

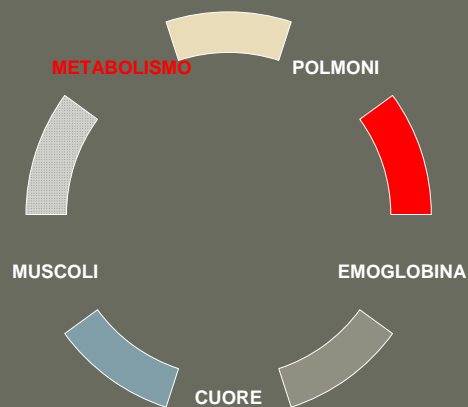
ADATTAMENTI
MUSCOLARI, CARDIOVASCOLARI ED ENZIMATICI
ALL'ALLENAMENTO AEROBICO E DI POTENZA

Luca Piancastelli



KEY POINTS

ADATTAMENTO



Adattamenti enz. card. e muscolari agli sport aerobici e di potenza

2

ADATTAMENTO ⇔ EVOLUZIONE



Adattamenti enz. card. e muscolari agli sport aerobici e di potenza

3

OGNI ATTIVITA' FISICA

AEROBICA

DI POTENZA

STRESS

ADEGUAMENTO DELLA
MACCHINA "ORGANISMO"

ADATTAMENTO

NEGATIVO

POSITIVO

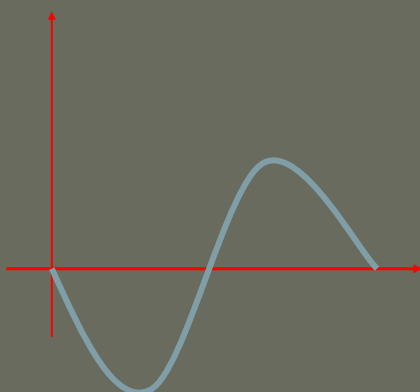
Adattamenti enz. card. e muscolari agli sport aerobici e di potenza

4

Allenamento, stress e supercompensazione

Teoria di Seelye (1976)

🏠 sindrome di adattamento allo stress (general adaptation syndrome)



ALLENAMENTO

SOMMATORIA DI STIMOLI

ADATTAMENTO

Adattamenti enz. card. e muscolari agli sport aerobici e di potenza

5

Tipologia muscolare

CARATTERISTICHE	TIPO DI FIBRA		
ATTIVITA' ELETTRICA	Fasica, ad alta frequenza		Tonica, a bassa frequenza
MORFOLOGIA	FTb	FTa	ST
COLORE	Pallido	Pallido/rosso	Rosso
DIAMETRO	Elevato	Intermedio	Piccolo
DENSITA' CAPILLARI	Bassa	Intermedia	Elevata
VOLUME MITOCONDRI	Piccolo	Intermedio	Elevato
ISTOCHEMICA	IIB	IIA	I
BIOCHIMICA	FG	FOG	SO
MIOSIN ATPASI	Elevata	Elevata	Bassa
CAPACITA' GLICOLITICA	Elevata	Elevata	Bassa
CAPACITA' OSSIDATIVA	Bassa	Intermedia	Elevata
FUNZIONE	FF	FR	S
CONTRATTILITA'	FT	FT	ST
VELOCITA' DI CONTRAZIONE	Elevata	Elevata	Bassa
VELOCITA' DI RILASCIAMENTO	Elevata	Elevata	Bassa
AFFATICAMENTO	Elevato	Intermedio	Basso
FORZA SVILUPPATA	Elevata	Intermedia	Bassa

FT: fast twitch (rapide); FG, Fast glycolitic (elevata att glicolitica); FOG, fast oxydative glycolitic (rapide ossidative glicolitiche); SO, slow, oxidative; FF, fast fatiguable (veloci e che si affaticano); FR, fast resistant; S, slow (lente)

