

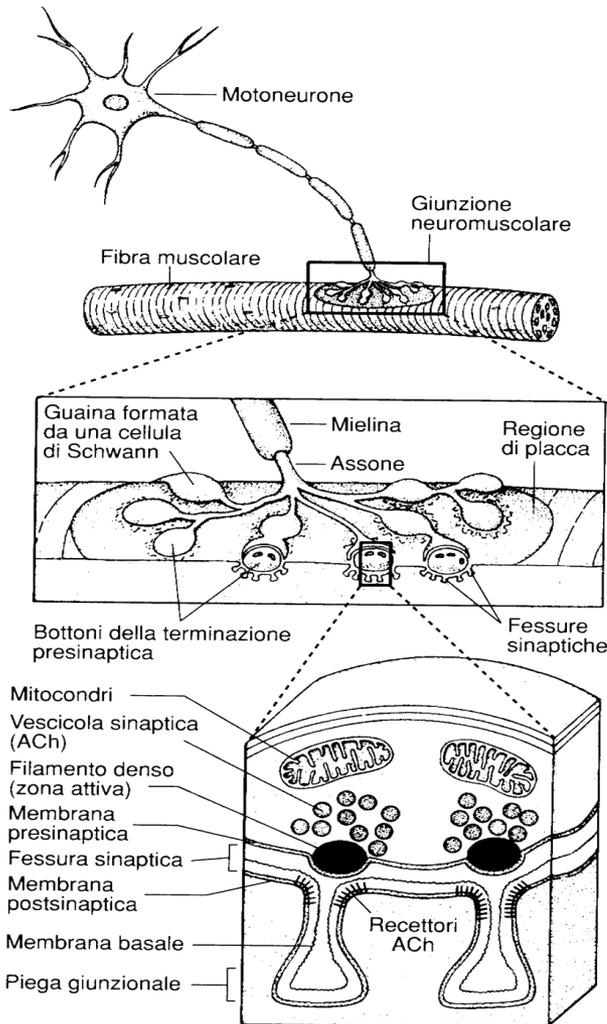
# ASPETTI MECCANICI DELLA CONTRAZIONE MUSCOLARE

**FGE aa.2016-17**

# ARGOMENTI

- ◆ Innervazione Del Muscolo Scheletrico
- ◆ Placca Neuro Muscolare
- ◆ Unità Neuro Motorie
- ◆ Tipi Di Contrazione
- ◆ Scosse Semplici
- ◆ Relazioni Tensione-lunghezza E Velocità-forza
- ◆ Tetano Muscolare E Fatica
- ◆ Tipi Di Fibre Muscolari
- ◆ Centri Motori Dei Muscoli
- ◆ Modulazione Della Forza Muscolare
- ◆ Elettromiografia
- ◆ Adattamenti funzionali all'allenamento

# INNERVAZIONE DEL MUSCOLO



## ● Struttura

- Una Giunzione Per Ogni Fibra Muscolare
- Terminazione Presinaptica Ramificata In Bottoni
- Acetilcolina Come Mediatore
- Spazio Sinaptico Da 50-100 Nm
- Membrana Post-sinaptica Pieghettata Con Una Superficie Di 2000 Mm<sup>2</sup>
- Recettori Nicotinici Per L'acetilcolina

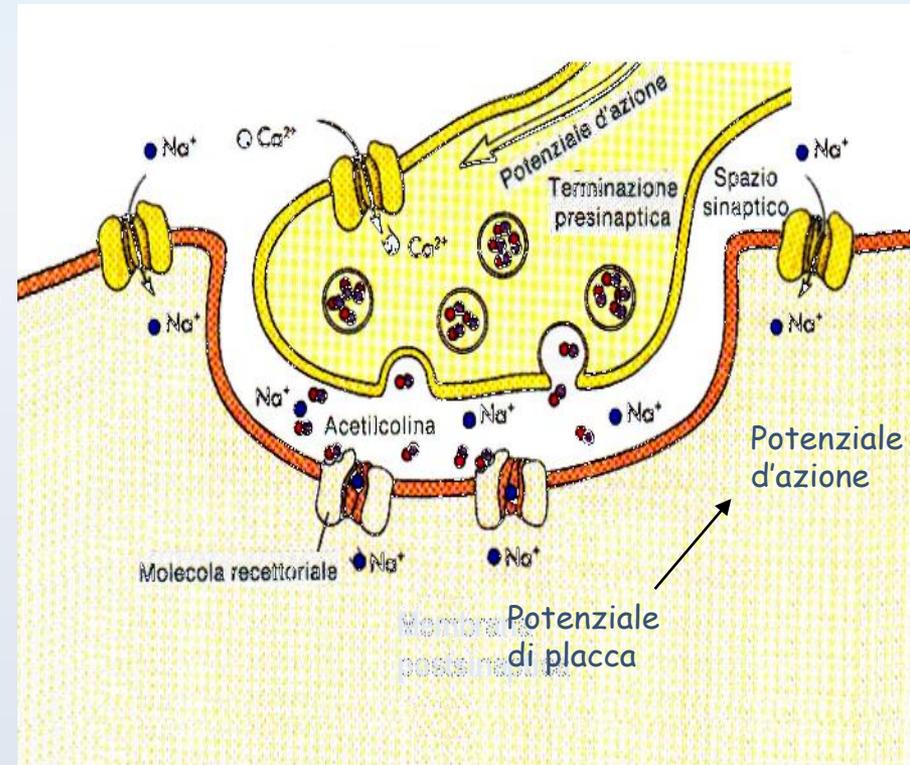
# FUNZIONAMENTO DELLA PLACCA NEUROMUSCOLARE

## ● Meccanismo

- Depolarizzazione Della Terminazione
- Liberazione Di Acetilcolina
- Legame Con Il Recettore Della Membrana Post-sinaptica (Poi Inattivazione)
- Apertura Dei Canali Postsinaptici
- Forte Corrente Di  $\text{Na}^+$  Verso L'interno
- Potenziale Di Placca
- Correnti Locali Verso Regioni Perisinaptiche
- Insorgenza Del Potenziale D'azione

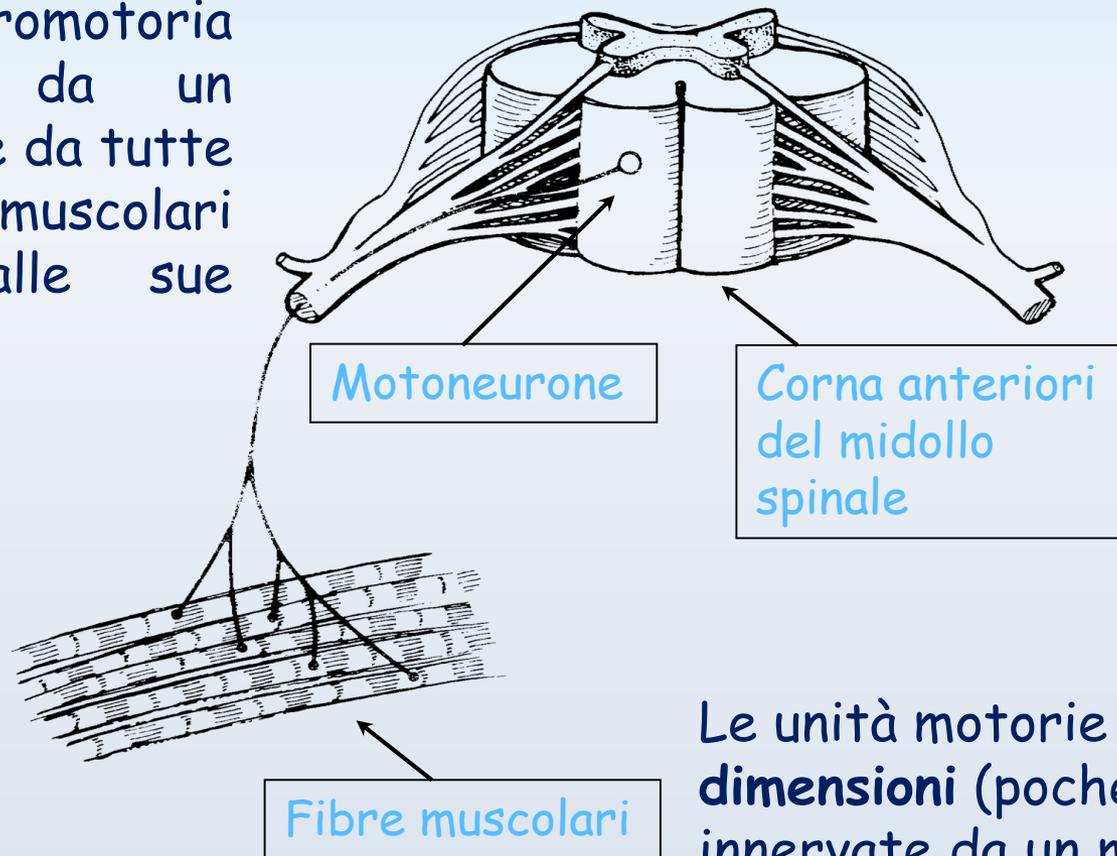
## ● Caratteristiche

- Sempre Eccitatoria
- Mancanza Di Sommazione
- Sicurezza Della Trasmissione



# UNITÀ NEUROMOTORIA

Una unità neuromotoria è formata da un motoneurone e da tutte le fibre muscolari innervate dalle sue terminazioni



Le unità motorie differiscono in **dimensioni** (poche o molte fibre innervate da un motoneurone) e in **tipo di fibre** (veloci, lente, intermedie)

# TIPI DI CONTRAZIONE

## Isometrica

Lunghezza costante  
Massima forza

## Isotonica

Lunghezza variabile  
Forza costante

Concentrica

Accorciamento  
Forza attiva

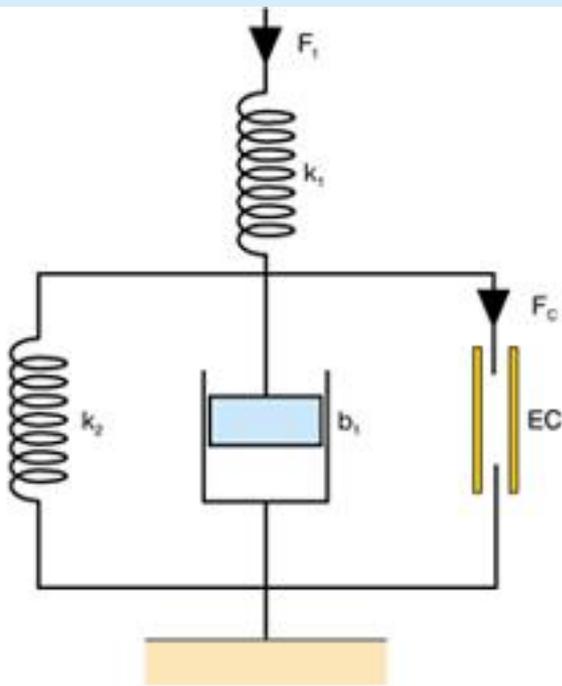
Eccentrica

Allungamento  
Forza resistiva

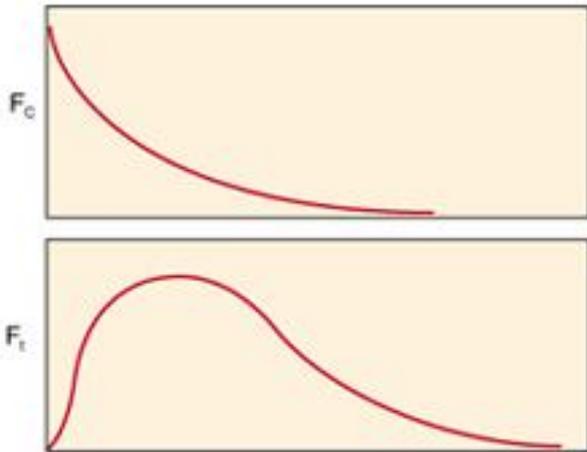
## Isocinetica

Velocità costante  
Carico variabile

# MODELLO MECCANICO MUSCOLARE



- EC: ELEMENTI CONTRATTILI
- K1: ELEMENTI ELASTICI IN SERIE
- K2: ELEMENTI ELASTICI IN PARALLELO
- B1: ELEMENTI VISCOSI IN PARALLELO
- FC: FORZA SVILUPPATA DAGLI EC
- FT: FORZA MISURATA AL CAPO7 DEL TENDINE



# I DETERMINANTI DELLE PRESTAZIONI MECCANICHE DEL MUSCOLO

## FORZA (N)

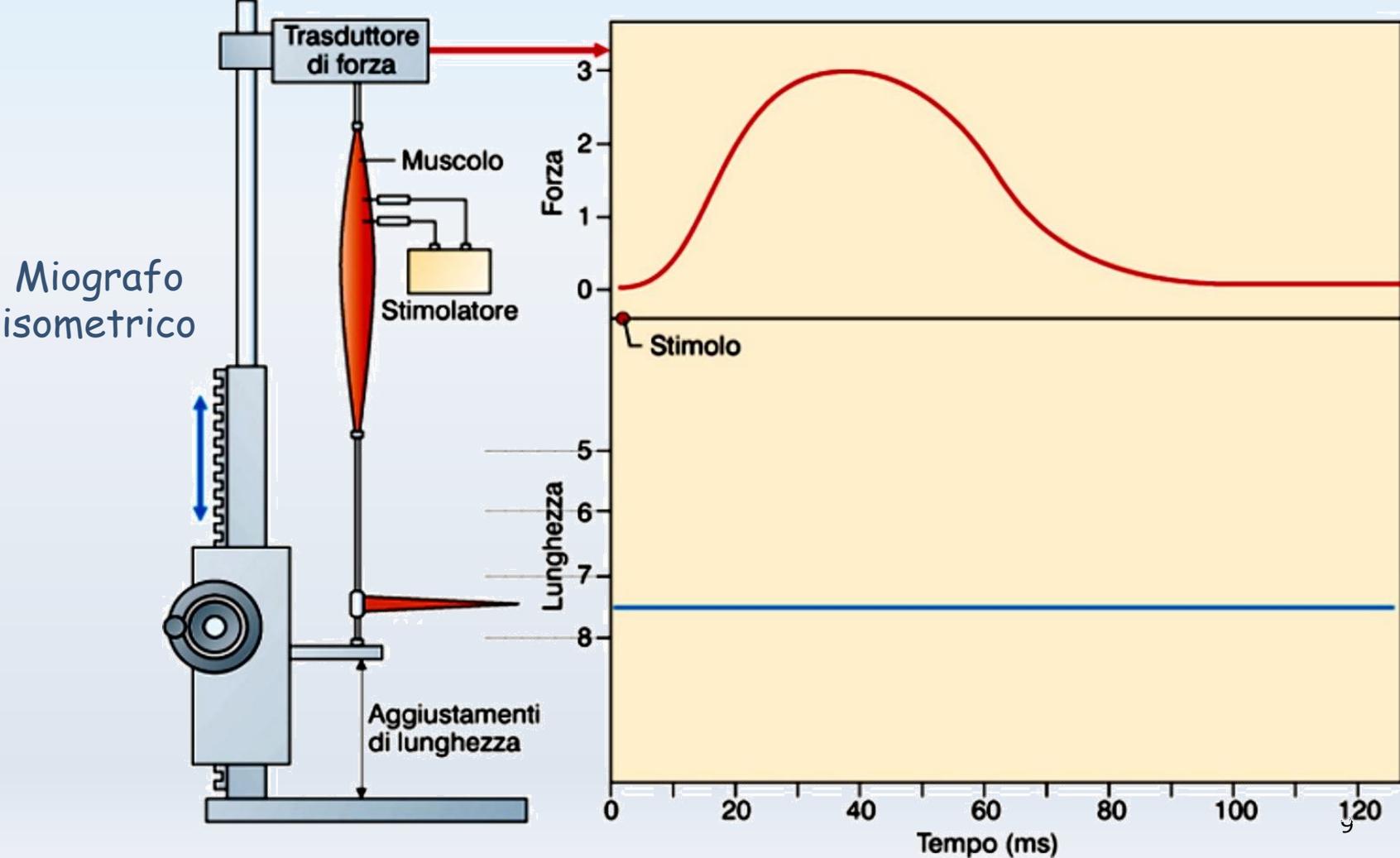
1. Caratteristiche delle fibre muscolari
2. Caratteristiche delle unità motorie
3. Caratteristiche dell'unità muscolo tendinea

## Velocità (m/s)

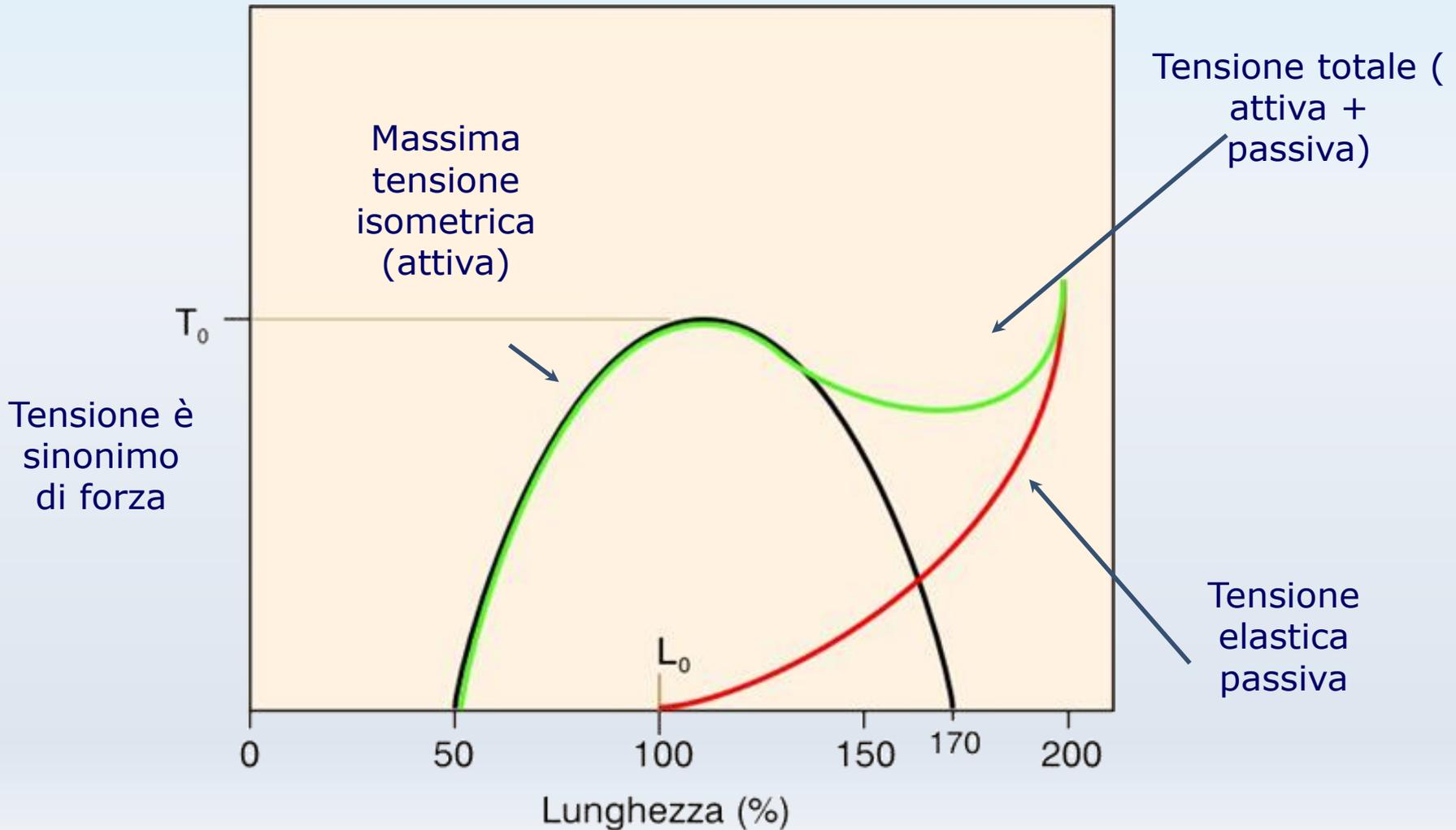
1. Velocità con la quale avviene l'interazione tra actina e miosina
  - Carico applicato
  - Attività ATPasica
  - Massima forza isometrica sviluppata

