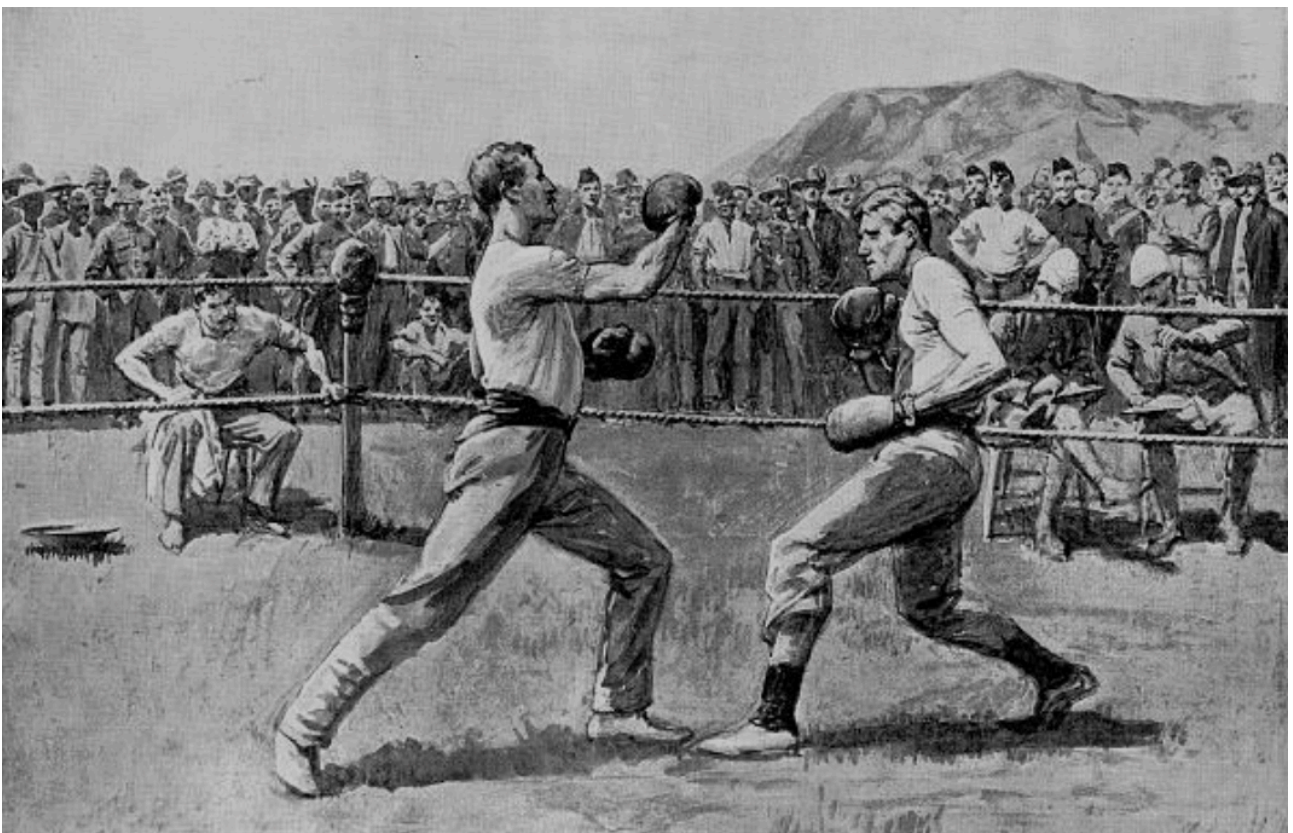




CORSO DI FORMAZIONE PREPARATORE ATLETICO SPORT DA COMBATTIMENTO

DOCENTE: MICHELE BIGLIOLI



I SISTEMI ENEGETICI

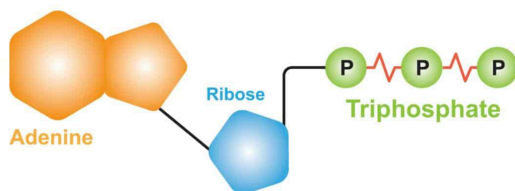
L'ATP è la produzione energetica durante l'attività sportiva

Per capire come il corpo umano produca energia durante l'attività fisica, dobbiamo partire da una molecola fondamentale: l'**ATP**, acronimo di *Adenosina Trifosfato*.



