades. En caso de no querer dedicarse al deporte en forma competitiva, puede practicarlo en forma libre a modo de esparcimiento.

2. Alto Rendimiento

Una vez que el menor pasa por diversas experiencias deportivas, está capacitado para comenzar a entrenar más específicamente. En esta etapa se exige un mayor nivel de compromiso y de esfuerzo físico; los entrenamientos comienzan a orientarse más hacia resultados que a ganar destrezas.

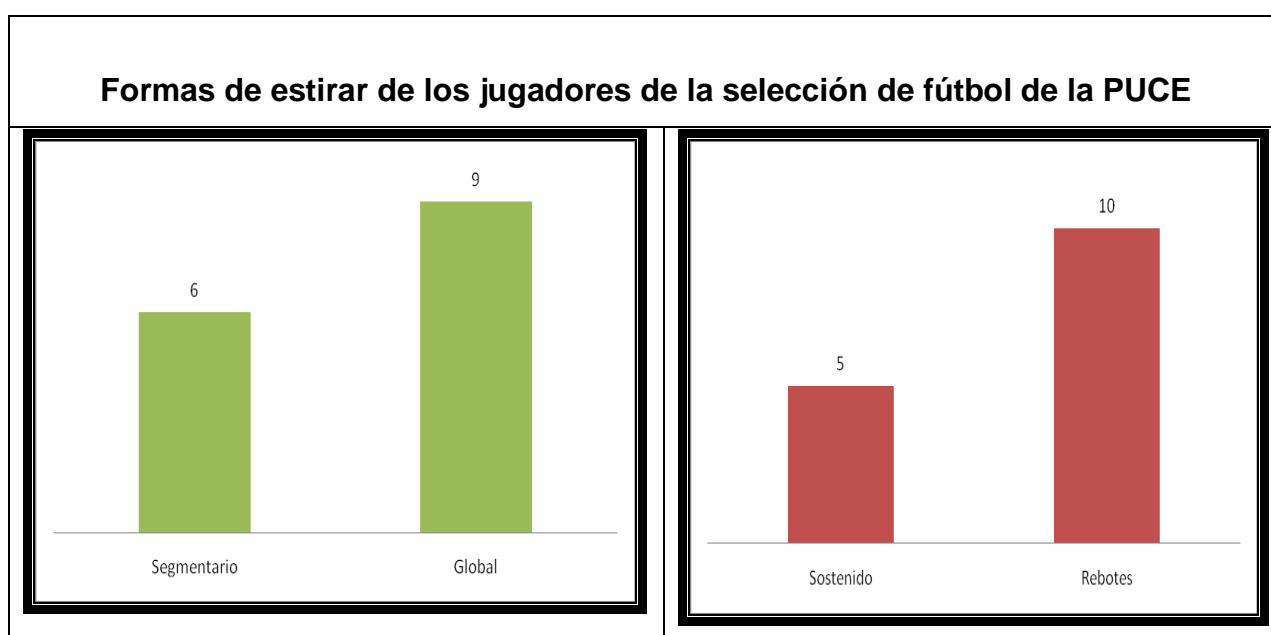
3. Nivel profesional

En el nivel profesional, aumenta la intensidad de los entrenamientos y campeonatos. Además de que, por lo general, el deportista recibe una remuneración por participar y entrenar en una disciplina.

- 6 deportistas empezaron su actividad en el fútbol desde los 4 a los 10 años de edad, 4 entre los 10 a los 15 años y 5 entre los 15 a los 20 años. Es decir que el 60% inicio cuando tenía menos de diez o diez años, esta cifra nos indica que los deportistas tenían que realizar un correcto proceso para que a futuro no sufran lesiones musculoesqueléticas.

- La forma de estirar de los jugadores de la selección de fútbol de la PUCE, no es la adecuada. El preparador físico o en este caso el asistente del

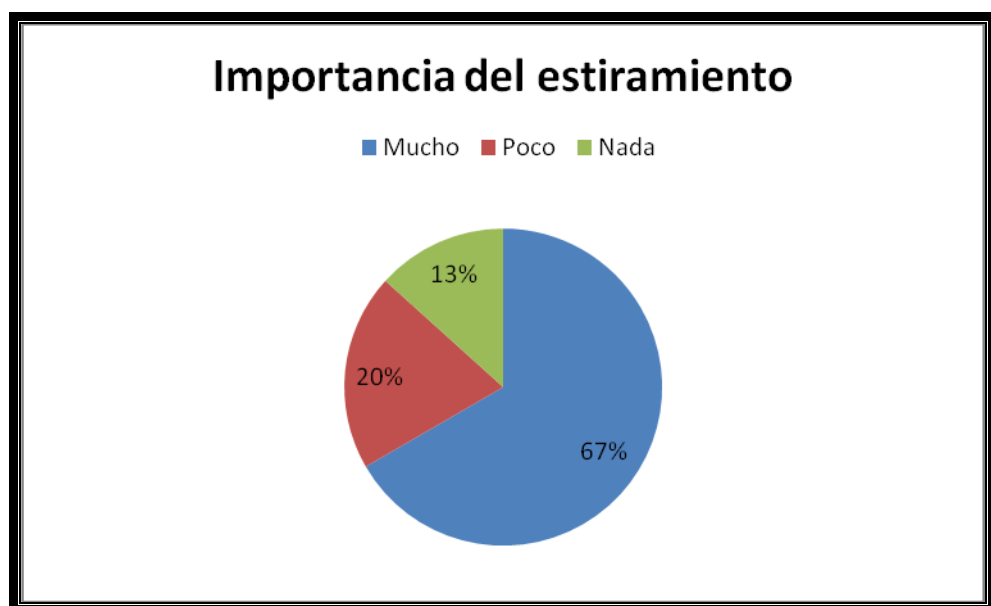
DT debe dirigir a los jugadores como, que partes, el tiempo y la frecuencia con la que se debe estirar antes y después del partido o entrenamiento. No es igual un estiramiento antes del partido que debe ser un estimulador a un estiramiento después de la actividad física que debe ser un relajador o evacuador a ácido láctico. De los 15 jugadores evaluados 9 de ellos estiran globalmente, 6 por segmentos; 10 jugadores lo realizan con rebotes y 5 sostenidos. Sin saber la diferencia de un estiramiento antes de la actividad y después de la actividad.