$$\text{Potenza (W)} = \text{Forza} \times \text{Velocità}$$

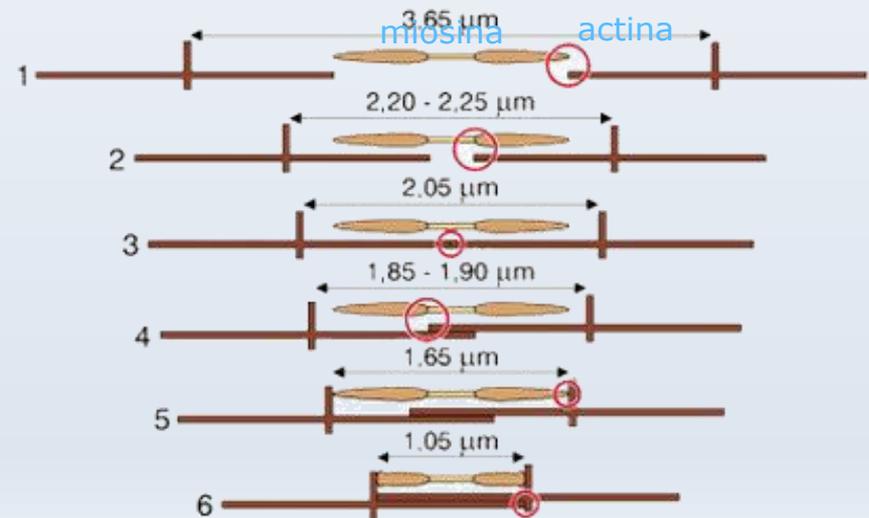
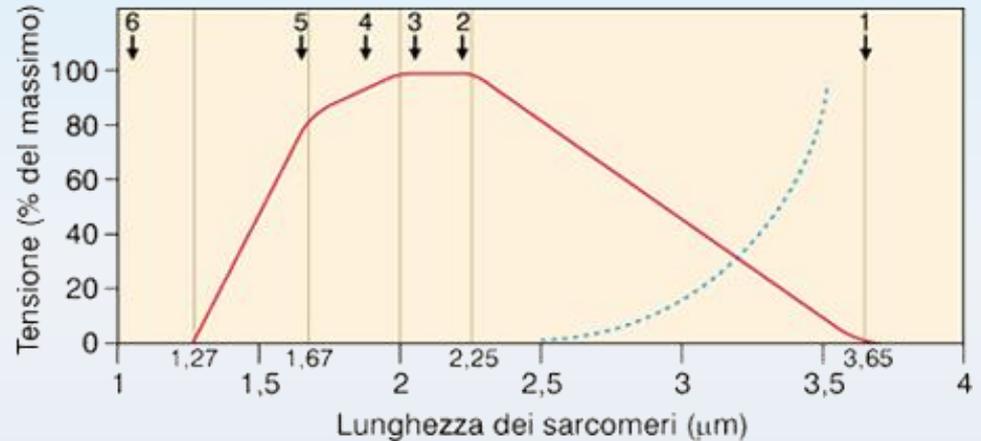
# SCOSSA MUSCOLARE SEMPLICE ISOMETRICA



# RELAZIONE TENSIONE - LUNGHEZZA



# SPIEGAZIONE DELLA CURVA TENSIONE-LUNGHEZZA



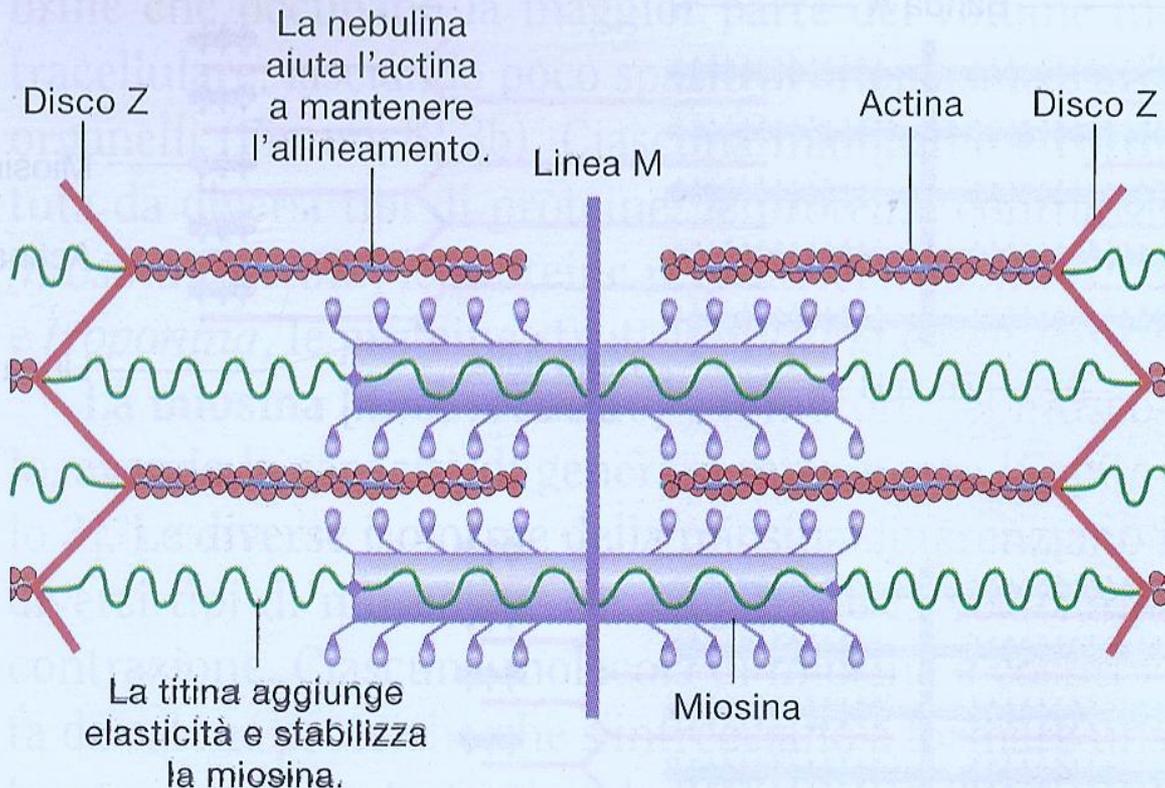
1. Nessuna sovrapposizione

2-3. Sovrapposizione ottimale

4-6. Doppia sovrapposizione

## TITINA E NEBULINA

Titina e nebulina sono proteine accessorie giganti. La titina si estende dalla linea Z alla linea M successiva. La nebulina percorre tutto il filamento sottile, è attaccata a una linea Z, ma non raggiunge la linea M.



TITINA ENORME  
PROTEINA ELASTICA:

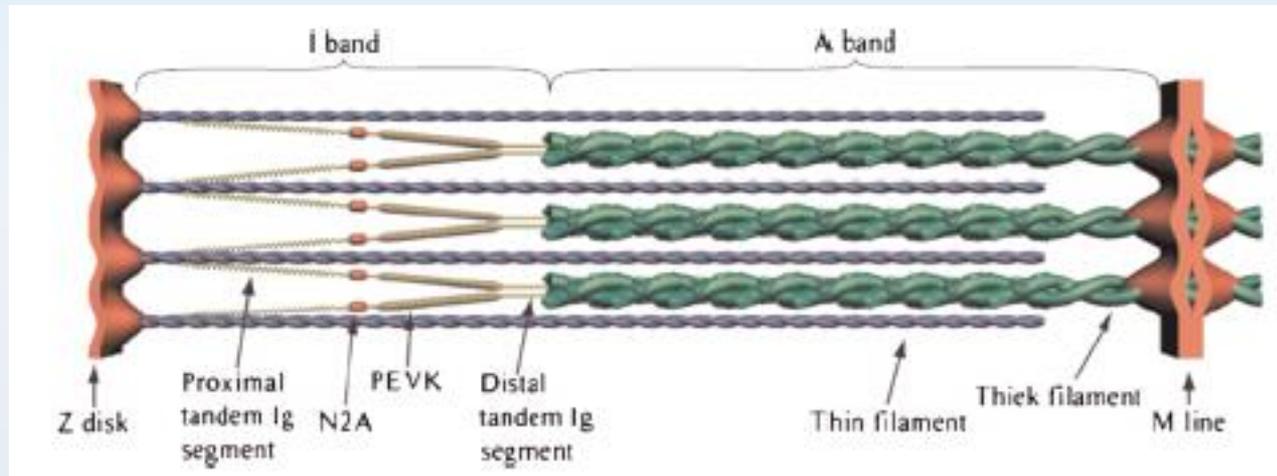
STABILIZZA LA  
POSIZIONE DEI  
FILAMENTI  
CONTRATTILI

CONSENTE IL RITORNO  
DEL MUSCOLO ALLA  
LUNGHEZZA INIZIALE  
DOPO LO STIRAMENTO

NEBULINA È  
ANELASTICA:

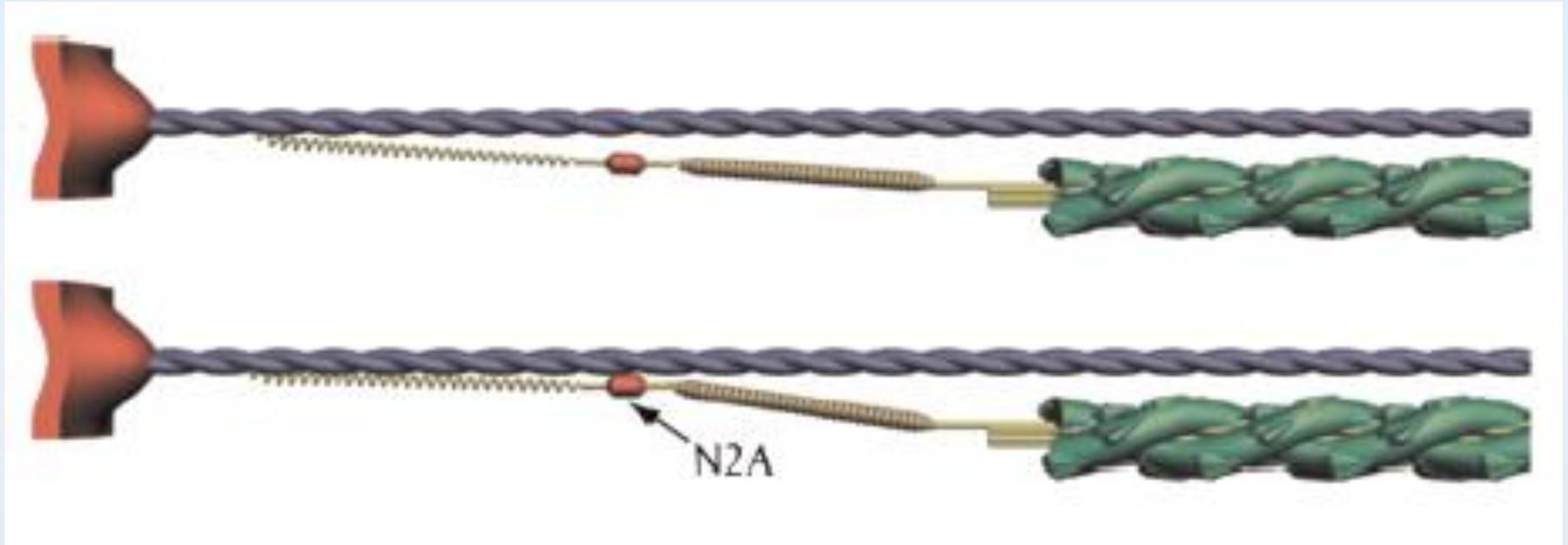
FAVORISCE  
L'ALLINEAMENTO  
DELL'ACTINA NEL  
SARCOMERO

# RELAZIONE TENSIONE ATTIVA - LUNGHEZZA-RUOLO DELLA TITINA



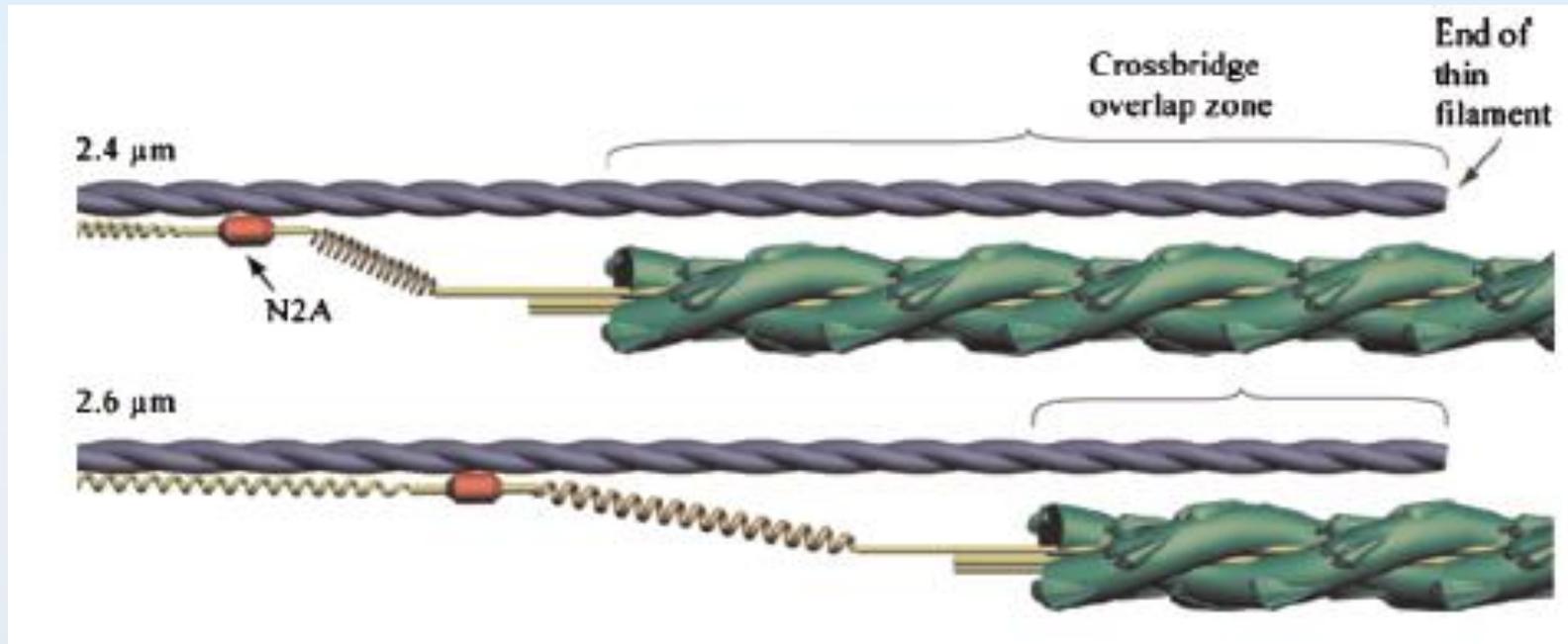
- Titina: due segmenti "arrotolati" Ig posti in tandem con l'interposizione del segmento PEVK e del sito N2A
- In ogni emisarcomero la titina si lega al filamento sottile nella banda I e al filamento spesso nella banda A
- Se il muscolo è stirato, i segmenti Ig e PEVK sono posti in tensione

# RELAZIONE TENSIONE ATTIVA - LUNGHEZZA-RUOLO DELLA TITINA



- Se la concentrazione di  $\text{Ca}^{++}$  citoplasmatica aumenta, N2A si lega al filamento sottile nella banda I
- In questo modo, la *stiffness* della "molla" di titina aumenta e così anche la forza sviluppata dal muscolo

# RELAZIONE TENSIONE ATTIVA - LUNGHEZZA - RUOLO DELLA TITINA



- Se N2A si lega al filamento sottili in molteplici siti, la forza isometrica potrebbe rimanere costante anche se il numero di punti si riduce per l'allungamento del sarcomero
- Quindi, la tensione della titina compenserebbe la riduzione del numero di ponti: spiegazione del plateau della curva tensione-lunghezza

# DETERMINATI DELLA FORZA MUSCOLARE ISOMETRICA

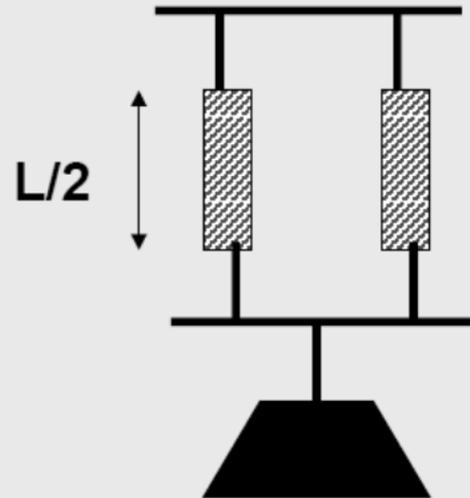
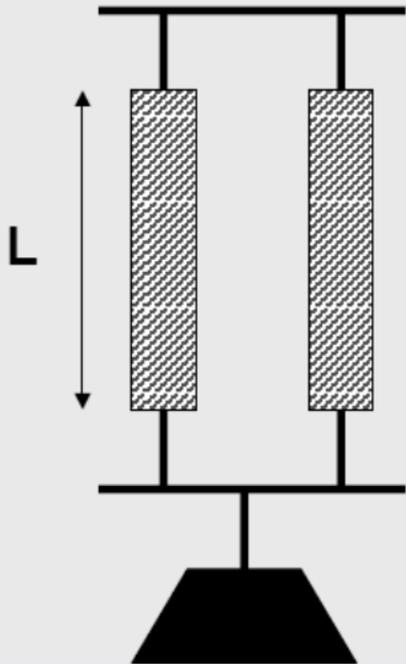
(SINGOLA FIBRA MUSCOLARE)

- LA FORZA ISOMETRICA DIPENDE DAL **NUMERO DI PONTI** TRA ACTINA E MIOSINA.