L'ATP rappresenta la **principale fonte di energia immediatamente disponibile** per le cellule, tanto da essere chiamata la “moneta energetica” dell'organismo. È la forma con cui l'energia viene “spesa” ogni volta che il corpo deve compiere un lavoro; muoversi, contrarsi, crescere o semplicemente mantenersi in vita.

Adenosine triphosphate molecule



Da un punto di vista chimico, l'ATP è formato da tre componenti principali:

- Una **base azotata**, l'adenina;
- Uno **zucchero**, il ribosio;
- E **tre gruppi fosfato**, legati tra loro da legami ad alta energia.

Sono proprio questi legami fosfato a rendere l'ATP una molecola così preziosa; essi sono instabili e possono essere facilmente rotti. Quando uno di questi legami si scinde, attraverso un processo chiamato **idrolisi** (cioè l'aggiunta di una molecola d'acqua), si libera energia, insieme a un fosfato inorganico e a una nuova molecola: l'**ADP**, ovvero *Adenosina Difosfato*.

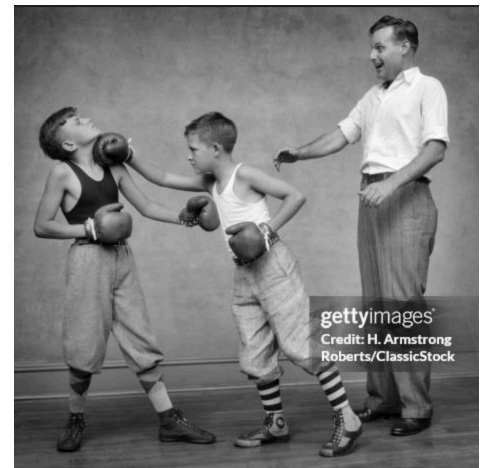
L'energia liberata in questa reazione viene immediatamente utilizzata dalle **miofibrille muscolari** per permettere la contrazione del muscolo e quindi il movimento. In situazioni di elevato fabbisogno energetico, anche l'ADP può perdere un ulteriore gruppo fosfato, formando **AMP**, *Adenosina Monofosfato* e liberando ancora energia.

Tuttavia, più frequentemente, l'ADP viene **riciclata** nei mitocondri e nel citoplasma, dove viene rigenerata in ATP; un processo continuo e vitale che garantisce la disponibilità energetica in ogni movimento.

L'ATP è al centro del metabolismo cellulare, cioè di quell'insieme di reazioni chimiche che permettono alle cellule di vivere, crescere e funzionare.

Nel movimento, la produzione di ATP avviene grazie a diverse **vie energetiche** o **sistemi di produzione**, che si attivano in base a due fattori fondamentali:

1. **L'intensità dello sforzo**, cioè quanto è impegnativo;
2. **La durata dello sforzo**, cioè per quanto tempo viene mantenuto.



A seconda della combinazione di questi due parametri, l'organismo utilizza in modo diverso i **sistemi energetici anaerobici** (che producono ATP senza l'uso di ossigeno) e il **sistema aerobico** (che invece necessita di ossigeno).

La comprensione di questi meccanismi è essenziale per analizzare la **bioenergetica dell'esercizio fisico** e per impostare programmi di allenamento.

Durante un allenamento o un'attività fisica, il nostro organismo può produrre energia, cioè ATP, attraverso **tre principali vie**:

1. Due **vie anaerobiche**, cioè che non prevedono l'utilizzo dell'ossigeno, una **alattacida** e una **lattacida**;
2. Una **via aerobica**, che invece richiede la presenza di ossigeno.



La scelta di quale sistema energetico venga utilizzato in misura maggiore, ripetiamo dipende da due fattori chiave; la **durata dello sforzo** e la **sua intensità**.

Le vie **anaerobiche**, come suggerisce il termine, producono ATP *senza che l'ossigeno venga impiegato* nei processi di sintesi. È importante sottolineare che ciò non significa che l'ossigeno “non ci sia”, ma semplicemente che, in quella fase e in quei tempi così rapidi, l'organismo non riesce a utilizzarlo per produrre energia.