- Los deportistas evaluados también consideraron que los estiramientos tenían una importancia dentro del deporte de un 67% corresponde a 10 jugadores que le dan mucha importancia, el 20% corresponde a 3 jugadores que consideraron poca importancia y el 13% corresponde a 2 jugadores que no era importante ya que para ellos les servía más el hecho de ser más fuertes en sus piernas.

Como bien dice Norberto Perezplata, licenciado en ciencias del deporte y especialista en deporte, “se entiende estiramientos como los ejercicios destinados a aumentar la capacidad innata de elongación muscular a fin de

vencer y adaptar el reflejo de contracción o reflejo de estiramiento. El estiramiento, ya sea antes o después de hacer el ejercicio, no sólo hay que centrarlo en los músculos implicados en el ejercicio sino también en todos los grupos musculares implicados, sobre todo al finalizar el ejercicio. Lo notaremos bastante. ¿La razón? el ácido láctico (un subproducto del esfuerzo muscular anaeróbico) se distribuye por todo el cuerpo, y es el culpable de los dolores musculares que aparecen después del ejercicio. Elongar o estirar los músculos ayuda a su reabsorción por parte del cuerpo”

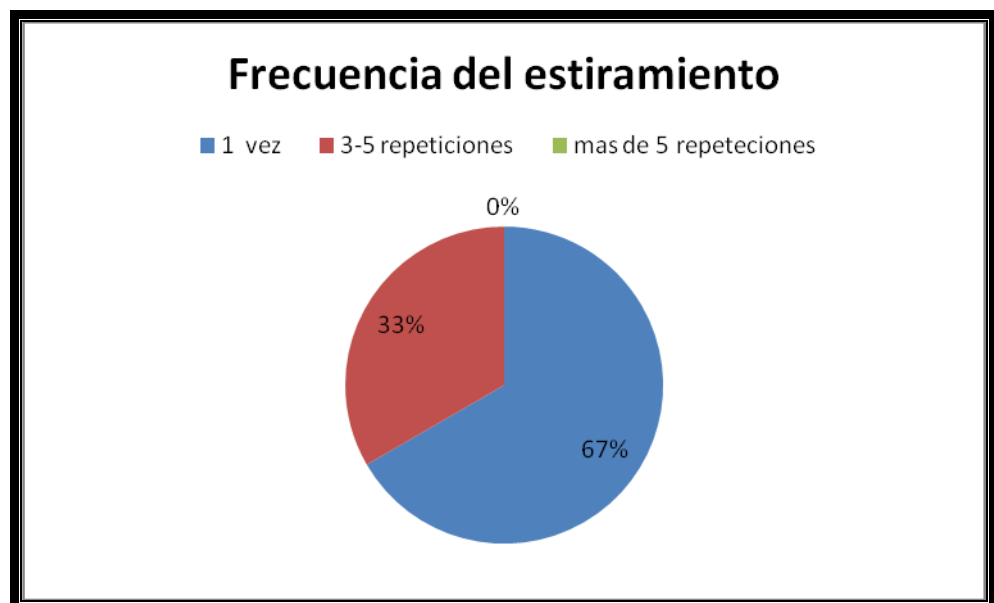


- El tiempo que realizan estiramiento los deportistas de la PUCE es del 53% lo realiza de 10 a 15 segundos, el 27% lo realiza de 15 a 30 segundos y el 20% de 30 a 60 segundos.

Según la Universidad Nacional de La Plata Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación en su 7mo. Congreso Argentino y 2do. Latinoamericano de Educación Física y Ciencias en su artículo “El Acondicionamiento Previo para el Partido de Fútbol: CEA como la base fisiológica de los gestos explosivos”; nos dice que hay varias posturas científicas, pero la franja de tiempo va de 8/10 segundos hasta 20/25 segundos, de acuerdo a la aptitud física de cada uno, en un estiramiento de

calentamiento; es decir estimularle al musculo para la actividad física. Es diferente al estiramiento de relajamiento muscular, las sobrecargas por esfuerzo o por trabajo habitual ocasionan rigidez muscular y dolor. El músculo se contrae por la acumulación de toxinas que dificultan la circulación. A través del estiramiento conseguimos recuperar el tono normal del músculo, liberar toxinas y dejar fluir la circulación. Los estiramientos reducen la fatiga y nos proporcionan una sensación de bienestar y alivio.

