



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

ANALISI DEI CARICHI DI PEDALATA MEDIANTE PEDALI DINAMOMETRICI
INTEGRATI IN UN SISTEMA DI TIPO MOTION CAPTURE

Relatore: Prof. Nicola Petrone

Correlatore: Dott. Giuseppe Marcolin

Laureando: Schiavon Alessio

Matr 565237

Anno Accademico 2014./2015.

Ai miei genitori per avermi sempre
sostenuto in questo lungo percorso

INDICE

Introduzione	5
Capitolo 1 – Terminologia	7
1.1 Il sistema uomo bicicletta	7
1.2 Pedali dinamometrici	8
1.2.1 Definizione dei sistemi di riferimento	8
1.2.2 Grandezze relative ai pedali	10
1.2.3 Le forze sulla bicicletta	12
1.3 Analisi del movimento	15
1.3.1 Il sistema fotogrammetrico	15
1.3.2 Il pocket EMG	20
Capitolo 2 – Analisi dei lavori precedenti	23
2.1 Definizione del modello	23
2.2 Progettazione del pedale dinamometrico	25
2.3 Estensimetratura e cablaggio	28
2.3.1 Teoria degli estensimetri	30
Capitolo 3 – Revisione dei pedali dinamometrici	33
3.1 Pedale destro	33
3.1.1 Modellazione pedivella	33
3.1.2 Modellazione attacco	37
3.1.3 Modellazione placchetta	37
3.1.4 Modellazione corona	37
3.1.5 Assemblaggio	38
3.1.6 Lavorazioni meccaniche	39
3.2 Pedale sinistro	40

3.3	Cablaggio cavo.....	41
Capitolo 4 – Taratura pedali		43
4.1	Taratura	43
4.2	Progetto banco di taratura	45
4.3	Rampe di carico	46
Capitolo 5 – Allestimento della prova		55
5.1	Il cicloergometro	56
5.1.1	Revisione elettro meccanica	56
5.1.2	Preparazione del cicloergometro	57
5.2	Allestimento della prova	59
5.2.1	Posizionamento in sella	59
5.2.2	Funzionamento rulli	60
5.2.3	Applicazione dei marker	61
5.3	Svolgimento prove	63
Capitolo 6 – Analisi dei dati		65
6.1	Elaborazione dei segnali	65
6.2	Risultati delle prove.....	70
6.2.1	Diagrammi forze caratteristiche	70
6.2.2	Confronti forze caratteristiche	109
6.2.3	Diagrammi polari	113
CONCLUSIONI		121
BIBLIOGRAFIA		123
APPENDICI A		125
APPENDICI B		143

INTRODUZIONE

Lo scopo del seguente lavoro è la progettazione delle apparecchiature che permettono di integrare la rilevazione dei carichi dei pedali dinamometrici con l'analisi del movimento utilizzando un sistema di visione "motion capture", così da poter studiare le forze caratteristiche e la biomeccanica della pedalata. Le informazioni ricavate serviranno per chiarire quale sia la miglior postura per ciclista sul mezzo, in modo da ottimizzarne il rendimento durante la pedalata. Il lavoro viene diviso in capitoli secondo le varie fasi seguite.

Nel primo capitolo vengono riportate una serie di definizioni utili alla comprensione dei dati rilevati nelle prove e viene descritto il funzionamento dei sistemi di acquisizione impiegati.

Nel secondo capitolo si riassumono i lavori precedenti, descrivendo le varie fasi che hanno portato alla realizzazione dei pedali dinamometrici: dall'idea di partenza alla progettazione e realizzazione del perno, per poi analizzare l'applicazione degli estensimetri. Terminando con il montaggio del perno nella carcassa del pedale.

Nel terzo vengono descritti i vari interventi effettuati sui pedali per il ripristino della funzionalità: dalla realizzazione di un nuovo attacco compatibile con la pedivella, alla sostituzione del perno e il rifacimento dei collegamenti elettrici.

Nel quarto capitolo vengono introdotti i concetti di taratura delle celle di carico e descritta la procedura seguita per la determinazione delle matrici di calibrazione.

Il quinto descrive le operazioni di allestimento del cicloergometro per le prove: la revisione elettromeccanica, il montaggio delle apparecchiature di acquisizione, la preparazione dell'atleta e definisce le condizioni di svolgimento della prova.

Nel sesto i dati acquisiti vengono elaborati e raccolti sotto forma di grafici e tabelle. Le curve caratteristiche sono rappresentate in funzione dell'angolo di pedivella e vengono confrontati i risultati tra le varie prove

CAPITOLO 1

TERMINOLOGIA

Il presente capitolo è stato diviso in due parti, una dedicata ai pedali dinamometrici e l'altra al sistema di visione. Nella prima si definisce una notazione univoca delle grandezze che si stanno analizzando e una nomenclatura delle parti che viene mantenuta in tutto il lavoro. Per quanto riguarda le parti e i componenti della bicicletta si fa riferimento alla normativa UNI-ISO 8090; la definizione dei sistemi di riferimento e delle le grandezze caratteristiche associate quali forze, posizioni angolari, velocità, avviene sulla base del lavoro svolto da Mirco Lucchetta nella sua tesi di laurea. Nella seconda parte si introducono i concetti dell'analisi del movimento e viene descritto il funzionamento del sistema di visione utilizzato.

1.1 IL SISTEMA UOMO BICICLETTA

Il lavoro che è stato volto in questa tesi va ad integrarsi con un progetto ben più vasto e complesso che si pone l'obiettivo di conoscere e risolvere i problemi che nascono nell'ambito della locomozione umana. Un nuovo ramo è quello della biomeccanica che può essere intesa come l'applicazione della meccanica classica ai sistemi fisiologici con lo scopo di analizzare, sulla base delle relazioni matematiche, il comportamento delle strutture fisiologiche sottoposte a sollecitazioni statiche e/o dinamiche. La bicicletta è uno dei mezzi di locomozione per cui è l'uomo stesso la fonte di energia. Da un punto di vista ingegneristico si possono schematizzare l'uomo e la bicicletta, interponendo alcune interfacce, tra loro, Figura 1.1.

