
Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione
Corso di Laurea in Ingegneria Biomedica

Relazione per la prova finale
«Elementi di emodinamica dell'esercizio fisico»

Relatrice: Prof.ssa Francesca Maria Susin

Laureanda: Beatrice Bozzetta
Matricola n.: 2111239

Padova, 20/07/2026

Motivazioni

- La comprensione quantitativa dei fenomeni emodinamici è rilevante sia in **bioingegneria** che in **clinica**
- L'esercizio fisico è uno dei principali interventi non farmacologici e non invasivi nella **prevenzione delle patologie croniche**
- L'attività fisica regolare **riduce la mortalità**

Obiettivi della tesi

- Analizzare con **interpretazione ingegneristica** i principali fenomeni emodinamici della risposta cardiovascolare all'esercizio fisico, con particolare attenzione agli **atleti di endurance**
- Descrivere gli **adattamenti acuti e cronici** indotti dall'esercizio sui parametri emodinamici
- Confrontare i meccanismi fisiologici con l'**evidenza sperimentale** recente in letteratura

Metodologia

- Revisione dei fondamenti fluidodinamici e anatomo-funzionali del sistema cardiovascolare
- Ricerca bibliografica con analisi critica e approfondimento della risposta acuta e degli adattamenti cronici
- Discussione critica dello studio scientifico «*Cardiovascular adaptation to training load in endurance athletes*» (EHJ, 2026) come caso applicativo

Risposta acuta all'esercizio

Attivazione del sistema nervoso simpatico

Aumento della frequenza cardiaca

Vasodilatazione del circolo muscolare attivo

Aumento della gittata cardiaca

Redistribuzione del flusso sanguigno verso i muscoli attivi

Aumento dell'estrazione periferica di ossigeno

Legge di Poiseuille



Resistenza periferica totale

Meccanismo di Frank-Starling

**Diagramma pressione-volume
(PV loop)**

Equazione di Fick



Consumo massimo di ossigeno

Legge di Poiseuille

La prima risposta all'inizio dell'esercizio fisico è l'**attivazione del sistema nervoso simpatico**.

aumento (quasi lineare con l'intensità dello sforzo) della **frequenza cardiaca** fino al raggiungimento della frequenza cardiaca massima $HR_{max}[bpm] \approx 220 - età$

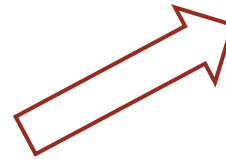
marcata **vasodilatazione** del **circolo muscolare attivo**

$$R = \frac{8\eta L}{\pi r^4}$$

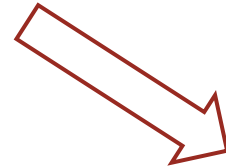
$$R \propto \frac{1}{r^4}$$



LEGGE DI POISEUILLE



Piccoli aumenti del raggio vascolare determinano elevata **riduzione** della **resistenza periferica totale TPR**



IPEREMIA DA ESERCIZIO = incremento del **flusso sanguigno** verso il muscolo scheletrico e il muscolo cardiaco

Il meccanismo di Frank-Starling

Descrive la capacità intrinseca del ventricolo di modulare SV in funzione di EDV (precarico).

aumenta il ritorno venoso al ventricolo destro



aumenta EDV (precarico)