- La frecuencia con la que estiran es de un 67% correspondiente a 10 jugadores que es una vez y el 33% correspondiente a 5 jugadores que repite de 3 a 5 veces cada estiramiento, nos damos cuenta la importancia del asistente o preparador físico para que a todos los jugadores les enseñe un buen estiramiento con tiempo, frecuencia y la forma estirar, en el equipo no existe esto.



TÉCNICA MEDIANTE ESTIRAMIENTOS PASIVOS

Se utiliza una combinación específica entre el estiramiento pasivo (acción externa) y una actuación activa por parte del paciente en sentido contrario (acción interna). En un primer momento en la pierna estudio se

realiza un alargamiento pasivo en longitud media, manteniendo esta posición, cuyos tendones se desean estirar. De esta manera la puesta en tensión del músculo (sin que haya desplazamiento) ejerce su acción sobre el tendón que tiende a acortarse, pero no puede por oposición de la acción externa posicional e interna muscular. En esta técnica es muy importante la capacidad y experiencia del operador por un lado (dosificación de la fuerza externa para adecuarla a la contracción estática del paciente) y la disposición del paciente por el otro, cuya colaboración es fundamental. Tenemos que tener en cuenta varios factores:

- El tiempo de realización de cada uno de los estiramientos será de 30 segundos con 3 repeticiones cada uno, un total de 180 segundos cada estiramiento, una frecuencia de 4 días a la semana, a lo largo de 6 semanas; Se debe tomar muy en cuenta que puede aparecer el fenómeno de fatiga muscular, agujetas e incluso problemas circulatorios.
- Una estrecha vigilancia del terapeuta, controlando, dosificando, corrigiendo y estimulando a la autocorrección del deportista.
- Es importante que al momento de realizar los estiramientos tomemos en cuenta que no se acentúen las curvaturas fisiológicas ya que esto nos llevara a un desgaste de los discos vertebrales, la alteración de las curvas modificaran el eje gravitacional haciendo que este se adelante provocando inestabilidad pélvica, sobrecarga postural muscular posterior.

Los estiramientos pasivos forman parte de la técnica de desarrollo y mantenimiento de la flexibilidad muscular. Los estiramientos consisten en aplicar una fuerza para elongar los componentes contráctiles (extensibles), filamentos de actina y miosina, buscando un alargamiento máximo de la estructura musculotendinosa.

Se encontraron diferencias significativas entre la medición inicial y final para la pierna control. Sin embargo, se observaron mejoras significativas en todas las piernas experimento.

Test del ángulo poplíteo

- Se realizó también el test de ángulo poplíteo, se tomó en cuenta una retracción de los isquiotibiales de moderada a marcada (La postura de exploración que debe adoptar el paciente es en supino sobre la camilla con la cadera y rodilla del miembro inferior que se está explorando flexionado a 90°. La pierna control permanece en extensión. El eje de giro del goniómetro lo colocamos en la cara lateral de la articulación de la rodilla, un brazo del goniómetro permanece alineado al fémur y el otro a la línea media de la pierna. Realizamos una extensión pasiva y progresiva de la pierna manteniendo la flexión de 90° de la cadera, hasta que el paciente nos manifieste el dolor en la región posterior del muslo o en el hueco poplíteo o hasta que se inicie la basculación pélvica. En ese momento procedemos a medir el ángulo que falta para la extensión completa de la rodilla. En este test consideramos como rangos normales los establecidos entre 0°-15°, como rangos de cortedad moderada entre 16°-34° y como cortedad isquiosural marcada un valor mayor o igual a 35°).

Evaluación

La población con la que se han desarrollado estos métodos es exclusivamente deportista de sexo masculino, para la comparación entre el E.E.P vs E.E.M. Dividimos a las piernas de los deportistas en pierna control y pierna estudio. La pierna control es aquella en la que se realiza la técnica de estiramientos estáticos pasivos, la pierna estudio es aquella que se le coloca el compex o electroestimulación y también se le realizara los estiramientos estáticos pasivos. Para la selección de la pierna se la hizo de una forma al azar es decir sin saber los datos de filiación del paciente ya se

tomo al azar una decisión de que el primer paciente se inicie con la pierna derecha la electroestimulación y la izquierda los estiramientos.

Los resultados obtenidos en este estudio muestran como todos los protocolos de estiramiento consiguen mejorar estadísticamente en sus niveles de extensibilidad isquiosural con respecto a sus valores iniciales y a la pierna control.

La evaluación goniometría constará de 4 partes:

1. Medición de partida (para conocer el estado inicial del futbolista y poder establecer unas pautas de actuación)

- Las amplitudes articulares iniciales varían desde los -24° de extensión de rodilla hasta los -44° , estableciendo la media en -33.8 grados de la pierna derecha y -30.3 grados es la media en la pierna izquierda.