A SUA VOLTA, IL NUMERO DI PONTI DIPENDE DA:

- **DIAMETRO DELLA FIBRA**
  - (INFLUENZA IL NUMERO DI MIOFIBRILLE E QUINDI IL NUMERO DI SARCOMERI IN PARALLELO)
- **LUNGHEZZA DEI SARCOMERI (CURVA TEN-LUNGH)**
- **QUANTITÀ DI CALCIO CHE SI LEGA ALLA TROPONINA**
- **TIPO DI MIOSINA**

# ELEMENTI IN PARALLELO



## IN PARALLELO

$$\Delta L_{\text{tot}} = \Delta L_i$$

$$F_{\text{tot}} = F_1 + F_2$$

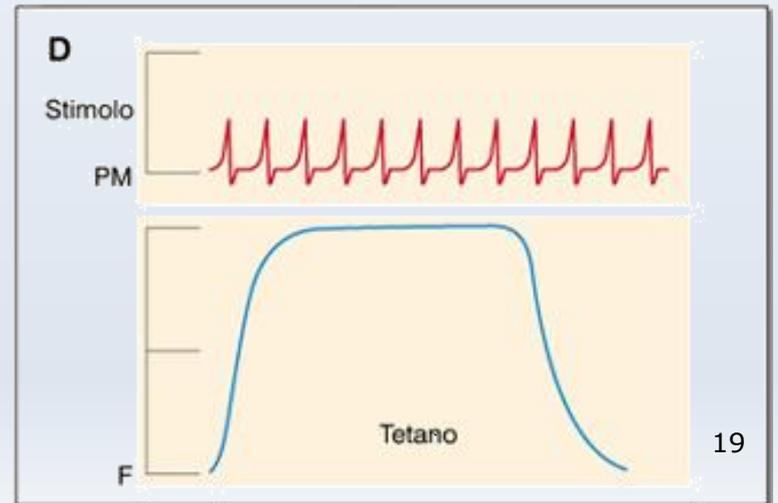
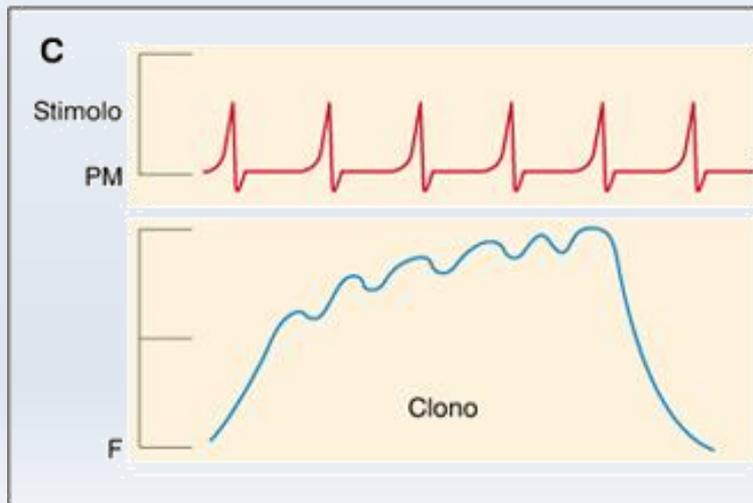
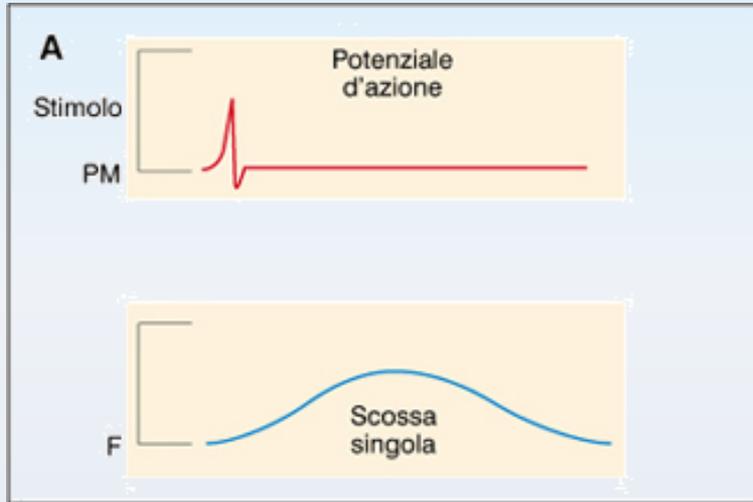
*(quindi  $F$  va normalizzata dividendola per la superficie di sezione)*

# QUANTITÀ DI CALCIO CHE SI LEGA ALLA TROPONINA

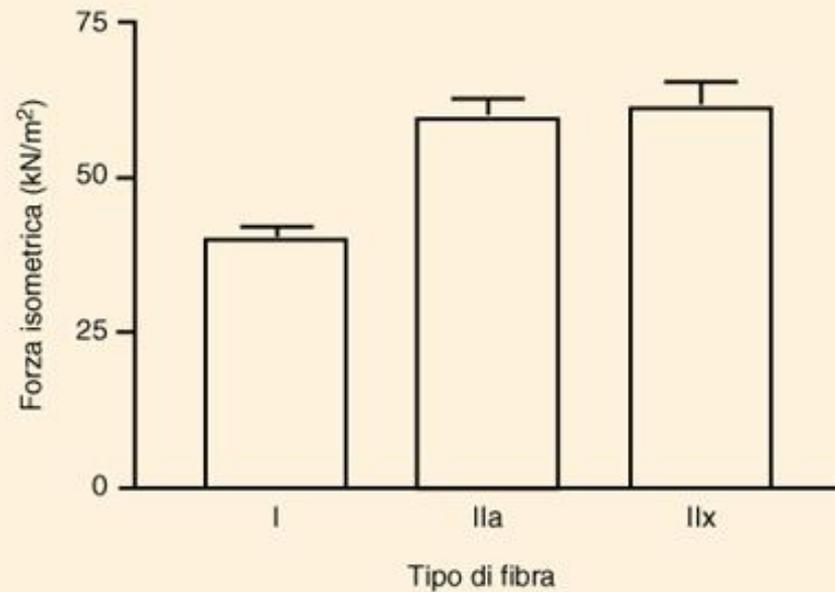
- DIPENDE DALLA QUANTITÀ DI CALCIO LIBERATA DAL RETICOLO SARCOPLASMATICO
- **CONCENTRAZIONE DI CALCIO LIBERO RAGGIUNTA NEL CITOPLASMA**
- DALL'AFFINITÀ DELLA TROPONINA C PER IL CALCIO
- DAL **TEMPO** DURANTE IL QUALE LA **CONCENTRAZIONE** DI CALCIO NEL CITOPLASMA RESTA **ALTA** PRIMA CHE IL CALCIO VENGA **RICATTURATO** DAL RETICOLO SARCOPLASMATICO

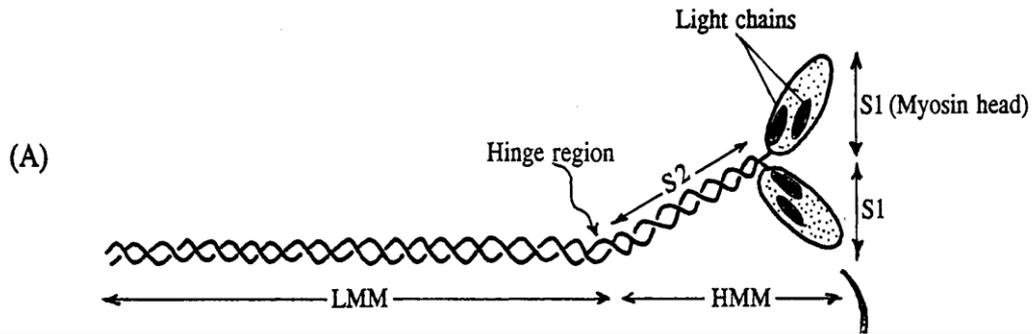
# FREQUENZA DI STIMOLAZIONE

## TETANO MUSCOLARE

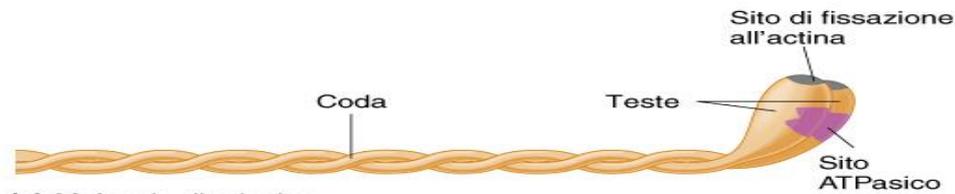


# ISOFORME DELLA MIOSINA E MASSIMA FORZA ISOMETRICA





*Miosina*



(a) Molecola di miosina

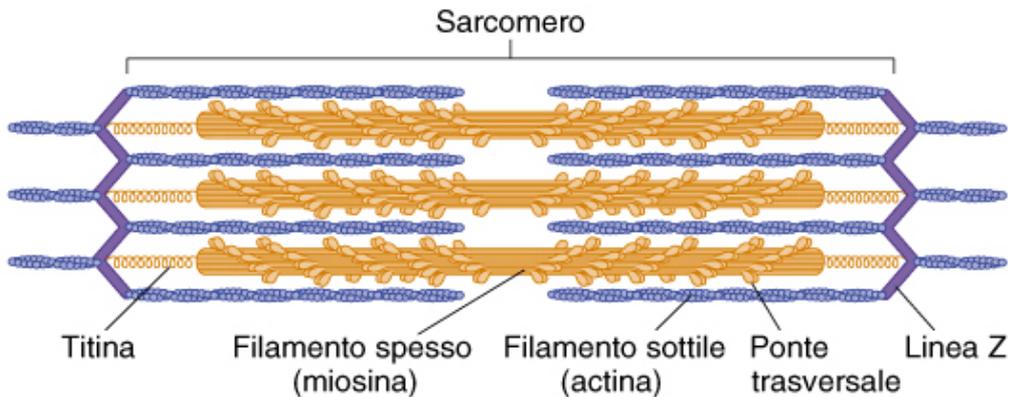


(b) Due molecole di miosina unite alle loro estremità



(c) Parte di filamento spesso

*Singolo filamento  
(di Miosina)*



(d) Sarcomero

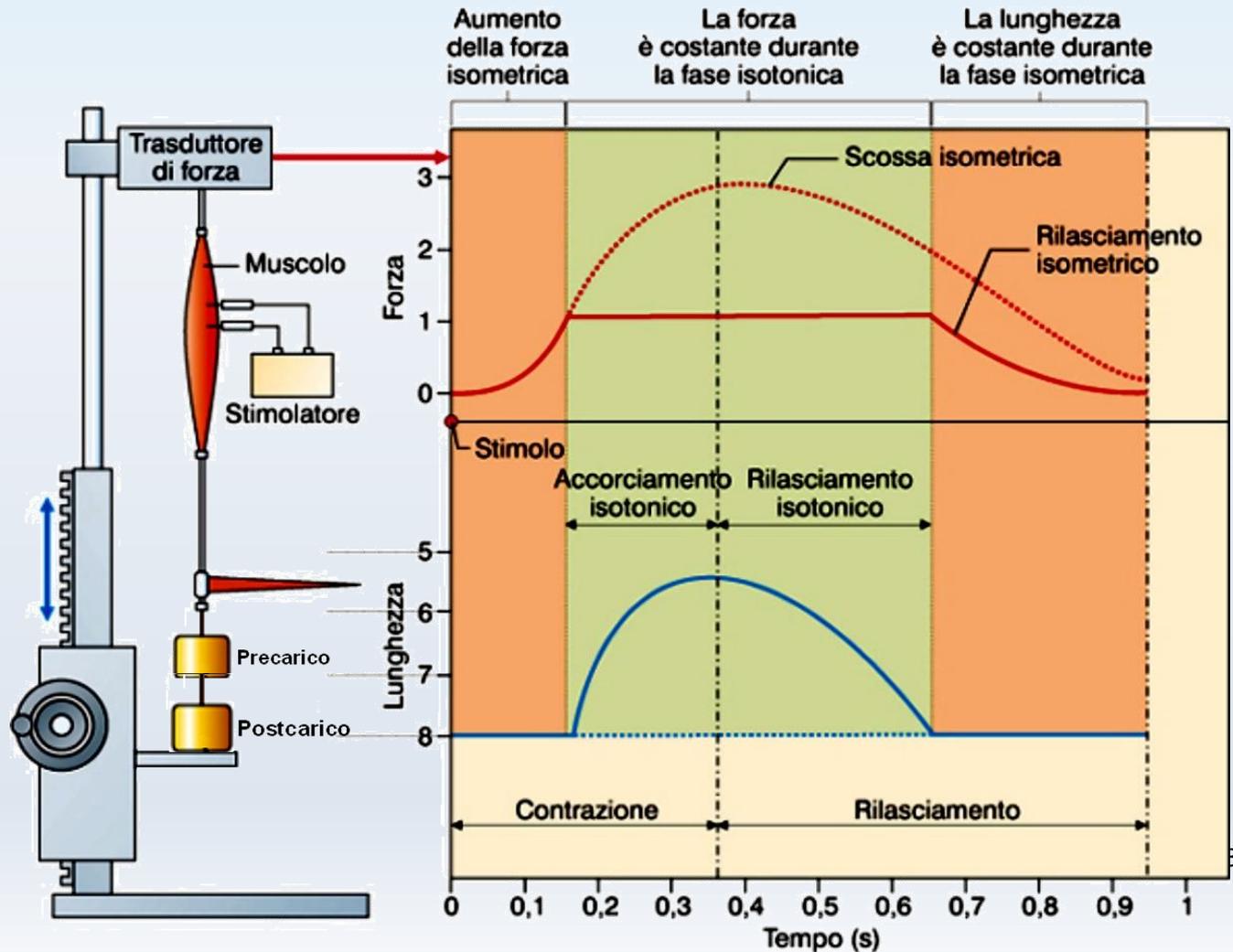
# CARATTERISTICHE FIBRE SCHELETRICHE

Isoforme delle catene pesanti, Meromyosin heavy chain (MHC), 3 tipi principali; Esistono anche fibre che contengono isoforme ibride (MHC-I+MHC-II), QUESTE SONO FIBRE IN FASE DI TRASFORMAZIONE

	<i>Tipo I: lento ossidativo</i>	<i>Tipo IIa: veloce ossidativo</i>	<i>Tipo IIx: veloce glicolitico</i>
Isoforme della miosina	MHC-I	MHC-IIa	MHC-IIx
Capacità della pompa per il $Ca^{2+}$ del reticolo sarcoplasmatico	Moderata	Elevata	Elevata
Diametro (distanza di diffusione)	Medio	Piccolo	Grande
Capacità ossidativa; contenuto di mitocondri; densità dei capillari; mioglobina	Elevata	Molto alta	Bassa
Capacità glicolitica	Moderata	Elevata	Elevata

# SCOSSA MUSCOLARE SEMPLICE ISOTONICA

Miografo  
isotonico

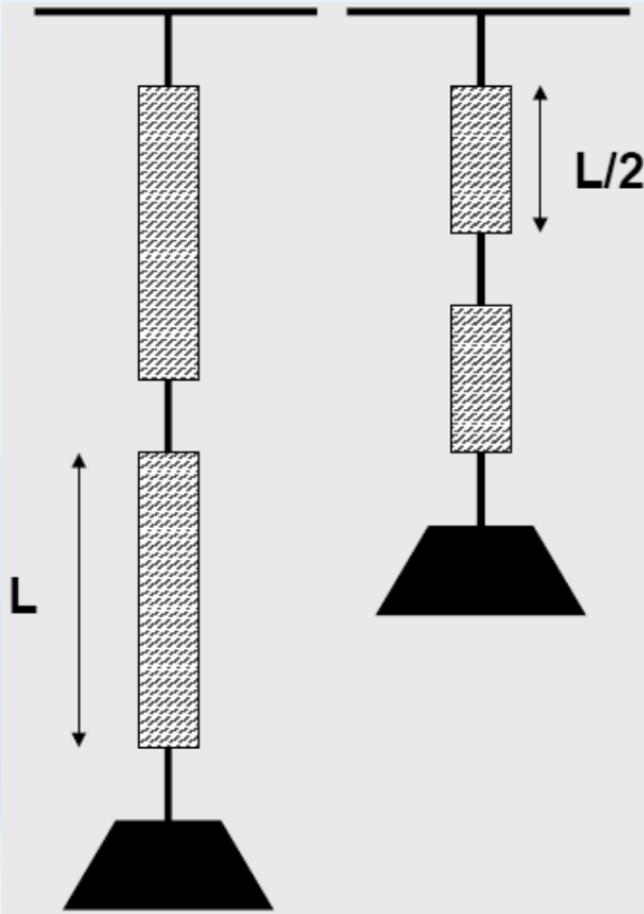


# DETERMINATI DELLA VELOCITÀ DI ACCORCIAMENTO

(SINGOLA FIBRA MUSCOLARE)

- DIPENDE DALLA VELOCITÀ DEL CICLO DI INTERAZIONE TRA ACTINA E MIOSINA.
- ESSA DIPENDE DA:
  - - NUMERO DI SARCOMERI IN SERIE
  - - CARICO APPLICATO (CURVA F - V)
  - - ATTIVITÀ ATP-ASICA DELLA MIOSINA (TIPI DI MIOSINA)
  - - MASSIMA FORZA ISOMETRICA SVILUPPATA