aumenta la forza contrattile



aumenta SV



$$SV \propto EDV$$



$$CO = HR \cdot SV$$

aumenta CO

$$LVEF [\%] = \frac{SV}{EDV} \cdot 100$$

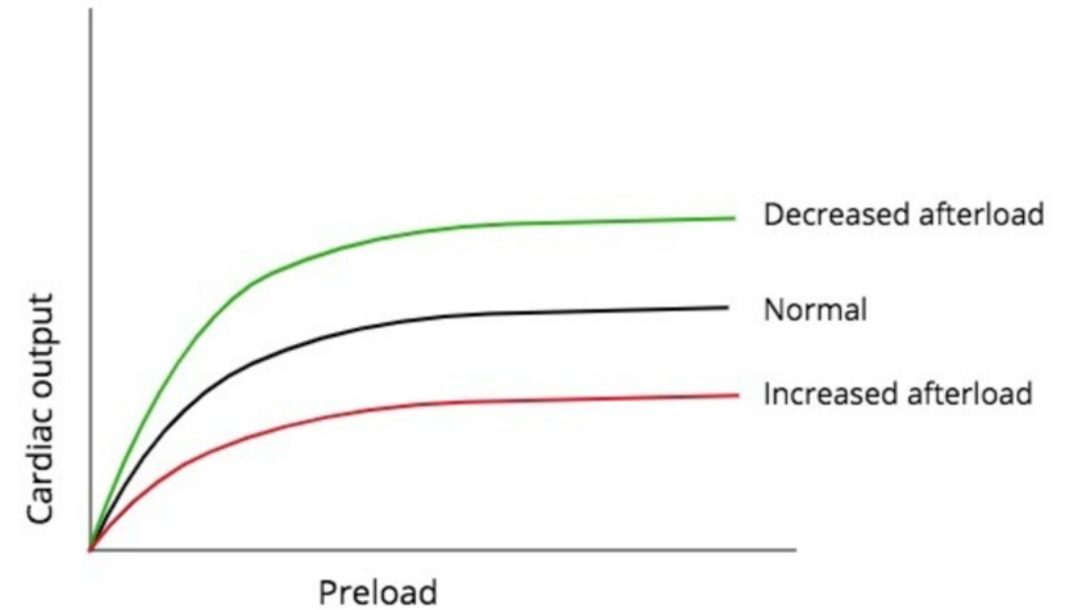
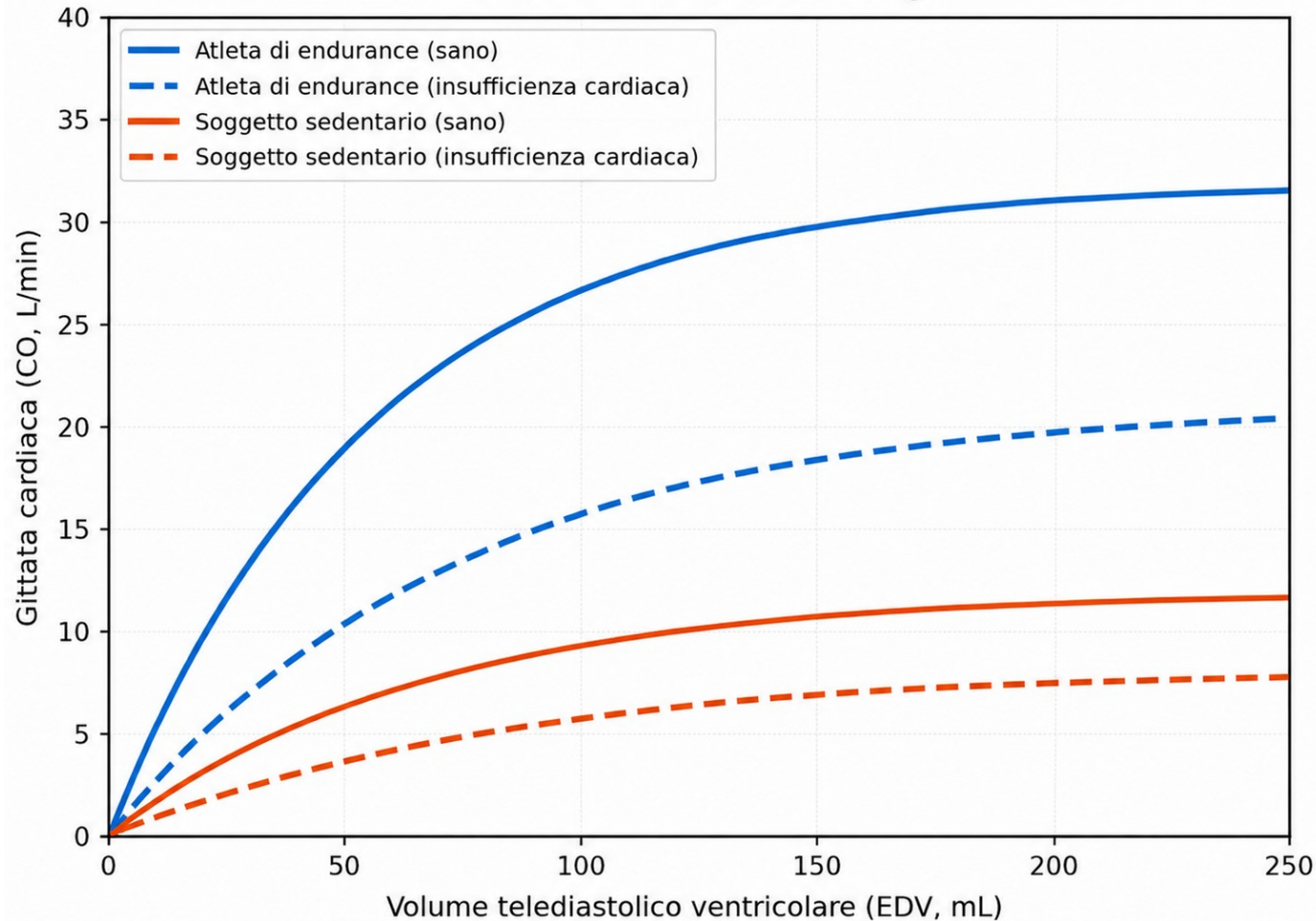