Deportistas	Amplitud Inicial Pierna Derecha	Amplitud Inicial Pierna Izq
1	-39	-32
2	-35	-40
3	-30	-38
4	-36	-29
5	-40	-24
6	-37	-27
7	-44	-35
8	-40	-32
9	-25	-33
10	-36	-32
11	-27	-24
12	-35	-26
13	-24	-27
14	-37	-33
15	-23	-23
Media Aritmetica	-33.8	-30.3

2. Pre-programa de desarrollo de la Flexibilidad (Medición después de primera y segunda semana, para ir controlando el proceso).

- Tras la aplicación de los estiramientos estáticos pasivos todos mejoraron después de las dos semanas de tratamiento, contabilizándose la mejoría de 10.7° de media en la pierna derecha y 10.2° de media en la pierna izquierda a las dos semanas de tratamiento en cada deportista.

Deportistas	Amplitud Inicial Pierna Derecha	1-2 Semana	Evolución	Amplitud Inicial Pierna Izq	1-2 Semana	Evolución
1	-39	-29	10	-32	-24	8
2	-35	-27	8	-40	-30	10
3	-30	-25	5	-38	-30	8
4	-36	-27	9	-29	-22	7
5	-40	-33	7	-24	-20	4
6	-37	-28	9	-27	-20	7
7	-44	-34	10	-35	-26	9
8	-40	-30	10	-32	-24	8
9	-25	-20	5	-33	-26	7
10	-36	-28	8	-32	-26	6
11	-27	-23	4	-24	-20	4
12	-35	-27	8	-26	-19	7
13	-24	-21	3	-27	-21	6
14	-37	-29	8	-33	-25	8
15	-23	-20	3	-23	-20	3
Media Aritmetica	-33.8	-26.7	7.1	-30.3	-23.5	6.8

3. Inter-programa de desarrollo de la Flexibilidad (Medición a la tercera y cuarta semana, para conocer la eficacia del proceso).

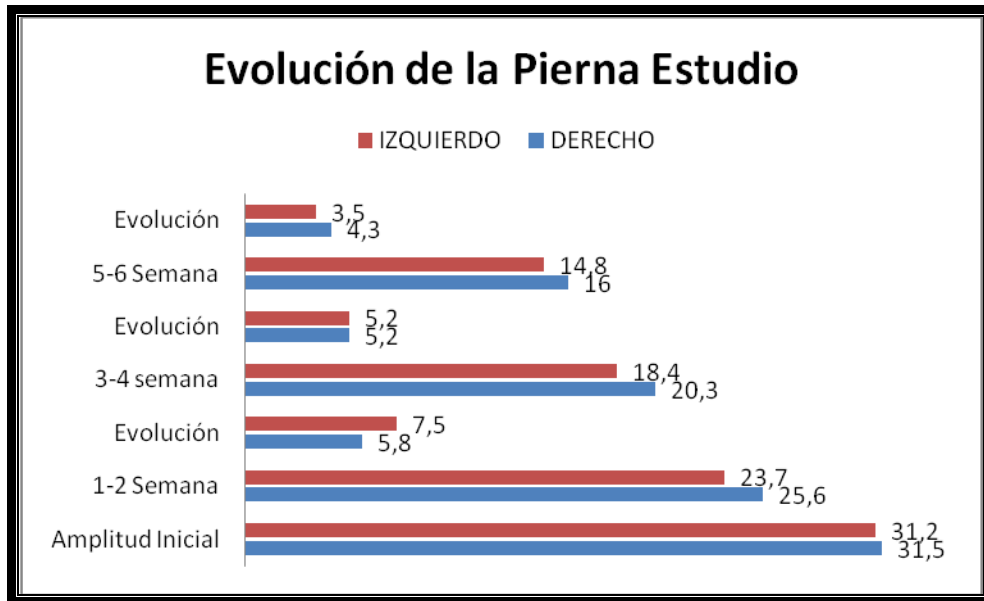
- Los resultados de evolución a la tercera y cuarta semana nos dio los siguientes resultados: en la pierna derecha 6.7° de la media del avance y de 5.4° de la media en la pierna izquierda.

Deportistas	Amplitud Inicial Pierna Derecha	1-2 Semana	Evolución	3-4 semana	Evolución	Amplitud Inicial Pierna Izq	1-2 Semana	Evolución	3-4 semana	Evolución
1	-39	-29	10	-22	7	-32	-24	8	-20	4
2	-35	-27	8	-21	6	-40	-30	10	-23	7
3	-30	-25	5	-21	4	-38	-30	8	-23	7
4	-36	-27	9	-19	8	-29	-22	7	-16	6
5	-40	-33	7	-25	8	-24	-20	4	-17	3
6	-37	-28	9	-21	7	-27	-20	7	-15	5
7	-44	-34	10	-25	9	-35	-26	9	-20	6
8	-40	-30	10	-22	8	-32	-24	8	-20	4
9	-25	-20	5	-16	4	-33	-26	7	-20	6
10	-36	-28	8	-22	6	-32	-26	6	-20	6
11	-27	-23	4	-19	4	-24	-20	4	-16	4
12	-35	-27	8	-19	8	-26	-19	7	-16	3
13	-24	-21	3	-18	3	-27	-21	6	-17	4
14	-37	-29	8	-22	7	-33	-25	8	-19	6
15	-23	-20	3	-17	3	-23	-20	3	-17	3
Media Aritmetica	-33.8	-26.7	7.1	-20.6	6.1	-30.3	-23.5	6.8	-18.6	4.9

4. Post-programa de desarrollo de la Flexibilidad (Medición a la quinta y sexta semana, para evaluar la eficacia final del programa, los efectos producidos por este).