Il metabolismo anaerobico alattacido

Prima di entrare nel dettaglio, è utile chiarire i due termini che compongono il nome di questo sistema:

- **Anaerobico** significa “senza utilizzo di ossigeno”;
- **Alattacido** significa “senza produzione, o accumulo, di acido lattico”.

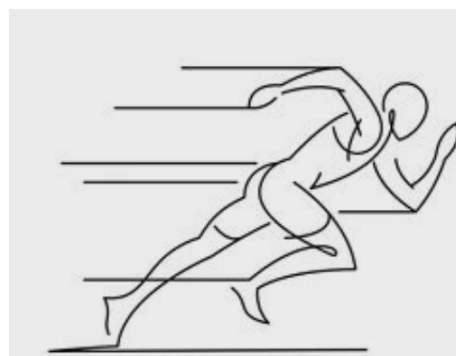
Il metabolismo anaerobico alattacido è quindi una via metabolica che **produce energia in assenza di ossigeno e senza accumulo di acido lattico**.

Quando entra in gioco?

Questa via energetica è predominante in tutte le attività di **massima o quasi intensità** che si svolgono in un **tempo molto breve**, generalmente **entro i 10 secondi**.

Alcuni classici esempi sono:

- Uno scatto di 30, 40 o 100 metri;
- Un salto esplosivo;
- Un sollevamento nel powerlifting o in un esercizio di forza massimale;
- Un gesto atletico esplosivo come uno slancio o uno strappo.



Si tratta di situazioni in cui serve **massima potenza in un tempo minimo**.

Più la forza espressa è elevata, più breve sarà il tempo in cui questa potrà essere mantenuta.

È un principio semplice ma fondamentale; **forza massimale e durata dello sforzo sono inversamente proporzionali**.

Per esempio, se provassimo a correre alla massima velocità possibile, riusciremmo a mantenerla solo per pochi secondi prima di rallentare. Allo stesso modo, se sollevassimo un carico pari al nostro massimale (1RM), potremmo eseguire una o due ripetizioni.

Questo sistema **fornisce energia immediata**, ma per un tempo limitato.

È bene ricordare che nel muscolo scheletrico esiste **una piccola riserva di ATP già pronta**, ma questa è sufficiente a sostenere lo sforzo soltanto per circa **un secondo**. Dopo questo brevissimo intervallo, entra in gioco un'altra sostanza: la **creatina**.



All'interno del muscolo, la creatina è immagazzinata sotto forma di **fosfocreatina o creatinfosfato**, ossia una molecola di creatina legata a un gruppo fosfato. Questa forma rappresenta una sorta di “riserva energetica di emergenza” pronta a entrare in azione quando serve energia immediata.

Quando lo sforzo inizia, l'enzima **creatinasi (CK)** interviene per catalizzare una reazione molto rapida; la fosfocreatina **cede il suo gruppo fosfato** all'**ADP** (Adenosina Difosfato), **rigenerando così l'ATP** necessario per la contrazione muscolare. Questo processo avviene in modo estremamente veloce e senza bisogno di ossigeno, il che lo rende ideale per gli sforzi brevi e intensi. Tuttavia, le **scorte di fosfocreatina** nei muscoli sono limitate; esaurite queste riserve, l'organismo deve ricorrere ad altri sistemi energetici, più lenti ma duraturi, come quello **anaerobico lattacido o aerobico**.

Il metabolismo anaerobico alattacido, quindi:

- **Non utilizza ossigeno;**
- **Non produce acido lattico;**
- **Fornisce energia immediata**, ma per un tempo molto breve (0-10 secondi);
- Si basa sulla **scissione dell'ATP muscolare e sulla donazione di fosfato dalla fosfocreatina;**
- È predominante nelle attività **esplosive, di forza e potenza massimale**.

È, in altre parole, **il sistema energetico della potenza pura**, quello che permette al corpo di esprimere tutto il suo potenziale in pochi istanti.

Il metabolismo anaerobico lattacido

Il metabolismo anaerobico lattacido entra in azione quando l'attività si protrae per un tempo **più lungo rispetto al sistema alattacido**, ma comunque relativamente breve, generalmente **15-20 secondi e pochi minuti**.

Si tratta quindi di un sistema energetico che interviene in esercizi **intensi ma non massimali**, come una corsa di 400 metri, un allenamento ad alta intensità o una serie di esercizi.