Figura 1 - LaCombe P, Tariq MA, Lappin SL, «Physiology, Afterload Reduction», 2023 Apr 24

SV (mL): gittata sistolica ($SV = EDV - ESV$)
EDV (mL): volume telediastolico ventricolare
CO (L/min): gittata cardiaca

Il meccanismo di Frank-Starling

Relazione di Frank-Starling



ATLETA DI ENDURANCE

Curva traslata verso l'alto rispetto ai soggetti sedentari



Maggior compliance ventricolare

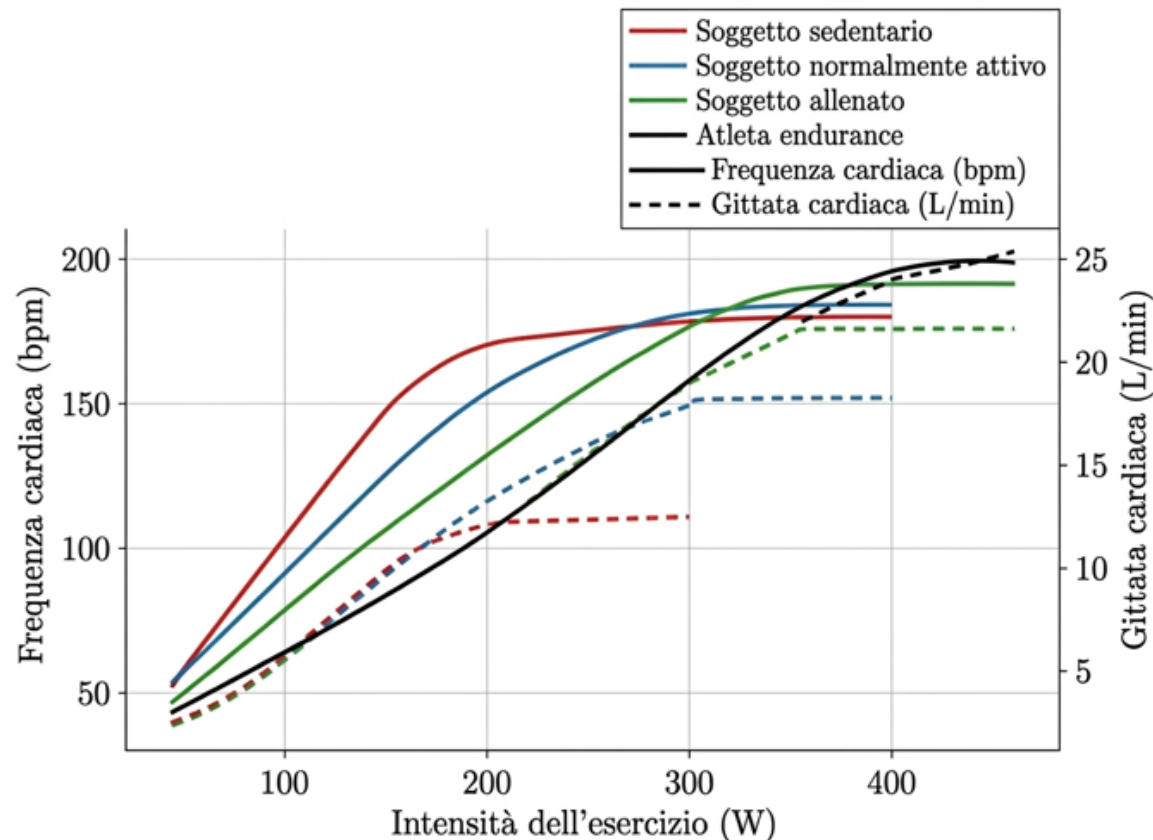
$$C = \frac{\Delta V}{\Delta P}$$

SOGGETTI SEDENTARI

----- In un cuore scompensato, la curva è più bassa e più piatta, quindi a parità di riempimento aumenta meno la gittata sistolica SV e cardiaca CO

Il meccanismo di Frank-Starling

