

## **Richiami di fisiologia neuromuscolare ed elettrostimolazione**

La scoperta dell'elettricità può essere fatta risalire intorno al 500 a.c., quando Talete da Mileto rilevò che un frammento di ambra strofinato è in grado di attirare corpi di piccole dimensioni. Il termine elettricità infatti deriva da "elektron", che in Greco significa proprio ambra.

Fin dai tempi antichi l'uomo era a conoscenza delle proprietà terapeutiche delle correnti elettriche. Queste ultime venivano allora utilizzate sfruttando alcuni elementi naturali, quali particolari minerali o pesci elettrici come per esempio la torpedine usata per la cura di alcuni disturbi comuni quali il mal di testa, la nausea, le infiammazioni e perfino le emorragie.

I primi passi scientifici a riguardo vengono però mossi nel 1791 da Galvani, che effettua sperimentazioni sulla contrazione muscolare negli animali, riportate nel suo trattato "De viribus electricitatis in motu musculari". Da qui gli studi si succedono attraverso varie ricerche; per esempio nel 1820 Duchenne De Boulogne individua i punti motori di stimolazione, per costruire successivamente i primi elettrodi trans-cutanei.

Nel 1831 è la volta di Faraday e delle omonime correnti faradiche, utilizzate con alcune modificazioni fino ai giorni nostri. Nel 1849 Du Bois Reymond stabilisce l'importanza della rapidità nella variazione d'intensità della corrente elettrica, per evitare il fenomeno dell'accomodazione nervosa. Nel 1901 Weiss getta finalmente le basi della moderna stimolazione, intuendo che l'elemento fondamentale deve essere ricercato nella quantità di corrente applicata al tessuto muscolare nell'unità di tempo.

In seguito nel 1909 i coniugi Lapique, sviluppando il lavoro di Weiss, introducono i concetti ed i termini di reobase e cronasia, calcolando con equazioni matematiche il rapporto ottimale intensità/tempo ( $I/t$  dell'impulso), che risulta specifico per ogni tessuto e distretto muscolare. Quelle di Weiss e Lapique sono oggi considerate le due basi fondamentali dell'elettrostimolazione, infatti è in funzione di questi studi che attualmente vengono costruiti i moderni apparecchi per l'elettrostimolazione.

Nel 1916 Adrian evidenzia la differenza delle curve  $I/t$  tra muscolo normoinnervato e denervato.

Nel 1961 Liberson utilizza la stimolazione elettrica nelle lesioni neuronali, attivando i muscoli antagonisti di quelli spastici. Nel 1965 Melzack e Wall gettano le basi teoriche per la successiva nascita della TENS (sistema gate-control) e dell'elettroagopuntura (stimolazione antalgica).

Per quanto concerne il campo sportivo l'elettrostimolazione viene introdotta da Y.M. Kotz (1970) con l'utilizzo dell'omonima corrente, detta anche russa, di tipo sinusoidale a 2500 Hz modulata a 50Hz. Questa metodica venne allora applicata con alcuni atleti di vertice, tra cui il noto velocista V. Borzov, poi olimpionico nel 1972 sui 100 e 200 metri piani. Seguirono altre sperimentazioni tra le quali quelle di Anzil, Modotto e Zanon in Italia (1973), o quelle di Portmann in Canada, che modificò la modulazione di frequenza per stimolare più specificatamente le unità motorie rapide, fino alle più recenti esperienze del francese G. Cometti (1988), con l'utilizzo delle correnti di Kotz e delle prime e più moderne correnti ad impulso quadro.

Attualmente capita ancora di vedere l'utilizzo delle correnti di Kotz (o sinusoidali) in campo rieducativo ed allenante.

