



POLITECNICO
MILANO 1863

DEPARTMENT
OF MECHANICAL ENGINEERING

BRIC 2022 No-Risks

Effetti biomeccanici, neurosensoriali e cognitivi delle vibrazioni trasmesse attraverso i piedi

14.05.2026 | Flavia Marrone

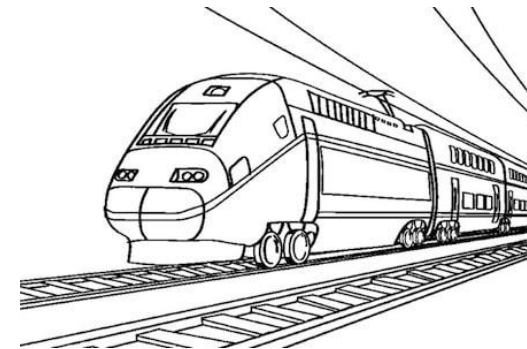
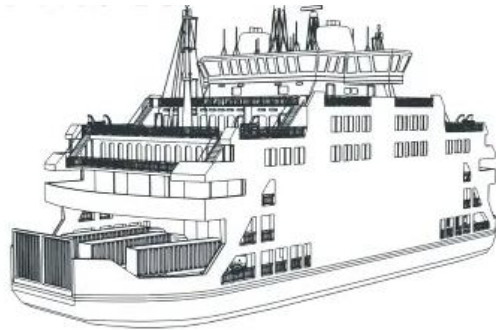


Foot-transmitted vibration (FTV)



Foot-Transmitted Vibration: Definizione

La *foot-transmitted vibration* (FTV) è la **vibrazione meccanica che viene trasmessa al corpo umano attraverso i piedi**, tipicamente quando una persona sta in piedi su superfici o macchinari vibranti.



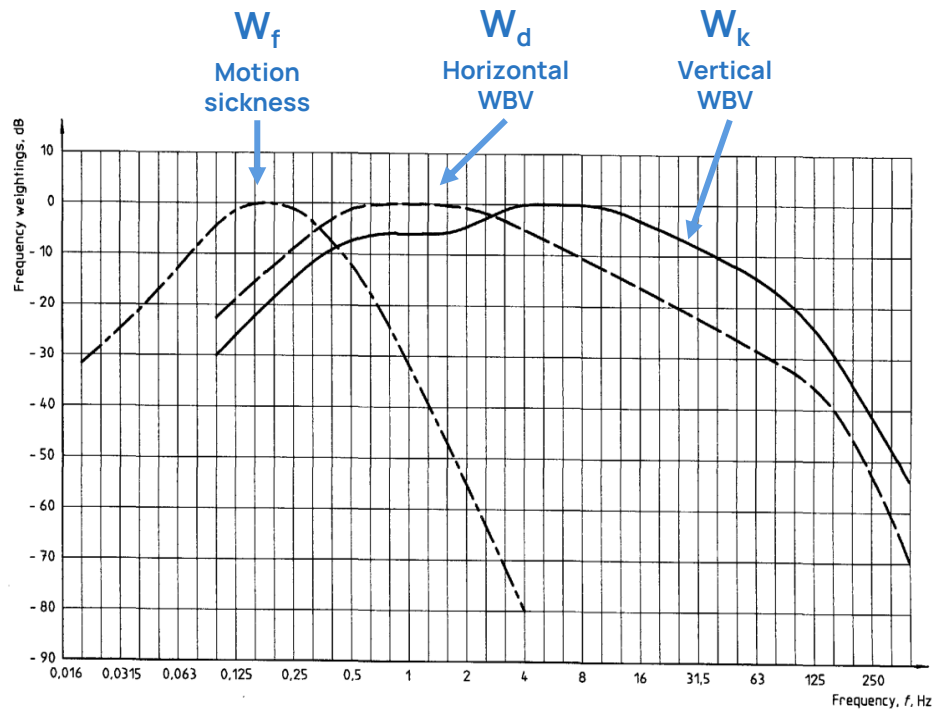
Ad oggi, le FTV sono considerate una sottocategoria delle whole-body vibration (WBV), pertanto si riferiscono allo standard **ISO 2631-1, 1997**



Foot-Transmitted Vibration: Gap normativo

0.1 ÷ 0.5 Hz → Motion Sickness
 0.5 ÷ 80 Hz → Salute, comfort e percezione

Per **postura seduta, in piedi, reclinata e supina**



7.1 Application

This clause concerns the effects of periodic, random and transient vibration on the health of persons in normal health exposed to whole-body vibration during travel, at work and during leisure activities. It applies primarily to seated persons, since the effects of vibration on the health of persons standing, reclining or recumbent are not known.

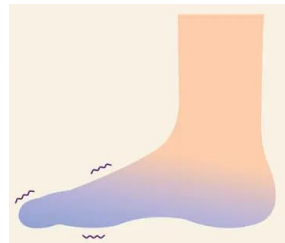
NOTE Assessment of the effects of vibration on the health of those exposed while standing, reclining or recumbent is usually carried out using the same evaluation method as for seated persons. **A1**



Foot-Transmitted Vibration: Gap normativo

La normativa vigente in materia di sicurezza dei lavoratori esposti a WBV è adatta/adattabile per questo tipo di condizioni ?

- Alterazioni **neurologiche** e **vascolari** nelle **dita dei piedi**



Vibration-induced white-foot (VIWFt)
Sindrome di Raynaud

- Effetti delle posture dinamiche (es. **cammino**)
 - Compensazioni biomeccaniche → aumento del **rischio di caduta** e **infortuni muscoloscheletrici**
- Influenza sulle prestazioni **cognitive**
 - Minore soglia di attenzione → aumento del **rischio di incidenti**