AUMENTO PROGRESSIVO di HR e CO, con l'incremento del carico di lavoro, fino a presentare una tendenza all'**APPIATTIMENTO** nelle fasi di intensità più elevate.



A parità di intensità di esercizio, gli **atleti di endurance** mostrano in genere una **HR simile** e una **CO più elevata** rispetto ai soggetti meno allenati

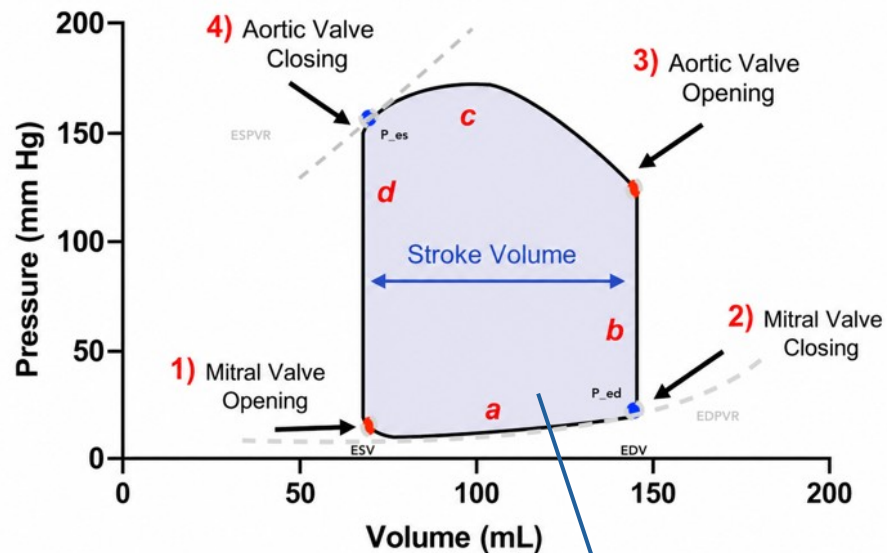


maggiore efficienza cardiovascolare

Figura 3 – adattata da Laughlin MH, «Cardiovascular response to exercise», 1999 Dec

PV loop

Rappresentazione ingegneristica della **pompa cardiaca**:
relazione tra **pressione ventricolare** (mmHg, asse y) e **volume ventricolare** (mL, asse x) durante un intero ciclo cardiaco.