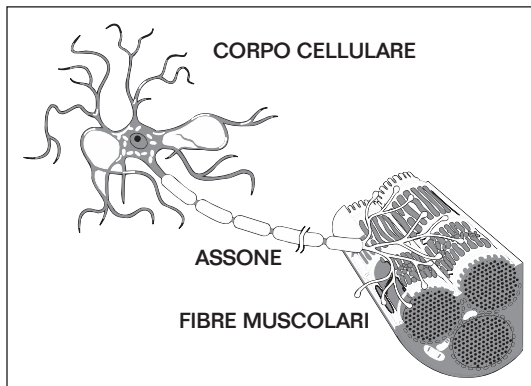
I discreti risultati ottenuti in passato, pur rappresentando un'importante base, non sono paragonabili all'attuale tecnologia ed alle nuove possibilità di applicazione, frutto di una ricerca più avanzata. Oggi l'elettrostimolazione eccitomotora viene regolarmente utilizzata da diversi sportivi e da alcuni preparatori atletici in molte discipline sportive tra cui il calcio, lo sci alpino, il rugby e l'atletica leggera con finalità riabilitative e di sviluppo della performance. Anche nel mondo dello spettacolo e della moda sono ormai diverse le persone che si affidano all'elettrostimolazione per mantenere un adeguato livello di fitness e per motivi estetici.

Anatomicamente il muscolo è composto da numerose cellule dette fibre muscolari. la sua unità contrattile e funzionale è però l'unità motoria (U.M.), formata da un motoneurone situato nel midollo spinale e dalle fibre da esso innervate tramite il proprio assone efferente (figura 1).

In prossimità del muscolo l'assone perde la sua guaina mie-

linica e si ramifica per entrare in contatto tramite ogni ramificazione con una singola fibra muscolare, mediante una speciale sinapsi detta placca neuromuscolare o placca motrice. Grazie ad essa l'impulso proveniente dal sistema nervoso centrale (s.n.c.) potrà essere trasmesso al muscolo per provocare una contrazione. Ogni motoneurone innerva un determinato numero di fibre muscolari. Nei muscoli oculari dediti ad un'attività di graduazione fine, il rapporto è di 1 a 5, viceversa in grandi muscoli posturali come il gluteo il rapporto può arrivare fino a 1 a 2000.

Tutte le fibre innervate dal medesimo motoneurone possiedono le medesime caratteristiche fisico-chimiche, il nervo infatti possiede una spiccata azione trofica sul muscolo, che sembra in gran parte legata al flusso asso-plasmatico. Gli assoni di



**FIGURA 1**  
L'unità motoria, ovvero il motoneurone spinale e le fibre muscolari da esso innervate.

maggiori dimensioni o riccamente mielinizzati, che per questo motivo permettono un'elevata velocità di conduzione dell'impulso, innervano cellule muscolari di grande dimensione, ricche di miofibrille scarsamente vascolarizzate, dotate di una spiccata attività ATPasica e di uno sviluppato metabolismo anaerobico, capaci di elevati picchi di forza e velocità, adatte quindi alle prestazioni di potenza (fibre bianche). Gli assoni di minore dimensione o scarsamente mielinizzati innervano invece fibre più piccole, riccamente vascolarizzate, abbondanti di mitocondri con metabolismo spiccatamente aerobico, più adatte quindi ad un lavoro di resistenza (fibre rosse). Più precisamente è possibile operare la seguente suddivisione:

- Slow twitch fiber, di tipo I, rosse o lente resistenti a metabolismo aerobico
- Fast twitch fiber, di tipo IIa, bianche intermedie o veloci resistenti a metabolismo misto ossidativo e glicolitico
- Fast twitch fiber, di tipo IIb, bianche veloci a metabolismo anaerobico

Alcuni ricercatori hanno ipotizzato l'esistenza di alcune fibre battezzate come fibre super-veloci di tipo II m, anche se a livello scientifico i pareri riguardo l'esistenza di questo tipo di

**FIGURA 2**

**CARATTERISTICHE PRINCIPALI DELLE DIFFERENTI  
TIPOLOGIE DI FIBRE MUSCOLARI**

PROPRIETÀ	TIPO I	TIPO IIA	TIPO IIB
TENSIONE MASSIMALE	2-5g	10g	50g
TEMPO DI CONTRAZIONE	100ms	50ms	50-30 ms
VELOCITÀ DI CONDUZIONE D'IMPULSO DEL NERVO	50-80 m/s	80-100 m/s	80-130 m/s
FREQUENZA DI SCARICA TETANIZZANTE	25 Hz	50 Hz	75-80 Hz
METABOLISMO PRINCIPALE	AEROBICO	ANAEROBICO/AEROBICO	ANAEROBICO
ATP-ASI MIOSINICA	BASSA	ELEVATA	MOLTO ELEVATA
FUNZIONE PRINCIPALE	ATTIVITÀ TONICA	ATTIVITÀ FASICO-TONICA	ATTIVITÀ FASICA

fibre sembrano contrastanti.