Effetto periferico:
risposta neurosensoriale

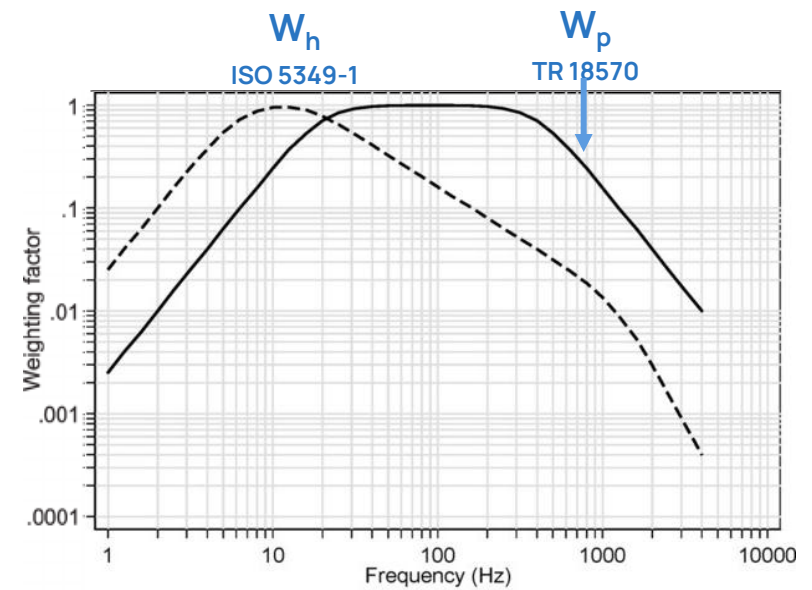
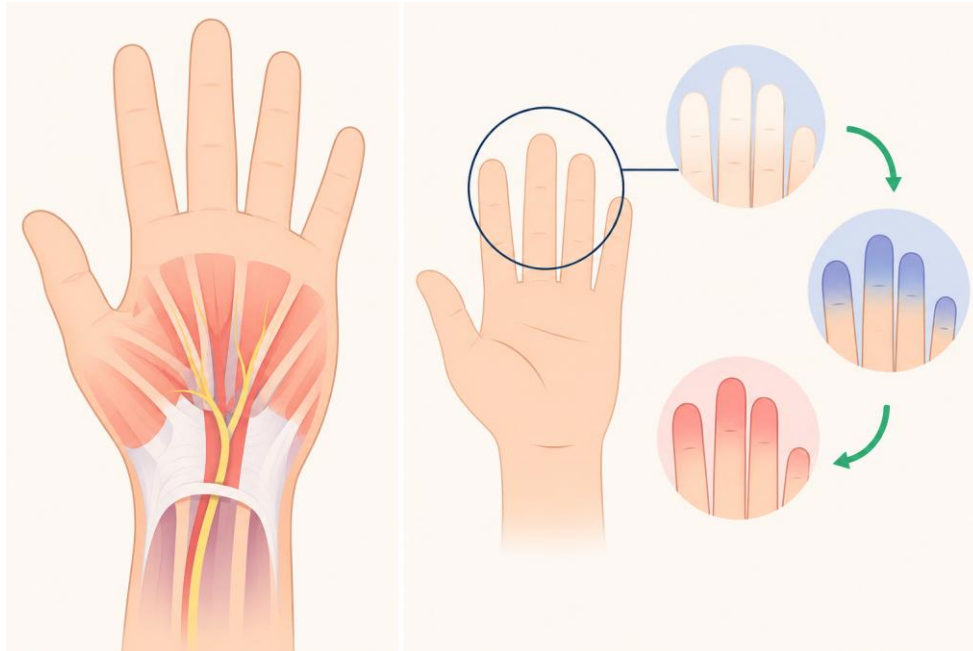
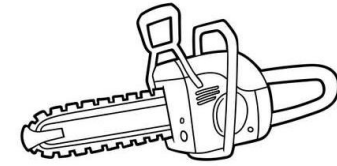


Background: Effetti periferici nelle mani



HTV
Hand-transmitted vibration

ISO 5349-1, 2001

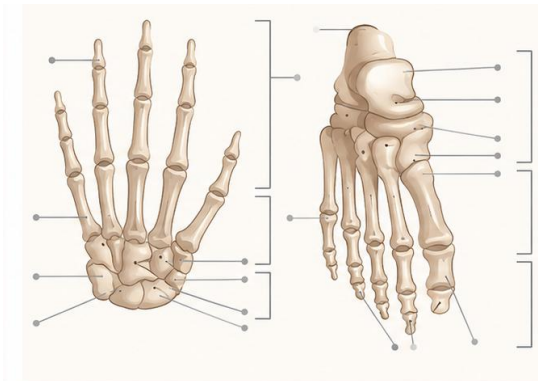




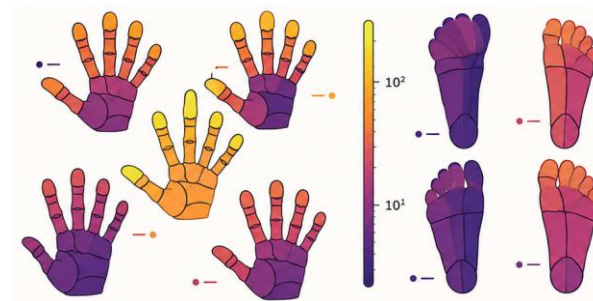
Background: Effetti periferici nei piedi

La normativa vigente per le HTV, può essere presa in considerazione anche per le FTV?

Somiglianze tra mano e piede



Anatomia



Meccanorecettori



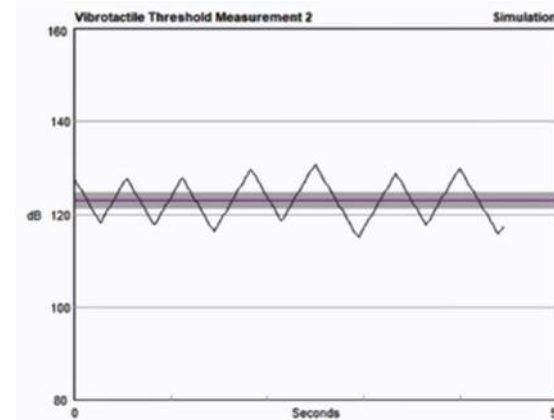
Sindrome di Raynaud



Background: Percezione vibrotattile

La risposta neurosensoriale indotta da FTV nel piede può essere valutata in modo comparabile a quella della mano indotta da HTV?