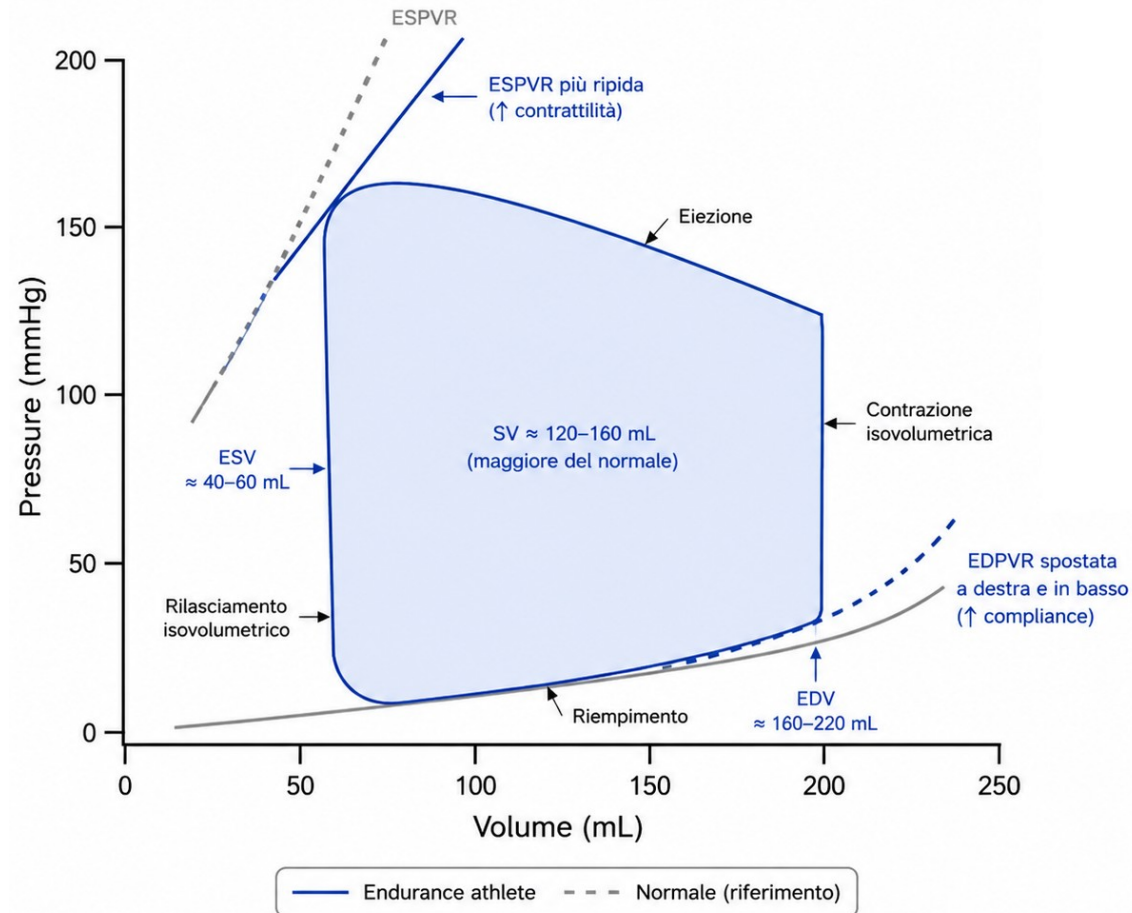


L'area racchiusa dal loop corrisponde al **lavoro meccanico** ventricolare

Il grafico ha forma “ad anello” e descrive le 4 fasi:

- a) riempimento ventricolare
- b) contrazione isovolumetrica
- c) eiezione
- d) rilasciamento isovolumetrico

Pressure–Volume Loop Endurance Athlete (Rest)



ATLETA DI ENDURANCE

- EDV ↑ (precarico ↑)
- ESV ↓ (contrattilità ↑ e afterload ↓)
- SV ↑↑
- EDPVR più bassa e spostata a destra (compliance ↑)
- ESPVR più ripida (contrattilità ↑)
- Area del loop ↑ (lavoro sistolico ↑)

volumi telediastolici più elevati
senza incrementi proporzionali
della pressione di riempimento

(EDPVR, End-Diastolic Pressure Volume Relationship
ESPVR, End-Systolic Pressure Volume Relationship)

Legge di Fick

$$\dot{V}_{O_2} = CO \times (Ca_{O_2} - Cv_{O_2})$$

$$\dot{V}_{O_2} = HR \times SV \times (Ca_{O_2} - Cv_{O_2})$$

$\dot{V}_{O_2}$ (L/min): consumo di ossigeno

Ca_{O_2} (mL O_2 / dL): contenuto arterioso di O_2 $\longrightarrow$ **costante / aumenta lievemente** durante l'esercizio