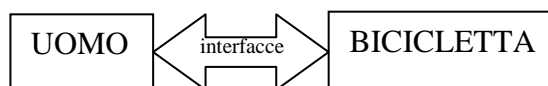


Figura 1.1: Rapporto uomo –bici

Secondo lo schema i due sistemi interagiscono attraverso i punti di contatto: manubrio, pedali e sella. Il pedali dinamometrici vanno ad integrarsi in un progetto ben più vasto e completo che è quello dell'integrazione tra uomo e bicicletta così da poter: ottimizzare il dispendio di energia durante la pedalata, migliorare la postura, evitare l'insorgenza di patologie dell'apparato articolare conseguenti la pratica del ciclismo. Le principali esigenze dell'atleta sono così riassunte:

- 1- Esprimere al meglio le proprie potenzialità;
- 2- Essere posizionato correttamente sulla bicicletta;
- 3- Evitare l'insorgere di patologie dovute ad un'azione di pedalata non corretta

Per "posizione ottimale in sella di un ciclista" si intende: la postura assunta che consenta di sviluppare una certa potenza con il minimo dispendio di energia. Tale posizione dipende da fattori quali:

- Le caratteristiche fisiche del ciclista;
- La posizione relativa dei tre componenti sella, manubrio e pedali, attraverso i quali il ciclista si rapporta alla bicicletta;

1.2 PEDALI DINAMOMETRICI

1.2.1 DEFINIZIONE DEI SISTEMI DI RIFERIMENTO

I sistemi di riferimento si fissano coerentemente alle grandezze che devono essere misurate. Il sistema di riferimento globale, che permette di identificare i parametri della bicicletta, coincide con quello utilizzato nel sistema di visione. Viene definito dalle seguenti grandezze.

- origine O: posizionata nel punto di contatto della ruota posteriore con il suolo;
- asse X: è l'asse longitudinale della bicicletta ed è parallelo alla retta passante per i due punti di contatto delle ruote con il suolo, è contenuto nel piano medio del telaio. Il verso è positivo nel moto in avanti;

- asse Y: è definito come asse verticale, è contenuto nel piano medio del telaio ed è ortogonale all'asse x. Il verso positivo è rivolto in alto;
- asse Z: asse trasversale ortogonale ai due precedenti, è ortogonale al piano medio del telaio. Il verso positivo è uscente dal piano se si guarda la parte destra della bicicletta;

Un sistema di riferimento locale viene associato ad ogni componente utilizzando due lettere identificative con il seguente significato:

1. la prima indica in quale componente si sta fissando il riferimento;
2. la seconda identifica la posizione;

La notazione utilizza le iniziali dei termini inglesi per definire punti e direzioni. In Tabella 1.1 sono riportati i simboli usati.

Origine dei sistemi di riferimento	Simbolo
Pedale destro: centro della superficie appoggio	PR
Pedale sinistro: centro della superficie appoggio	PL
Manubrio: baricentro dell'area di contatto mano destra	HR
Manubrio: baricentro dell'area di contatto mano sinistra	HL
Sella: intersezione asse tubo verticale con superficie di appoggio	S
Forcella: centro del mozzo ruota anteriore	F
Forcellini posteriori: centro del mozzo ruota posteriore	R

Tabella 1.1: Simboli letterali per la definizioni dei punti di riferimento

Le direzioni delle componenti in un sistema locale vengono di seguito definite:

- asse N: direzione normale;
- asse L: direzione longitudinale;
- asse T: direzione trasversale, tale da completare con N e L una terna trirettangola levogira o destrogira;

Per il pedale destro valgono le seguenti definizioni:

- origine P-R: si trova nel centro della superficie di appoggio del pedale a contatto con il piede;
- asse L: direzione longitudinale parallela all'asse del perno pedale. Partendo dal punto PR il verso positivo è uscente dal pedale;
- asse N: direzione normale alla superficie di appoggio. Il verso positivo è in basso;
- asse T: direzione tangenziale alla superficie di appoggio. Risulta ortogonale a N e L. Il verso positivo è in avanti, concorde con la direzione X;

L'orientamento della terna del pedale risulta essere destrorsa (N-T-L). Per il pedale sinistro le definizioni dell'origine PL e degli assi N, T e L sono analoghe a quelle usate per il pedale destro, la terna è orientata in modo differente e risulta levorsa (N-L-T). Nel caso di forze positive in direzione longitudinale si ha uno stato di trazione in entrambi i perni pedale.

1.2.2 GRANDEZZE RELATIVE AI PEDALI

Si elencano le grandezze necessarie alla definizione geometrica dei componenti e delle parti del pedale:

- Braccio di pedivella L_c : dimensione tra l'asse del foro di posizionamento del pedale e quello in corrispondenza del perno del movimento centrale;
- Distanza del pedale dalla pedivella L: dimensione tra il centro della superficie di appoggio del pedale e la parte esterna della pedivella;
- Angolo di pedivella θ_c : angolo che definisce la posizione della pedivella rispetto al telaio. Per la pedivella destra è l'angolo tra l'asse della pedivella e quello normale alla direzione longitudinale X della bicicletta. Il senso di rotazione è orario visto dalla parte della catena. Per la pedivella sinistra la rotazione è antioraria e il suo angolo è legato rigidamente a quello destro da

uno sfasamento di 180 gradi;

- Angolo di pedale θ_p : individua la posizione del pedale rispetto al telaio. Si misura la rotazione tra la direzione tangenziale T, sulla superficie di appoggio, e l'asse longitudinale X. L'angolo è positivo per il pedale destro se ruota in senso antiorario dalla parte della catena;
- Angolo relativo tra pedivella e pedale θ_{cp} : indica l'angolo di rotazione relativo tra l'asse dello stelo della pedivella e la direzione parallela al piano di appoggio, viene definito come:

$$\theta_{cp} = \theta_c - \theta_p$$

Si definiscono anche:

- Ciclo di pedalata: fase di pedalata corrispondente ad un giro completo delle pedivelle nell'intervallo:

$$0^\circ < \theta_c < 360^\circ$$

- Fase di spinta: periodo in cui la forza normale PN è diretta dal piede al pedale;
- Fase di tiro: periodo in cui la stessa forza è diretta in senso opposto;
- Pedalata avanti: fase che corrisponde all'intervallo di angolo di pedivella:

$$0^\circ < \theta_c < 180^\circ$$

- Pedalata indietro: fase per cui vale:

$$180^\circ < \theta_c < 360^\circ$$

- PMS e PMI sono rispettivamente il punto morto superiore e quello inferiore cioè:

$$\text{PMS con } \theta_c = 0^\circ$$

$$\text{PMI con } \theta_c = 180^\circ$$

1.2.3 LE FORZE SULLA BICICLETTA

Le forze agenti sulla bicicletta sono molte e diversificate. Si distinguono tra quelle deterministiche, in cui, noto il punto di applicazione, è possibile la loro individuazione e misura da quelle completamente casuali. Le forze misurabili per esempio sono quelle scambiate ai pedali per il movimento, al manubrio per poter sterzare o alla sella

Le varie forze scambiate dai pedali vengono sintetizzate in una notazione che permette di essere univoci e sintetici nel definire le componenti e quale lato della bici si sta considerando. Vengono così definite e riassunte nella Tabella 1.2:

- La prima lettera è sempre P, “Pedal”;
- La seconda indica la componente;
- La terza pedale associato destro-R o sinistro-L;

Parametro	Simbolo pedale dx	Simbolo pedale sx
Forza normale	PN-R	PN-L
Forza tangenziale	PT-R	PT-L
Forza longitudinale	PL-R	PL-L

Tabella 1.2: notazione delle forze

Vengono introdotte ulteriori definizioni che permettono di scomporre le forze ai pedali rispetto ad altri riferimenti ed ottenere le altre componenti.