In ultimo occorre ricordare le fibre di tipo II c, fibre con caratteristiche di passaggio e poco evidenziabili. Queste ultime sarebbero quelle più facilmente modificabili dalla specificità dell'allenamento, a differenza delle altre che pur essendo orientabili per una attività differente da quella per cui sono preposte, non sono comunque sostanzialmente mutabili, in quanto legate come visto al tipo di innervazione.

La suddivisione citata è comunque puramente indicativa in quanto queste classi rappresentano gli estremi di una graduatoria assai più sfumata e variabile. La maggior parte dei muscoli si compone approssimativamente di un egual numero di differenti fibre, disposte a mosaico, con una prevalenza di fibre rosse in profondità. Vi sono comunque muscoli spiccatamente bianchi, deputati in genere ad azioni di potenza, ed altri più rossi come quelli maggiormente legati alla postura. Enormi differenze sussistono poi a livello genetico tra i diversi soggetti

FIGURA 3

PERCENTUALE DI FIBRE LENTE (ST) E VELOCI CON ALTO POTENZIALE METABOLICO OSSIDATIVO E GLICOLITICO (FTA) E PREVALENTEMENTE GLICOLITICO (FTB) PRESENTI NEI MUSCOLI SCHELETRICI DELL'UOMO.							
MUSCOLO	%ST	%FTA	%FTB	MUSCOLO	%FTB		
ADDUTTORE BREVE	45	15	40	ADDUTTORE LUNGO	45	15	40
GRANDE ADDUTTORE	55	15	30	GEMELLI	50	20	30
GRANDE GLUTEO	50	20	30	GLUTEO MEDIO/PICCOLO	50	20	30
ILEO PSOAS	50		50	OTTURATORE EST/INT	50	20	30
PETTINEO	45	15	40	PIRIFORME	50	20	30
PSOAS	50	20	30	BICIPITE FEMORALE	65	10	25
GRACILE	55	15	30	SARTORIO	50	20	30
SEMIMEMBRANOSO	50	15	35	SEMITENDINOSO	50	15	35
TENSORE FASCIA LATA	70	10	20	POPLITEO	50	15	35
QF VASTO INTERMEDIO	50	15	35	QF VASTO LATERALE	45	20	35
QF VASTO MEDIALE	50	15	35	QF RETTO FEMORALE	45	15	40
SOLEO	75	15	10	TIBIALE ANTERIORE	70	10	20
GRANDE DORSALE	50		50	RETTO ADDOMINALE	46		54
BICIPITE BRACHIALE	50		50	BRACHIO-RADIALE	40		60
DELTOIDE	60		40	GRANDE PETTORALE	42		58
ROMBOIDE	45		55	TRICIPITE BRACHIALE	33		67
TRAPEZIO	54		46	SOPRASPINOSO	60		40

Da: Pierrynowski e Morrison, *Math Biosc.* 1995 e Johnson e coll. *J. Neur. Sci* 1973 (in Bosco 1996).