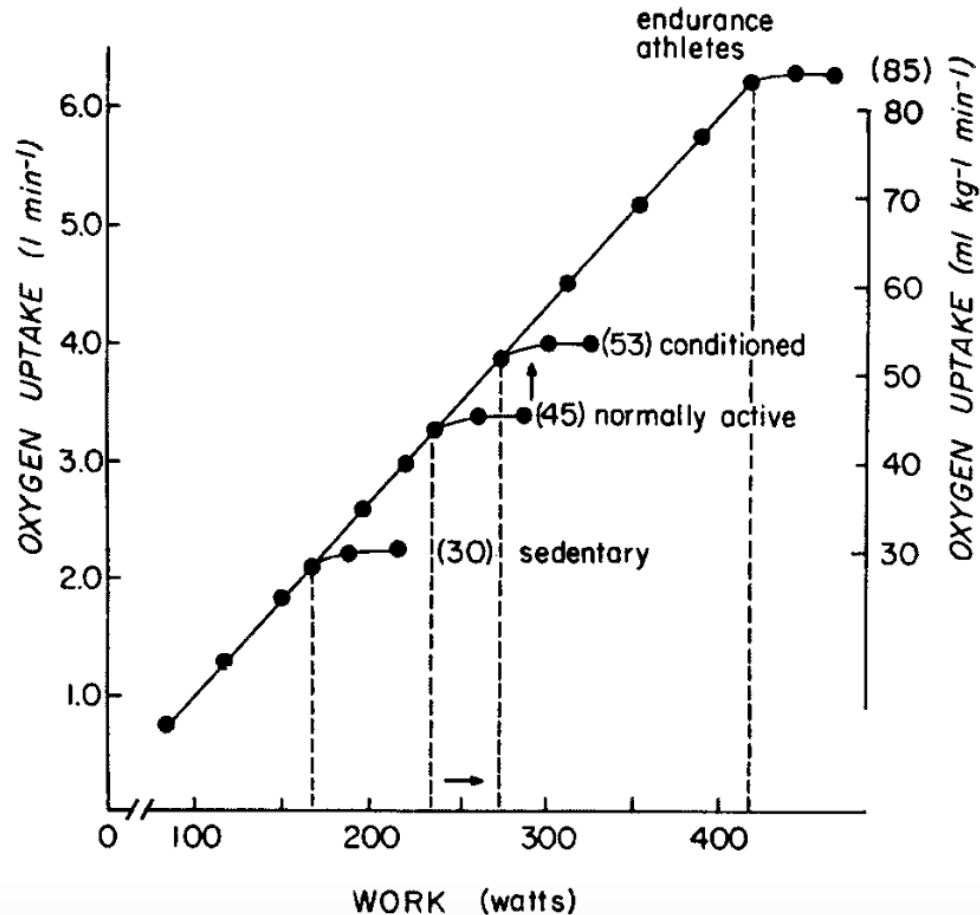
Cv_{O_2} (mL O_2 / dL): contenuto venoso di O_2 $\longrightarrow$ **diminuisce** significativamente con l'aumentare dell'intensità dell'esercizio

$Ca_{O_2} - Cv_{O_2}$ (mL O_2 / dL): differenza artero-venosa di O_2 $\longrightarrow$ nel complesso **aumenta**

incremento carico di lavoro $\longrightarrow$ aumenta HR, aumenta SV, aumenta CO,
aumenta $Ca_{O_2} - Cv_{O_2}$ $\longrightarrow$ $\dot{V}_{O_2}$ **aumenta**

Consumo massimo di ossigeno $\dot{V}_{O_{2\max}}$

INCREMENTO PROGRESSIVO di $\dot{V}_{O_2}$, con l'incremento del carico di lavoro, fino al raggiungimento di un **PLATEAU $\dot{V}_{O_{2\max}}$**