Vibrotactile Perception Threshold (VPT)



Temporary Threshold Shift (TTS)

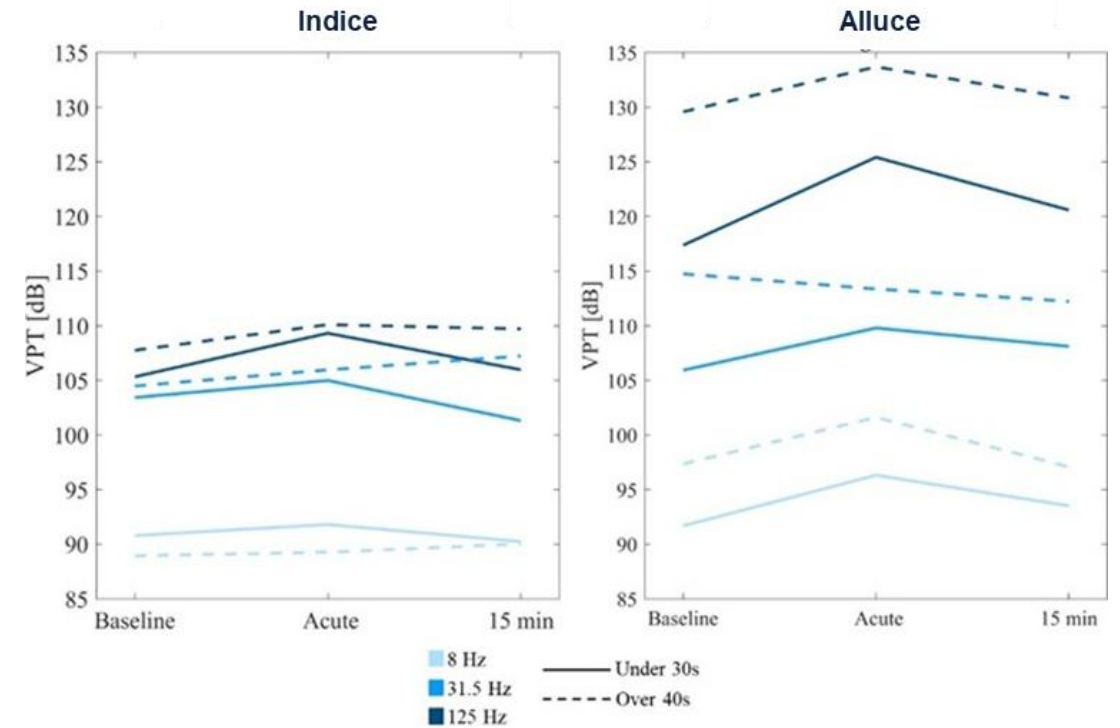
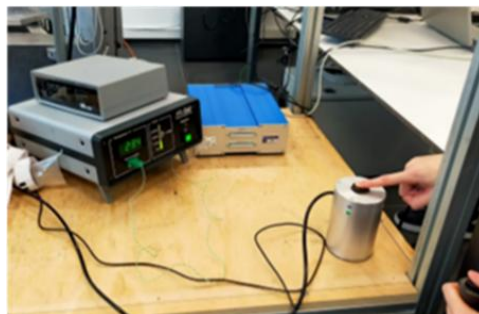
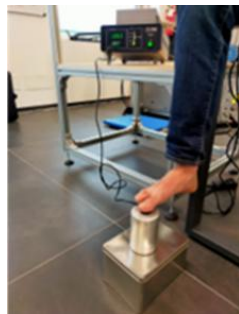
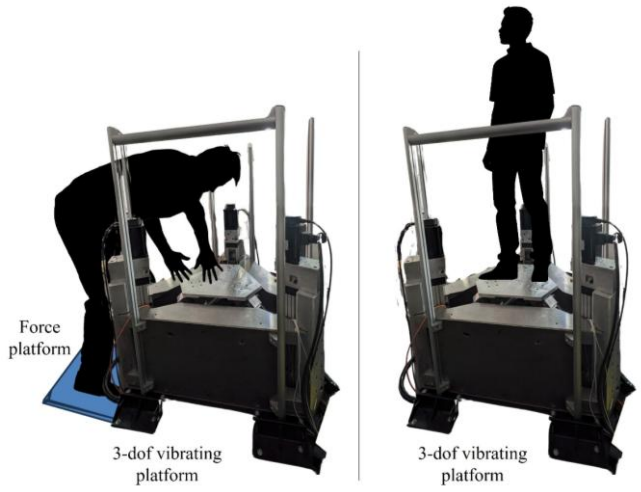
$$TTS_{t_1} = VPT_{t_1} - VPT_{t_0}$$

- Innalzamento VPT in acuto post-esposizione
- Recovery della soglia vibrotattile nel tempo



Effetto neurosensoriale: Comparazione mano vs piede

- Effetto dell'età
- Effetto della frequenza di test



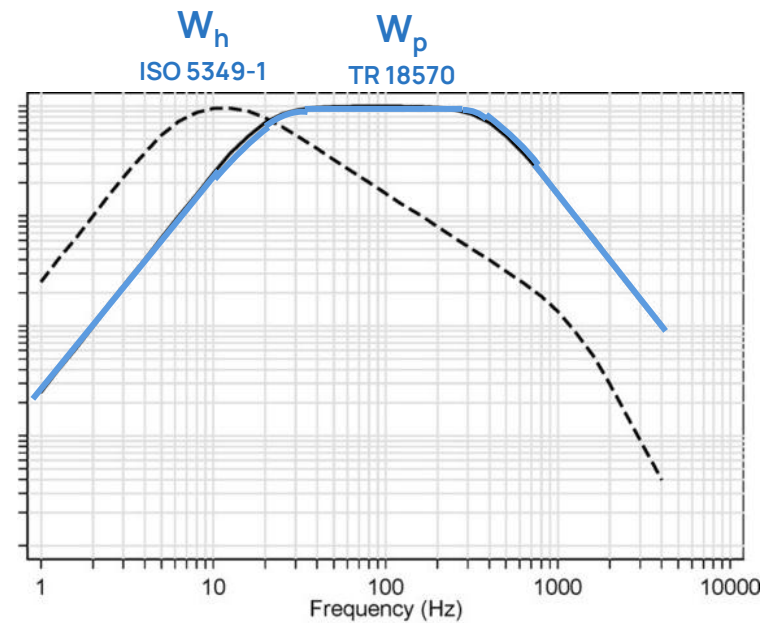
- Correlazione positiva tra **VPT dell'alluce** e l'età
- Correlazione positiva tra il **VPT dell'indice** e l'alluce



Effetto neurosensoriale: Conclusioni

Somiglianze tra mano e piede

- Inadeguatezza della ISO 2631
- Possibile approccio comune per la risposta neurosensoriale a FTV and HTV





Cammino perturbato:

- risposta cognitiva
- risposta biomeccanica

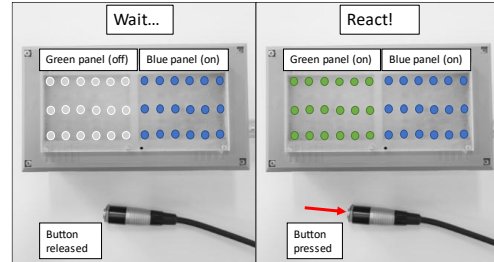


Background: Risposta cognitiva alle FTV

Effetto delle WBV (postura seduta):