- “Driving forces” : con questa definizione si indicano le forze propulsive, che contribuiscono alla generazione della potenza, cioè PN e PT, da quelle che non hanno questo ruolo (PT). Tali forze hanno componente ortogonale all’asse della pedivella e sono in grado di farla ruotare attorno al perno del movimento centrale;
- Forza risultante, PR: è la risultante delle “driving forces” e risulta:

$$PR = \sqrt{PN^2 + PT^2}$$

- Angolo risultante, θ_R : angolo compreso tra la direzione di applicazione di PN e PT viene calcolato come, Figura 1.2:

$$\theta_R = \arctg\left(\frac{PT}{PN}\right)$$

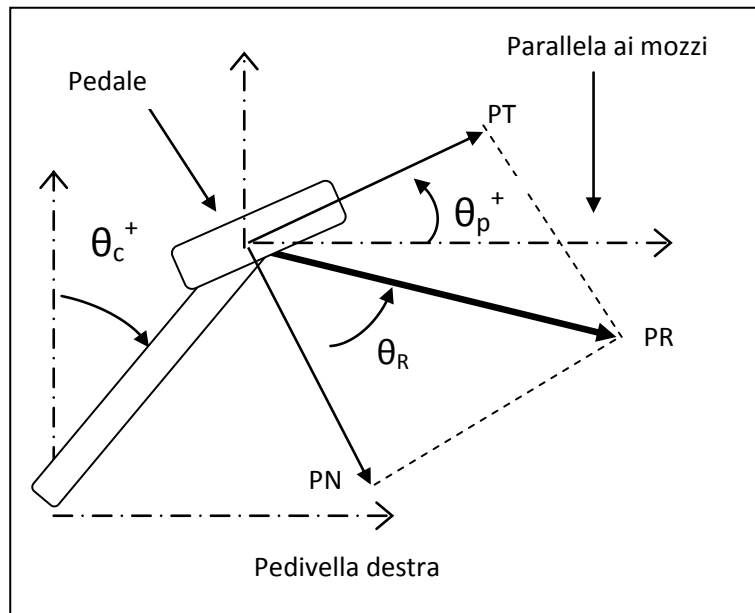


Figura 1.2: “Driving forces pedale destro”

- Forza efficace, PE: componente della forza risultante ortogonale all’asse della pedivella, è la forza che muove la bicicletta e che produce potenza, è definita dalla seguente relazione Figura 1.3:

$$PE = PN \cdot \text{sen}(\vartheta_C + \vartheta_p) + PT \cdot \cos(\vartheta_C + \vartheta_p)$$

- Forza parallela, PP: componente della forza risultante parallela all’asse della pedivella, non ha effetto sulla trazione e produce sollecitazioni di trazione o compressione, viene definita come:

$$PP = -PN \cdot \cos(\vartheta_C + \vartheta_p) + PT \cdot \text{sen}(\vartheta_C + \vartheta_p)$$

La forza PP risulta positiva quando si pone in trazione la pedivella.

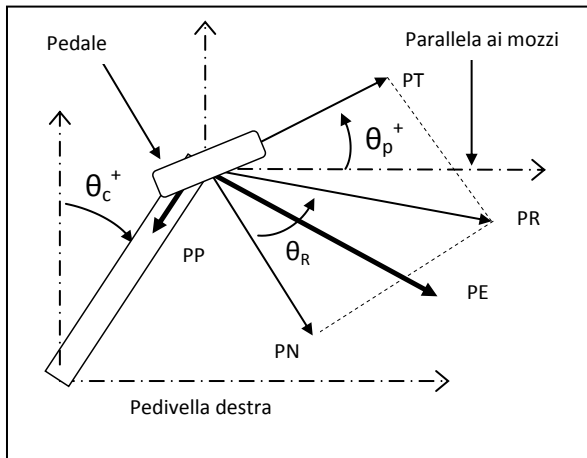


Figura 1.3: Forza efficace PE e parallela PP

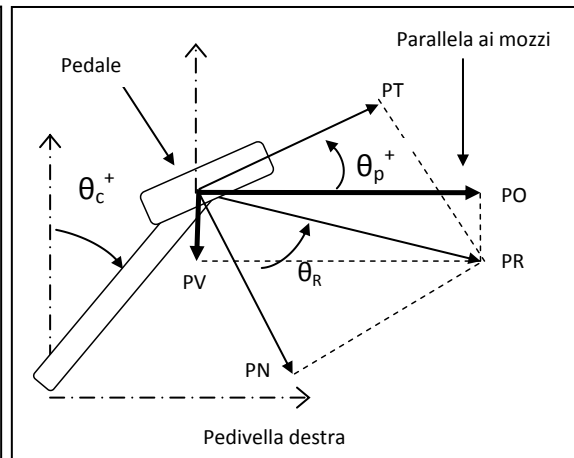


Figura 1.4: Forza verticale PV orizzontale PO

- Forza verticale, PV: è la componente verticale verso il basso della forza risultante, è definita Figura 1.4:

$$PV = PN \cdot \cos(\vartheta_p) - PT \cdot \sin(\vartheta_p)$$

- Forza orizzontale, PO: è la componente parallela ad x della risultante, è definita:

$$PO = PN \cdot \sin(\vartheta_p) + PT \cdot \cos(\vartheta_p)$$

Nota la forza efficace PE è possibile determinare altri parametri di ciclo, si definiscono:

- Velocità angolare delle pedivelle ω : è la derivata temporale dell'angolo di pedivella:

$$\omega = \dot{\theta}_c = \left(\frac{d\theta_c}{dt} \right)$$

- Coppia motrice, T: la coppia motrice “torque” è pari al prodotto della forza efficace PE per la lunghezza della pedivella:

$$T(\theta_c) = PE(\theta_c) \cdot L_c$$

- Potenza istantanea, P: si calcola:

$$P(\theta_c) = T(\theta_c) \cdot \omega = PE(\theta_c) \cdot L_c \cdot \omega$$

- La potenza media di ciclo, \underline{P} : si calcola come la potenza media espressa in un ciclo di carico con la seguente espressione:

$$\underline{P} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} P(\theta_c) d\theta_c$$

$$\text{Oppure } \underline{P} = \frac{1}{N} \sum_1^N P_i$$

Dove N è il numero di campioni di campioni per l'angolo di pedivella $0^\circ \div 360^\circ$.