**PERCENTUALE DI FIBRE LENTE RILEVATE IN ATLETI IMPEGNATI  
IN DIFFERENTI DISCIPLINE SPORTIVE**

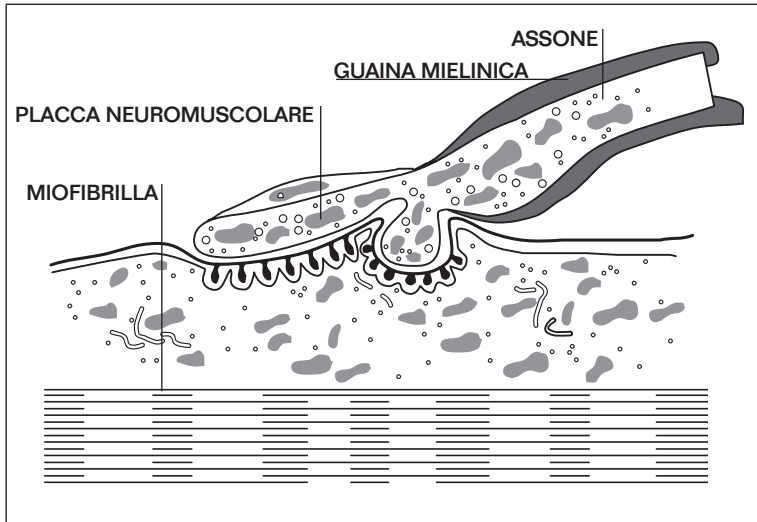
DISCIPLINA	PERCENTUALE FIBRE LENTE	AUTORI
100-200 m, ATLETICA	35-40	Bosco, 1985; Tihanyi, 1985
400 m, ATLETICA	40-50	Bosco, 1985; Tihanyi, 1985
800-1500 m, ATLETICA	55-60	Bosco, 1985; Tihanyi, 1985
5000-MARATONA	65-80	Bosco, 1985; Komi e coll. 1997
MARCIATORI, ATLETICA	65-70	Bosco, 1985;
LANCIATORI, ATLETICA	50-55	Bosco, 1985;
SALTATORI, ATLETICA	50-55	Bosco, 1985; Tihanyi, 1985
SCI DI FONDO	65-85	Komi e coll. 1977; Tesch e coll. 1975
SLALOM	50-55	Komi e coll. 1997
SCI, SALTO DAL TRAMPOLINO	50-55	Komi e coll. 1997
PATTINAGGIO SU GHIACCIO	65-70	Komi e coll. 1997
CICLISTI SU STRADA	55-60	Burke e coll. 1997
CANOA	55-60	Komi e coll. 1997; Gollnick e coll. 1972
NUOTO	50-60	Lundin, 1974; Gollnick e coll. 1972
SCI ACQUATICO	50-55	Tesch e coll. 1975
LOTTA	50-55	Tesch e coll. 1982
SOLLEVAMENTO PESI	40-45	Tesch e coll. 1975
BODY BUILDING	40-45	Hakkinen e coll. 1984
PALLAMANO	45-55	Tesch e coll. 1982
PALLAVOLO	45-55	Univ. Jyvaskyla (non pubbl.)
CALCIO	40-45	Jacobs, 1982; Apor, 1988
SPORTIVI NON AGONISTI	40-60	Karlsson e coll. 1975

**FIGURA 4**  
(da C. Bosco 1996  
modificato)

e tra atleti praticanti diverse discipline.

Qualsiasi cellula in condizione di non attività si dice che possiede un potenziale di riposo. Si presenta infatti polarizzata, ovvero con una differenza di potenziale tra l'interno e l'esterno della membrana con il primo elettronegativo. La differenza di potenziale è da ricercare nella diversa sensibilità della membrana agli ioni ed all'azione attiva del meccanismo della pompa sodio-potassio. Quando uno stimolo elettrico di sufficiente intensità supera il valore di soglia liminare, dà il via ad una breve ed irreversibile depolarizzazione che comporta la nascita di un potenziale di azione, la cellula entra allora in un effettivo stato di eccitazione e può quindi svolgere la funzione fondamentale alla quale è preposta. Dal momento in cui un potenziale di azione

si genera a livello spinale esso si trasmette ad elevata velocità lungo l'assone, tramite il fenomeno di conduzione saltatoria tra i successivi nodi di Ranvier, fino al bottone sinaptico terminale in prossimità della giunzione neuromuscolare, dove indurrà il rilascio del neurotrasmettitore ACTH (Acetilcolina) dalle apposite vescicole, in grado di trasportare l'informazione ai recettori membranari post-sinaptici e generare così una breve contrazione seguita



**FIGURA 5**  
La placca neuromuscolare, luogo della trasmissione dell'impulso dal motoneurone alla fibra muscolare grazie al rilascio di ACTH.

dal rilasciamento (scossa muscolare).