Adattamenti enz. card. e muscolari agli sport aerobici e di potenza

6

% relative a fibre lente/rapide presenti nel muscolo quadricipite in differenti atleti

	% FIBRE RAPIDE	% FIBRE LENTE
MARATONETI	18	82
NUOTATORI	26	74
UOMO MEDIO	55	45
SOLLEVATORI DI PESI	55	45
VELOCISTI	63	37
SALTATORI	63	37

Adattamenti enz. card. e muscolari agli sport aerobici e di potenza

7

Adattamenti cardiovascolari allo sforzo fisico

Il mantenimento dell'adeguato flusso ematico ai muscoli scheletrici durante lo sforzo è la condizione fondamentale per rifornire i muscoli che lavorano dei combustibili (metaboliti) e del comburente (ossigeno) necessari per garantire l'adeguata produzione di energia.

Adattamenti enz. card. e muscolari agli sport aerobici e di potenza

8

Adattamenti cardiocircolatori nelle diverse discipline sportive

L'allenamento svolto sistematicamente induce l'organismo, e quindi anche l'apparato cardiocircolatorio, ad adattarsi **fisiologicamente** a questa nuova condizione di superlavoro attraverso lo sviluppo di modificazioni morfologiche e funzionali, stabili nel tempo, definite

adattamenti cardiocircolatori all'allenamento

Variabili che influenzano l'adattabilità all'esercizio

- 📊 Tipo, intensità, durata dell'esercizio
- 📊 Caratteristiche fisiologiche di base del soggetto
- 📊 Età del soggetto
- 📊 Epoca di inizio dell'attività sportiva

Finalità degli adattamenti CV negli sport aerobici



Incremento della velocità di produzione dell'energia attraverso la via ossidativa ovvero della massima potenza aerobica (VO_{2max})

Il principale

fattore limitante

è rappresentato dalla capacità del sistema cv di trasportare ossigeno ai muscoli in attività

Adattamenti enz. card. e muscolari agli sport aerobici e di potenza

11

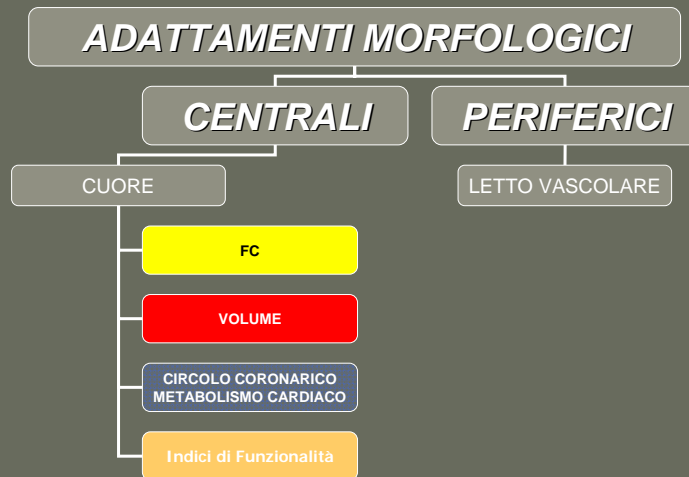
Variazioni in soggetti maschi allenati e non in sport aerobici

VARIABILE	NON ALLENATI	ALLENATI	Δ %
N° MITOCONDRI mmol / g muscolo fresco	0.59	1.20	103
ENZIMI GLICOLITICI			
FOSFORFRUTTOCHINASI, mmol / g muscolo fresco	50	50	0
FOSFORILASI, mmol / g muscolo fresco	4-6	6-9	60
ENZIMI AEROBICI			
SUCCINATO DEIDROGENASI, mmol / g muscolo fresco	5-10	15-20	133
FIBRE MUSCOLARI			
FT, %	50	20-30	-50
ST, %	50	60	20
GITTATA PULSATORIA MAX, ml	120	180	50
GITTATA CARDIACA MAX, l/min	20	30-40	75
FC A RIPOSO, bpm	70	40	-43
FC MAX, bpm	190	180	-5
VO ₂ max, mL/Kg/min	30-40	65-80	107
VOLUME CARDIACO, l	7.5	9.5	27
VOLUME DI SANGUE	4.7	6.0	28
VENTILAZIONE MAX, L/min	110	190	73
PERCENTUALE GRASSO CORPOREO	15	11	-27