- Efficienza η di spinta, η : è un parametro che permette di valutare l'efficienza della pedalata, è il rapporto istantaneo tra la forza efficace e quella risultante;

$$\eta = \frac{PE}{PR} = \frac{PE}{\sqrt{PN^2 + PT^2}}$$

1.3 ANALISI DEL MOVIMENTO

L'analisi del movimento umano consiste nella rilevazione tridimensionale di grandezze cinematiche (spostamento nello spazio, velocità e accelerazione), dinamiche (analisi delle forze coinvolte nel movimento) ed elettromiografiche (muscoli attivati nel movimento) durante l'esecuzione di un gesto motorio.

1.3.1 IL SISTEMA STEREO FOTOGRAMMETRICO

L'apparecchiatura utilizzata è fornita dalla BTS Spa, azienda produttrice e sviluppatrice di un sistema di cattura e analisi del movimento denominato SMART. I suoi prodotti vengono utilizzati da medici, ingegneri e ricercatori che hanno la necessità di ottenere informazioni per i loro scopi.

BTS non produce solamente strumentazioni scientifiche per l'analisi clinica del movimento ma anche:

- Sistemi per l'acquisizione e l'elaborazione di segnali elettromiografici;
- Sistemi dinamici per l'analisi della postura;
- Sistemi optoelettronici per la misura della ventilazione polmonare;
- Sistemi per il controllo degli stati vegetativi;
- Sistemi per la riabilitazione neuromotoria in ambienti immersivi;

I sistemi di analisi del movimento BTS non vengono utilizzati esclusivamente nel settore medico, presso ospedali, centri di cura e cliniche riabilitative per analizzare le problematiche del movimento e valutare il percorso riabilitativo più adatto, ma anche presso istituti scientifici e universitari per compiere ricerche nei campi della biomeccanica, scienze motorie e in medicina sportiva per valutare le prestazioni degli atleti prevenire infortuni e migliorare l'efficacia di una eventuale riabilitazione.

Il sistema SMART è formato da vari componenti, Figura 1.6.

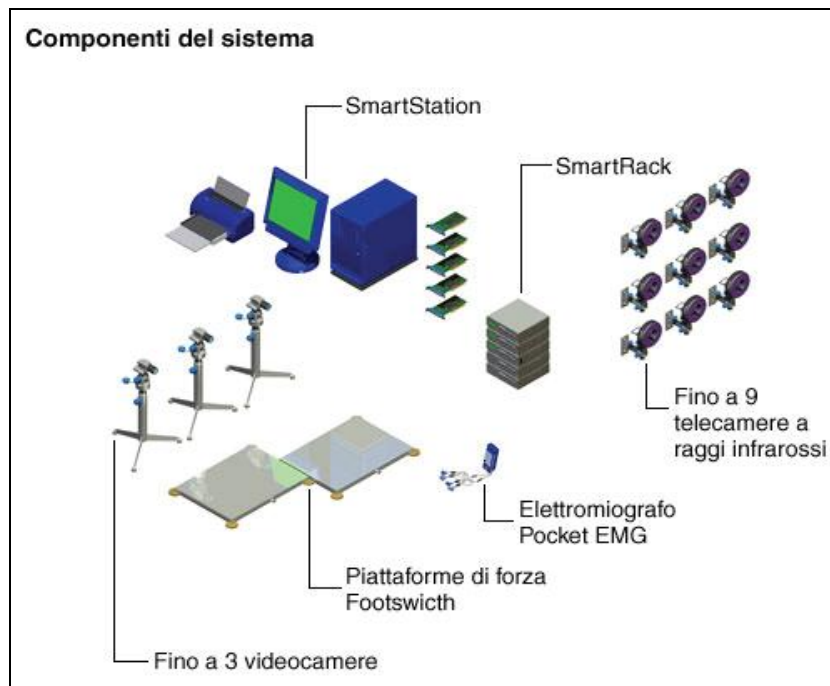


Figura 1.6: Componenti sistema SMART

- Telecamere a raggi infrarossi, utilizzate per lo studio della cinematica. L'analisi si basa sul riconoscimento e ricostruzione tridimensionale dei marker posizionati su punti di repere anatomico. Permettendo di ottenere informazioni quali traiettorie, velocità, angoli articolari nei tre piani principali (sagittale, trasversale e frontale);
- Videocamere, permettono la ripresa del soggetto durante un gesto e forniscono una registrazione permanente del movimento, a supporto dell'indagine clinica;
- Piattaforme di forza, consentono l'analisi delle reazioni vincolari al terreno durante la camminata a livello delle articolazioni;
- Pocket EMG, rileva il segnale elettromiografico di superficie e consente di ottenere informazioni sullo stato di attivazione muscolare a seguito del movimento. Il sistema non è invasivo;

- Unità di alimentazione delle videocamere, una stazione PC con le schede per il controllo dei componenti e i software del sistema SMART;

I componenti software di cui dispone il sistema sono:

SMART Capture, applicazione del sistema che permette di acquisire immagini (statiche o dinamiche) per poterle poi analizzare. La procedura per l'acquisizione di immagini comincia con la calibrazione, che consiste nel far conoscere al sistema la posizione e l'orientamento di ciascuna telecamera, rendendo così possibile ricostruire la posizione tridimensionale di un marker. Si utilizza una terna (destrorsa) per definire un sistema di riferimento globale all'interno dello spazio in cui avviene l'acquisizione. Figura 1.7.