$\dot{V}_{O_{2\max}}$ = massima capacità dell'organismo di utilizzare ossigeno
= principale indicatore della performance aerobica

- atleti di **endurance** → valori più **elevati** di $\dot{V}_{O_{2\max}}$
- soggetti **altamente allenati**
- soggetti **allenati**
- soggetti **sedentari** → valori **inferiori** di $\dot{V}_{O_{2\max}}$



maggior efficienza emodinamica nel caso degli atleti

Adattamenti cronici: il «cuore d'atleta»

La **pratica regolare e prolungata di attività fisica aerobica** porta a **modificazioni strutturali e funzionali stabili**:

DILATAZIONE VENTRICOLARE: aumento dei volumi telediastolici

BRADICARDIA A RIPOSO: maggiore gittata sistolica per battito, aumento meno marcato della frequenza cardiaca

CAPILLARIZZAZIONE: aumento della densità dei capillari nel muscolo scheletrico

$\dot{V}_{O_{2\max}}$ **PIU' ELEVATO:** miglior efficienza nell'estrazione e utilizzo dell'ossigeno

Studio Pro@Heart e Master@Heart (EHJ, 2026)

Obiettivo e Metodologia

OBIETTIVO:

Analizzare il **rapporto** tra **carico di allenamento** e **rimodellamento cardiaco**



CARATTERISTICHE DELLA POPOLAZIONE:

- **151 atleti** maschi di età compresa tra **16 e 71 anni** → 2 coorti: **Pro@Heart** (16-23) e **Master@Heart** (45-71)
- almeno l'80% delle sessioni di allenamento monitorate per **3 mesi**

CARICO DI ALLENAMENTO:

- **DURATA** complessiva dell'attività fisica
 - **INTENSITA'** dell'esercizio (zone 1-5)
- } **indice eTRIMP** (Edwards Training Impulse)

$$eTRIMP = \sum_{i=1}^5 (t_i \cdot w_i)$$

t_i = tempo (in minuti) trascorso nella zona di frequenza cardiaca (i)
 w_i = coefficiente (peso) della zona cardiaca (i) = 1÷5

REGISTRAZIONE DATI:

- **FASCE TORACICHE** per il monitoraggio della frequenza cardiaca
- **RISONANZA MAGNETICA CARDIACA** per l'analisi della struttura cardiaca