Adattamenti enz. card. e muscolari agli sport aerobici e di potenza

12

Adattamenti cardiovascolari sport aerobici



Adattamenti enz. card. e muscolari agli sport aerobici e di potenza

13

FUNZIONE CRONOTROPA: HR

🚩 RIDUZIONE DELLA FC A RIPOSO

🚩 Si instaura già dopo 10-15 giorni di attività ed è precoce in soggetti sedentari

🚩 BRADICARDIA DELL'ATLETA: 45-50 bpm dopo periodi di allenamento intensi e prolungati

🚩 RIDUZIONE DELLA FC IN CORSO DI ESERCIZIO FISICO

🚩 Raggiungimento per sforzi submassimali di una FC inferiore a quella del soggetto non allenato a parità di intensità di lavoro (bradicardia relativa da sforzo)

🚩 Essa è direttamente correlata con l'aumento di volume della Gittata Sistolica

Adattamenti enz. card. e muscolari agli sport aerobici e di potenza

14

Cause e meccanismi di cronotropismo negativo

Lin e Howarth

("autonomic nervous control frequency in the exercised trained rat" Jour Appl Physiol 1972; 33;796)*

- 🚩 Ipertono vagale [*]
- 🚩 Ridotto tono simpatico (sympathetic Drive) [*]
- 🚩 Controllo intrinseco della frequenza
- 🚩 Meccanismi nervosi periferici (riflesso barorecettoriale)
 - 🚩 L'esercizio per le braccia induce una bradicardia inferiore rispetto a quello per le gambe
- 🚩 Condizionamento genetico

Aumento del volume cardiaco

Si tratta di un fenomeno importante già dimostrato da Henschen nel 1899 ("Eine medizinische sport studie" Mitt Med Clin Upsala, Fischer-Verlag)

- 🚩 INGRANDIMENTO ARMONICO DEL CUORE
- 🚩 ASSOCIATO AD UN MIGLIORAMENTO DELLA FUNZIONE CARDIACA
- 🚩 ESISTE UNA CORRELAZIONE TRA ENTITA' DI CARDIOMEGALIA E CAPACITA' FUNZIONALE CARDIOVASCOLARE