La fibra muscolare risponde però alla legge del tutto o nulla, per cui una volta stimolata si contrarrà al massimo delle sue capacità momentanee. Per graduare il livello di forza espresso, bisognerà allora ricorrere ad altre modalità di controllo nervoso:

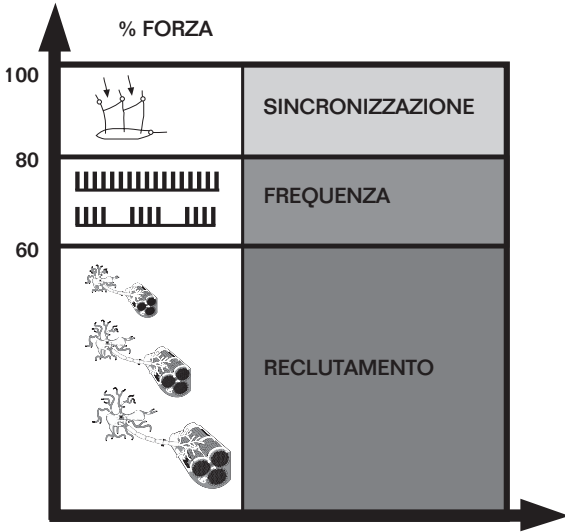
- Il reclutamento di ulteriori U.M., detto reclutamento SPAZIALE
- L'aumento della frequenza di scarica con cui viene stimolata una U.M. già attivata, detto reclutamento TEMPORALE.

Con l'aumentare della frequenza infatti il muscolo non ha più il tempo di rilasciarsi e si assiste ad una progressiva fusione delle scosse muscolari fino al raggiungimento della tetanizzazione, in grado di sviluppare una forza 4 volte superiore a quella della singola scossa. Generalmente però, durante una contrazione muscolare volontaria, il muscolo non riesce a raggiungere la completa tetanizzazione, per cui le differenti

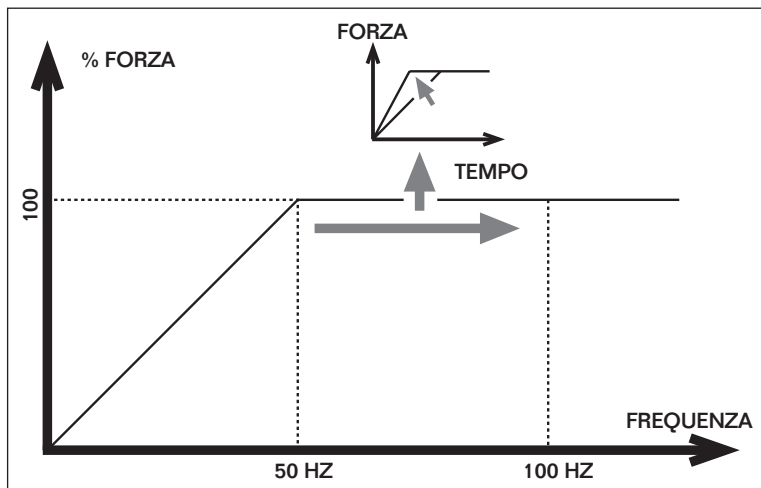
U.M. reclutate scaricano in maniera ASINCRONA, ovvero sfasata nel tempo, per evitare che la forza si sviluppi a scatti. Secondo alcuni autori è comunque possibile il verificarsi di

una diminuzione della differenza nel tempo di intervento soprattutto a carico delle U.M. rapide. Questo fenomeno, che prende il nome di SINCRONIZZAZIONE INTRAMUSCOLARE, contribuirebbe però ad aumentare esclusivamente l'esplosività della contrazione (P.E. Sale). I processi di reclutamento spaziale e temporale si alternano fino al 60-80 % circa della massima contrazione volontaria, oltre, il meccanismo di reclutamento spaziale si esaurisce ed è possibile unicamente utilizzare il secondo per aumentare l'intensità della contrazione. Le U.M. di tipo I

entrano in gioco anticipatamente nei movimenti a bassa intensità lavorativa, mentre con il crescere della stessa vengono reclutate le U.M. di tipo II. Queste indicazioni sono comunque assai generalizzanti e risentono di modifiche ed adattamenti in funzione di alcune variabili, tra le quali spicca la velocità di contrazione del movimento, evidenziando un'elevata plasticità da