Studio Pro@Heart e Master@Heart (EHJ, 2026) Risultati e Conclusione

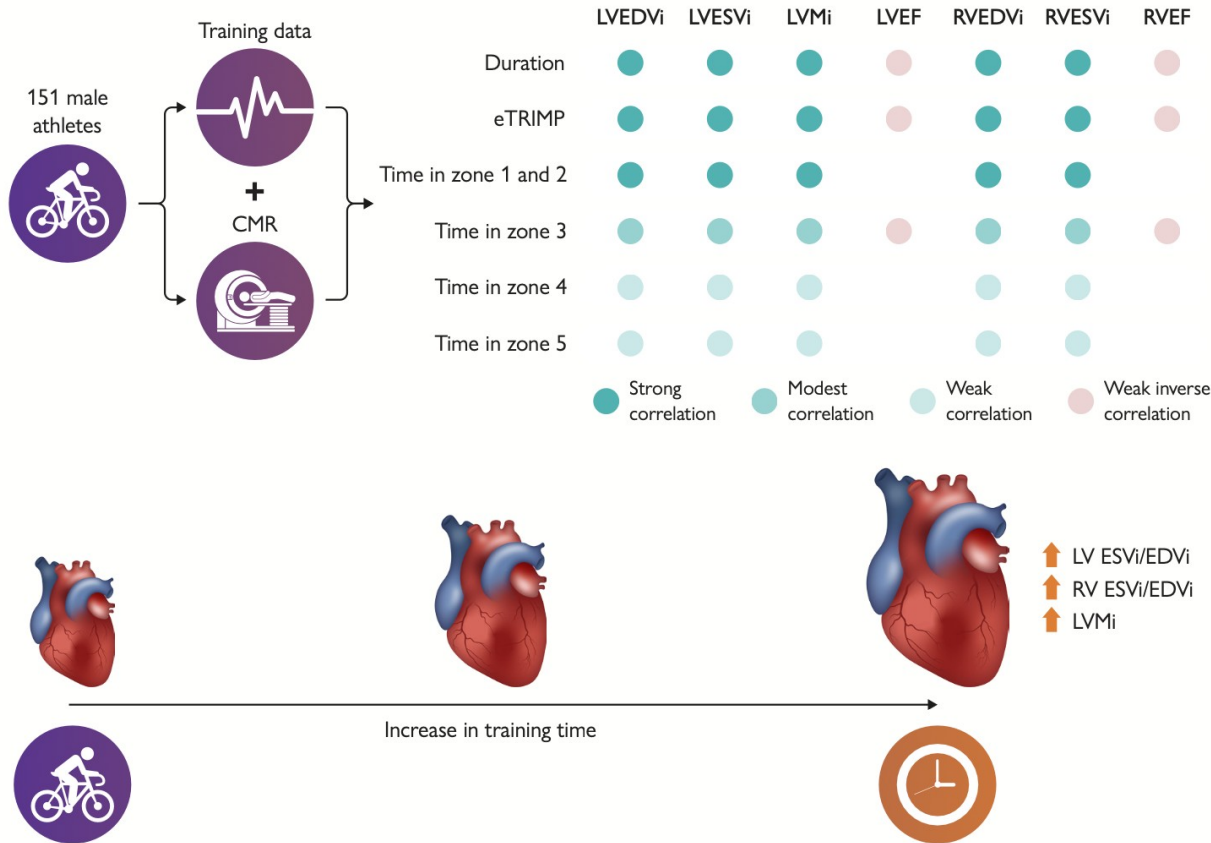


Figura 10 - "Cardiovascular adaptation to training load in endurance athletes: a longitudinal study", European Heart Journal, 2026

- Coefficienti di **correlazione elevati** ($r = 0,50 \div 0,53$) tra:
 - **durata totale** di allenamento e volumi/massa ventricolare indicizzati (**LVEDVi, LVESVi, LVMi**)
 - **eTRIMP** e volumi/massa ventricolare indicizzati (**LVEDVi, LVESVi, LVMi**)
- Le **correlazioni** con la sola **intensità** risultano significativamente più **deboli**
- Le **correlazioni** sono **inverse** tra:
 - **durata totale** di allenamento e **LVEF**
 - **eTRIMP** e **LVEF**



CONCLUSIONE:

La DURATA TOTALE di allenamento rappresenta il principale determinante del rimodellamento cardiaco

1) **L'esposizione prolungata a bassa intensità** è responsabile della maggior parte della **dilatazione ventricolare** osservata

2) Gli adattamenti acuti allo sforzo, se ripetuti nel tempo, si consolidano in un **rimodellamento strutturale stabile**

(⇒ meccanismo adattativo per migliorare efficienza cardiovascolare e capacità di sostenere carichi di lavoro prolungati)

1) Il «cuore d'atleta» raggiunge una maggior efficienza emodinamica: a parità di intensità di esercizio, produce una **gittata sistolica** e un $\dot{V}_{O_{2\max}}$ **più elevati**

Implicazioni ingegneristiche

- Sviluppo di strumenti diagnostici più accurati, modelli predittivi della funzione cardiaca e sistemi di monitoraggio wearable.

Implicazioni cliniche

- Sviluppo di programmi di esercizio personalizzati per il recupero funzionale, per migliorare gli esiti clinici e per prevenire numerose patologie croniche.
- Distinguere un adattamento fisiologico da un rimodellamento potenzialmente patologico.
- Intensità e durata dell'esercizio dovrebbero essere sempre considerate congiuntamente nelle prescrizioni di esercizio o nelle formulazioni di allenamento, aumentando sia la sicurezza sia l'efficacia di quest'ultimo.

Limiti

- Lo studio *EHJ*, 2026 include solo una coorte maschile e dati «non longitudinali»: servono ulteriori conferme su popolazione femminile e maggiori informazioni su storie di allenamento nel corso della vita

***GRAZIE PER
L'ATTENZIONE***