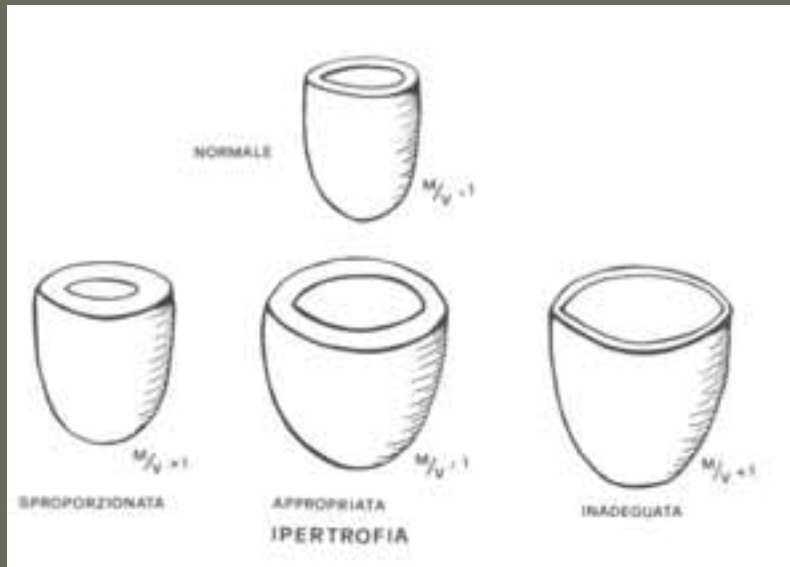
Alcuni dati di riferimento

- In uno studio condotto su reclute militari si è evidenziato un aumento del 18% della massa ventricolare sinistra (da 167 a 197 g/mq) già dopo 10 settimane di un allenamento di resistenza e di potenza
 - Montgomery HE. "Association of angiotensin-converting enzyme gene I/D polymorphism with change in left ventricular mass in response to physical training" *Circulation* 1997; 96: 741-7
- Almeno il 10% degli atleti maschi esaminati nello studio più ampio finora pubblicato, presentavano uno spessore della parete ventricolare sinistra > 12 mm
 - Pelliccia A, Maron BJ, e al. "The upper limit of physiologic cardiac hypertrophy in highly trained elite athletes" *New Engl J of Med* 1991; 96:741-7"

Grazie alle metodiche diagnostiche radiologiche ed ecocardiografiche si è evidenziato che:

- Il volume cardiaco può anche raddoppiare (passando da 600/800 ml a 1300/1500 ml)
- Nelle ATLETE l'aumento è in media inferiore del 10-15% rispetto agli uomini
- L'ingrandimento è a carico di tutte le cavità (armonico) e si estende anche ai grossi vasi
- Paragonando atleti di ieri e di oggi le dimensioni del cuore ingrandito sono pressoché identiche, il che suggerisce l'esistenza di un limite naturale per l'ingrandimento (relazionabile alla taglia dell'atleta)

Ipertrofia Cardiaca nell'atleta di resistenza



Adattamenti enz. card. e muscolari agli sport aerobici e di potenza

19

Ventricolo destro

- 🚩 Aumenta le dimensioni cavitare e lo spessore della parete libera
- 🚩 Negli atleti di vertice assume una forma più tondeggiante, piramidale
- 🚩 Con esso aumentano di volume l'atrio destro e le vene cave

(Hauser A, Hashimoto T, et Al. "Symmetric cardiac enlargement in highly trained endurance athletes: a two-dimensional echocardiographic study. Am Heart J)

Adattamenti enz. card. e muscolari agli sport aerobici e di potenza

20

Ventricolo sinistro

- Aumento di tutte le sue dimensioni e dello spessore di tutte le pareti (ipertrofia appropriata)
- Si delinea un quadro di ipertrofia eccentrica (RMN)
 - A livello microscopico si ha una replicazione in serie dei sarcomeri con allungamento delle fibre
- La cavità tende ad assumere una forma più globosa (ottimale per un lavoro di volume: studi derivanti dall'anatomia comparata)

Meccanismi coinvolti nella cardiomegalia (1)

- STIMOLO MECCANICO
 - Stiramento e/o aumento di tensione
 - Aumento dell'afflusso di ioni Na
 - Scambio Na/Ca con aumento del Ca citoplasmatico nelle zone interessate dal maggior carico di lavoro
 - $L' >$ di Ca costituisce il primum movens biochimico della cascata di eventi

Meccanismi coinvolti nella cardiomegalia (2)

STIMOLO NEUROENDOCRINO

Catecolamine

- Il recettore catecolaminergico è unito alla proteina G (chiamata così perché complessata a GTP e GDP)
 - La loro stimolazione provoca l'attivazione di AMPc (secondo messaggero)
 - L'AMPc, attraverso la Ornitina Decarbossilasi attiva la sintesi di poliammine (che rappresentano regolatori della sintesi proteica)
 - Altri autori ipotizzano che il secondo messaggero sia l' IP3 (inositolo- trifosfato), molecola derivata dalla scissione del fosfatidil-inositolo
- > della [peptide natriuretico encefalico]

Meccanismi coinvolti nella cardiomegalia (3)