- En la cuarta y sexta semana en la pierna derecha todos evolucionan 5.2° de media, en la pierna izquierda 3.5° de media.

Deportistas	Amplitud Inicial Pierna Derecha	5-6 Semana	Evolución	Amplitud Inicial Pierna Izq	5-6 Semana	Evolución
1	-39	-17	5	-32	-17	3
2	-35	-16	5	-40	-17	6
3	-30	-17	4	-38	-20	3
4	-36	-16	3	-29	-13	3
5	-40	-19	6	-24	-16	1
6	-37	-15	6	-27	-14	1
7	-44	-17	8	-35	-16	4
8	-40	-15	7	-32	-16	4
9	-25	-13	3	-33	-16	4
10	-36	-17	5	-32	-14	6
11	-27	-15	4	-24	-16	0
12	-35	-14	5	-26	-15	1
13	-24	-15	3	-27	-15	2
14	-37	-16	6	-33	-15	4
15	-23	-15	2	-23	-17	0
Media Aritmetica	-33.8	-15.8	4.8	-30.3	-15.8	2.8



Los resultados del gran avance que esta técnica da para la ayuda de la flexibilidad es evidente, tras la aplicación de la técnica por estiramiento mediante electroestimulación en pierna estudio todos evolucionan en la primera-segunda semana -25,6 grados en la pierna derecha y -23,7 grados en la pierna izquierda dando una evolución de estas dos primeras semanas de 5,8 grados en la pierna derecha y de 7,5 grados en la pierna izquierda, pasada esta primera fase del tratamiento se realiza una medición a las dos semanas. Se observa que la pierna experimento empieza a ganar volumen, goniométricamente a la tercera y cuarta semana la pierna derecha media 20,3 grados con una evolución de 5,2 y la pierna izquierda con 18,4 grados y su evolución de 5,2 grados. La quinta y sexta semana fueran las más importantes dentro del tratamiento puesto que nos darían a conocer si la técnica funciona o no. En la pierna derecha media 16 grados con una evolución total de 4,3 grados y la pierna izquierda con 14,8 grados con su evolución de 3,5 grados. Los jugadores de la PUCE vieron que su flexibilidad fue evolucionando gracias a esta innovadora técnica.



La importancia de la influencia de los hábitos con la técnica propuesta nos da como resultados que los deportistas que al azar se escogió la pierna derecha para el estudio son los más disciplinados en cuanto a su alimentación, descanso, tabaco y alcohol que con los jugadores que se escogió la pierna izquierda estudiada.

CONCLUSIONES

El bienestar de un equipo de fútbol depende de varios factores como físicos, psíquicos, ambientales, socioculturales y se encuentra muy ligado al trabajo multidisciplinario de su equipo técnico su médico, su nutricionista y su terapeuta físico para de esta manera orientar mejor a los jugadores, obteniendo resultados positivos.

Desde el punto de vista físico lo ideal en un equipo es mantener la salud y el óptimo rendimiento en cada uno de sus jugadores, sin que por el esfuerzo físico o malos hábitos de alguno u otra forma existan alteraciones de dolor, lesiones o trastornos posturales por mala técnica.

Los buenos hábitos son fundamentales dentro del deporte y de la vida cotidiana, el deportista fumador puede contribuir junto a sus entrenadores y la familia a disminuir la actividad; El Tabaquismo constituye una droga legal que causa innumerables riesgos para la salud y disminuye en alguna medida el rendimiento deportivo óptimo en el deportista fumador y e l que no lo es constituye un riesgo para su salud. Según la OMS es en la adolescencia donde mayor incidencia existe en el consumo del tabaco

La electroestimulación mediante COMPEX es cómoda, de fácil aplicación y no exige un entrenamiento previo, ni por parte del paciente ni del profesional. Gracias a las pequeñas dimensiones de un COMPEX portátil podemos realizar la sesión en cualquier lugar (sala de Fisioterapia, domicilio o campo de entrenamiento).

El bienestar, el conocimiento y la adecuada técnica para que los deportistas tengan buenas condiciones dependerán de diversos factores físicos que se puede actuar e intervenir sobre los músculos, tendones, ligamentos, fascias, esqueleto, etc.