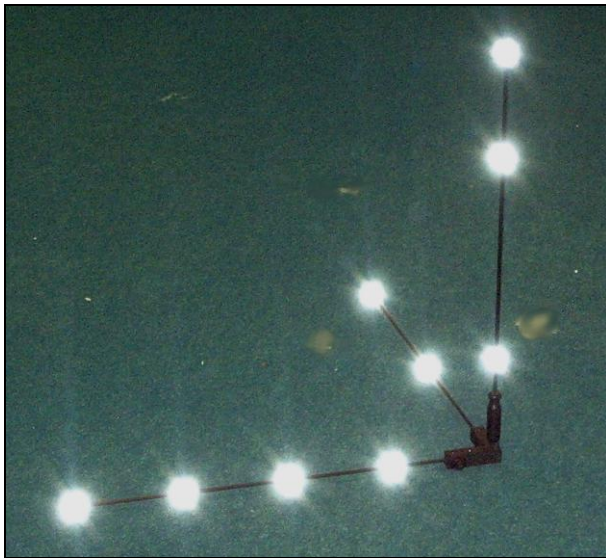


Figura 1.7: Terna di riferimento

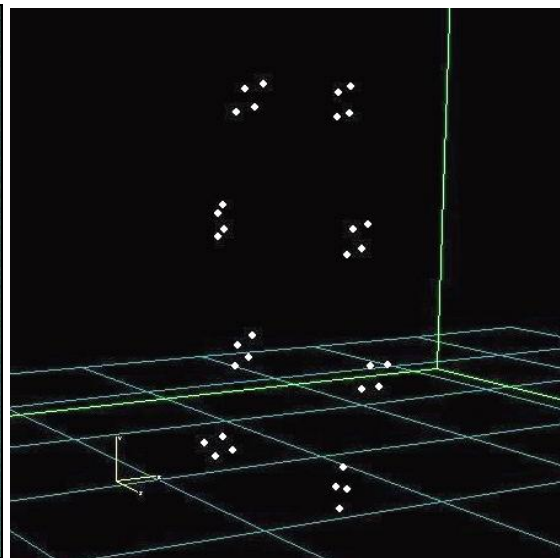


Figura 1.8: Acquisizione marker

Determinata la posizione e l'orientazione della terna, si procede con la definizione delle dimensioni del volume che le telecamere ad infrarossi devono filmare, attraverso lo "spaz-zolamento" nelle tre direzioni (X, Y, e Z) per mezzo di un asse estraibile. Dopo queste operazioni, il sistema SMART è pronto per l'acquisizione di immagini e ciò che appare sullo schermo sono dei punti luminosi in corrispondenza dei marker riflettenti, Figura 1.8.

SMART Tracker, applicazione che permette di ricostruire la posizione tridimensionale di ogni marker a partire dalle immagini di ogni telecamera, acquisite mediante lo SMART

Capture; consente inoltre di poter applicare un modello che assegna un nome a ciascun marker visualizzato, Figura 1.9.

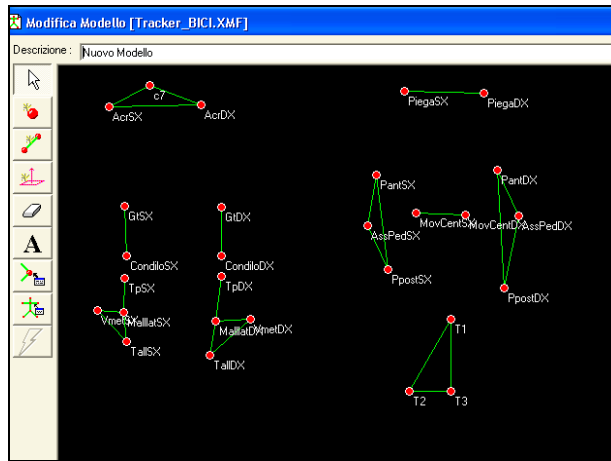


Figura 1.9: Modello tracker bici

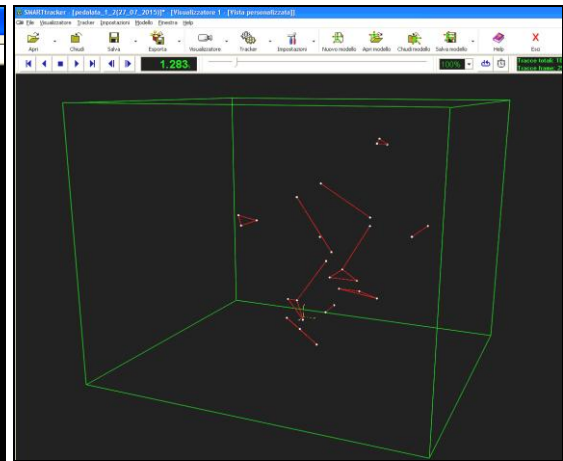


Figura 1.10: Ricostruzione del modello bici

Creato il modello si possono accoppiare i singoli punti di tale schema ai marker acquisizioni in precedenza Figura 1.10. I movimenti dei marker vengono analizzati e ricostruiti per eliminare i problemi di interpolazione delle traiettorie.

SMART Analyzer, programma che permette un'analisi biomeccanica del movimento con integrazione di dati cinematici 3D, video e analogici provenienti da piattaforme di forza, elettromiografi od altri dispositivi. Il software permette di sviluppare protocolli di analisi attraverso un'interfaccia a blocchi ed è integrabile con i sistemi Motion Capture.

Il sistema di analisi SMART analyzer permette di generare passo-passo di tutti i dati biomeccanici attraverso un'interfaccia grafica a blocchi, gestisce i dati di interesse biomeccanico: distanze, angoli, velocità, accelerazioni, forze, momenti, potenze che rappresenta per mezzo di visualizzatori tridimensionali, grafici e tabelle numeriche, permette di utilizzare tecniche di interpolazione e filtraggio di tutti i tipi di segnali e genera sistemi di riferimento anatomici diversi da quello di laboratorio, che permettono all'utente di analizzare e presentare i dati in diversi sistemi di coordinate.

Viene brevemente descritto il funzionamento delle altre apparecchiature utilizzate in questo lavoro che fanno parte del sistema di acquisizione del movimento SMART.

Il sistema ottico di acquisizione è costituito da un set di telecamere con illuminatore, dotate di un rilevatore CCD sensibile alla radiazione infrarossa che permettono di riprendere la scena dove il soggetto si muove. Con questa soluzione è possibile operare in qualsiasi condizione di luce, anche in ambienti esterni, Figura 1.12.



Fig 1.12: Telecamera a infrarossi con illuminatore.



Fig 1.13: Marker

I marker Figura 1.13, di forma sferica o semisferica, vengono posti sul soggetto in esame o sull'elemento e l'infrarosso riflesso, da questi, viene visto dalle telecamere come punto luminoso sulla scena. Combinando flash e marker riflettenti, è possibile generare immagini ad alto contrasto dove è facile identificare i marker stessi. Il sistema di motion capture ricostruisce la posizione tridimensionale del marcatore in ogni istante di tempo, e deve essere composto da almeno due telecamere in grado elaborare un'immagine tridimensionale

1.3.2 IL POCKET EMG

BTS produce il PocketEMG, Figura 1.14, un apparecchio che viene usato nei laboratori che si occupano dello studio dell'attività muscolare, nei campi della riabilitazione, medicina dello sport, ergonomia, ricerca clinica e negli studi sulla valutazione di capacità funzionali e affaticamento muscolare. Lo strumento offre la possibilità di sfruttare fino a 16 canali elettromiografici e lavora su una frequenza di campionamento di 1 kHz, con riso-

luzione a 16 bit. PocketEMG viene fornito con il software Myolab come dotazione standard. In questo lavoro è stato utilizzato come unità di acquisizione per i segnali provenienti dai pedali estensimetrici in quanto rendeva possibile alimentare sia i ponti che registrarne lo sbilanciamento. Inoltre, i dati acquisiti erano trasferiti immediatamente al sistema di visione e quindi elaborabili in tempo reale.