ATTIVAZIONE DI GENI SPECIFICI A LIVELLO NUCLEARE

- Nelle cellule umane sono presenti segmenti genici detti protooncogeni di norma attivi solo nella vita fetale (c-myc, c-sys, c-fos, c-ras)
- Alcuni di questi geni sono responsabili della sintesi dell'isoforma di miosina-V3, detta miosina lenta, con attività ATPasica ridotta. Essa consente una contrazione miocardica più lenta, efficace ed al risparmio

COMPONENTE GENETICA

- Soggetti con delezione omozigote (D/D) presentano un aumento di massa cardiaca più marcato rispetto agli eterozigoti. Inoltre in questi soggetti sono più alte le [peptide natriuretico encefalico]

Modificazioni del circolo coronarico

- Capillarizzazione miocardica
 - Principale differenziale tra IV fisiologica e patologica
- Aumento del calibro dei vasi coronarici epicardici
 - Con aumento anche del 100% (da 2-4 mm a 7 mm)
- Ridotta reattività agli stimoli vasocostrittori
 - Si ipotizza per riduzione del numero di recettori adrenergici e per ridotta secrezione di catecolamine

Modificazioni del metabolismo cardiaco

- Minore assunzione dei substrati energetici
- Minore consumo miocardico di ossigeno
 - Per unità di tessuto a parità di lavoro effettuato
- Preferenziale utilizzo del lattato
 - Soprattutto ad intensità di lavoro massimali e sopramassimali

Lattico Deidrogenasi (LDH)



La reazione complessiva della conversione del glucosio in lattato è



Adattamenti enz. card. e muscolari agli sport aerobici e di potenza

27

LDH (2)

La LDH catalizza la reazione reversibile
Piruvato \leftrightarrow lattato

Si conoscono 5 isoforme di LDH (1-2-3-4-5) che derivano dalla combinazione di due sottounità (H, cardiaca e M, muscolare) espresse da 2 geni diversi

I TX A PREVALENTE METABOLISMO AEROBICO MOSTRANO ISOENZIMI PIU' RAPIDI (TIPO H)

LDH2 che catalizza la reazione lattato \rightarrow piruvato

I TX A RICCO METABOLISMO ANAEROBICO MOSTRANO ISOENZIMI PIU' LENTI (TIPO M)

LDH5 viene anche definita "piruvato-reduttase"

Adattamenti enz. card. e muscolari agli sport aerobici e di potenza

28

Adattamenti vascolari

Gli adattamenti che avvengono durante lo sforzo sono anche il risultato di modificazioni intrinseche metaboliche-strutturali dei muscoli scheletrici e del letto capillare correlati sia al tipo di sforzo ma anche al tipo di fibra muscolare coinvolta nell'esercizio.

Studi sperimentali eseguiti con microsferi fluorescenti nell'individuo non allenato hanno dimostrato che nella fase iniziale dell'esercizio il flusso ematico è identico in tutti i tipi di fibre. Se lo sforzo perdura nel tempo il flusso aumenta di 2-3 volte nelle fibre rosse a discapito delle bianche

Laughlin MH. "Muscle blood flow locomotory exercise." Exercise Sport Sci Rev 1985;13:95-136

Adattamenti periferici

- Aumento della riserva vascolare
- Aumento di calibro dei grossi vasi
- Aumento del numero di capillari
- Aumento del rapporto capillari/fibre muscolari
- Assente o minimo aumento della pressione di perfusione tissutale
- Riduzione della pressione arteriosa
- Fattori neurochimici e dinamici

Calibro dei vasi art/ven in differenti soggetti

(Shenberger JS e coll. "Physiologic and structural indices ..." Med Sci Sport Exerc 1990)