- La vibrazione corpo intero da seduti (WBV) **influisce sulle prestazioni di compiti semplici** come leggere, scrivere e bere
- L'esposizione a WBV causa **affaticamento visivo** e un **aumento del carico di lavoro, sonnolenza e perdita di vigilanza**

Effetto delle FTV:



Registrazione dei tempi di reazione (**reaction time-RT**) premendo un bottone non appena lo stimolo luminoso appare

- **In posizione eretta**
- **Durante il cammino**

Marelli et al. (2023)

Bertozzi et al. (2024)





Background: Risposta biomeccanica alle FTV

Effetto delle WBV (postura seduta):



- Numerosi studi in letteratura
- Effetti muscoloscheletrici: **mal di schiena** (lombare)



Effetto delle FTV:

- In posizione eretta

Trasmissione diretta al bacino e alla colonna vertebrale



Ginocchia **stese**



Ginocchia **flesse**

Parte dell'energia viene smorzata riducendo la trasmissibilità alla parte superiore del corpo



Background: Risposta biomeccanica alle FTV

Effetto delle FTV:

- In posizione eretta

Trasmissione diretta al bacino e alla colonna vertebrale



Ginocchia **stese**



Ginocchia **flesse**

Parte dell'energia viene smorzata riducendo la trasmissibilità alla parte superiore del corpo

- Durante il cammino ??

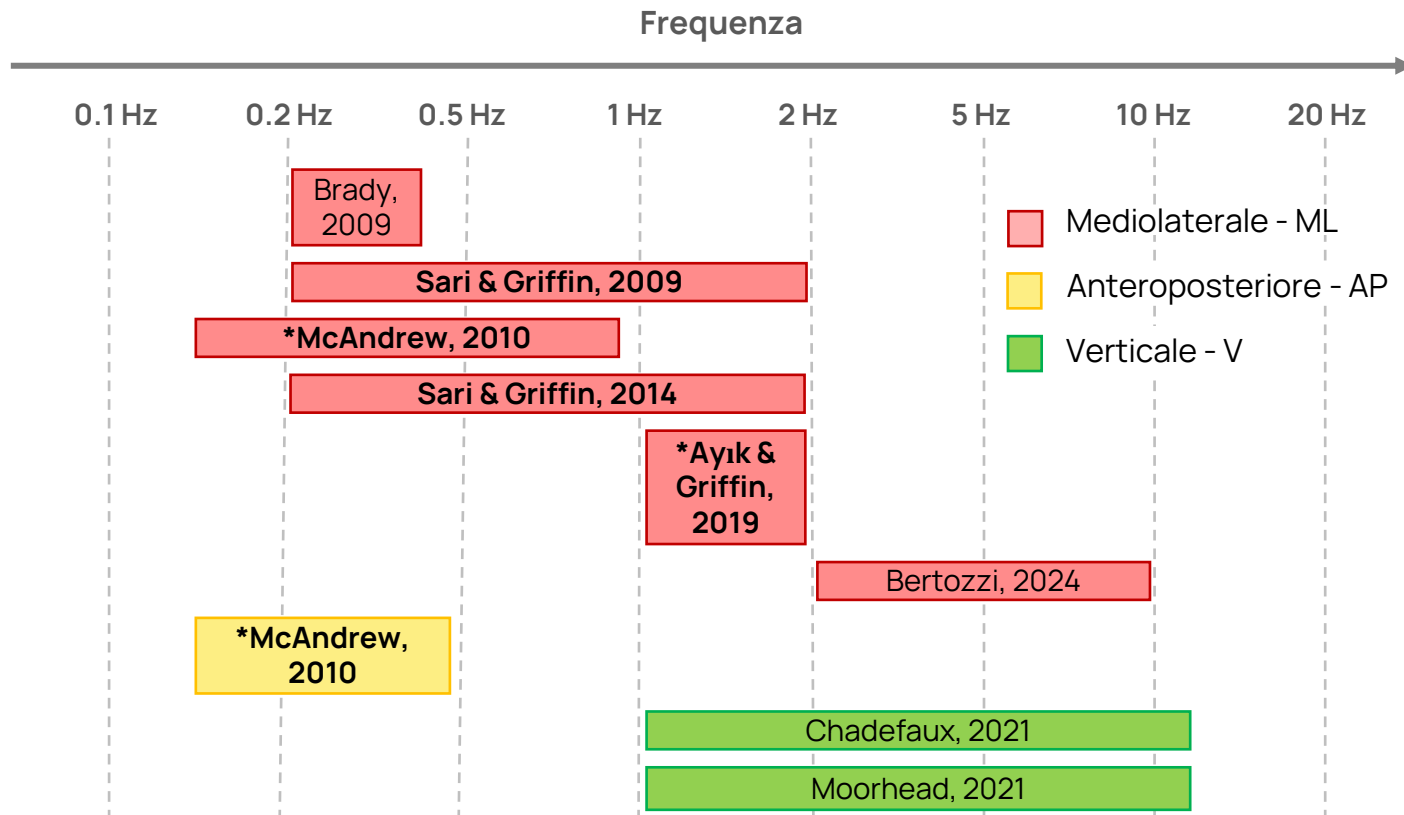


Ginocchia flesse → effetto ridotto sul mal di schiena

- Rischio caduta?
- Strategie compensatorie?