Tanto entre los deportistas como entre la gente que practica gimnasia, el tratamiento de la flexibilidad se ha descuidado mucho. Toda la atención se ha centrado en mejorar la fuerza. Ahora bien, para mantener el cuerpo en plena forma son igualmente importantes los dos factores: fuerza y flexibilidad. Cuando se activa el aparato muscular en el entrenamiento y la competición en fútbol, se producen contracciones musculares y estrés muscular, con lo cual es conveniente un adecuado trabajo de estiramientos musculares que favorezcan la recuperación de los tejidos activos contraídos durante la actividad

Se deben evitar incorrectas posiciones tanto en los gestos deportivos como durante los estiramientos, ya que se puede comprometer la efectividad del estiramiento con la columna vertebral alineada, manteniendo sus curvas fisiológicas, anterversión pélvica. Para estirar un grupo muscular simplemente se realiza el movimiento contrario a la acción de la musculatura. En este caso, una flexión de cadera o una extensión de rodilla. Debemos tener claro que la flexibilidad se aplica a la amplitud del movimiento articular, y que la elasticidad hace referencia al trabajo conjunto de nervios y musculatura.

Es importante incluir la electroestimulación dentro del ámbito deportivo y como forma de recuperación y entrenamiento integral para que de esta forma combata y desinstale las compensaciones nocivas de los mecanismos de defensa, con el fin de establecer una mejora para los deportistas.

El Terapeuta Físico es quien debe guiar de esta manera al deportista con los estiramientos adecuados, con una técnica eficaz y sin llegar a compensaciones; de esta forma se sentirán más cómodos, toleraran mas el estiramiento y la confianza que se generara hacia el fisioterapeuta va ha ser mayor con resultados óptimos.

Una vez analizados los resultados obtenidos podemos afirmar que los dos métodos utilizados en el estudio permiten una ganancia importante de la flexibilidad siempre y cuando son aplicados de forma correcta y sistemática. Si bien es cierto que las ganancias han sido mucho mayores al utilizar la técnica de estiramiento

con electroestimulación es un método para ganar más flexibilidad, pero sin duda alguna el simple hecho de estirar los músculos de forma correcta nos darán una ganancia.

Los resultados que se obtenidos de la efectividad de la elongación de los isquiotibiales mediante la facilitación por electroestimulación del cuádriceps generaron mayores ventajas que aquellos con estiramiento estático pasivo, al disminuir la retracción muscular de los isquiotibiales, pudiendo que el deportista se dé cuenta de su postura correcta para mantener una adecuada tensión en el músculo que se está estirando, evitando de esta manera una contractura refleja debida a un estiramiento incorrecto.

RECOMENDACIONES

Fomentar el trabajo interdisciplinario para optimizar la calidad del deportista y lograr mayores resultados en la disciplina correspondiente. En la actualidad el sedentarismo y la falta de ejercicio nos lleva a un acortamiento de determinados músculos y a la pérdida de flexibilidad de nuestro aparato musculoesquelético. Esto determina un déficit de la funcionalidad que influye negativamente sobre nosotros tanto física como psíquicamente. Si sumamos a esto que existen patologías que exigen un período de reposo más o menos prolongado manteniendo miembros o parte de ellos en posturas fijas, nos encontraremos con una grave afectación de la elasticidad de parte o de la totalidad del cuerpo que van a determinar un serio obstáculo en la recuperación del individuo. Nuestro primer deber como profesionales de la Fisioterapia es preservar y/o recuperar la funcionalidad de nuestros pacientes, por lo que los estiramientos se convierten en una de las técnicas más usadas en nuestra práctica diaria, ya sea como objetivo profiláctico o terapéutico. Debido al amplio campo de actuación de los estiramientos (reeducación psicomotriz y funcional, rehabilitación, medicina del deporte y práctica deportiva) existen múltiples técnicas que incluso evolucionan y se perfeccionan exigiendo un reciclaje continuo del profesional. En esta constante evolución es imprescindible que el fisioterapeuta pueda investigar para precisar mejor los objetivos y progresos del tratamiento, mejorando así la metodología y la calidad de vida del paciente que es el fin último de todo buen profesional. En este sentido hemos intentado cotejar dos buenos métodos de estiramiento para observar distintos parámetros que a la postre nos permita elegir. Se recomienda la prescripción de rutinas de estiramientos activos por su eficacia y seguridad para el aparato locomotor, quedando la elección de la duración del estiramiento aislado supeditada a su tolerancia o tomar en cuenta la fisiología del músculo.

Con respecto a la conservación en el tiempo de los grados articulares ganados sin la aplicación de ninguna de las dos técnicas podemos ver como el método de estiramiento con COMPEX permite una pérdida menor, aunque, como

hemos visto, las diferencias con la técnica de estiramiento estático pasivo no son tan significativas. No obstante, independientemente de la utilización de una técnica u otra, si pasado cierto periodo de tiempo no se aplica ningún tipo de estiramiento con bastante probabilidad se producirá una disminución progresiva del balance articular hasta encontrarnos en una situación de acortamiento muscular similar a la del punto de partida.

La técnica de estiramiento con electroestimulación que hemos propuesto en nuestro estudio puede permitirnos obtener grandes mejoras en la flexibilidad. Sin embargo, debemos tener en cuenta que el músculo que estamos estirando se encuentra al mismo tiempo en un estado de relativa contracción. Este hecho conlleva un cierto riesgo, ya que podemos provocar una rotura muscular si no se realiza con un control importante.