	Sedentari N = 20		Ciclisti N = 15		Maratoneti N = 15		Pallavolisti N = 15	
	ass	ind	ass	ind	ass	ind	ass	ind
Arco aortico	27.2	14.4	30.0	16.3	29.1	16.5	28.8	13.3
Art. Carotide sn	7.8	4.1	8.5	4.6	7.9	4.5	7.7	3.6
Art. Succlavia sn	9.2	4.8	11.7	6.4	10.7	6.1	11.0	5.1
Aorta Addomin.	16.2	8.5	18.8	10.2	18.1	10.3	19.9	9.2
Art. Mesenterica	7.1	3.7	8.0	4.3	7.9	4.5	7.2	3.3
V. Cava super.	16.7	8.8	19.4	10.5	19.5	11.1	20.3	9.3
V. Cava infer.	20.0	10.5	27.7	15.1	27.8	15.8	26.9	12.4
Art. Polmonare	19.3	10.2	21.5	11.7	21.5	12.1	22.0	10.1

Adattamenti enz. card. e muscolari agli sport aerobici e di potenza

31

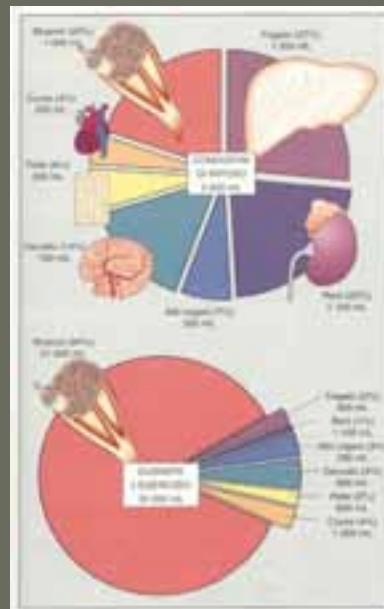
Ridistribuzione del flusso ematico durante esercizio submassimale

Zelis e Flaim classificano tre categorie di organi e tessuti:

- **Muscoli coinvolti nello sforzo** (arti, tronco, cuore, respiratori)
- **Organi la cui attività anabolica-catabolica è stimata durante lo sforzo** (fegato, tessuto adiposo...)
- **Tessuti-organi-apparati non coinvolti durante lo sforzo**

La distribuzione ottimale della portata cardiaca si ottiene quando non esistono differenze significative del rapporto flusso metabolismo

"alteration in vasomotor tone in congestive heart failure." Prog Cardiovasc Dis 1982; 24:437-59



Adattamenti enz. card. e muscolari agli sport aerobici e di potenza

32

Modificazioni indotte dall'allenamento di potenza

Sistema	Modificazione	Sistema	Modificazione
Fibre muscolari	Non chiarita	Enzimi della glicolisi	Aumento
Numero	Aumento	Fosfofruttochinasi	Aumento
Dimensione	Non nota	Lattodeidrogenasi	
Tipo			
Densità capillare	Nessuna variaz	Enzimi met aerobico	Aumento
Body building	Diminuzione	Carboidrati	Non nota
Powerlifting		Lipidi	
Mitocondri	Diminuzione	Subst intramuscolari	Aumento
Volume	Diminuzione	ATP	Aumento
Densità		CP	Aumento
		Glicogeno	Aumento
		Trigliceridi	Non nota
Tempo di contrazione	Diminuzione	VO2max	Aumento
		Circuit training	Invariato
		All coi pesi intensità >	
Enzimi	Aumento	Tx connettivo	Aumento
Creatinfosochinasi	Aumento	Struttura legamenti/tendini	Invariato
Miochinasi		Collagene muscolare	

Adattamenti enz. card. e muscolari agli sport aerobici e di potenza

33

Adattamenti cardiocircolatori negli sport di potenza

Nelle attività sportive di potenza il cuore è chiamato ad effettuare per tempi brevi o brevissimi

LAVORO DI PRESSIONE

La cui entità è ingente in quanto in esercizi massimali coi pesi sono state registrate pressioni intraarteriose superiori a 350 mmHg per la sistolica e 200 mmHg per la diastolica