# ELEMENTI IN SERIE



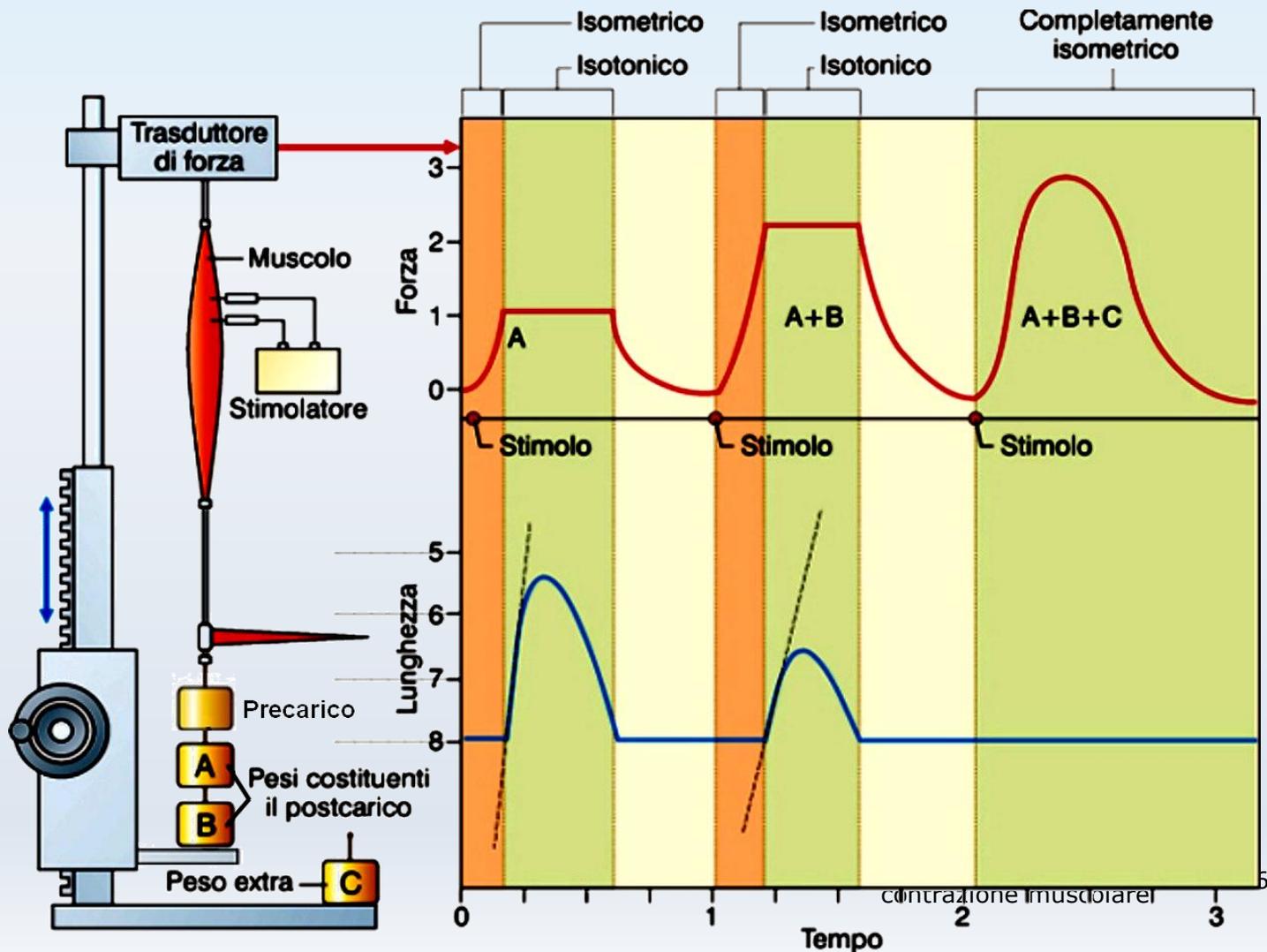
## IN SERIE

$$\Delta L_{\text{tot}} = \Delta L_1 + \Delta L_2$$

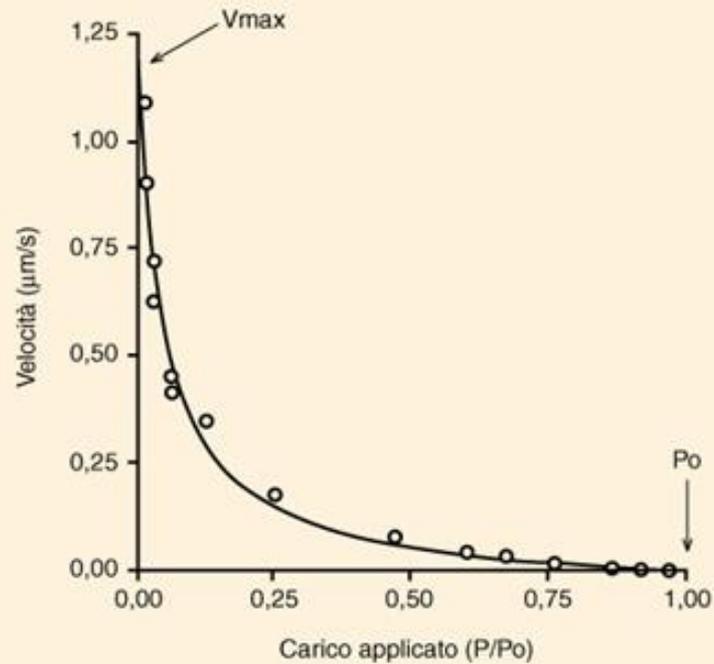
$$F_{\text{tot}} = F_1 = F_2$$

$$\Delta L / \Delta t = \Delta L_1 / \Delta t + \Delta L_2 / \Delta t$$

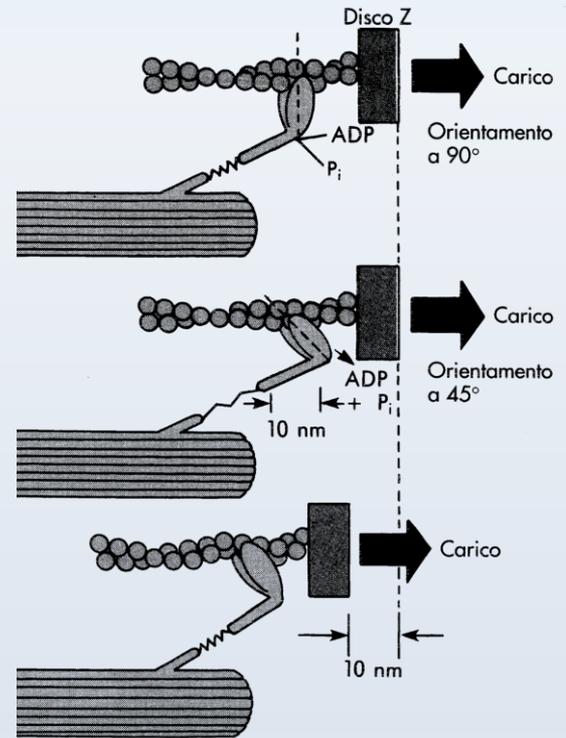
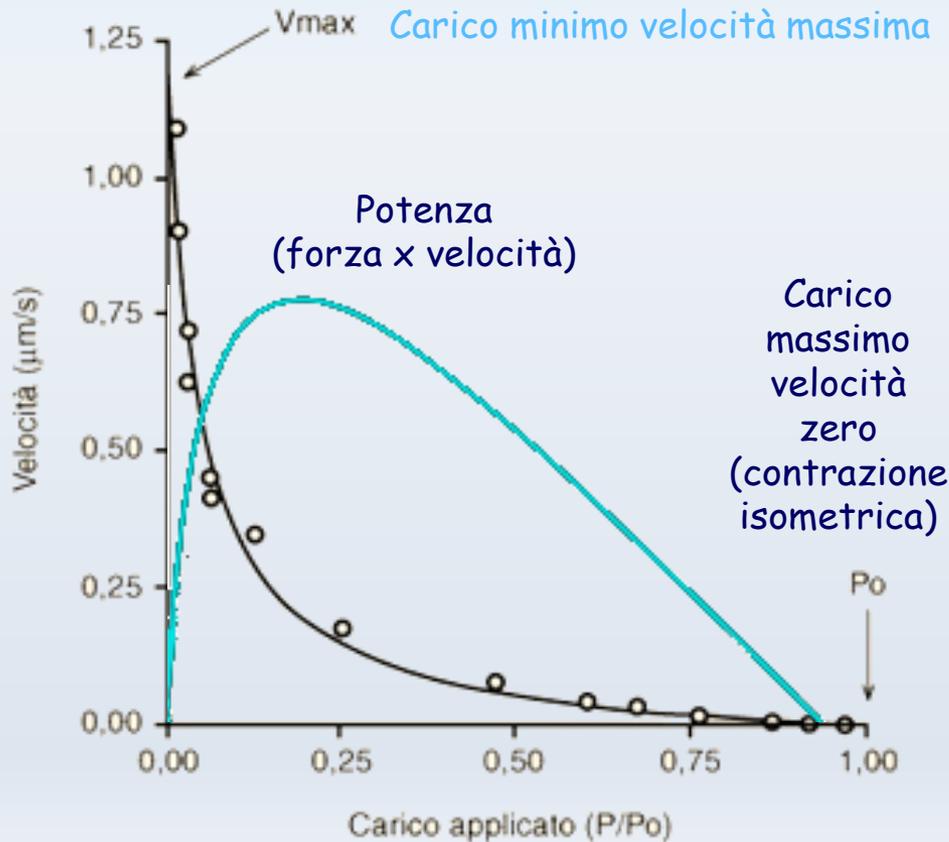
# SCOSSE ISOTONICHE A CARICO CRESCENTE



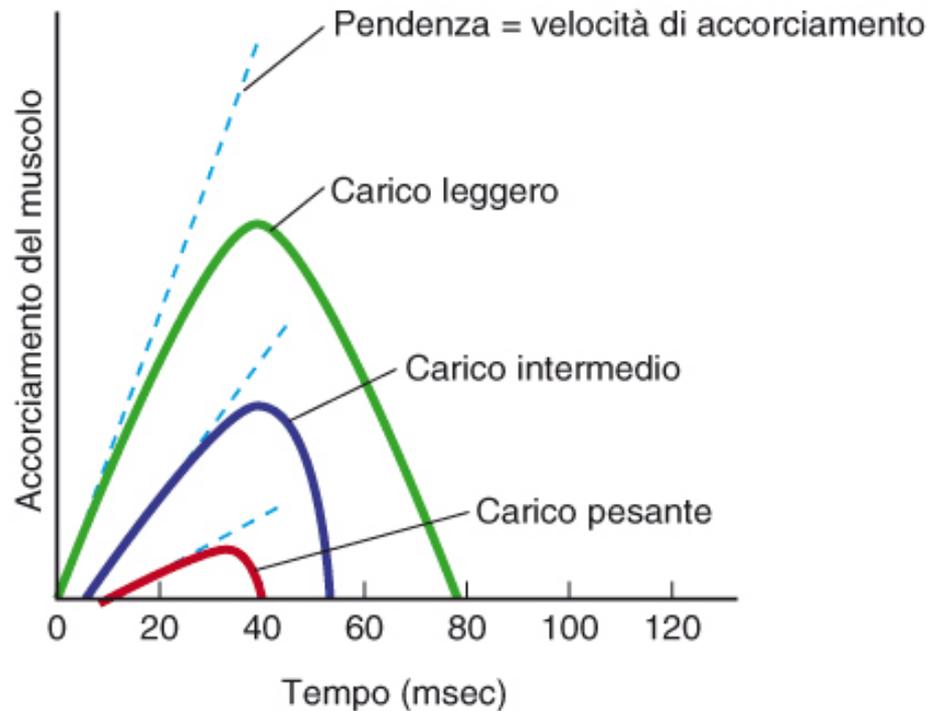
# CARICO APPLICATO - CURVA FORZA-VELOCITÀ



# CURVA VELOCITÀ - CARICO



# EFFETTO DEL CARICO SULLA VELOCITÀ DI ACCORCIAMENTO

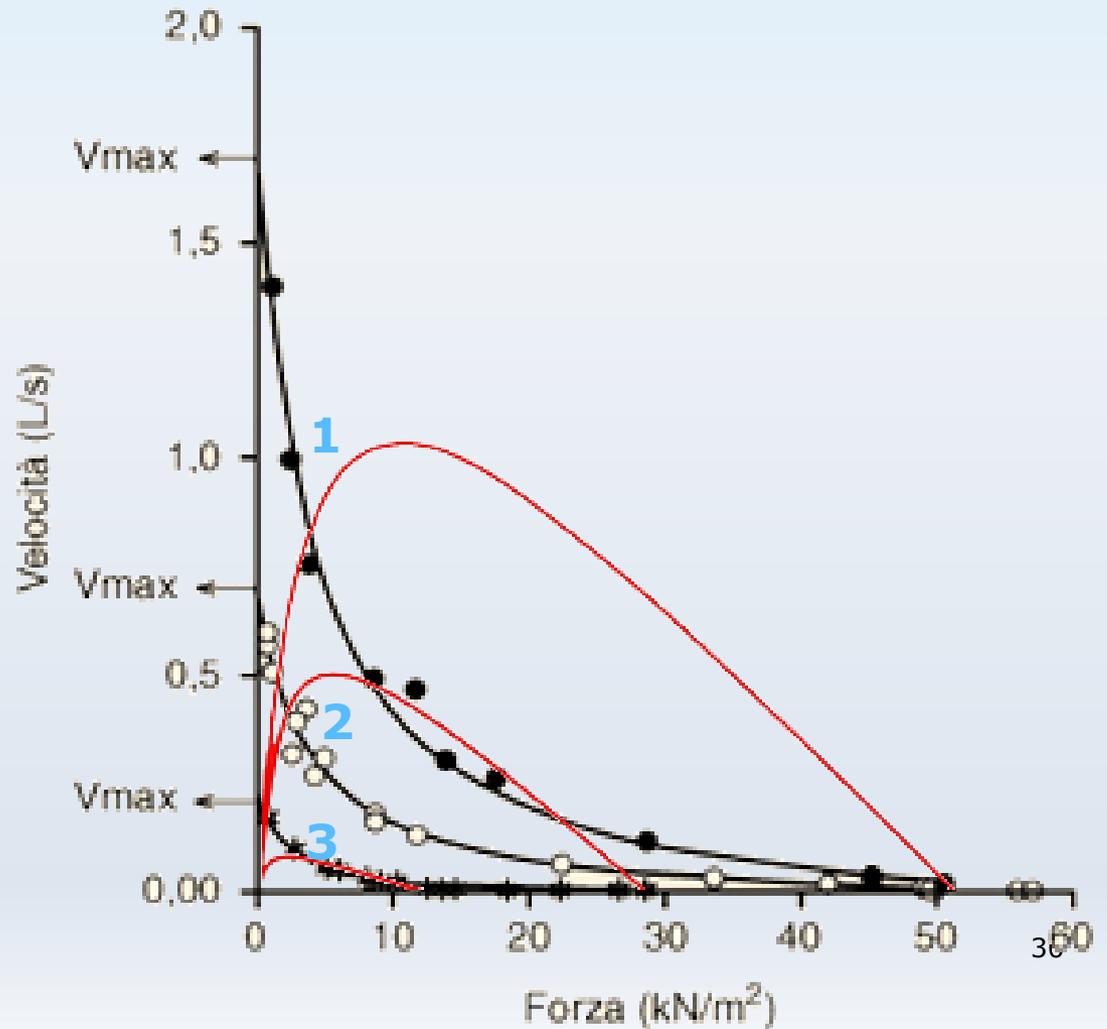


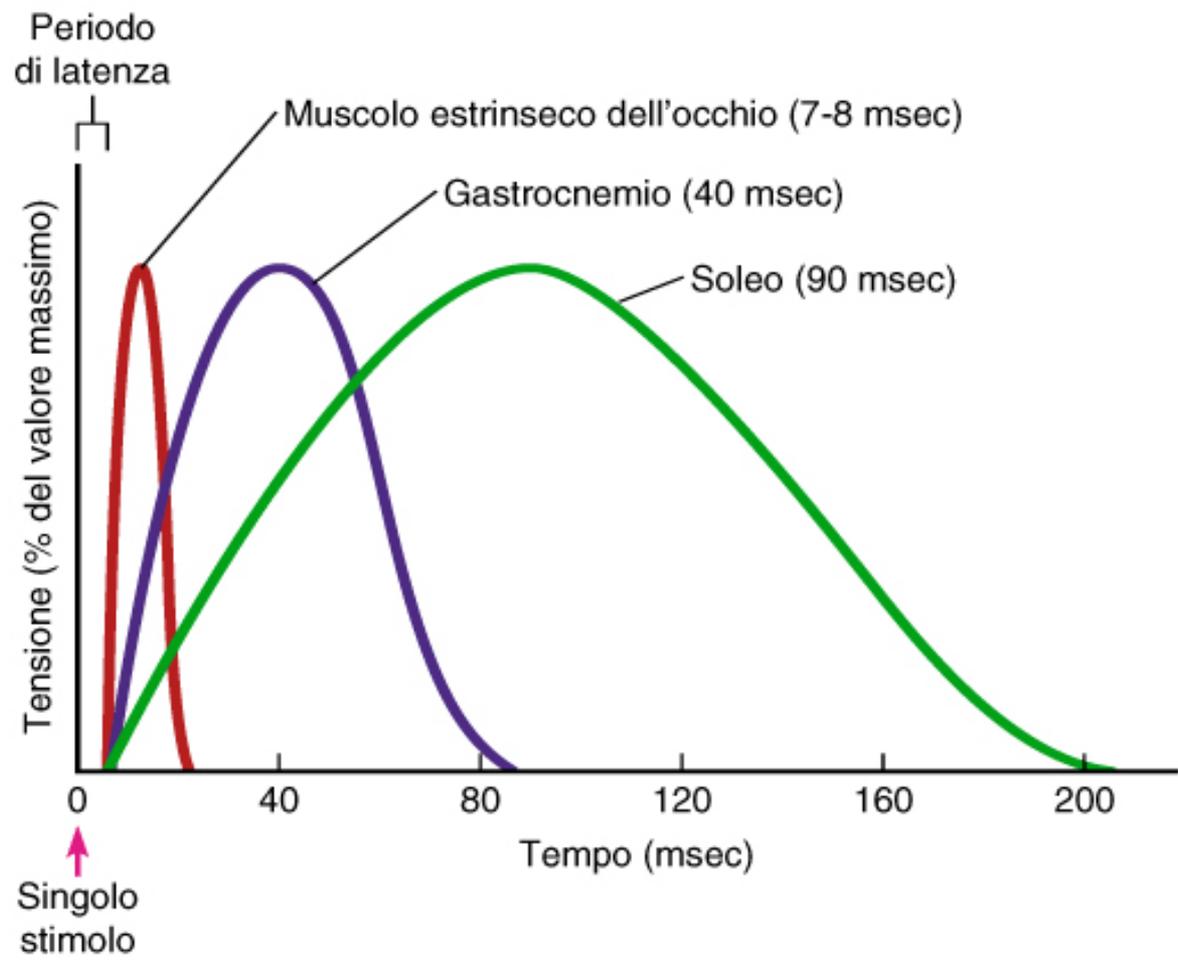
# UNITÀ MOTORIE CON VELOCITÀ E POTENZE DIFFERENTI

1 Fibre veloci

2 Fibre intermedie

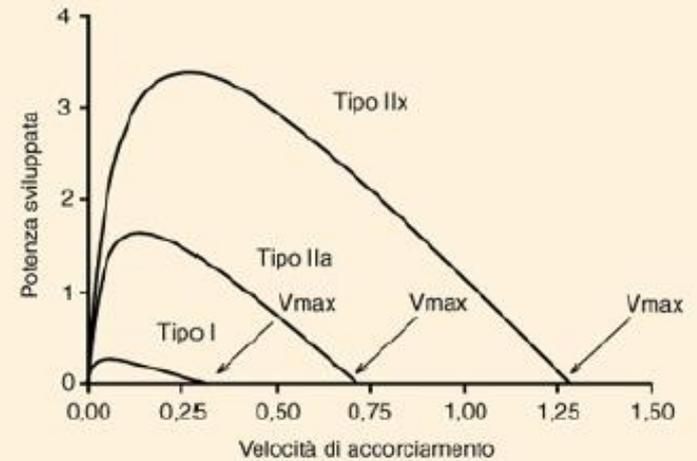
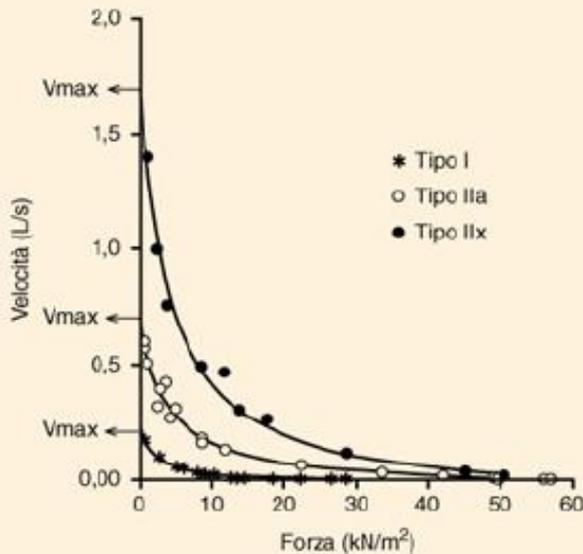
3 Fibre lente



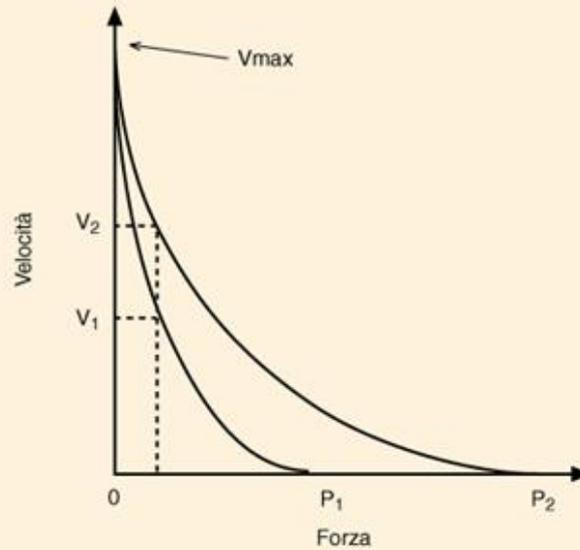


# ATTIVITÀ ATP-ASICA DELLA MIOSINA

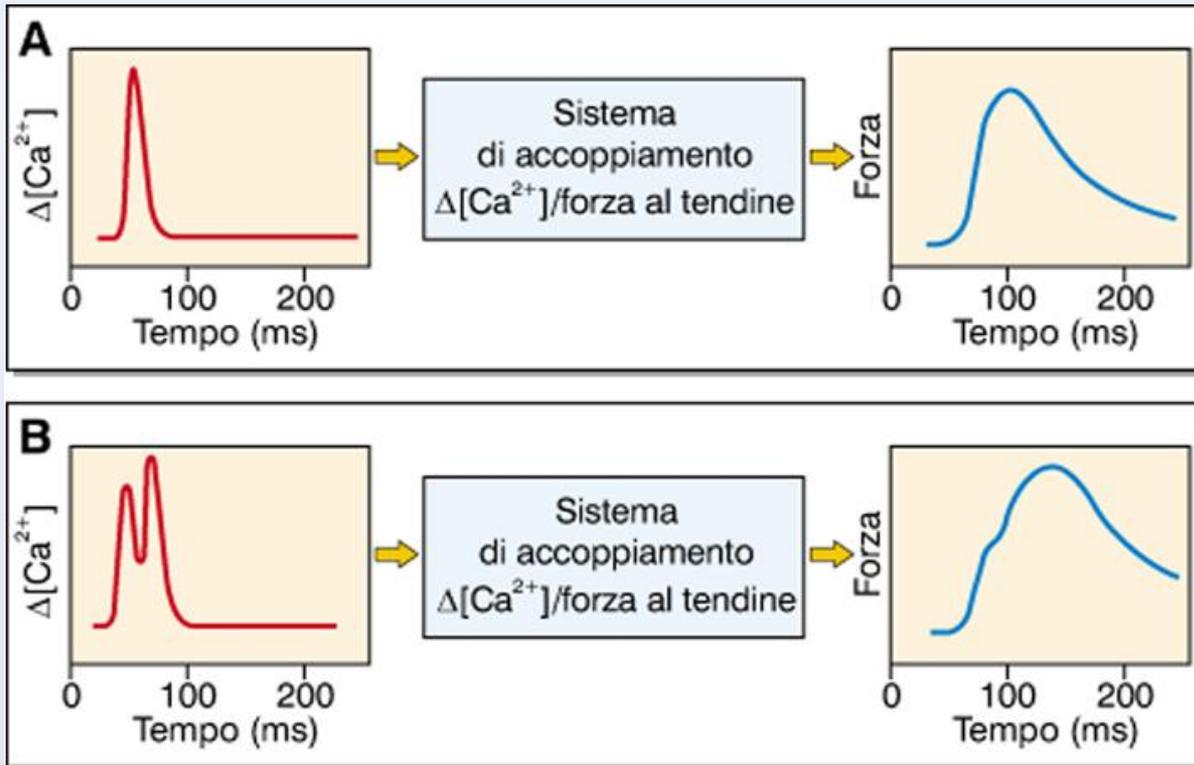
- MHC-I HANNO Attività 3-4 VOLTE MINORE DELLE MHC-IIx
- MHC-I SONO 7-9 VOLTE PIÙ LENTE DELLE MHC-IIx