In queste situazioni, la **forza espressa è minore** rispetto a quella del metabolismo alattacido, ma la **durata dello sforzo** è maggiore.

Questo sistema permette la **produzione di ATP senza l'utilizzo diretto dell'ossigeno**, ma a differenza del precedente, comporta la **formazione e l'accumulo di acido lattico**, da cui deriva il termine *lattacido*.

- **Anaerobico**, senza utilizzo di ossigeno;
- **Lattacido**, con produzione e accumulo di acido lattico.

Nel metabolismo anaerobico lattacido, la principale fonte per la produzione di ATP è il **glicogeno muscolare**, una sostanza di riserva formata da **lunghe catene di molecole di glucosio**.

Il glicogeno rappresenta quindi una **scorta di zuccheri pronti all'uso**, che il corpo può rapidamente "rompere" per ottenere energia.



Quando il muscolo, necessita di ATP, una molecola di glucosio entra in una via metabolica chiamata **glicolisi anaerobica**, che si svolge nel **sarcoplasma** (parte fluida della cellula muscolare).

La **glicolisi** è un processo composto da una serie di **reazioni chimiche**, attraverso le quali il glucosio viene trasformato in **due molecole di piruvato**.

Durante queste trasformazioni viene liberata **energia**, che serve per sintesi di ATP.

In questa fase, dunque, l'obiettivo dell'organismo, cioè **fornire energia al muscolo**, è stato raggiunto. Tuttavia, la glicolisi produce anche una significativa percentuale di piruvato, una molecola che, in presenza di ossigeno, verrebbe ulteriormente metabolizzata nei mitocondri.

Quando però l'ossigeno **non è disponibile in quantità sufficiente**, come accade negli sforzi intensi e rapidi, il piruvato **non può entrare nei mitocondri** e viene invece convertito in **acido lattico**.



La produzione di acido lattico è una conseguenza inevitabile della glicolisi anaerobica.

L'accumulo di questa sostanza nei muscoli provoca una **riduzione temporanea del PH**, creando un ambiente più acido che **limita l'attività degli enzimi** responsabili della contrazione muscolare.

È questo il motivo per cui, dopo un certo tempo, la performance cala e **lo sforzo non può essere mantenuto oltre alcuni minuti**.

Tuttavia, l'acido lattico **non è un prodotto "negativo"**, come spesso si pensa.

Dopo la sua formazione, infatti, viene rapidamente trasformato in **lattato** e **trasportato dal sangue fino al fegato**.

Nel **fegato**, il lattato viene **ricconvertito in piruvato** e poi, attraverso un processo chiamato **gluconeogenesi**, può essere trasformato nuovamente in **glucosio**.

Questo glucosio può:

- Essere **rilasciato nel sangue** per fornire energia ad altri tessuti;
- Oppure **tornare al muscolo**, dove verrà utilizzato per produrre ATP o per ricostituire le riserve di glicogeno.

Questo affascinante meccanismo di riciclo prende il nome di **Ciclo di Cori** e rappresenta una strategia fondamentale dell'organismo per **gestire e riutilizzare** l'acido lattico prodotto durante lo sforzo.

Il metabolismo anaerobico lattacido:

- **Non utilizza ossigeno;**
- **Produce acido lattico;**
- **Fornisce energia per sforzi intensi ma brevi** (15 secondi - pochi minuti);
- Utilizza come combustibile principale il **glicogeno muscolare;**
- È caratterizzato dalla **glicolisi anaerobica** e dal successivo **Ciclo di Cori** per il riciclo del lattato.

È il sistema energetico che il corpo utilizza quando l'intensità dell'attività è ancora alta ma prolungata rispetto agli sforzi esplosivi; la fase in cui il muscolo continua a "lavorare forte", anche se comincia ad avvertire la fatica.

....senza utilizzare ossigeno!

Quando parliamo di **metabolismi anaerobici**, ci riferiamo a quei sistemi energetici che sono in grado di **produrre ATP senza utilizzare ossigeno** nei processi di sintesi.

È importante sottolineare questa espressione "senza utilizzare ossigeno", perché è più corretta rispetto a dire semplicemente "senza ossigeno".

Infatti, l'ossigeno è **presente nel corpo anche durante queste fasi, ma non fa in tempo ad essere impiegato** per produrre energia.