Adattamenti enz. card. e muscolari agli sport aerobici e di potenza

34

Adattamenti del cuore agli sport di potenza

- Si ha uno specifico quadro adattativo del cuore con ipertrofia concentrica a carico del ventricolo sinistro e del setto interventricolare
- A differenza degli sport aerobici, l'aumento dello spessore parietale non è seguito dall'aumento delle dimensioni cavitare
- Va sottolineato comunque che, a parte segnalazioni sporadiche, l'aumento della massa cardiaca non ha creato disturbi funzionali

Fattori che modificano la forza muscolare

- Fattori nervosi
 - Facilità di reclutamento delle unità neuro-motorie
 - Una maggiore attivazione centrale delle aree motorie
 - Una maggiore sincronizzazione nell'attivazione delle unità motorie
 - Una riduzione dell'effetto inibitorio di alcune afferenze sensitive
 - Un'inibizione delle afferenze dei recettori muscolo-tendinei di Golgi
- Fattori muscolari
 - Ipertrofia muscolare
 - Iperplasia muscolare
 - Variazioni della tipologia delle fibre muscolari
- Fattori neuromuscolari

Effetti di allenamenti specifici sui muscoli scheletrici

Tip muscolare	Fibre lente		Fibre rapide	
	Forza	Resistenza	Forza	Resistenza
Composizione %	0 o ?	0 o ?	0 o ?	0 o ?
Sezione	+	0 o +	++	0
Contrattilità	0	0	0	0
Capacità ossidativa	0	++	0	+
Capacità anaerobica	? o +	0	? O +	0
Contenuto di glicogeno	0	++	0	++
Ossidazione dei grassi	0	++	0	+
Densità capillare	?	+	?	? O +
Flusso di sangue sotto sforzo	?	? O +	?	?

Adattamenti enz. card. e muscolari agli sport aerobici e di potenza

37

Adattamenti metabolici del muscolo scheletrico nell'attività fisica regolare

Adattamenti cellulari

=> migliore attività contrattile

Adattamenti vascolari

🚩 > repentino del potenziale ossidativo mitocondriale

🚩 Fosforilazione ossidativa

🚩 Beta ossidazione

🚩 Incremento dell'espressione di proteine coinvolte nel trasporto del glucosio

🚩 esochinasi

🚩 GLUT 4

🚩 Incremento di proteine trasportatrici di Na e K

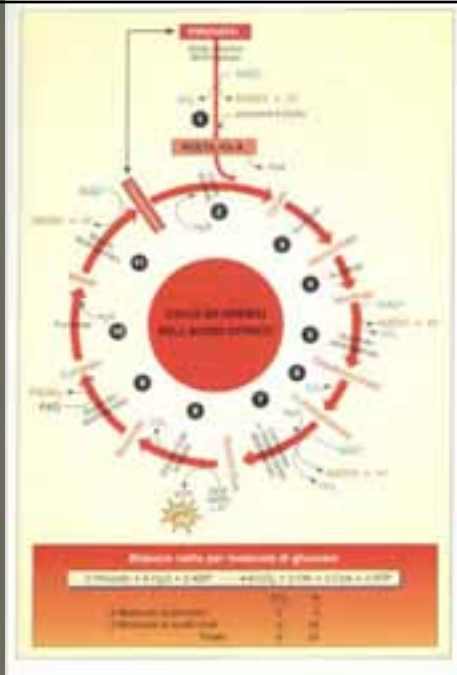
🚩 Na⁺/K⁺-ATPasi

🚩 Incremento di MCT 1 (monocarboxylate transporter 1)