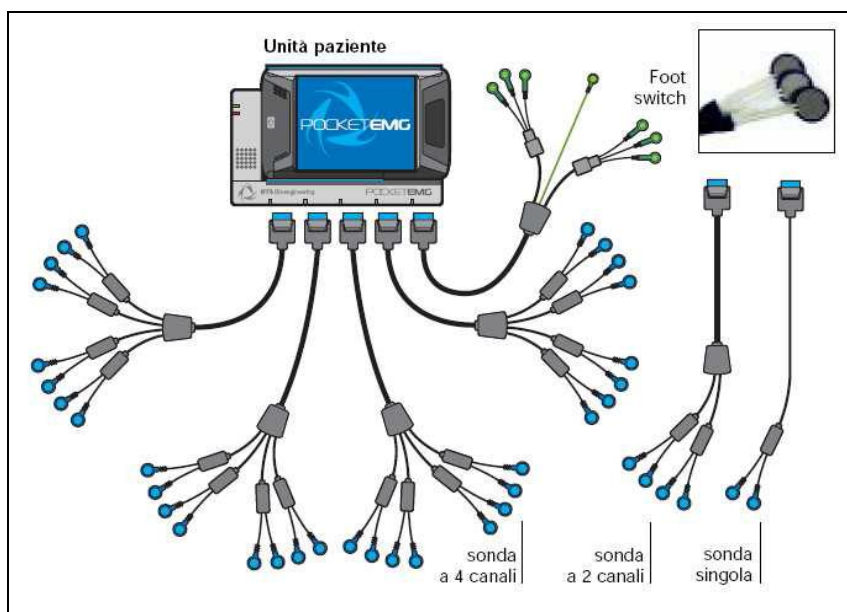


Fig 1.14: POCKET-EMG

CAPITOLO 2

ANALISI DEI LAVORI PRECEDENTI

Il presente capitolo riassume i lavori che hanno permesso di giungere alla realizzazione del pedale dinamometrico. Nella prima parte viene analizzato il modello di riferimento per poi descrivere la fase progettuale che ha permesso di giungere al dimensionamento e alla geometria finale del perno. Nella seconda viene richiamata la teoria degli estensimetri e considerata l'influenza del loro posizionamento sulla rilevazione dei carichi applicati.

2.1 DEFINIZIONE DEL MODELLO

Il pedale dinamometrico ha interesse sia in applicazioni biomeccaniche che costruttive. Biomeccanico poiché ci permette di studiare il moto del ciclista quando esso si trova nelle condizioni di utilizzo normali avendo quindi la possibilità di conoscere tutte le caratteristiche della pedalata (“driving forces”). Queste informazioni potranno essere utili per ottimizzare la pedalata stessa in modo da minimizzare lo sforzo muscolare a parità di potenza espressa o per individuare possibili cause di lesioni alle varie parti delle gambe dei ciclisti provocate da condizioni di pedalata non corrette

Dal punto di vista costruttivo la misurazione delle sollecitazioni sui pedali permette di ricavare delle storie di carico utili alla progettazione dei vari componenti quali pedali commerciali, telai, e componentistica per ottenere il migliore sfruttamento dei materiali.

Nella tesi di laurea di Mirco Luchetta sono stati utilizzati dei sensori elettrici per misurare le grandezze fisiche: gli estensimetri per la rilevare le forze e i potenziometri a rotazione per gli angoli. Il sistema di misura nel suo complesso è formato da:

- cella di carico per la misura delle forze;
- strumento di misura dell'angolo di rotazione relativo tra pedivella e telaio θ_c ;
- strumento di misura dell'angolo relativo tra pedivella a corpo pedale θ_p ;

Con le informazioni che si ottengono dai tre strumenti è possibile valutare le forze caratteristiche durante il ciclo di pedalata.

Nel presente lavoro gli angoli di pedale e pedivella non sono stati ricavati utilizzando dei potenziometri ma analizzando la cinematica della pedalata attraverso un sistema di motion capture prodotto dalla BTS.

L'idea costruttiva che sta alla base del progetto è stata l'applicazione degli estensimetri direttamente sul perno pedale. Questo componente ha assunto il ruolo di cella di carico. Nei pedali commerciali il perno pedale è vincolato rigidamente alla pedivella, il corpo del pedale è rotante rispetto al suo perno su cuscinetti a rotolamento. In questo modo, durante il funzionamento, il perno compie un moto di rivoluzione attorno al movimento centrale mentre il corpo pedale pur ruotando non compie mai rotazioni complete. L'applicazione di estensimetri sul perno risulta allora impossibile, perché essi dovrebbero essere alimentati mediante cavi elettrici e durante il funzionamento questi ultimi si attorciglierebbero attorno al perno stesso. Si è scelta allora una costruzione differente del pedale: mediante un cuscinetto posto tra perno e pedivella anziché tra pedale e perno, Figura 2.1. Infatti con la soluzione adottata il perno è diventato solidale al corpo pedale e al piede del ciclista e dunque compie rotazioni attorno al proprio asse solo su intervalli d'angolo limitati.

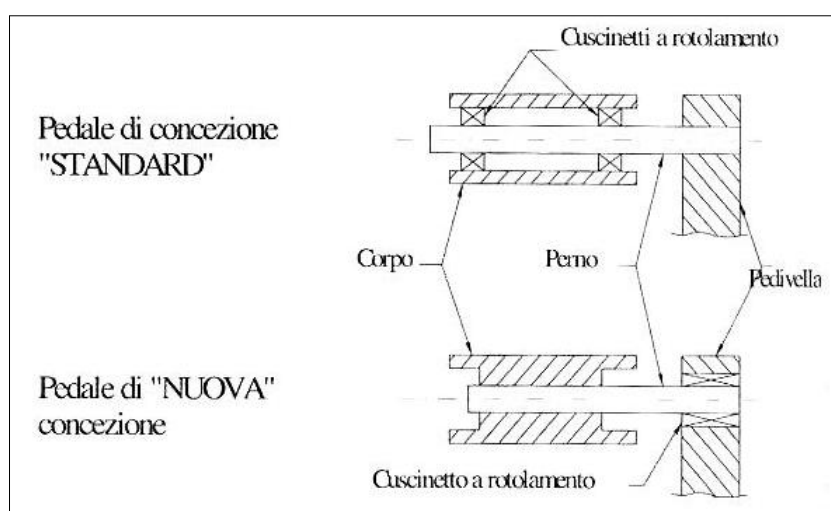


Figura 2.1 differenze tra il pedale “standard” e quello di “nuova concezione”.