# MASSIMA FORZA ISOMETRICA SVILUPPATA

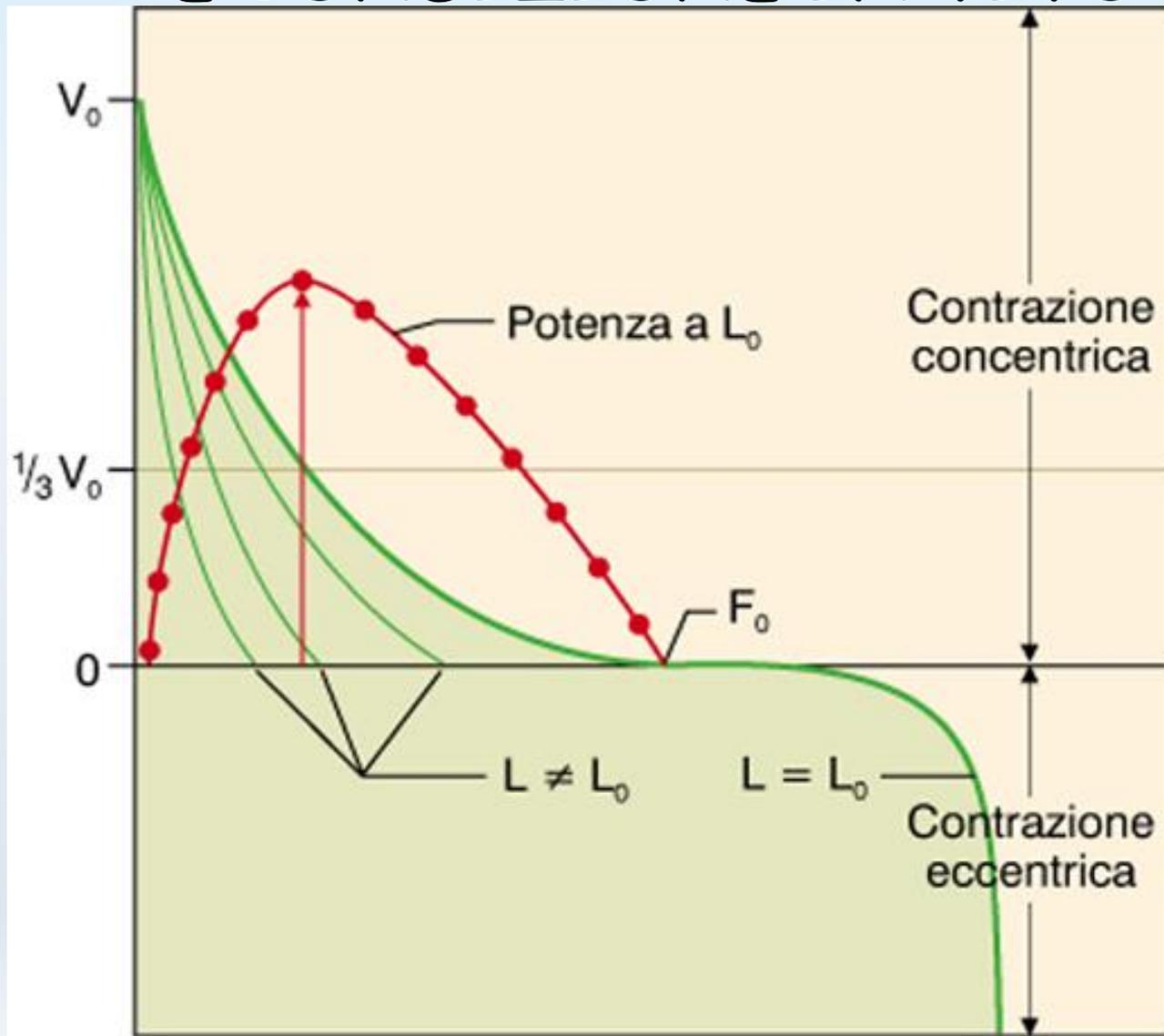


# CONSEGUENZE IN VIVO



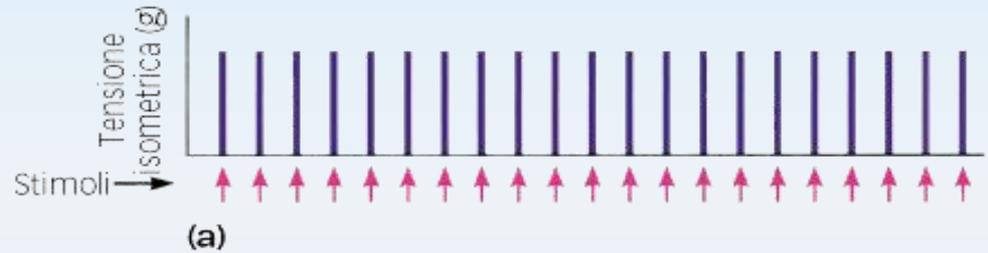
- LA FORZA FT È UGUALE FC SOLO QUANDO K1 È COMPLETAMENTE STIRATA E LA VELOCITÀ DI STIRAMENTO  $DX/DT$  È UGUALE A ZERO

# CONTRAZIONE ECCENTRICA E CONDIZIONE IN VIVO



# FATICA MUSCOLARE

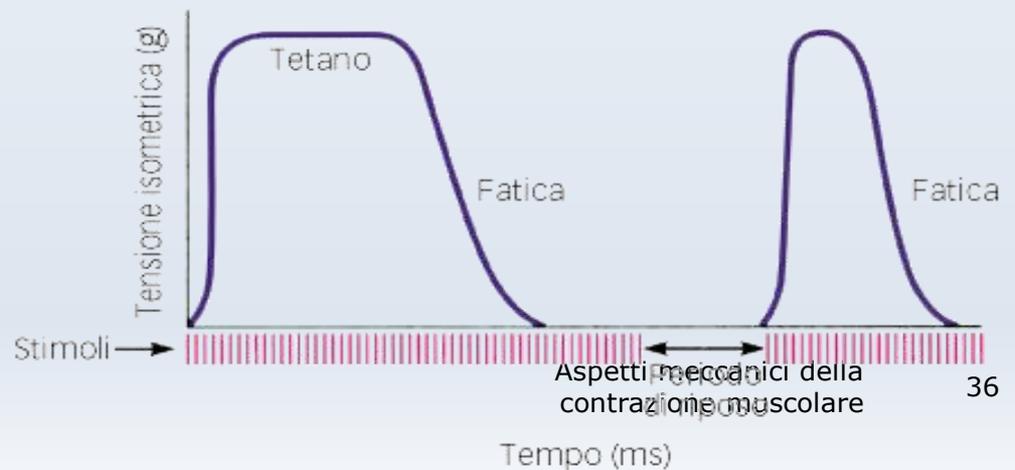
Frequenza non affaticante



Frequenza affaticante ma non tetanizzante

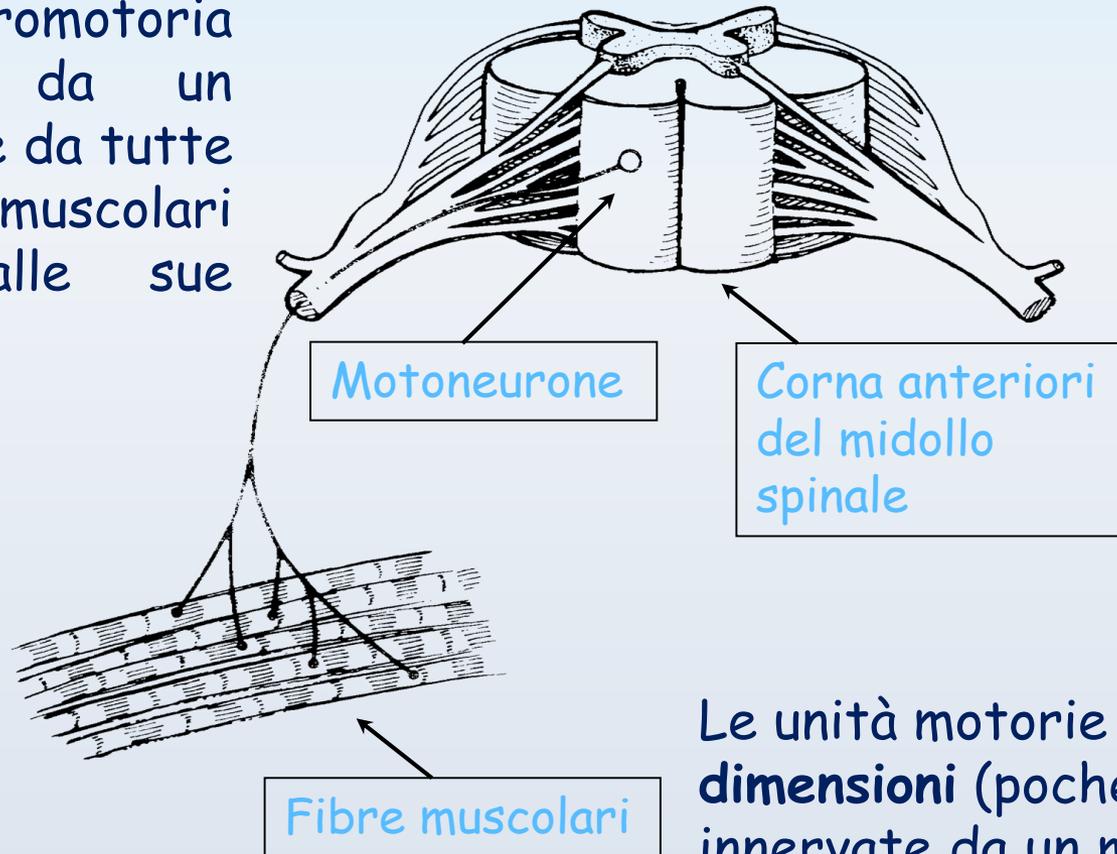


Frequenza affaticante e tetanizzante



# UNITÀ NEUROMOTORIA

Una unità neuromotoria è formata da un motoneurone e da tutte le fibre muscolari innervate dalle sue terminazioni



Le unità motorie differiscono in **dimensioni** (poche o molte fibre innervate da un motoneurone) e in **tipo di fibre** (veloci, lente, intermedie)

# UNITÀ MOTORIE

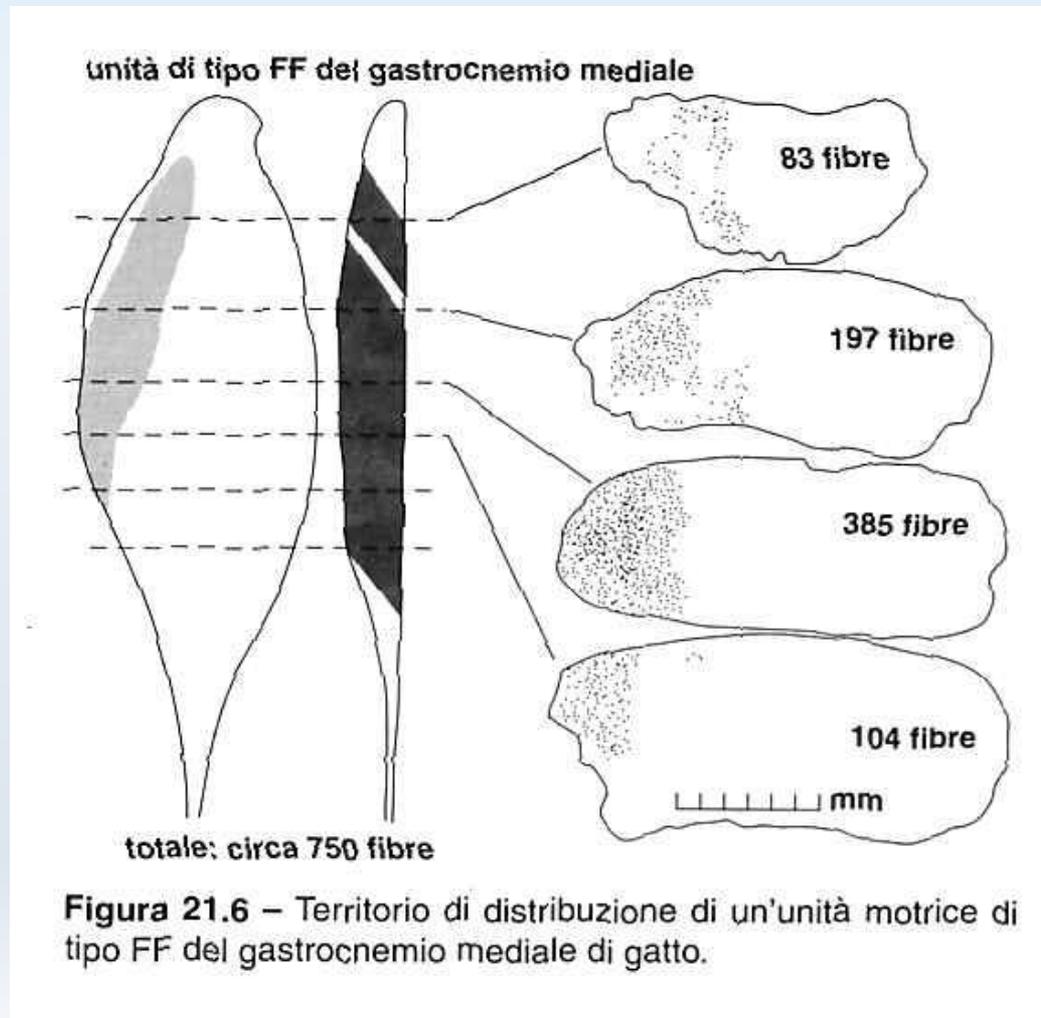
## Definizione:

- Un **motoneurone** e il **gruppo di fibre muscolari** da esso innervate costituiscono **un'unità motoria**.  
E' la quantità minima di tessuto muscolare che può essere controllata dal sistema nervoso: **unità funzionale del movimento**.

# U.M. - CARATTERISTICHE GENERALI

- Le fibre muscolari appartenenti ad una singola UM non sono contigue, ma si distribuiscono in esso mescolate alle fibre di altre UM.
- Le UM non sono quasi mai attivate all'unisono (*asincronia*); ciò aiuta a mantenere un grado di forza costante e previene la fatica
- Il numero di fibre appartenenti a ciascuna UM varia in modo considerevole

# TERRITORIO DI DISTRIBUZIONE DI UN'UM



# CARATTERISTICHE DELLE UNITÀ MOTORIE

Le UM si distinguono per differenti caratteristiche *meccaniche, biochimiche e morfologiche*

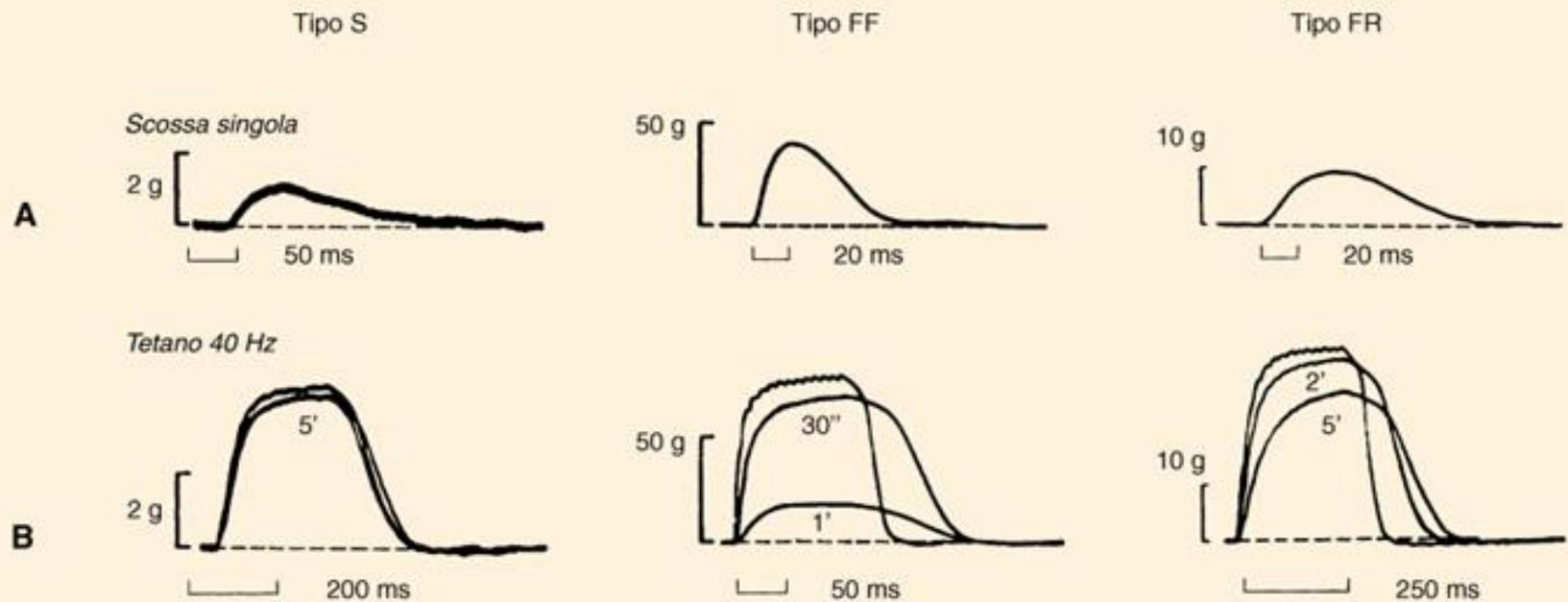
## 1. Meccaniche

- Forza massima isometrica (tetano) e massima forza di picco (scossa singola)
- Tempo di raggiungimento del picco
- Tempi di contrazione e rilassamento
- Resistenza alla fatica

# CLASSIFICAZIONE DELLE UNITÀ MOTORIE: TERMINOLOGIA

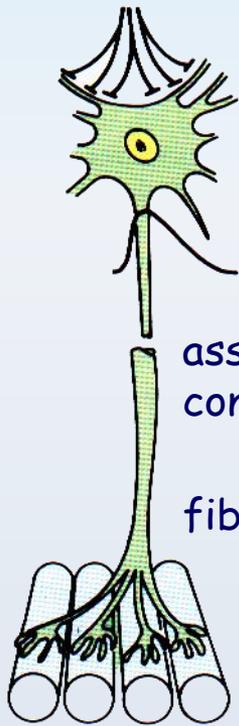
Criterio	<b>I</b>	<b>IIa</b>	<b>IIb</b>
Biochimica	<b>SO</b> (slow oxidative)	<b>FOG</b> (fast oxidative glycolytic)	<b>FG</b> (fast glycolytic)
Fisiologia	<b>S</b> (slow)	<b>FR</b> (fast resistant)	<b>FF</b> (fast fatigable)
Fisiologia	<b>ST</b> (slow twitch)	<b>FT</b> (fast twitch)	<b>FT</b> (fast twitch)