Background: Risposta biomeccanica alle FTV durante il cammino



Studi condotti esclusivamente con FTV traslazionali

Alterazione del cammino alle frequenze più basse

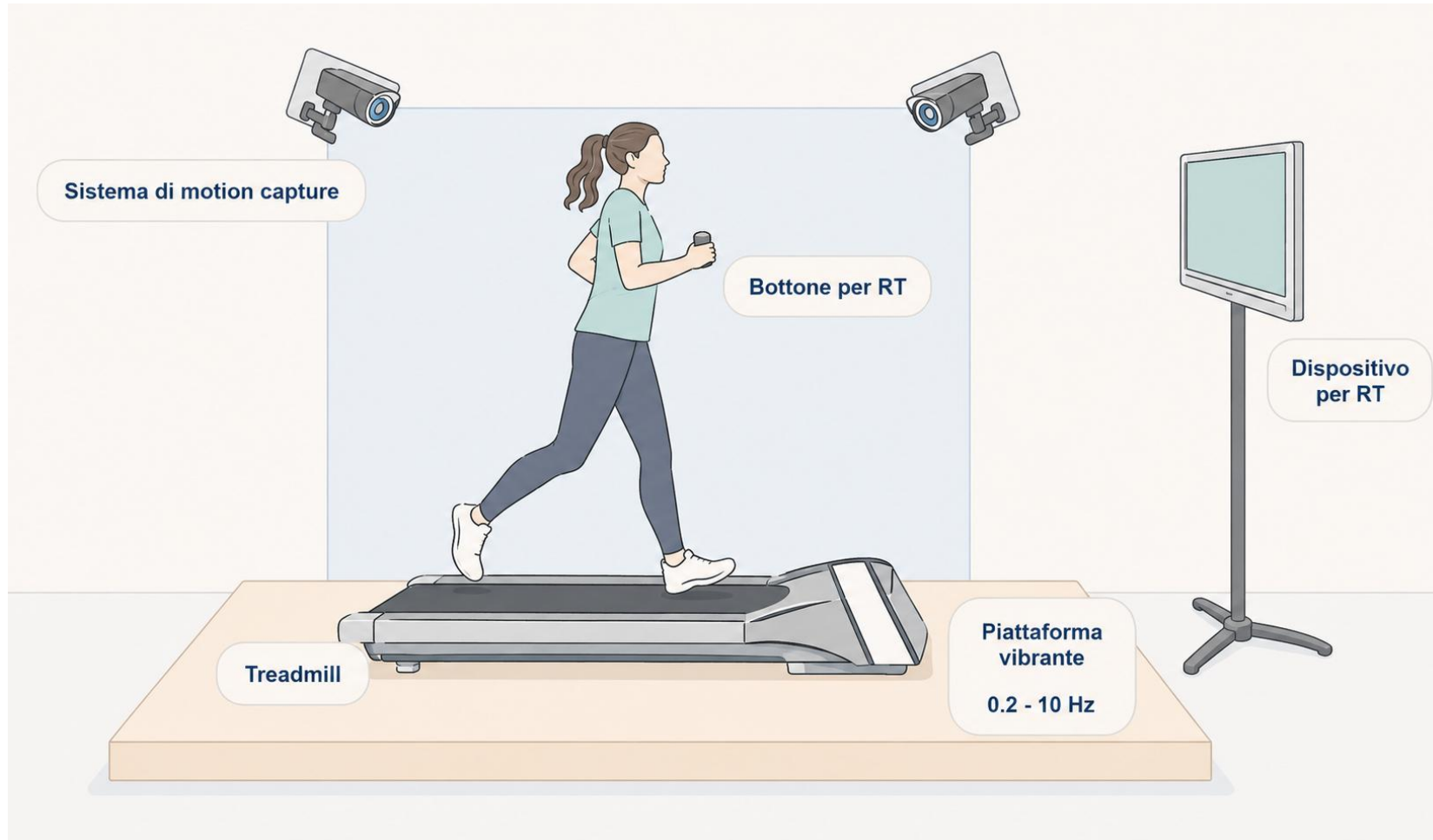
- maggiore larghezza del passo, cadenza e instabilità
- minore lunghezza e durata del passo e fasi di appoggio

Maggiore effetto in direzione ML rispetto ad AP

*In grassetto sono indicati gli studi in cui sono state considerate più ampiezze. Tutti gli studi hanno utilizzato vibrazioni FTV sinusoidali, eccetto quelli contrassegnati con * in cui è stata applicata una vibrazione pseudocasuale.*

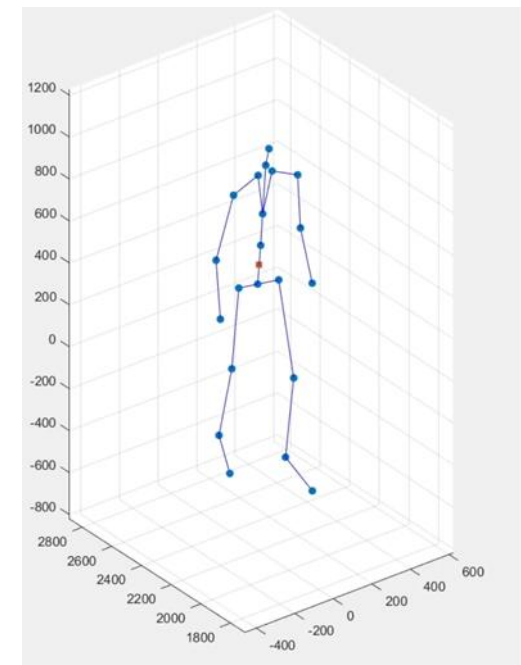
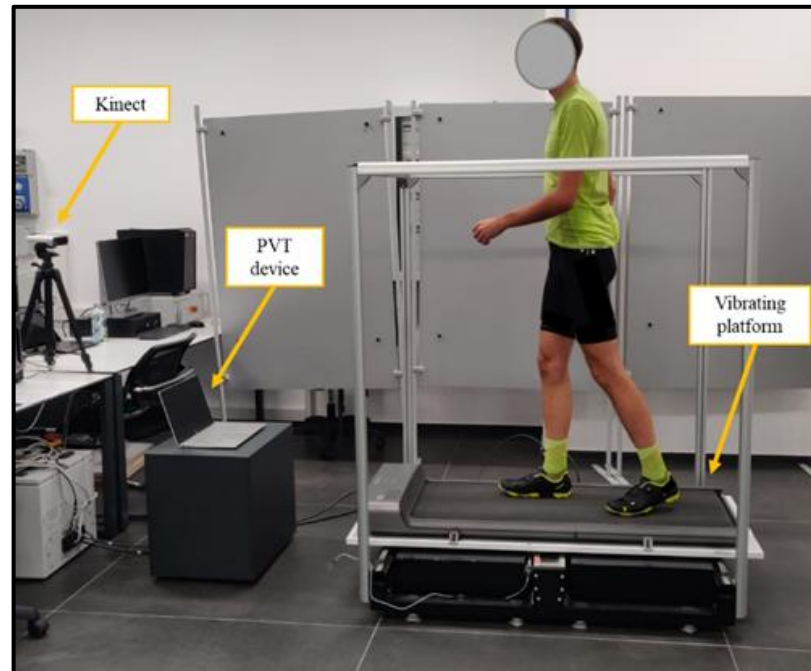
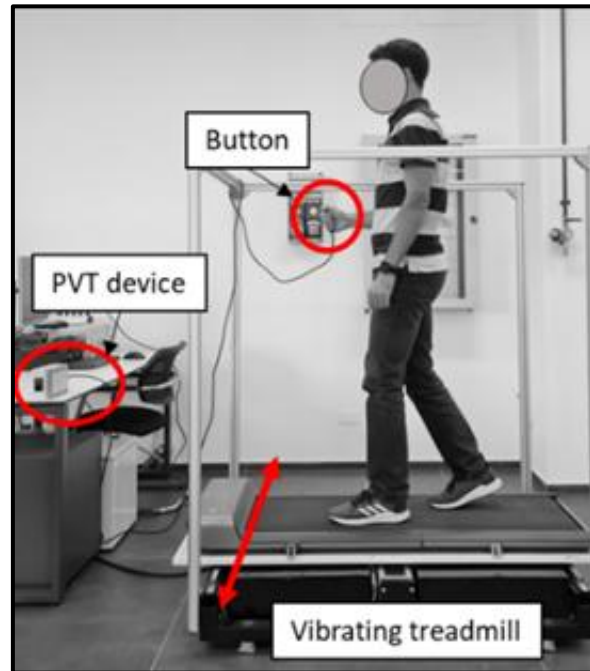