🚩 Vettore del lattato

Adattamenti enz. card. e muscolari agli sport aerobici e di potenza

38



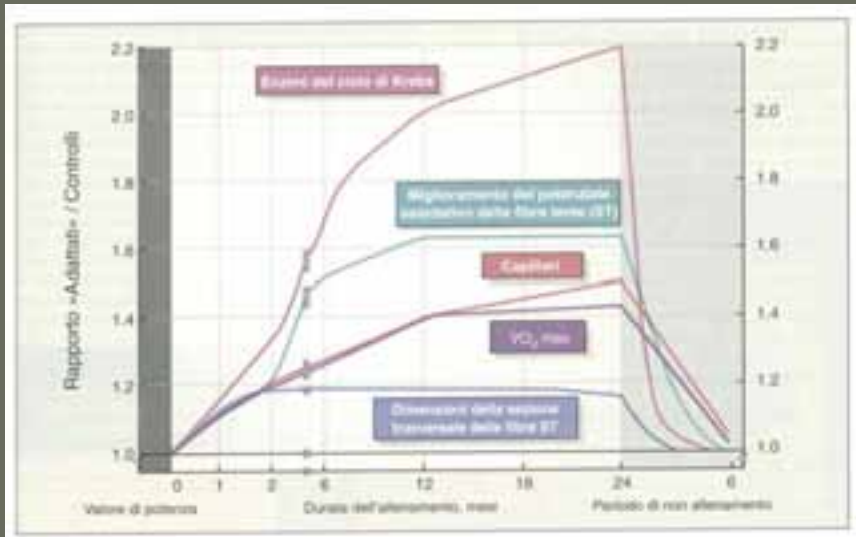
Adattamenti enz. card. e muscolari agli sport aerobici e di potenza

Analisi comparativa

Allenamento AEROBICO	Allenamento DI POTENZA
Aumento del VO2max	Ipertrofia muscolare per aumento delle proteine miofibrillari
No ipertrofia (< diametro muscolare)	Aumento del numero delle fibre FT e ST
> numero di capillari per unità di muscolo	> adattamenti neuromuscolari
> numero e dimensione dei mitocondri (soprattutto nelle fibre Type I)	> coordinazione tra muscoli agonisti, sinergici, antagonisti
< produzione di acido lattico	< del numero e densità dei mitocondri
< deplezione del glicogeno	< del numero dei capillari e della loro densità
> Ossidazione lipidica	> della secrezione di acetil-colina nella placca neuromuscolare
< risposta CV in sforzi submassimali	> enzimi glicolitici

Adattamenti enz. card. e muscolari agli sport aerobici e di potenza

Adattamento e regressione



Adattamenti enz. card. e muscolari agli sport aerobici e di potenza

43

DETRAINING

Just as meaningful adaptations are induced by physical activity, they are gradually lost in persons who become inactive

Adattamenti enz. card. e muscolari agli sport aerobici e di potenza

44

DETRAINING

The extent and time course of regression are not known for many variables and are likely related to the exact process under consideration

DETRAINING

For example, roughly 50% of the increased muscle mitochondrial content induced by training can be lost within 1 week of detraining

DETRAINING

A return to training will recover the muscle adaptations; however, the time required to reestablish the steady-state trained condition can take longer than the detraining interval

Il futuro cardiovascolare dell'atleta e ex atleta

- 🏆 Lo stato di salute generale e cardiovascolare degli ex atleti non differisce o è addirittura migliore dai coetanei che non avevano fatto sport
 - 🏆 Paffenbarger RS. "A natural history of athleticism and cardiovascular health" Med Spor 1981; 34:93
- 🏆 Lo stato di salute dell'ex atleta sembra direttamente correlato con
 - 🏆 Età di inizio dell'attività, durata e continuità, epoca della cessazione e grado reale di inattività
 - 🏆 Stato morfofunzionale ed invecchiamento del cuore
 - 🏆 Presenza di patologie intercorrenti spesso misconosciute

Gli adattamenti sono eventi positivi per la salute?



Conclusioni





Adattamenti enz. card. e muscolari agli sport aerobici e di potenza

51



Adattamenti enz. card. e muscolari agli sport aerobici e di potenza

52