# CARATTERISTICHE FISIOLOGICHE DELLE UM



# TIPI DI FIBRE MUSCOLARI

I



neurone piccolo

PPS ampio

assone piccolo  
conduzione lenta

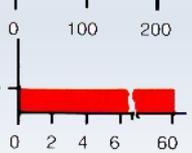
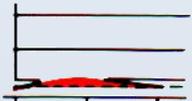
fibre innervate  
10 - 180

metabolismo  
ossidativo

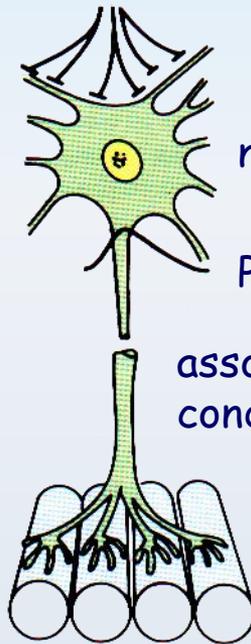
forza ridotta

contrazione lenta

scarsa  
affaticabilità



IIa



neurone grande

PPS medio

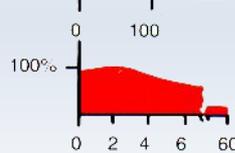
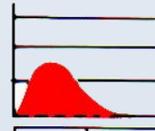
assone grande  
conduzione veloce

metabolismo  
ossidativo  
glicolitico

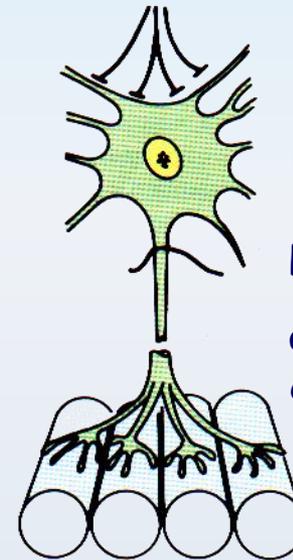
forza intermedia

contrazione rapida

affaticabilità  
moderata



IIb



neurone grande

PPS piccolo

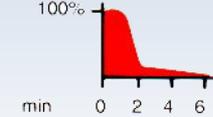
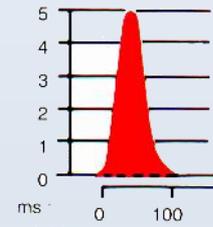
assone grande  
conduzione veloce

fibre innervate  
300 - 800  
metabolismo  
glicolitico

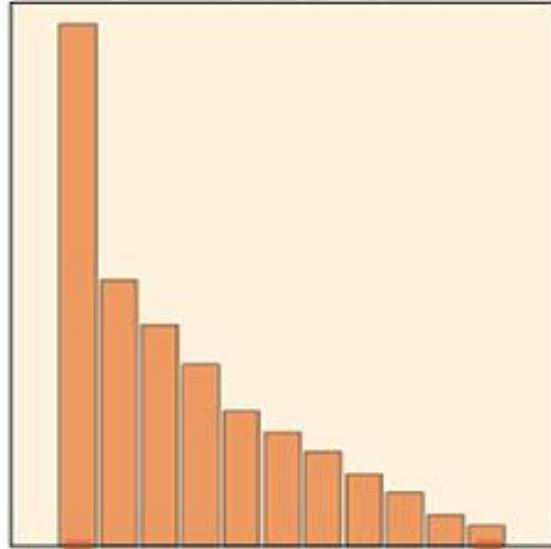
forza elevata

contrazione rapida

rapida  
affaticabilità



# LE UM SONO DISTRIBUITE È DIVERSAMENTE NEI MUSCOLI



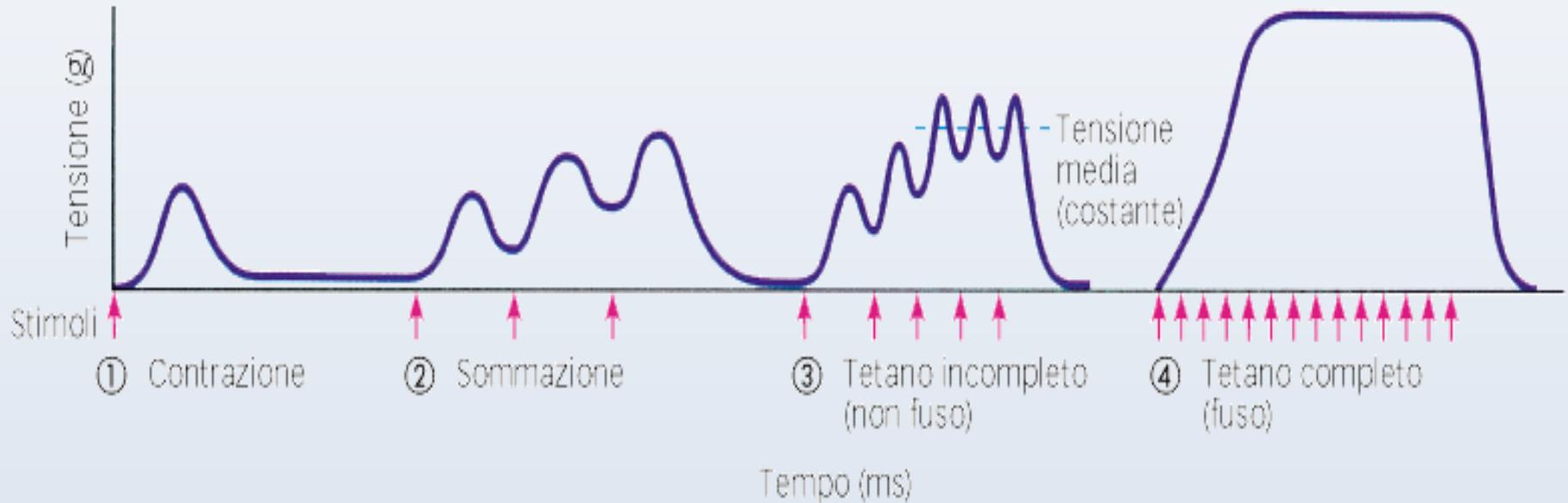
N° delle unità	molte
Diametro degli assoni	piccolo
N° delle terminazioni	poche
Tensione tetanica	piccola
Velocità di contrazione	lenta o rapida
Fatica	poca o nulla
Metabolismo	aerobico
Mioglobina	abbondante
Glicogeno	poco
Mitocondri	molto fitti
Capillari	abbondanti
Fibre muscolari	piccole, rosse

N° delle unità	poche
Diametro degli assoni	grande
N° delle terminazioni	molte
Tensione tetanica	grande
Velocità di contrazione	rapida
Fatica	rapida
Metabolismo	anaerobico
Mioglobina	scarsa
Glicogeno	molto
Mitocondri	poco fitti
Capillari	pochi o nessuno
Fibre muscolari	grandi, pallide

- muscoli impiegati in attività motorie di tipo **tonico**: UM S e FR (Soleus)

- muscoli impiegati in attività **fasiche**: UM FF (Gastrocnemius)

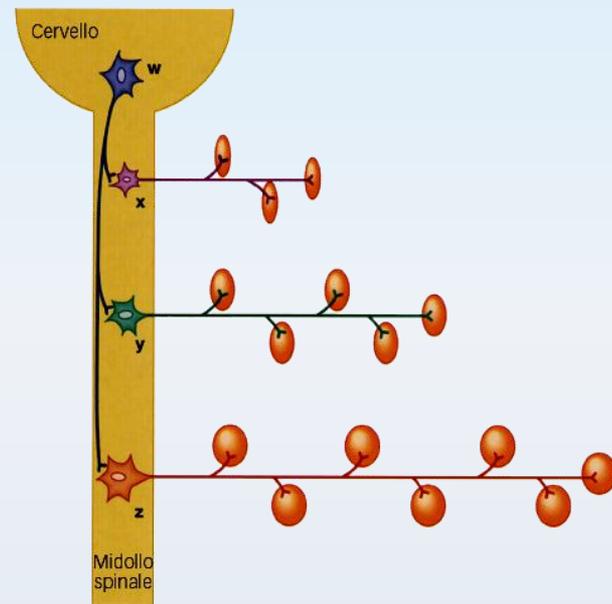
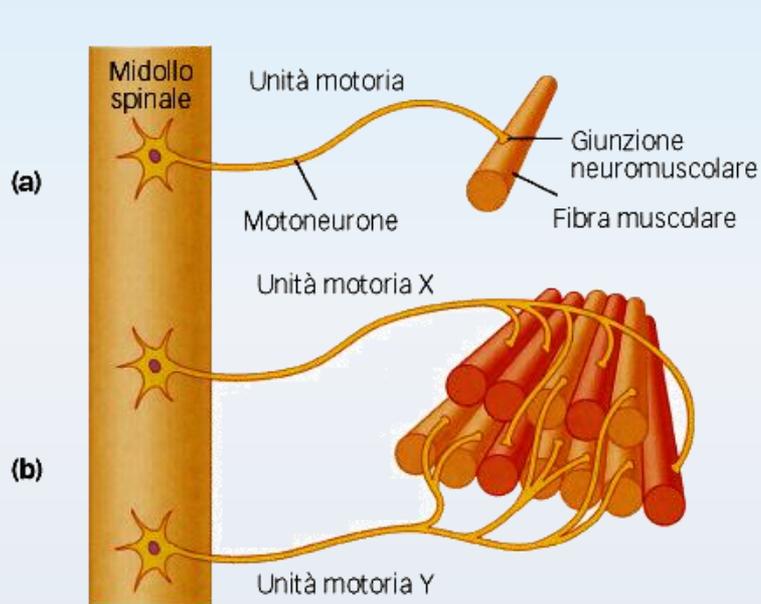
# MODULAZIONE DELLA FORZA: TETANIZZAZIONE



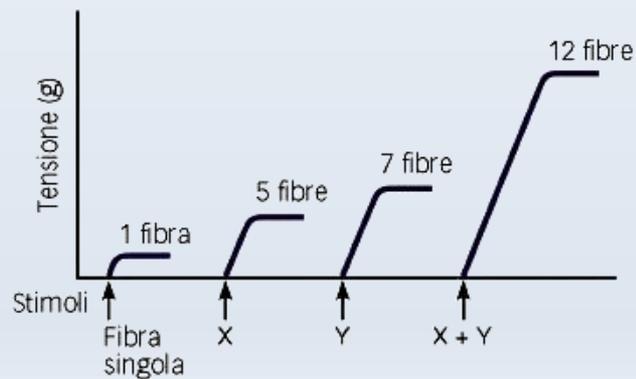
Aumento della frequenza degli stimoli



# MODULAZIONE DELLA FORZA: RECLUTAMENTO DI UNITÀ MOTORIE

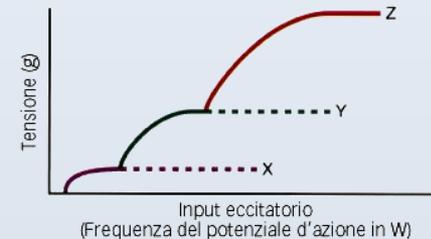


(a)



(c)

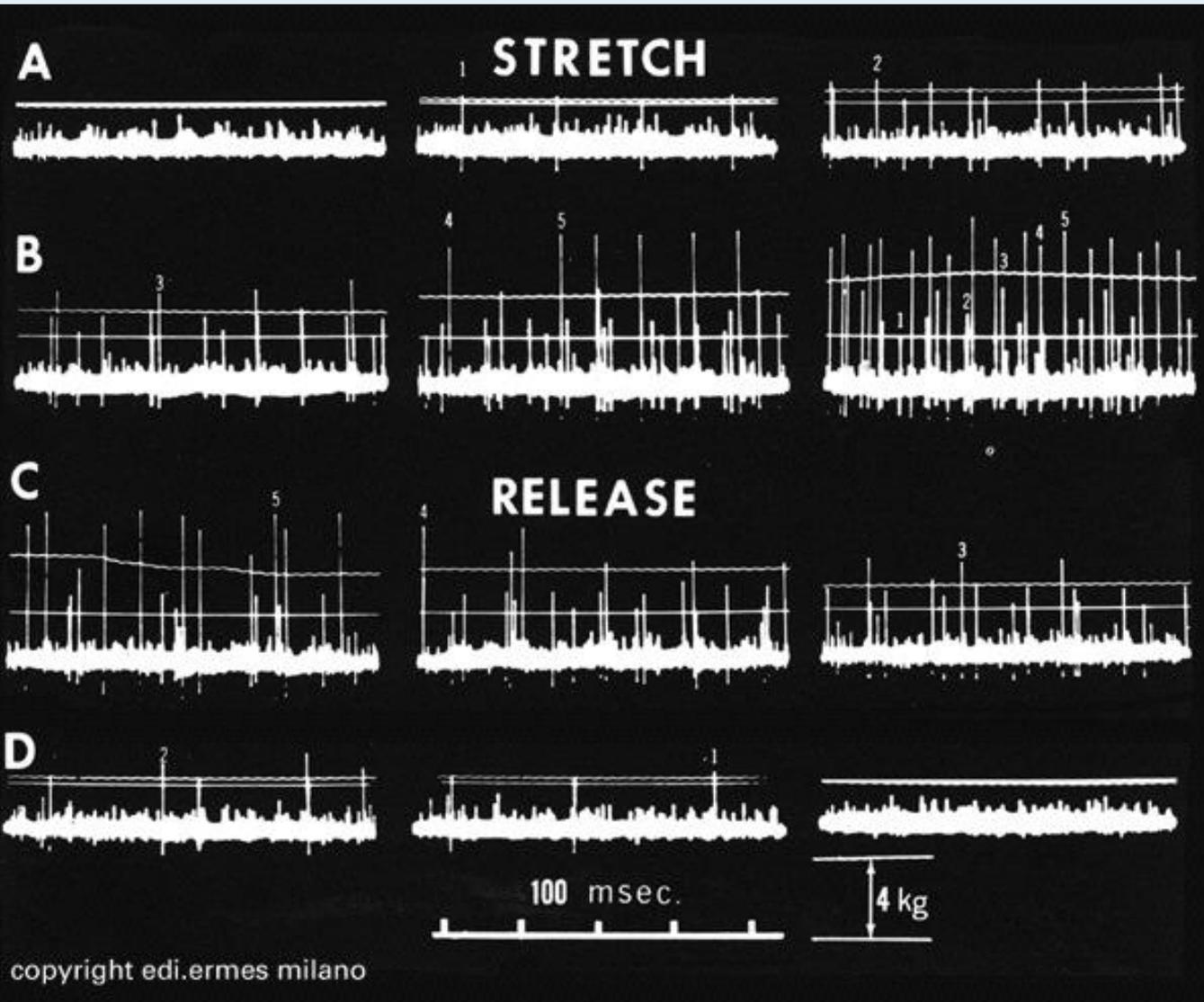
Sommazione spaziale



(b)

Principio delle dimensioni

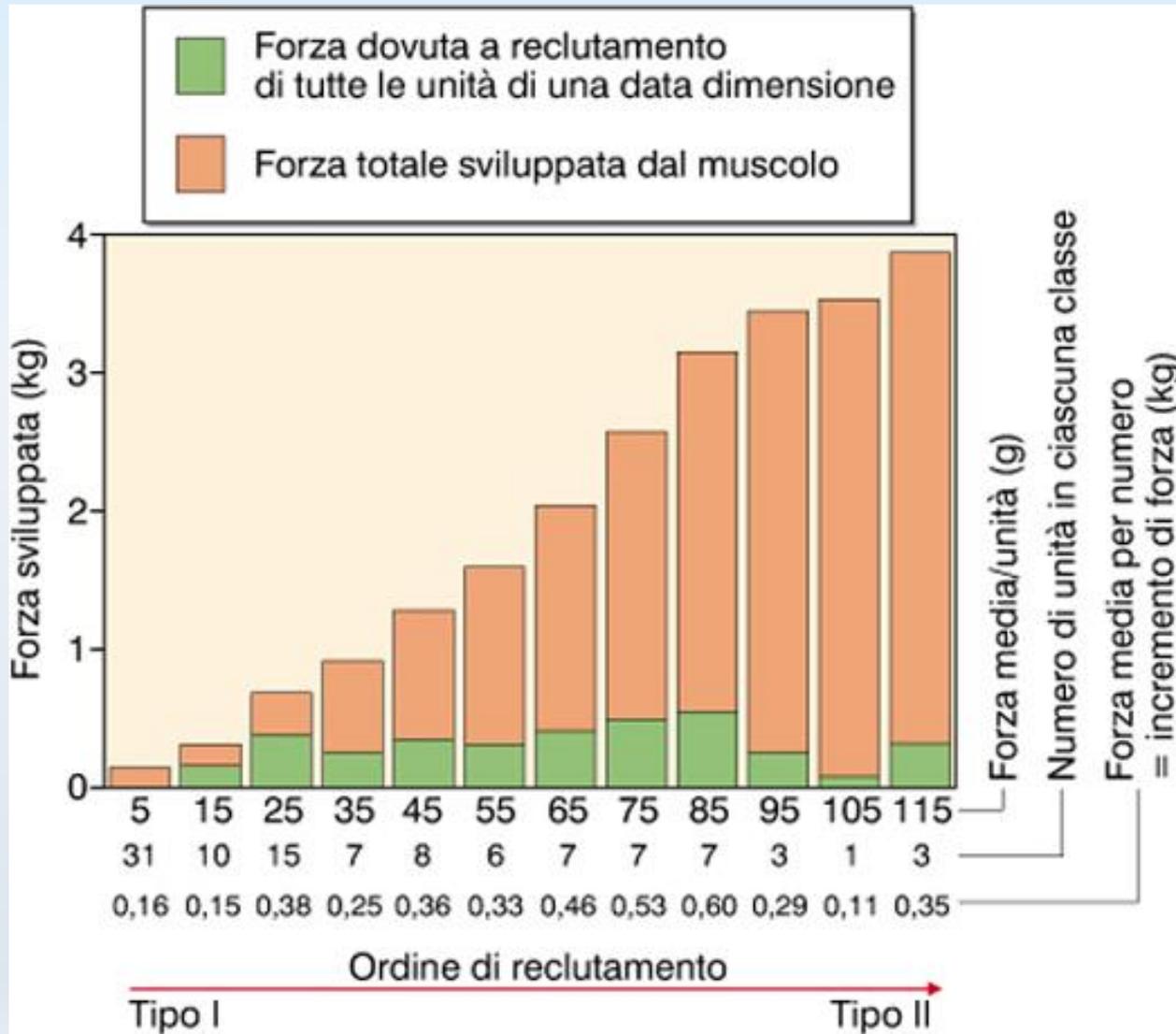
# CONTROLLO DELLA FORZA MUSCOLARE



Reclutamento di UM e principio della dimensione

- Attività elettrica di 5 motoneuroni

- A e B: risposte dei motoneuroni a diversi gradi di stiramento muscolare

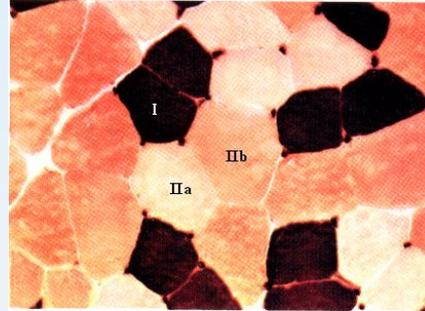


MODULAZIONE  
 DELLA  
 FREQUENZA DI  
 SCARICA  
 DELLE UM ATTIVE

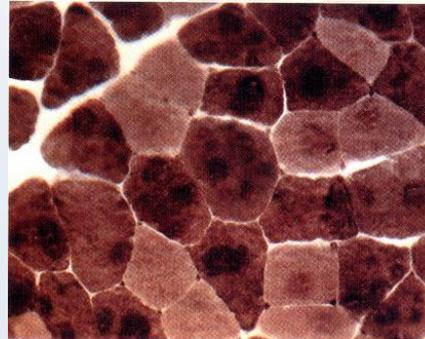
# MODULAZIONE DELLA FORZA: SCHEMA SINTETICO



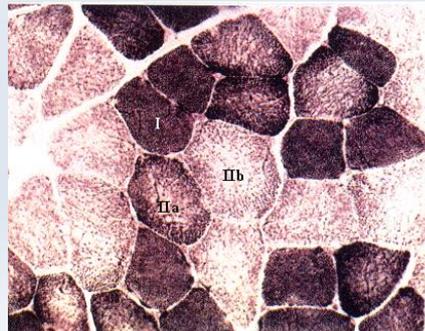
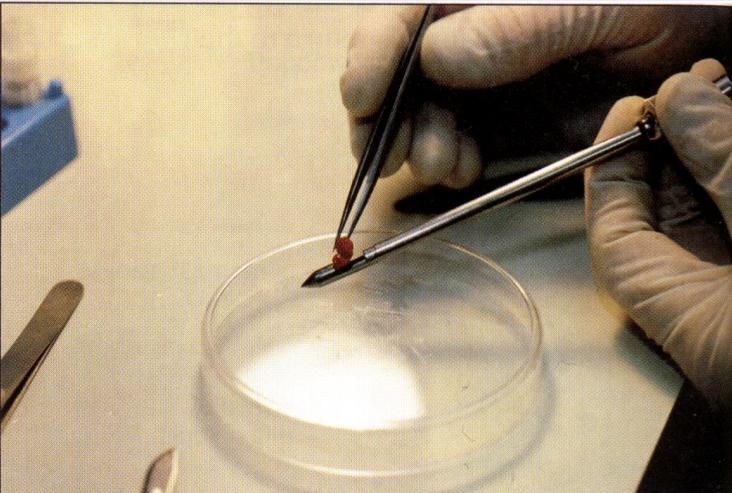
# TIPI DI FIBRE: BIOPSIA MUSCOLARE