Los terapeutas físicos tenemos un gran deber el ayudar donde nos necesitan nosotros como futuros profesionales debemos innovar con nuevas técnicas, nuevos conocimientos y lo esencial trabajar en equipo para que nuestros pacientes tengan la mejor atención y de esta manera disminuir lesiones.

Los resultados obtenidos en este estudio nos ayudaran para el beneficio de los deportistas de la PUCE como mantener su beca deportiva para los estudios o la obtención de una beca internacional por el buen rendimiento deportivo.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahonen, J. et al. (1996) Kinesiología y Anatomía Aplicada a la Educación Física. Editorial Paidotribo.
- Alter, Michael. Los estiramientos, bases científicas y desarrollo de ejercicios. Paidotribo.Barcelona. 1990.
- Amiridis IG, et al. Co-activation and tension-regulating phenomena during isokinetic knee extension in sedentary and highly skilled humans. European Journal Applied Physiology 1996;73:149-56.
- Anderson, Bob. Cómo rejuvenecer su cuerpo estirándose. Integral Ediciones. Barcelona. 1989.
- Basas García A. Electroestimulación «dinámica» en el deporte. Fisioterapia AEF; 1997;19(NM1):53-9.
- Castro, Luis Alberto. "Carga física y adaptación orgánica". *Revista educación física y deporte*. Vol. 8 No. 1-2. pp. 60-65. Medellín. 1986.
- Drake, R. Vogl, W. Mitchell, A. Gray anatomía para estudiantes. Primera edición. Elsevier España. 2005
- Fahey TD, et al. Influence of sex differences and knee joint position on electrical stimulation-modulated strength increases. Medicine and Science in Sports and Exercise; 1985. p. 144-7.
- Feneis, H.; Dauber, W. Nomenclatura anatómica ilustrada. Masson. 4ed. 2000
- Freiwald, J. El Calentamiento en el Deporte. Editorial Hispano Europea.
- Fyfe I, Stanish WD. El ejercicio excéntrico y el estiramiento en el tratamiento y la prevención de las lesiones tendinosas. Tomado de la Division of Orthopaedic Surgery (IF, WDS). Department of Surgery, Dalhousie University and Orthopaedic and Sport Medicine Clinico of Nova Scotia (WDS). Halifax. Nova Scotia. Canadá.
- Guía práctica de electroterapia. Juan Plaja. Carin. Electromedicarin, SA; 1999.
- Guía práctica de utilización del Compex: Medicompex, SA; 1990.

- Hargreaves, M. Exercise Metabolism. Human Kinetics.
- Hooland R. Fortalecimiento y extensión de los músculos usando la corriente eléctrica. Rnref Nonius Ibérica.
- Koutedakis Y, et al. Maximal voluntary quadriceps strength patterns in olympic overtrained athletes. Medicine and Science in Sports and Exercise 1995;27:566-72.
- Kulund. Lesiones del deportista. Principios de electricidad. Neurofisiología. Ed. Salvat.
- Lamb David, Augusto Pila Telena. Fisiología del ejercicio, respuestas y adaptaciones. Madrid.1985.
- Latarjet,M.; Ruiz Liard, A. Anatomía Humana. Médica Panamericana. 4ed. 2004.
- Mishchenko, V: Fisiología del Deportista. Editorial Paidotribo.
- Moore, K.L. Anatomía con orientación clínica. Médica Panamericana. (Williams & Wilkins). 4ed. 2002.
- Netter, F.H. Atlas de Anatomía Humana. Novartis-Masson.1999.
- Nordin, Margarita. "Biomecánica básica del sistema musculoesquelético". 3era Ed. (2001). España: McGraw Hill Interamericana.
- Norris, C. (1996): La Flexibilidad: principios y práctica. Editorial Paidotribo.
- Pérez Lugo J. Estiramientos con electroestimulación. Fisioterapia 1994;16:35-41.
- Pérez Machado JL, Álamo Arce DD. Estudio comparativo entre los estiramientos musculares mediante tensión activa y electroestimulación. Fisioterapia 2001;23(1):10-4.
- Porta, Jordi. "El desarrollo de las capacidades físicas, la flexibilidad". *Revista Apunts*. Nos 7-8. Barcelona. 1987.
- Rodríguez Martín JM. Electroterapia de baja y media frecuencia. Mandala Rd; 1994.
- Rohen, J.W.; Yokochi, C. Atlas fotográfico de Anatomía Humana. Doyma. 3ed.1994.
- Romero JA, et al. Effects of electrical stimulation of normal quadriceps on strength and girth. Medicine and Science in Sports and Exercise 1982. p. 194-7.