Setup sperimentale



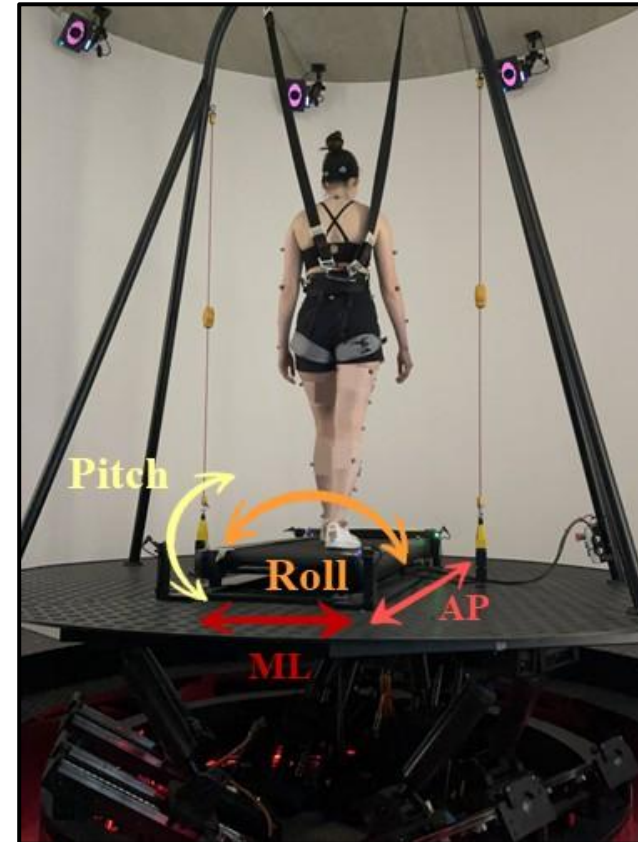


Setup sperimentale



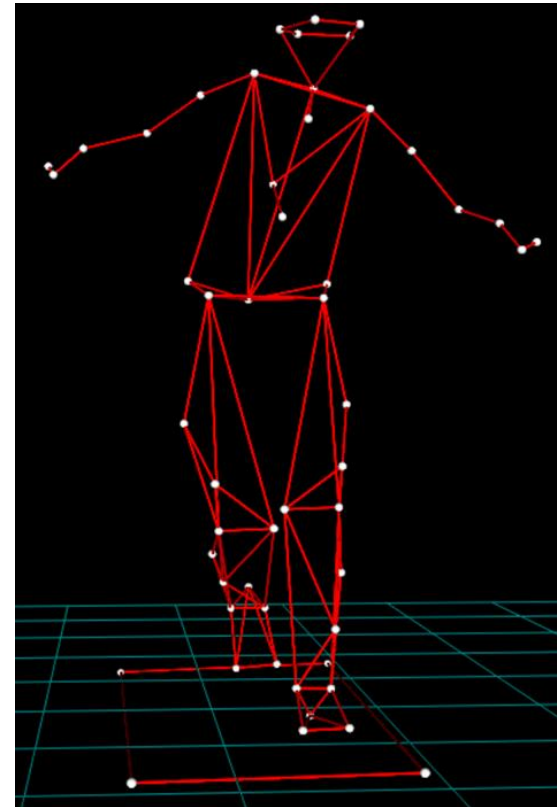


Setup sperimentale





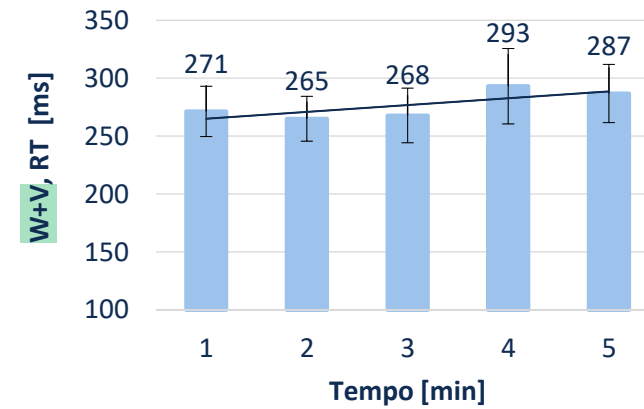
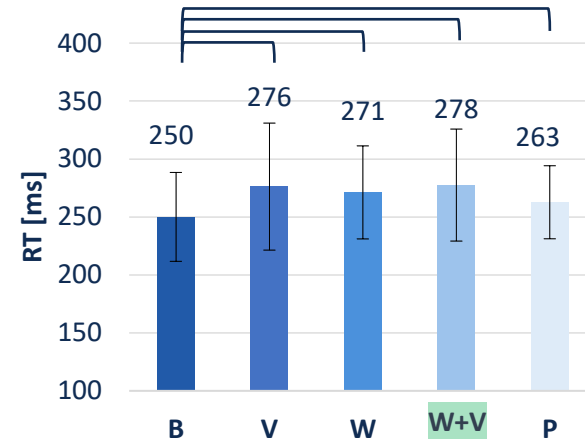
Setup sperimentale





Risultati: Risposta cognitiva

B: baseline (posizione eretta)
V: vibration (FTV)
W: walking (cammino)
W+V: cammino+FTV
P: post-sessione (posizione eretta)