Attività ATPasica  
a pH neutro  
(colora le fibre di tipo I)

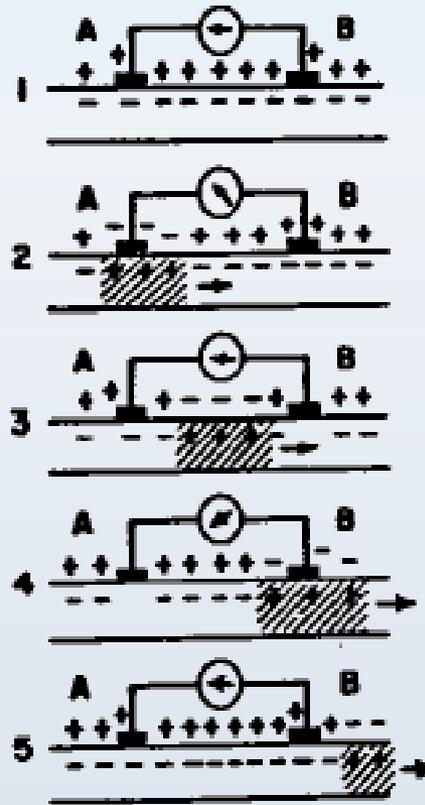
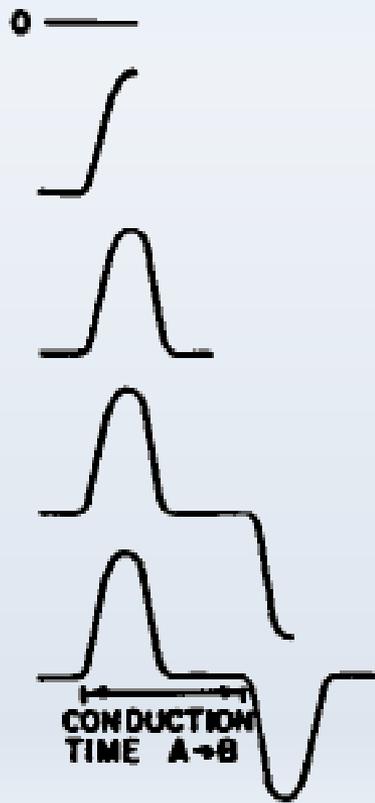


Attività ATPasica  
a pH acido  
(colora le fibre di tipo II)



NADH-deidrogenasi  
(colora le fibre di tipo I e  
IIa ma non IIb) <sup>51</sup>

# ELETTROMIOGRAFIA: BASI FISIOLOGICHE



Differenza di potenziale tra due elettrodi A e B posti sulla superficie di una fibra durante la conduzione del potenziale d'azione

# ELETTROMIOGRAFIA: POTENZIALI D'AZIONE DI UNITÀ MOTORIA

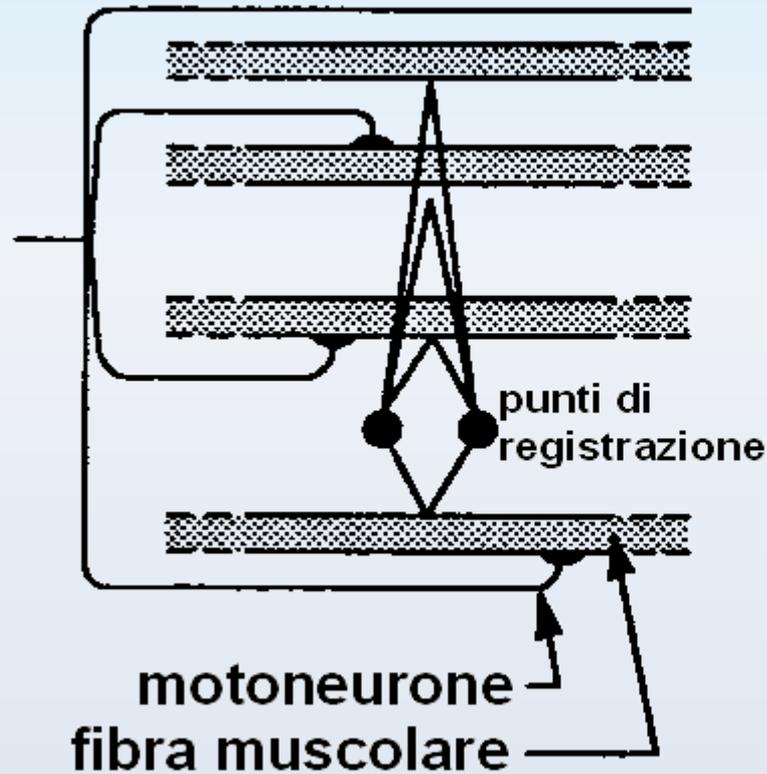
Disposizione geometrica degli elettrodi e delle fibre attive



Funzioni di filtro dei tessuti e degli elettrodi

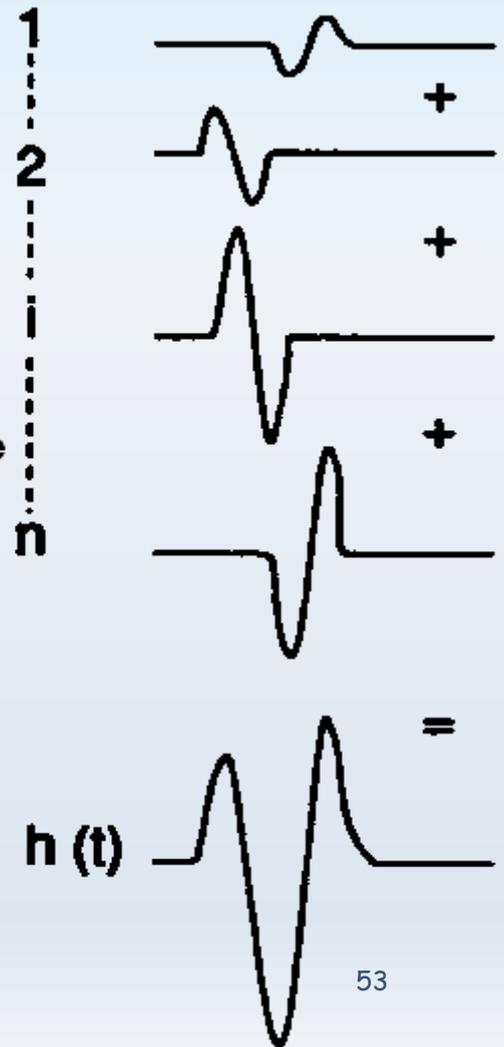


Sovrapposizione dei potenziali d'azione

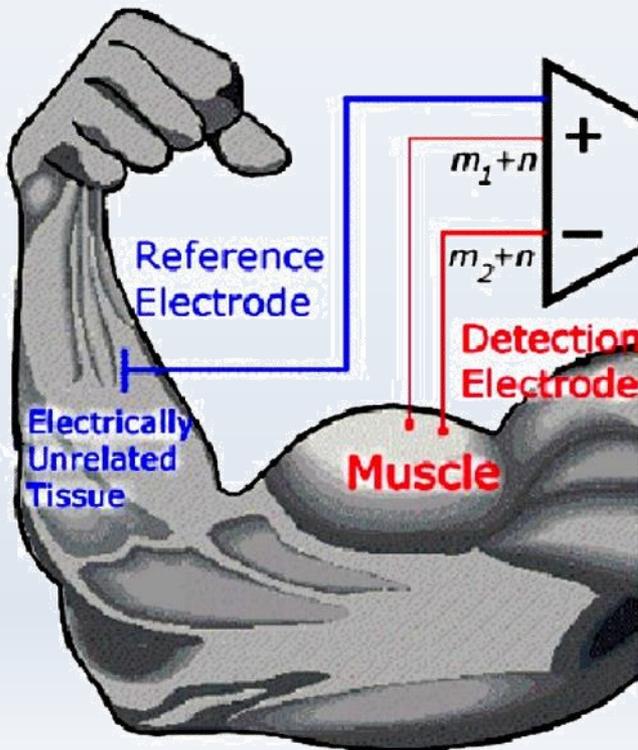
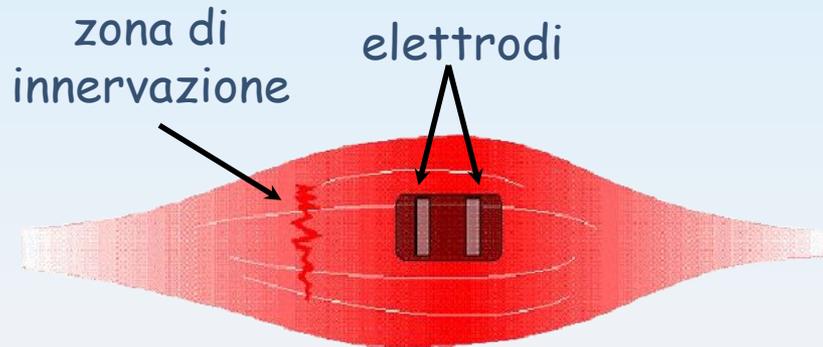


motoneurone  
fibra muscolare

Potenziale risultante



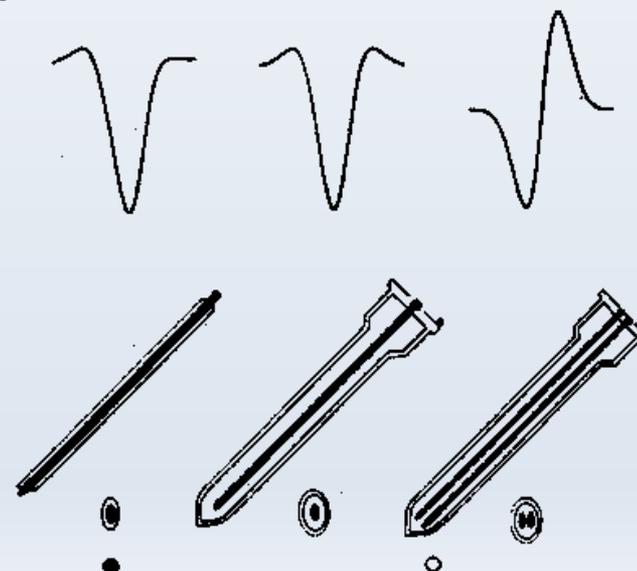
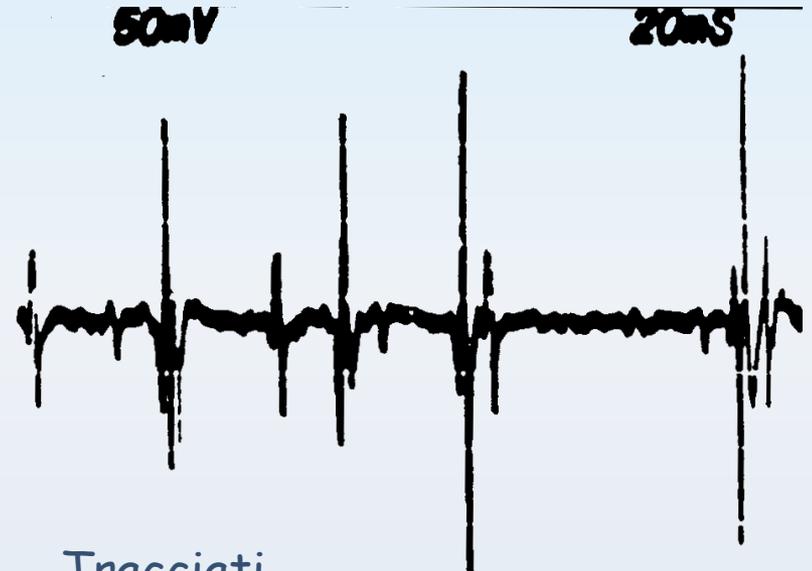
# ELETTROMIOGRAFIA DI SUPERFICIE



$$(m_1+n)-(m_2+n) = m_1-m_2$$

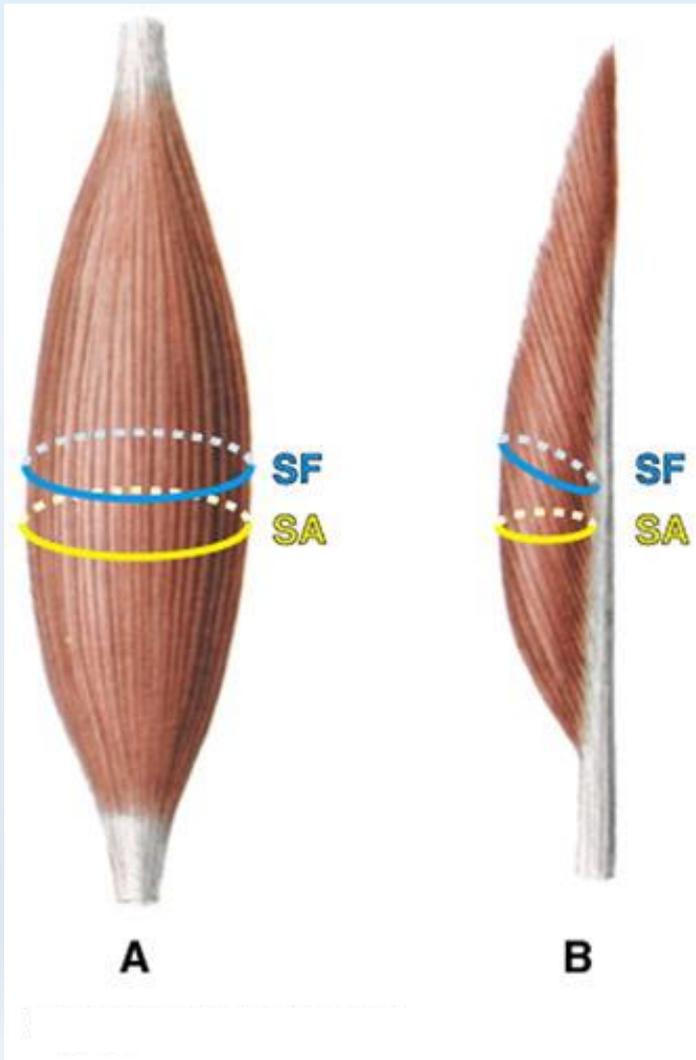


# ELETTROMIOGRAFIA UNITARIA



Tipi di aghi elettrodi

# UNITÀ MUSCOLO TENDINEA



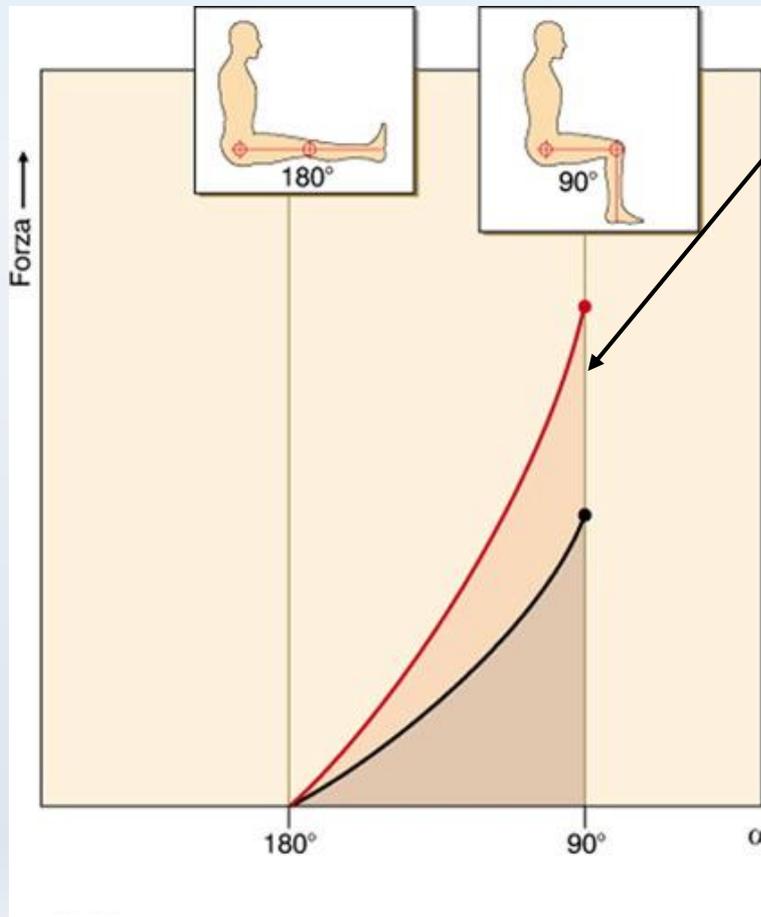
## A: Muscolo fusiforme

Sezione anatomica coincide con sezione fisiologica (sezione trasversa alla direzione delle fibre)

## B: Muscolo pennato

Sezione anatomica inferiore alla seconda

# COMPONENTE ELASTICA IN VIVO



## Muscolo prestirato

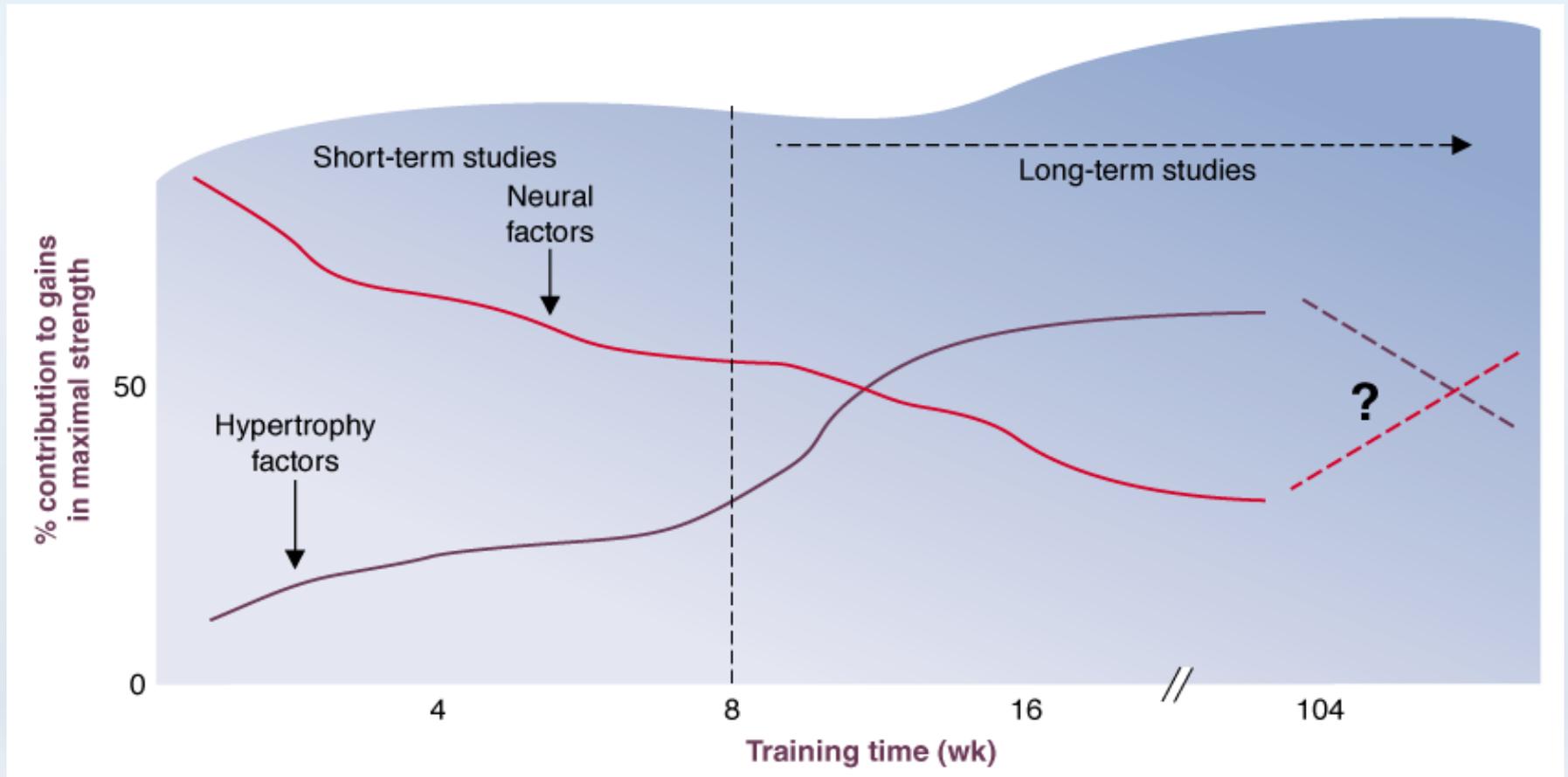
Il prestiramento *aumenta il lavoro meccanico* svolto dal muscolo nella *successiva* ed immediata contrazione *concentrica*