L'estensimetratura ed il cablaggio sono diventati così possibili. I cavi elettrici, collegati ai quattro mezzi ponti di Wheatstone, ottenuti per applicazione di otto elementi sensibili, fuoriescono dalla parte inferiore del pedale e vengono raccolti in una scatola di derivazione.

2.2 PROGETTAZIONE DEL PEDALE DINAMOMETRICO

Durante le fasi preliminari del progetto sono stati definiti i parametri che il pedale doveva soddisfare:

- sistema di bloccaggio del piede di tipo “clipless” ovvero senza cinghia;
- caratteristiche generali di resistenza, compattezza, leggerezza, sicurezza e praticità del vincolo;
- il sistema di forze tra piede e pedale che passa attraverso la placchetta con forze applicate in corrispondenza del baricentro della stessa;

Si è deciso di utilizzare il pedale Shimano modello PD - M747;

Il perno rappresenta lo strumento di misura in quanto assume il ruolo di cella di carico. Si tratta dell'elemento più sollecitato dell'intero sistema e dunque quello per cui il dimensionamento, è stato più accurato.

Due specifiche dovevano essere soddisfatte in fase di progetto

1. soddisfacente precisione nella misura;
2. sicurezza del ciclista;

La prima richiesta implicava che il perno dovesse essere elastico e deformabile; solo se questo si verifica si hanno sufficienti deformazioni degli estensimetri, sensibilità della e conseguenti buoni risultati.

La seconda voleva invece che il perno fosse tutt'altro che deformabile. Era necessario infatti per la sicurezza dei tester della bicicletta che il perno pedale fosse resistente e reggesse carichi di entità molto elevata

Per il dimensionamento statico è stato necessario fissare dei carichi realistici da usare come dati di progetto.

Si è stimato che i valori massimi delle forze fossero i seguenti:

forza normale $P_N = 2500 \text{ N}$

forza tangenziale $P_T = 1000 \text{ N}$

Tali valori si raggiungono solo in particolari fasi di utilizzo della bicicletta, in particolare durante le partenze in piedi, oppure pedalata in salita o ancora per effetto di particolari asperità del terreno quali salti o buche; nella maggior parte del tempo le forze sono nettamente più basse e non superano i 1000 N per entrambe le componenti.

Si sono prese come condizioni al contorno quattro richieste:

- sensibilità della cella di carico;
- resistenza meccanica;
- possibilità di realizzazione del supporto;
- ingombro radiale del perno che consideri lo spazio disponibile all'interno del corpo pedale;

Il modello fisico applicato per il dimensionamento è stato quello di trave incastrata. Con l'ipotesi fatta, il sistema è stato rappresentato in Figura 2.2. Le grandezze caratteristiche per il dimensionamento sono:

- L: distanza del Punto di Applicazione delle Forze (FAP) dalla pedivella; corrisponde alla dimensione determinante il centro del pedale sulla superficie di appoggio. Come detto tale valore è stato misurato nel pedale commerciale e risulta pari a 53mm;

- L_1 : distanza del FAP dal vincolo, diversa da L per la presenza del cuscinetto;
- L_2 dimensione caratteristica del supporto tale che:

$$L = L_1 + L_2$$

- D : diametro esterno del perno;
- d : diametro del foro sede dell'albero di collegamento tra pedivella e perno del potenziometro;

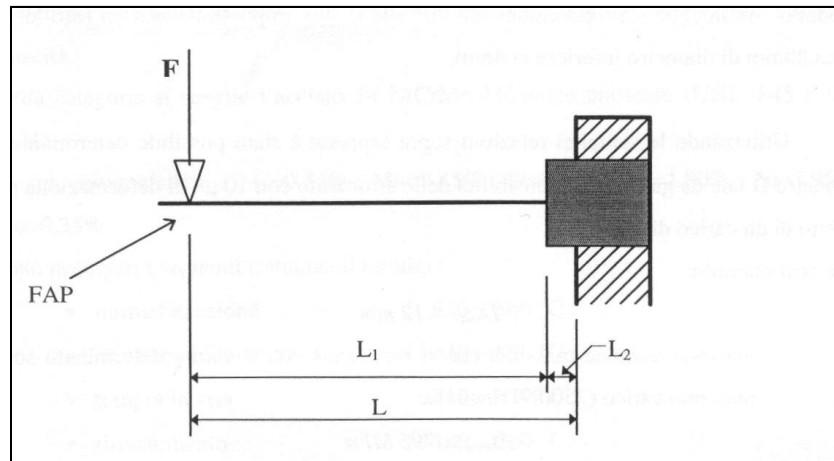


Figura 2.2 Modello trave incastrata

Note le condizioni al contorno è stato possibile determinare il diametro D tale che si garantisce alla cella di carico una buona sensibilità ottenendo:

$$D_{\max} = 12 \text{ mm.}$$

La tensione normale massima che si realizzava sotto effetto del carico massimo (2500N) risultava:

$$\sigma_{\max} = 795 \text{ MPa}$$

Si è subito visto come tale valore di tensione fosse molto elevato. E' stato necessario risolvere il problema mediante la scelta di un acciaio speciale "autotemprante" con buone caratteristiche di resistenza meccanica.

In base ai risultati ottenuti dal dimensionamento e dalla geometria del corpo pedale, sono state fissate le seguenti dimensioni:

- diametro in corrispondenza al supporto cuscinetti: $D = 12 \text{ mm}$;
- diametro in corrispondenza degli estensimetri: $D = 12 \text{ mm}$;
- diametro del foro: $d = 4 \text{ mm}$;

2.3 ESTENSIMETRATURA E CABLAGGIO

La fase successiva, che ha riguardato la scelta della tipologia di estensimetri da adottare, il posizionamento degli stessi sulla superficie per la composizione dei ponti di Wheatstone ed il cablaggio elettrico, è stata una delle più complesse da eseguire per le ridottissime dimensioni della cella di carico e l'elevato numero di sensori applicati sulla sua limitata superficie. Lo spazio disponibile tra corpo pedale e perno ha condizionato la disposizione degli estensimetri, cavi e saldature. Ciascun pedale presentava per ogni direzione di carico due mezzi ponti collegati a ponte intero, acquisendo così lo sforzo di taglio. Sono stati utilizzati degli estensimetri commerciali HBM LY 13.