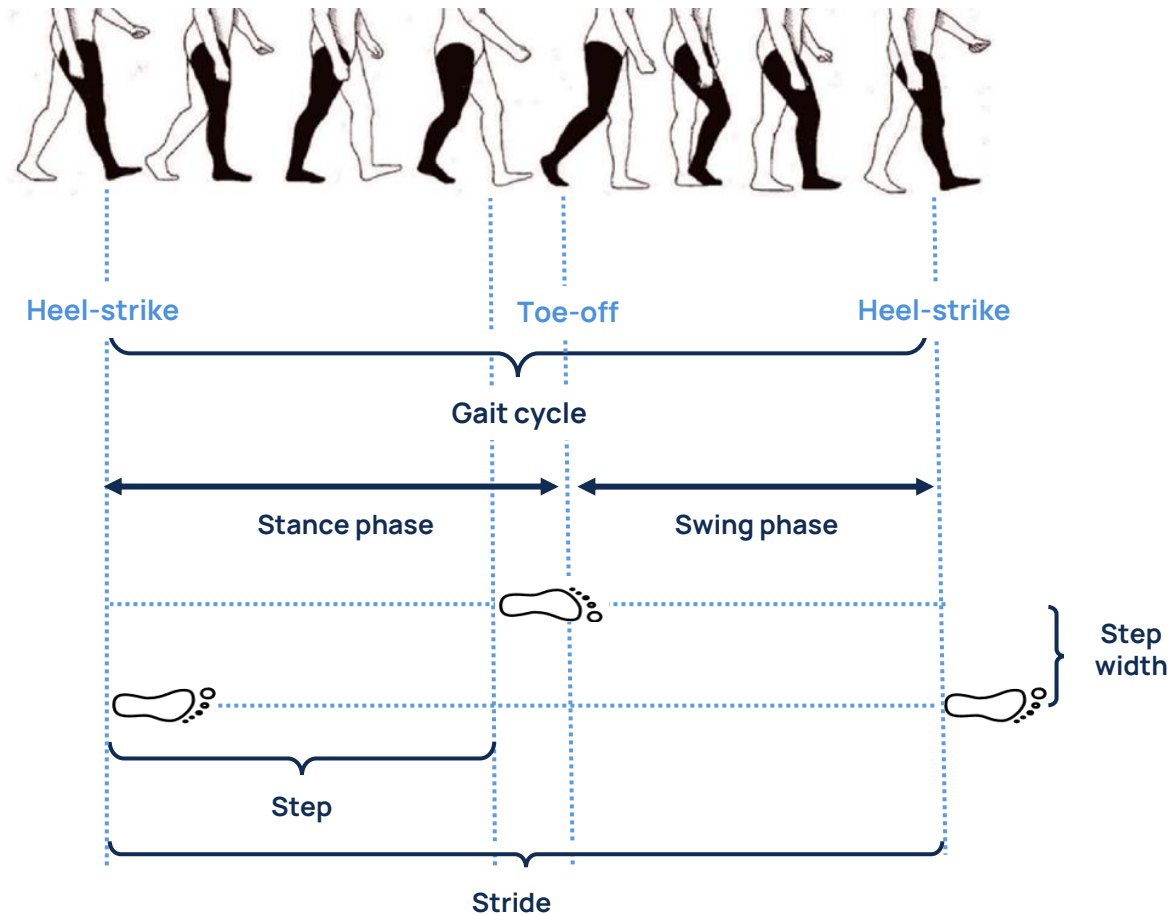


- Riduzione della vigilanza durante il cammino
- Riduzione della vigilanza durante esposizione a FTV

+ Effetto combinato



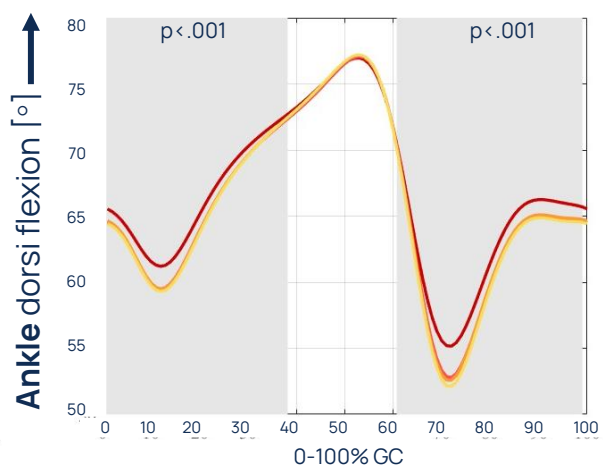
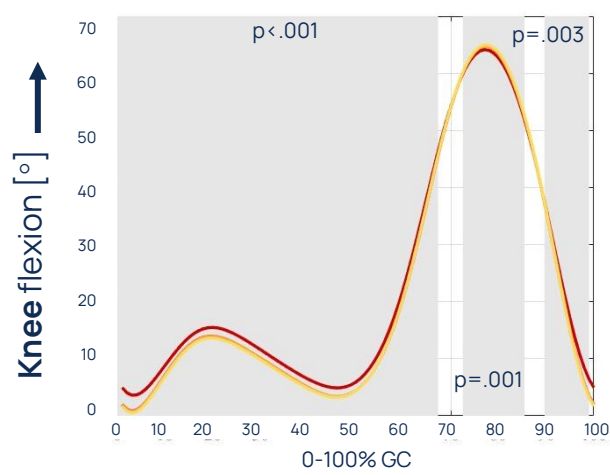
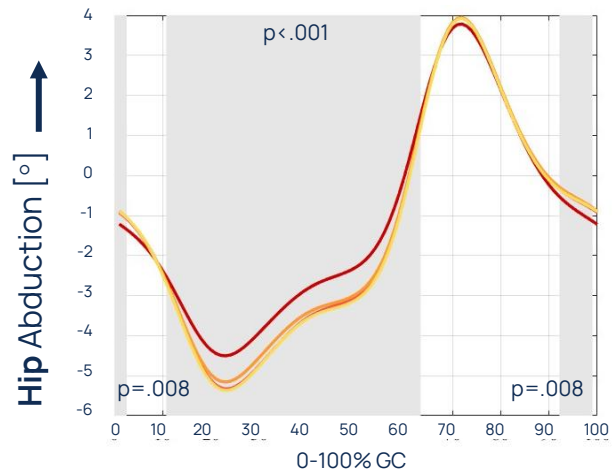
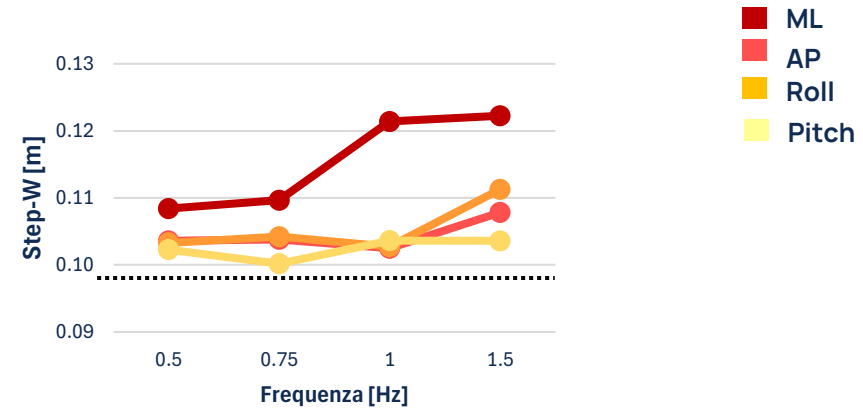
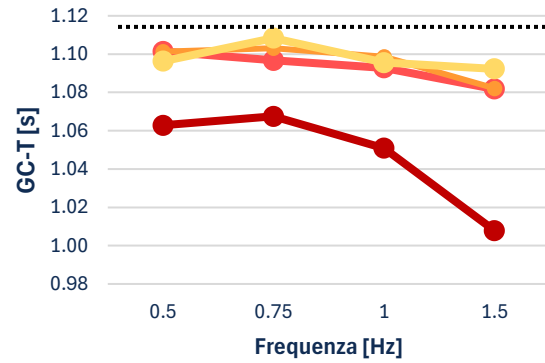
Risultati: Risposta biomeccanica