1. Componente *elastica* (elementi elastici in serie)
2. Componente *contrattile* (il ponte A-M si sposta in una posizione con maggiore energia potenziale)

# ADATTAMENTI: ALLENAMENTO ED INATTIVITÀ

- Dipendono da adattamenti neurali e fisiologici
- *La specificità dell'allenamento indirizza gli adattamenti*

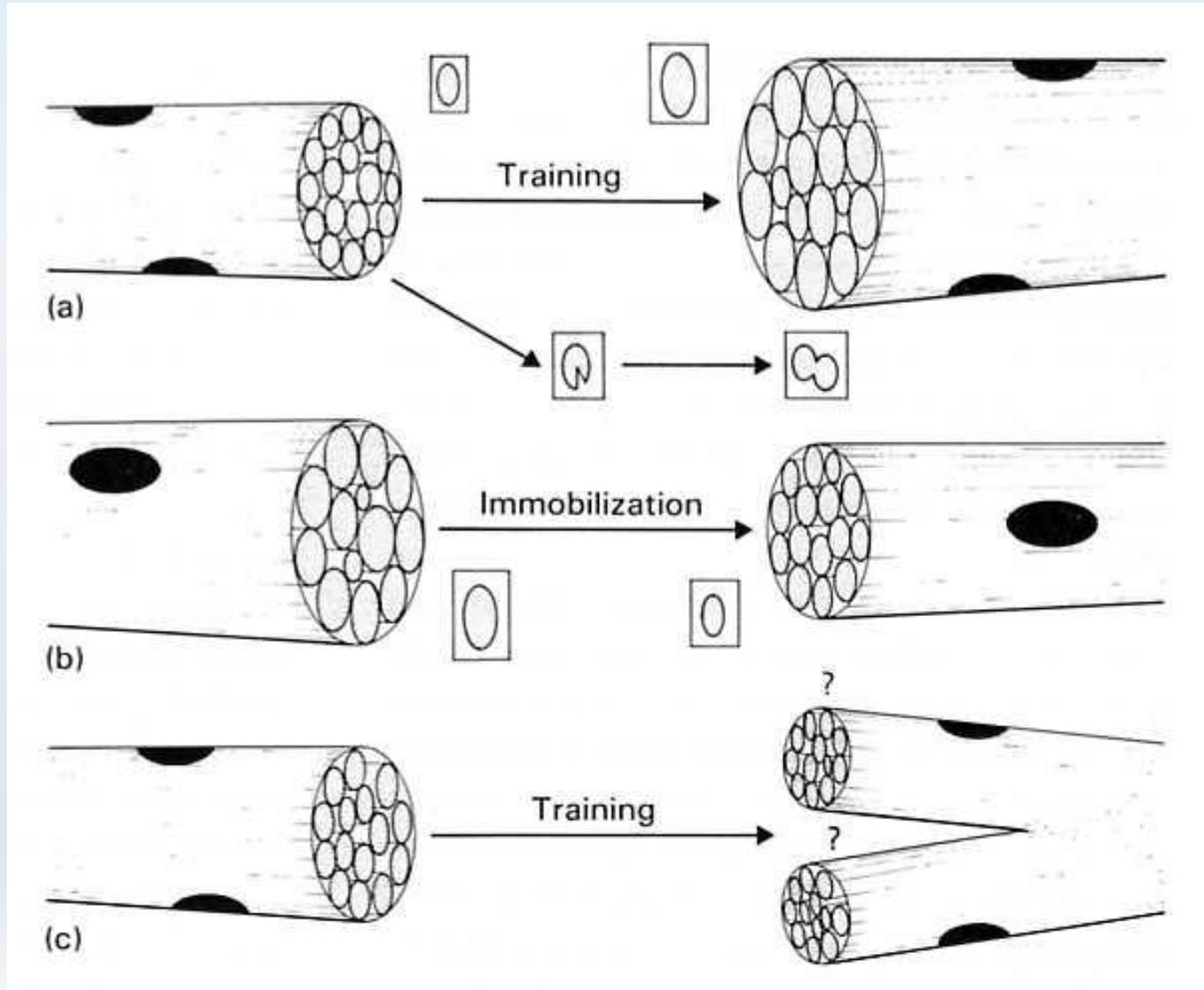
# ALLENAMENTO DELLA FORZA

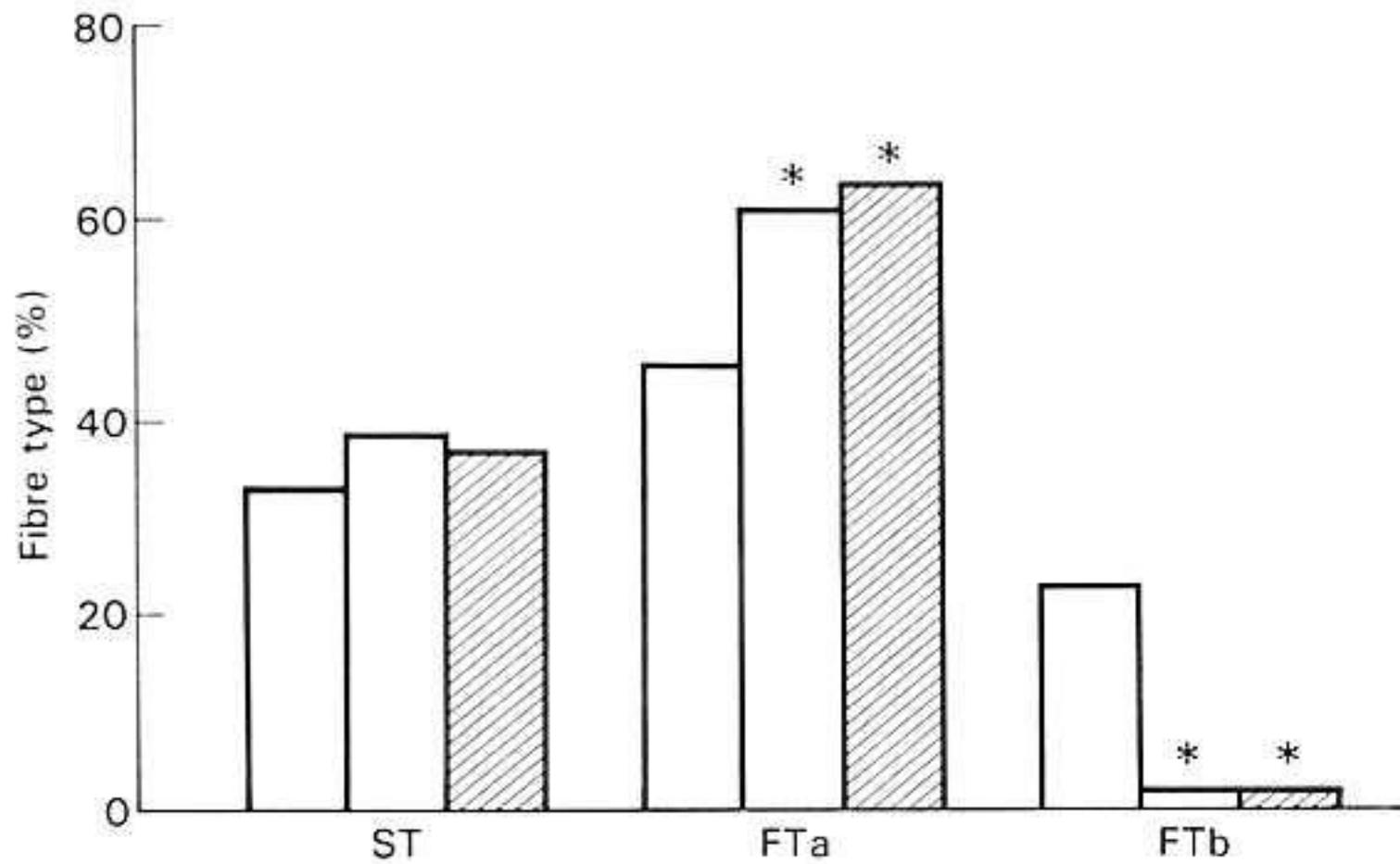


# ADATTAMENTI MUSCOLARI

- Aumento delle dimensioni delle fibre di entrambi i tipi:
  - *ipertrofia*
  - *Iperplasia (?)*
  - Più spiccata per FT che per ST
- Scarse modificazioni dei tipi di fibre
- Il testosterone spiega in parte la maggiore massa muscolare presente nei maschi

# IPERTROFIA

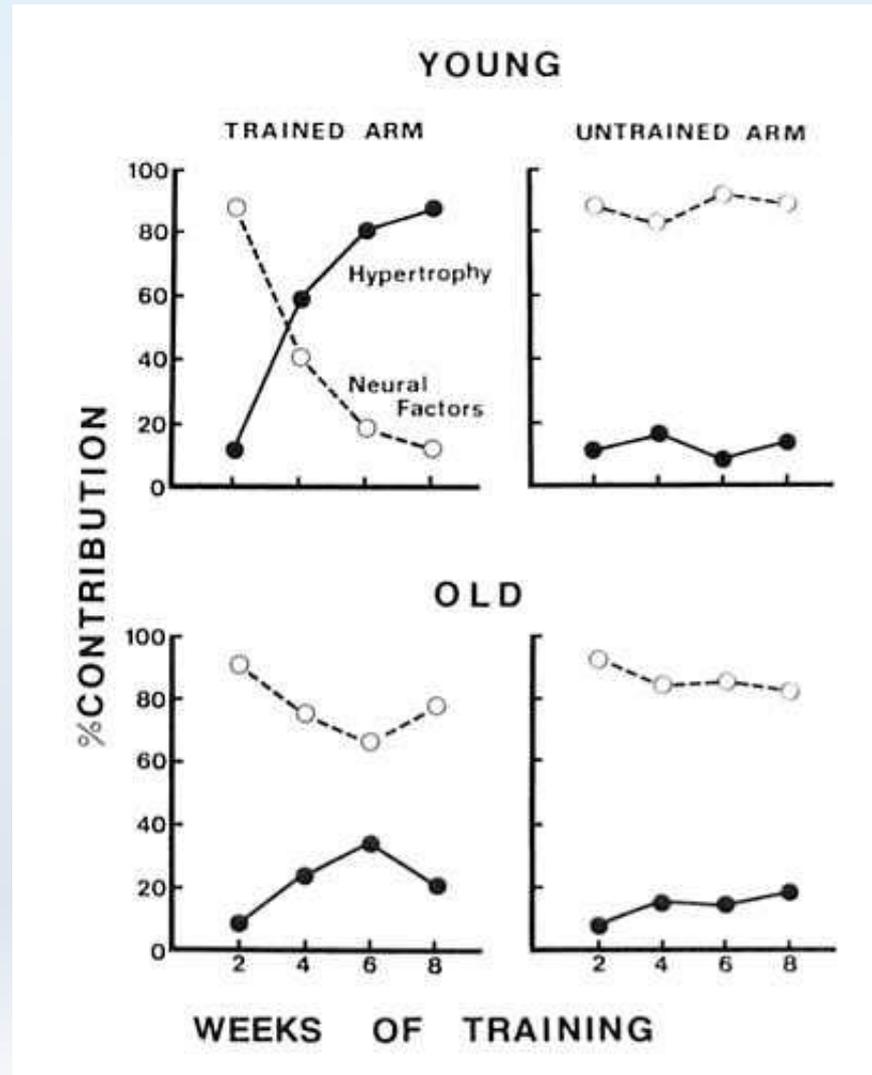




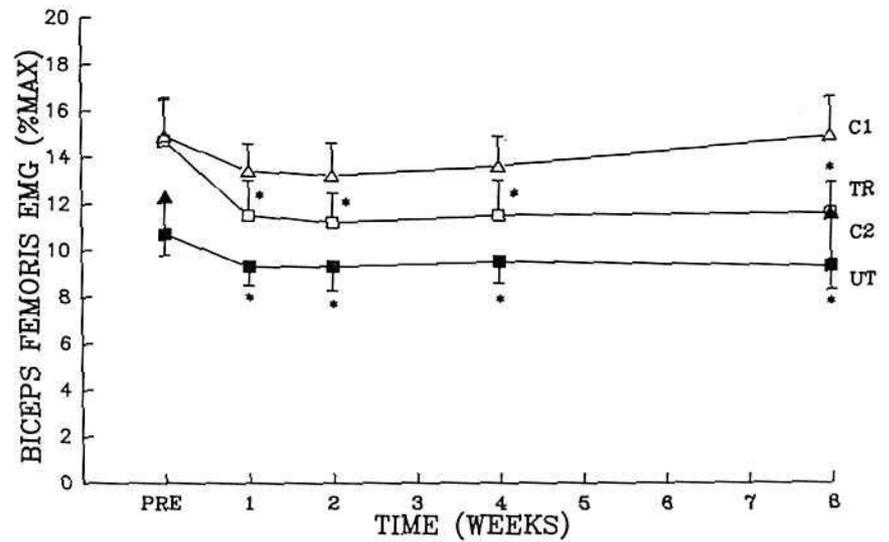
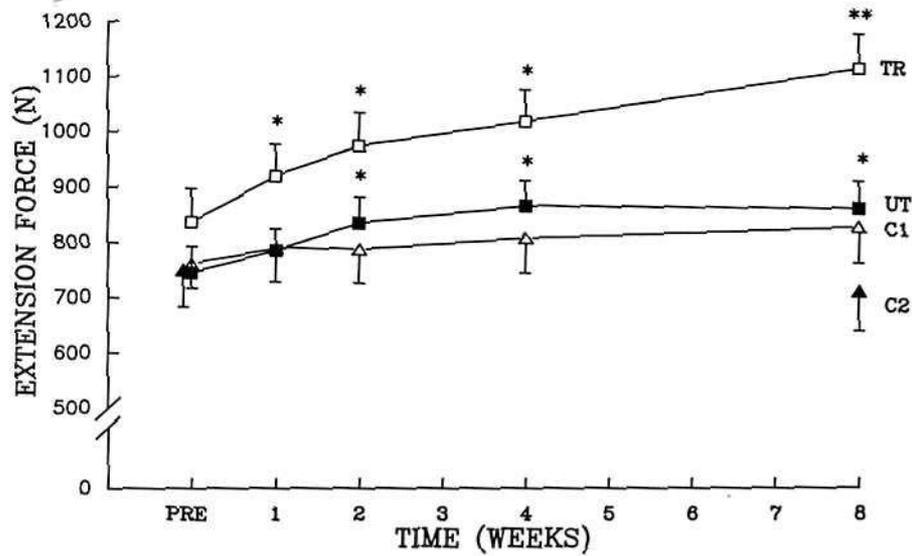
# ADATTAMENTI NEURALI

- Aumento del numero di UM reclutate
- Diminuzione della inibizione delle UM reclutate
- Diminuzione del reclutamento dell UM dei muscoli antagonisti
- Aumento della sincronizzazione dell UM reclutate

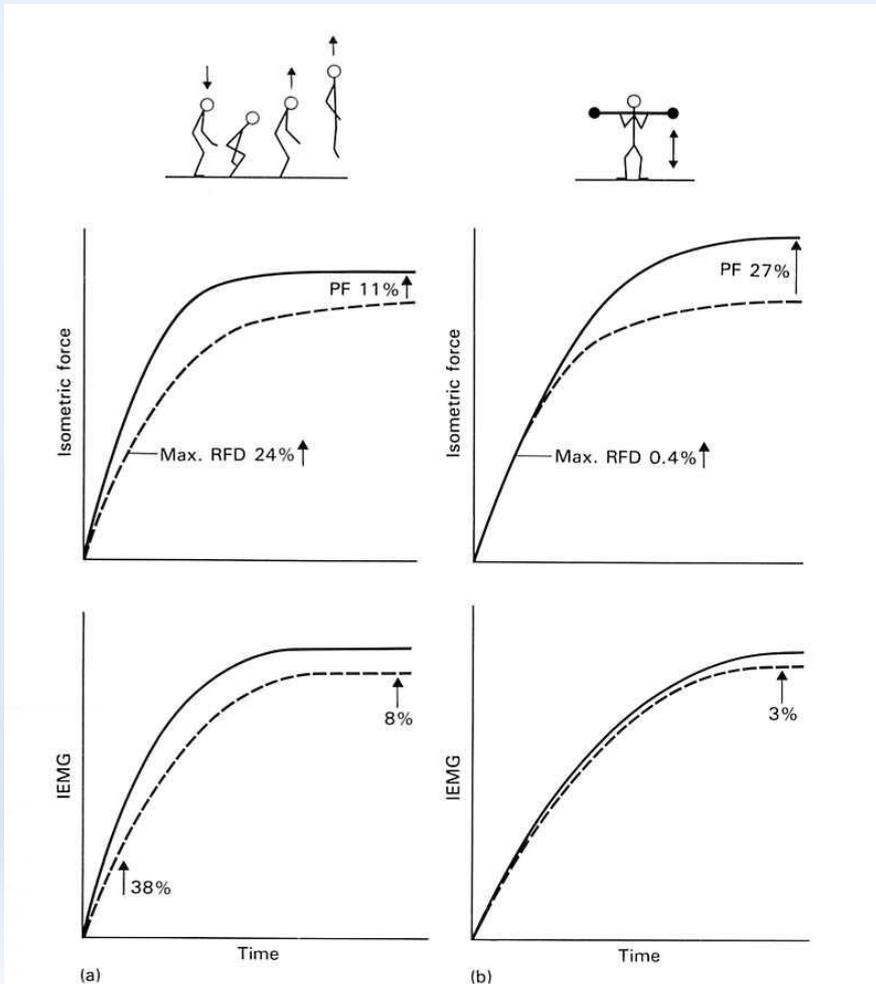
# DECORSO TEMPORALE DEI CAMBIAMENTI



# INIBIZIONE DEGLI ANTAGONISTI



# SPECIFICITÀ DELL'ALLENAMENTO



- **Allenamento con squat-jump (esplosivo)**
- La velocità di sviluppo della forza e la velocità di incremento di iEMG aumentano di più dei valori registrati in condizione isometrica
- **Allenamento di resistenza con carichi**
- Il pattern delle modificazioni è in senso opposto

# BIBLIOGRAFIA

- **Fisiologia dell' Uomo, autori vari, Edi.Ermes, Milano**
  - **Capitolo 2: Fisiologia del muscolo**
- **Fisiologia Generale e Umana, Rhoades-Pflanzer**
  - **Capitolo 16: Muscolo**