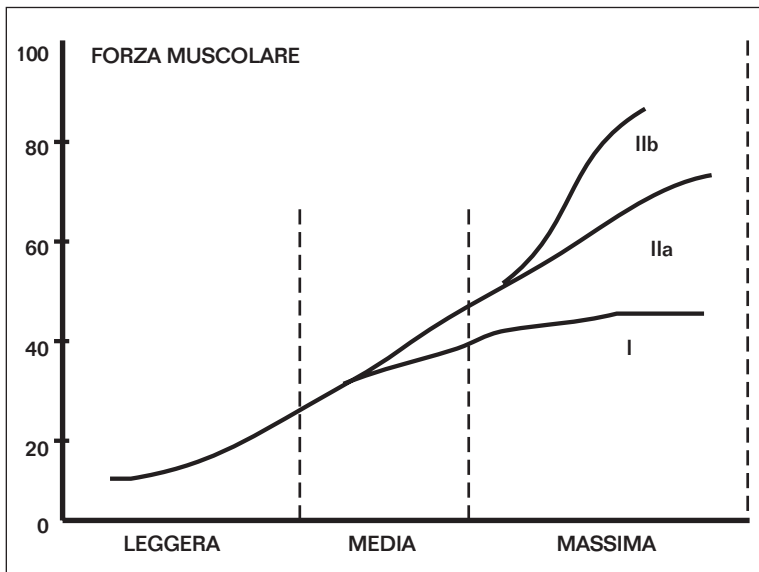


**FIGURA 6**  
I meccanismi che intervengono nella regolazione della forza (Cometti 1988). In realtà il controllo neurogeno non è così semplice ed i meccanismi descritti agiscono in maniera contemporanea.

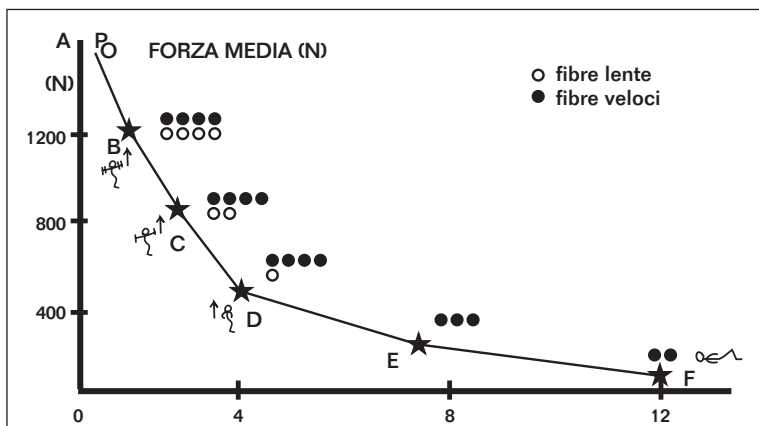


**FIGURA 7**  
La sincronizzazione intramuscolare sembra agire sulla velocità della contrazione più che sull'aumento della forza (da Cometti 1988).





**FIGURA 8**  
Il reclutamento spaziale secondo il principio di Henneman (1965) illustrato da Costill. Con l'aumentare dell'intensità della contrazione vengono progressivamente messe in gioco le fibre di tipo I, quindi le IIa e IIb.



**FIGURA 9**  
Relazione tra la forza sviluppata in salti verticali, eseguiti con e senza carico sulle spalle, e la velocità del ginocchio. L'intervento delle fibre muscolari viene presentato secondo l'ipotesi di Bosco secondo il quale le U.M. rapide in movimenti balistici entrano in gioco anticipatamente (Bosco 1995).

parte del sistema nervoso nel controllo della forza e dei movimenti, tanto che alcuni meccanismi rimangono tuttora poco chiariti.

L'elettrostimolazione, come vedremo in seguito, è in grado di agire sui principali meccanismi di reclutamento neurogeno descritti. Mediante questa metodica, a differenza di quello che accade nel



La stimolazione dei quadricipiti con elettrostimolazione comporta un impegno nervoso totale.

reclutamento volontario, sarà inoltre possibile ottenere una tetanizzazione completa e continuativa delle U.M. nonché la contrazione **sincrona** delle stesse. È facile intuire quali possano essere i possibili vantaggi derivanti dall'utilizzo di impulsi elettrici esogeni nell'allenamento.

La stimolazione dei muscoli tramite elettrostimolazione avviene però a livello periferico (placca neuromuscolare), in questo caso il ruolo del sistema nervoso centrale e delle afferenze non è stato ancora sufficientemente indagato.