La differenza è sottile ma fondamentale; non si tratta di un'assenza fisica di ossigeno, bensì di **una questione di tempo**.



Nei **sistemi anaerobici**, la richiesta di ATP è talmente **immediata e intensa** che l'organismo deve utilizzare vie metaboliche **molto rapide**, in grado di fornire energia in pochi istanti.

Nel metabolismo **anaerobico alattacido**, questo avviene in **frazioni di secondo**; nel **metabolismo anaerobico lattacido**, la durata si estende un pò di più, ma resta

comunque **troppo breve** perché l'ossigeno possa essere coinvolto nei processi di produzione.

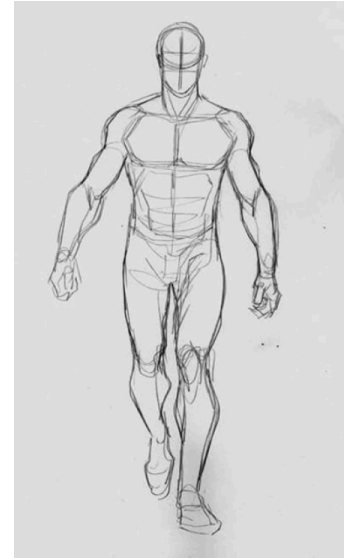
In altre parole, i sistemi anaerobici **non posso aspettare** che l'ossigeno venga trasportato, diffuso nelle cellule e utilizzato nei mitocondri; la richiesta di energia è troppo urgente, il corpo ricorre quindi a **vie più veloci ma meno efficienti**.

I **sistemi aerobici**, cioè quelli che invece **utilizzano ossigeno**, sono molto più “convenienti” dal punto di vista energetico; riescono a produrre una quantità di ATP nettamente superiore. Tuttavia, hanno un limite opposto; sono **più lenti**.

Non riuscirebbero, da soli, a soddisfare le richieste energetiche immediate di uno sprint, di un salto o di un gesto esplosivo.

Per questo motivo, il corpo umano ha sviluppato un sistema energetico straordinariamente intelligente:

- I **metabolismi anaerobici** intervengono quando serve **energia immediata**;
- Mentre il **metabolismo aerobico** entra in gioco quando lo sforzo si **prolunga nel tempo** e può contare su una disponibilità di ossigeno adeguata.



Il metabolismo aerobico

Il metabolismo aerobico è il sistema energetico che permette al nostro corpo di **produrre ATP grazie all'utilizzo dell'ossigeno**.



Si attiva in tutti quei momenti in cui l'attività fisica **si prolunga nel tempo**, cioè quando lo sforzo non è più immediato ed esplosivo (come nei sistemi anaerobici), ma **più costante e duraturo**. Parliamo, per esempio, di attività di corsa per lunghi tragitti, ciclismo, nuoto o camminate su tapis roulant.

In questi casi, l'organismo riesce a “prendere fiato” e a **integrare l'ossigeno nei processi di produzione energetica**.

Il risultato è un sistema molto **più efficiente**, capace di produrre una **grande quantità di ATP**, ma in modo **più lento** rispetto ai metabolismi anaerobici.

Come funziona?

Il metabolismo aerobico entra in gioco **dopo alcuni minuti di attività continuata** e può sostenere il lavoro muscolare **per periodi lunghi**, anche di diverse ore.

Naturalmente, man mano che lo sforzo si prolunga, **la forza espressa diminuisce**; non possiamo mantenere la stessa potenza di uno sprint per tutta la maratona.

Dal punto di vista biochimico, il sistema aerobico è il più “vantaggioso” perché riesce a **estrarre energia da diversi tipi di substrati**:

- **Glicogeno**, cioè i carboidrati immagazzinati nei muscoli e nel fegato;
- **Lipidi**, i grassi di deposito;
- E, in casi particolari, anche **proteine**.

All'inizio di un'attività aerobica, il corpo ricava ATP soprattutto attraverso la **glicolisi**, cioè la scomposizione del glicogeno in energia.

Questa fase è simile a quella del **metabolismo anaerobico lattacido**, ma con una differenza fondamentale; **qui è presente l'ossigeno**.

Per questo parliamo di **glicolisi aerobica**.