- Rouviere, H.; Delmas, A. Anatomía Humana. Masson. 10ed. 1999.
- Sánchez Martín, Jorge. "Acondicionamiento, facilitación neuromuscular propioceptiva, técnica de estiramiento". *Revista dirección deportiva*. No. 34. Madrid. 1988.
- Scheneider, Werner y otros. Fitness. Barcelona. Striba. 1993.
- Seger JY, Thorstensson A. Electrically evoked eccentric and concentric torque-velocity relationships in human knee extensor muscles. *Acta Physiol Scand* 2000;169:63-9.
- Solverborn, Sven A. Stretching. Barcelona. Martínez Roca. 1984
- Stojnik V. Muscle activation level during maximal voluntary effort. *European journal Applied Physiology* 1995;72:144-9.
- Strojnik V. The effects of superimposed electrical stimulation of the quadriceps muscles on performance in different motor task. *Of Sports Medicine and Physical Fitnes* 1998;38:194-200.
- Vigil J. Apuntes de postgrado en Fisioterapia del deporte. Universidad Autónoma de Alcalá de Henares.
- Weineck, J. (1995): Anatomía Aplicada al Deporte. Editorial Paidotribo
- Williams y Lissner. "Biomecánica del movimiento humano". 1era Ed (1991). México:Editorial Trillas.
- Williams, P. Anatomía de Gray. Churchill Livingstone. 38 edición. Tomo I y Tomo II. 1998.

ANEXOS

ANEXOS 1: Guía de entrevista

Fecha:

1. DATOS DE FILIACIÓN

- Nombre:
- Sexo:
- Edad:
- Lateralidad:
- Instrucción:
- Ocupación:

2. ANTECEDENTES CLINICOS

- **Lesiones o molestias en la rodilla o cadera:**

.....
.....
.....

- **Hábitos**

- Tabaco :

No Si #de tabacos que fuma al día.....

- Alcohol:

No Si #veces que toma a la semana.....

- Alimentación:

Cuántas veces come al día.....

- Descanso:

Horas de sueño.....

3. ACTIVIDAD EN EL FÚTBOL

- Edad que empezó a jugar futbol:.....
- Cuantas veces a la semana practica este deporte:.....
- Qué factores predisponen a las lesiones:.....
- Qué importancias cree usted que tienen los estiramientos
Mucha..... Poca..... Nada.....
- Como realiza estiramientos usted
Todo el cuerpo Por partes Es sostenido Con rebotes
 - Tiempo que realiza cada estiramiento:
10-15 segundos 15-30 segundos 30- 60 segundos
 - Frecuencia :
1 sola vez 3-5 repeticiones más de 5 repeticiones

4. EXPLORACIÓN FÍSICA

- Talla:.....
- Peso:
- Medición ángulo poplíteo:

ANEXO 2: Consentimiento

CONSENTIMIENTO INFORMADO

(En cumplimiento del Estudio previo a la disertación de Tesis de Liliana Cárdenas)

(Nombre completo)

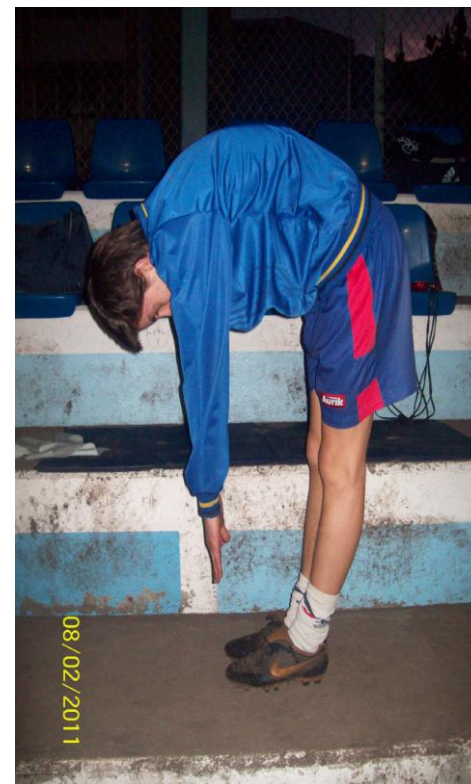
He leído la hoja informativa que me ha sido entregada. He tenido oportunidad de efectuar preguntas sobre el estudio. He recibido respuestas satisfactorias. He recibido suficiente información en relación con el estudio. He hablado con Liliana Cárdenas, entiendo que la participación es voluntaria.

Firma _____

C.C. _____

Ciudad y fecha _____

ANEXOS 3: Fotografías







PARA GRADOS ACADÉMICOS DE LICENCIADOS (TERCER NIVEL)

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

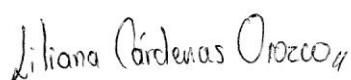
DECLARACIÓN y AUTORIZACIÓN

Yo, **LILIANA ARACELY CÁEDENAS OROZCO**, C.I. **1716385248**, autora del trabajo de graduación intitulado: **“Comparación de la efectividad de la elongación de los músculos Isquiotibiales mediante la facilitación por electroestimulación del cuádriceps vs estiramiento estático pasivo, en los jugadores de la selección masculina de fútbol de la PUCE en las edades de 18 a 25 años, durante el periodo de Febrero – Abril 2011”**, previa a la obtención del grado académico de **LICENCIADA EN TERAPIA FÍSICA** en la Facultad de Enfermería:

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tiene la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, de conformidad con el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador a difundir a través de sitio web de la Biblioteca de la PUCE el referido trabajo de graduación, respetando las políticas de propiedad intelectual de Universidad.

Quito, 19 de Septiembre 2011



Liliana Aracely Cárdenas Orozco
C.I. 1716385248