- Metriche del cammino
- Cinematica articolare
- Attivazioni muscolari
- Indici di stabilità

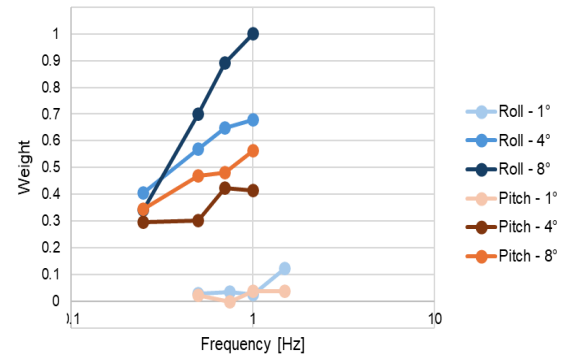
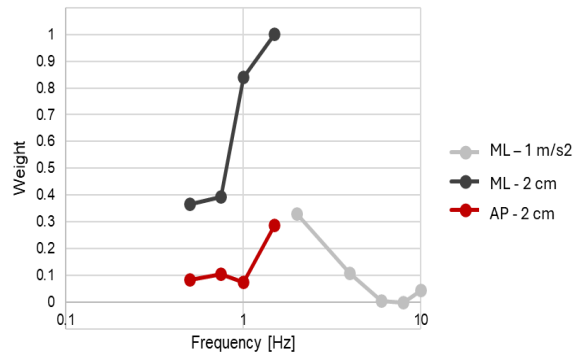


Risultati: Risposta biomeccanica





Risultati: Risposta biomeccanica



Maggiore instabilità:

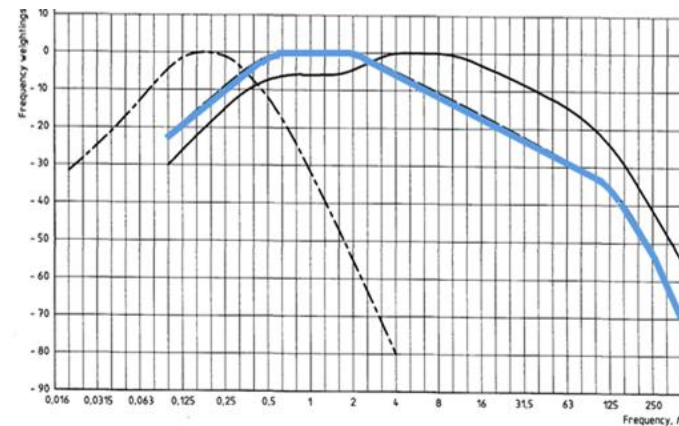
- Allargamento della base di supporto
- Minore tempo di contatto piede-suolo
- Centro di massa più stabilizzato al suolo

Direzione ML più impattante

Maggiore attrazione biomeccanica tra 0.7 e 1.5 Hz

Effetto della direzione

Interferenza a frequenze vicine alla cadenza del cammino



W_d



Conclusioni



Conclusioni

- Inadeguatezza della ISO 2631 per l'esposizione a FTV
- Necessità di una normativa ad-hoc

Riduzione della sensibilità vibrotattile



Riduzione della vigilanza



Alterazioni del cammino



- Futuri studi per approfondire la problematica

Pubblicazioni

- **Marrone F.**, Sanna N., Falchi E., Tirabasso A., Bovenzi M., Tarabini M., 2025. Effects of foot-transmitted vibration on gait metrics, kinematics, and dynamic stability. *Applied Ergonomics* 125. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2025.104618>
- **Marrone F.**, Sanna N., Sanchez Garcia J., Ronchese F., Marchetti E., Tirabasso A., Bovenzi M., Tarabini M., 2025. Neurosensory response of the hand and foot to vibration exposure. *La Medicina del Lavoro* 116(3):17149. <https://doi.org/10.23749/jml.v116i3.17149>
- **Marrone F.**, Goggins K.A., Pontiggia L., Tirabasso A., Marchetti E., Bovenzi M., Galli M., Tarabini M., 2025. Effect of mediolateral vibration magnitude and frequency on the cognitive response and spatiotemporal gait parameters. *International Journal of Industrial Ergonomics* 107, 103717. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2025.103717>
- **Marrone F.**, Marelli S., Bertozzi F., Goggi A., Marchetti E., Galli M., Tarabini M., 2024. Alterations in step width and reaction times in walking subjects exposed to mediolateral foot-transmitted vibration. *Vibration* 7, 374–387. <https://doi.org/10.3390/vibration7020019>



POLITECNICO
MILANO 1863

DEPARTMENT
OF MECHANICAL ENGINEERING

Grazie dell'attenzione !!

BRIC 2022 No-Risks

**Effetti biomeccanici, neurosensoriali e cognitivi delle
vibrazioni trasmesse attraverso i piedi**

14.05.2026 | Flavia Marrone