Al termine di questa prima fase, si ottengono **ATP e piruvato**, che rappresenta il punto di partenza per la tappa successiva; il **Ciclo di Krebs** o **Ciclo dell'Acido Citrico**.

Quando l'attività fisica continua, la richiesta di energia aumenta.

Il **piruvato** prodotto dalla glicolisi, in presenza di ossigeno, si trasforma in **Acetil-CoA**.

Quest'ultimo reagisce con una molecola chiamata **ossalacetato**, dando il via al **Ciclo di Krebs**, che si svolge all'interno dei **mitocondri** (le “centrali energetiche” delle cellule).

Grazie a questo ciclo, l'organismo riesce a produrre **circa 34 molecole di ATP**, completando così l'ossidazione del glicogeno.

Si tratta di un processo estremamente efficiente, che garantisce un flusso costante di energia finché le riserve di glicogeno sono disponibili.

Quando finiscono le riserve di glicogeno?

Con il protrarsi dell'attività, le **scorte di glicogeno** si riducono progressivamente.

A questo punto il corpo comincia ad attingere ai **grassi di deposito**, cioè ai **trigliceridi**, per continuare a produrre energia.

I trigliceridi vengono scissi in **acidi grassi** e **glicerolo**, un processo chiamato lipolisi.

Gli acidi grassi, una volta entrati nel muscolo, vengono trasformati in **Acetil-CoA** attraverso un serie di reazioni note come **β -ossidazione**.

Da qui, l'Acetil-CoA entra nuovamente nel **Ciclo di Krebs**, dove viene utilizzato per produrre **ATP**.

Perché i grassi rendono di più?

L'ossidazione dei grassi è un processo più lungo e complesso rispetto a quello dei carboidrati, ma **produce molta più energia**.

Per esempio, l'ossidazione di una singola molecola di **acido palmitico** (un acido grasso) genera circa **129 molecole di ATP**, più del doppio di quelle ottenute dalla ossidazione di una molecola di glucosio.

Questo spiega perché, nelle attività di lunga durata e a bassa intensità, **i grassi diventano il principale carburante energetico**.

E le proteine?

In condizioni particolari, come sforzi molto prolungati o carenza di carboidrati, anche le **proteine** possono contribuire alla produzione di energia.

In questo caso, gli **amminoacidi** derivati dalle proteine vengono trasformati in **glucosio** attraverso un processo chiamato **gluconeogenesi**, per poi essere impiegati nelle stesse vie metaboliche già viste (glicolisi e ciclo di Krebs).



In metabolismo aerobico è un processo **lento ma altamente efficiente**, capace di utilizzare ossigeno e diversi substrati per produrre ATP.

È il **motore principale delle attività di resistenza**, permette di mantenere lo sforzo nel tempo e di farlo in modo sostenibile, anche se con un livello di forza inferiore rispetto ai sistemi anaerobici.

Il debito di ossigeno

Quando iniziamo un'attività fisica, che sia una corsa, un salto o una serie di esercizi, il nostro **corpo aumenta immediatamente la richiesta di energia**.

Serve ATP, e serve subito.

Tuttavia, i **meccanismi aerobici** (quelli che utilizzano ossigeno) **non si attivano istantaneamente**; hanno bisogno di qualche secondo per “entrare in regime”.

Questo momento iniziale, in cui la richiesta energetica è alta ma l'apporto di ossigeno ancora insufficiente, viene **coperto dai sistemi anaerobici**, cioè quelli che **producono energia senza ossigeno**.



Cosa significa debito di ossigeno?

Proprio perché all'inizio dello sforzo l'ossigeno non arriva subito in quantità sufficiente, l'organismo si trova a dover **“recuperare” questa mancanza in un secondo momento**.

La quantità di ossigeno necessaria per **ripristinare le riserve energetiche** utilizzata durante la fase anaerobica prende il nome di **debito di ossigeno**.

In altre parole, il debito di ossigeno rappresenta **la quantità di ossigeno che il corpo dovrà consumare dopo l'attività fisica** per:

- Ricostruire ATP;
- Smaltire i prodotti di scarto;
- Ristabilire le riserve energetiche (fosfati e glicogeno).

Durante i primi istanti dello sforzo, il **sistema anaerobico lattacido** è il primo a intervenire. L'attivazione di questo sistema libera rapidamente **ADP e fosfato inorganico**,

questa condizione stimola la respirazione e la circolazione sanguigna, preparando così il terreno per l'attivazione del **metabolismo aerobico**.

Successivamente, entra in gioco anche il **sistema anaerobico lattacido**, che produce ATP ma anche **acido lattico**.

Dopo la fine dello sforzo, il corpo continua a consumare ossigeno a ritmi elevati per:

1. **Ricostruire le riserve di fosfocreatina;**
2. **Ossidare e rimuovere l'acido lattico;**
3. **Ripristinare i livelli di glicogeno muscolare.**

Questo consumo di ossigeno **dopo l'attività fisica** è di fatto, la **“ricostruzione” del debito contratto**.

Un aspetto interessante riguarda la **differenza tra soggetti allenati e sedentari**.

Chi è allenato riesce ad **attivare più rapidamente il metabolismo aerobico**, riducendo così il ricorso ai sistemi anaerobici e, di conseguenza, **contraendo un debito di ossigeno minore**.

Al contrario, chi non è allenato impiega più tempo ad attivare la respirazione aerobica e accumula quindi un **debito più elevato**.

Il **debito di ossigeno** è una risposta fisiologica fondamentale; è la “traccia” che il corpo lascia quando ha lavorato più velocemente di quanto l'ossigeno possa arrivare.

Una volta terminata l'attività, l'organismo continua a lavorare “dietro le quinte” per ristabilire l'equilibrio energetico, dimostrando quanto sia dinamico e intelligente il nostro sistema di regolazione metabolica.

Il VO2max

Più l'esercizio diventa intenso, più aumenta la richiesta di ossigeno; il cuore accelera, la respirazione si fa profonda e tutto l'organismo lavora per portare l'ossigeno ai tessuti che ne hanno bisogno.

Tuttavia, arriva un punto in cui, anche se l'intensità dello sforzo continua a crescere, il **consumo di ossigeno non aumenta più**.



Questo punto si chiama **VO2max** e rappresenta **la quantità massima di ossigeno che il corpo è in grado di utilizzare in un minuto** durante un'attività fisica.

Il VO2max è un indice della **potenza aerobica** di una persona, cioè della sua capacità di sostenere un lavoro grazie ai meccanismi energetici che utilizzano ossigeno, indicando, quanto è efficiente il nostro sistema cardiocircolatorio e muscolare.

Per capire meglio, possiamo immaginare che il VO2max sia come la cilindrata del motore del nostro corpo; chi ha un VO2max alto può mantenere più a lungo intensità di sforzo elevate, mentre chi ha un valore più basso si affatica prima, perché il suo organismo riesce a fornire meno ossigeno ai muscoli.

In sintesi, il VO2max:

- Rappresenta il limite massimo di utilizzo dell'ossigeno durante l'esercizio;
- Definisce la **potenza del sistema aerobico**;
- Permette di capire quanto siamo allenati e quanto possiamo sostenere uno sforzo.

Allenamenti regolari e mirati, ad alta intensità, possono migliorare nel tempo il VO2max, rendendo il nostro corpo più efficiente e resistente.

Più ossigeno sappiamo utilizzare, **più energia possiamo produrre** e quindi più a lungo possiamo muoverci senza andare “fuori giri”.

BIBLIOGRAFIA:

- McArdle, W. D., Katch, F. I., & Katch, V. L. (2020). Interaction among skeletal muscle metabolic energy systems. *Exercise Physiology: Nutrition, Energy, and Human Performance*. Human Kinetics.
- Gustin, P. B. (2001). Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise. *Sports Medicine*, 31(10), 725-741.
- Jeukendrup, A. E. (2019). Regulation of energy substrate metabolism during exercise. *Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care*, 22(6), 471-477.
- Contrepois, K., et al. (2022). The exercise metabolome: Acute aerobic and anaerobic signatures. *Cell Metabolism*, 34(2), 276-289.
- Egan, B., & Zierath, J. R. (2013). Adaptations to endurance and strength training. *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, 3(12), a009712.
- Foster, C., & Lucia, A. (2016). Misconceptions about aerobic and anaerobic energy expenditure. *Journal of Strength and Conditioning Research* 20(8), 2345-2350.