Il principio di funzionamento degli estensimetri è legato alla loro variazione di resistenza per effetto della deformazione esterna imposta. Essi sono collegati a formare dei ponti di Wheatstone alimentati con una tensione elettrica costante; la variazione di resistenza si traduce in uno sbilanciamento dei ponti con conseguente variazione della tensione elettrica alle estremità. In uscita dall'estensimetro si ha un segnale di piccola entità, che deve essere amplificato mediante collegamento a ponte. Lo strumento di acquisizione misura le variazioni di tensione. Per avere la massima sensibilità ai carichi esterni la cella di carico viene assunta come trave in flessione, in cui le fibre esterne sono anche quelle maggiormente deformate.

Gli estensimetri sono stati incollati alla superficie cilindrica del perno formando due serie di sensori con otto estensimetri. Il collegamento è stato realizzato per ottenere tre aspetti

positivi:

1. aumento della sensibilità : per effetto di un momento flettente ognuno degli estensimetri incollati sulle facce opposte subisce la stessa deformazione ma di segno opposto, e inseriti nello schema a ponte intero i sensori quadruplicano la sensibilità ai carichi (fattore di ponte 4);
2. insensibilità ai carichi assiali: per effetto dei carichi assiali i sensori posti sulla stessa faccia si deformano allo stesso modo annullando nel complesso lo sbilanciamento del ponte;
3. insensibilità alle variazioni di temperatura: le eventuali variazioni di temperatura hanno l'effetto di deformare allo stesso modo i quattro sensori compensandosi;

Nella configurazione a ponte intero gli estensimetri sono incollati sul perno secondo lo schema in Figura 2.3 e alimentati con una tensione (V).

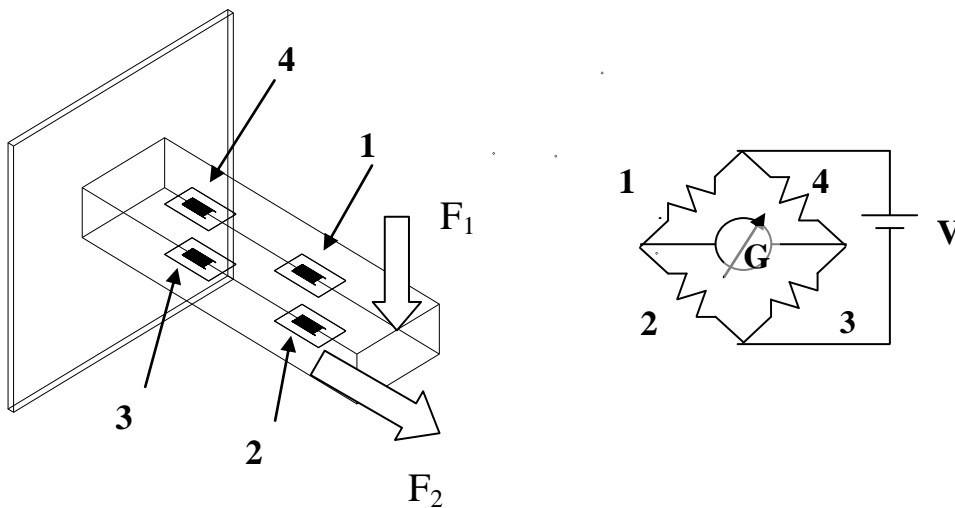


Fig.2.3 Schema del Ponte intero di Wheatstone

2.3.1 TEORIA DEGLI ESTENSIMETRI

Il principio di funzionamento si basa sul fatto che una resistenza elettrica di un conduttore metallico varia quando questo viene sottoposto a deformazione: la variazione del valore che la resistenza metallica assume è proporzionale alla deformazione a cui la resistenza è soggetta.

La resistenza di un conduttore metallico è data da:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$$

Quando il conduttore viene sottoposto ad uno sforzo, muteranno le dimensioni geometriche del conduttore: in seguito ad un allungamento della griglia metallica vi sarà una conseguente contrazione della sezione; considerando anche una variazione della resistività ρ , in seguito ad una deformazione si avrà:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho}$$

Trasformando opportunamente i vari termini si ottiene:

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon + 2\nu\varepsilon + \frac{d\rho}{\rho}$$

in cui ε è la deformazione che il corpo subisce, ν è il coefficiente di contrazione laterale. Si definisce :

$$K = \frac{dR/R}{\varepsilon} = 1 + 2\nu + \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon}$$

Ad una deformazione corrisponde una variazione della resistenza secondo una costante di proporzionalità **K**, detta **Gauge Factor**; questo importante parametro è fornito dal costruttore.

Per ciascun ramo i , è possibile trovare la relazione che lega la variazione di tensione elettrica (dVi) per effetto di una variazione di resistenza (dRi). Nel ramo 1 si ha:

$$\frac{dV_1}{V} \cong \frac{1}{4} \cdot \frac{dR_1}{R_1}$$

Per tutti e 4 i rami è possibile trovare una relazione generale che consente di determinare lo sbilanciamento del Ponte di Wheatstone in seguito alla variazione di più resistenze.

$$\frac{dV}{V} \cong \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{dR_1}{R_1} - \frac{dR_2}{R_2} + \frac{dR_3}{R_3} - \frac{dR_4}{R_4} \right)$$

Inserendo la definizione della sensibilità si ottiene:

$$\frac{dV}{V} \cong \frac{K}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

che mette in relazione la tensione in uscita del Ponte di Wheatstone (dV) con la deformazione degli estensimetri (ε_i). Si definisce “canale” l’uscita del Ponte di Wheatstone.

L’inserimento di più estensimetri in un Ponte con la conseguente creazione di un solo canale, ha lo scopo di aumentare la sensibilità del canale alla deformazione che si vuole misurare.

Ponte Intero

Il pedale dinamometrico viene considerato come una trave a sbalzo sollecitata sia a trazione (F_2) che a taglio (F_1), con la comparsa del momento flettente M_f . La disposizione degli estensimetri, Figura 2.3, considera solo la deformazione dovuta alla flessione e alla trazione.

Sia M_{f12} il momento flettente nella sezione in cui sono incollati gli estensimetri 1 e 2 e M_{f34} il momento flettente nella sezione in cui sono incollati gli estensimetri 3 e 4.

$$\varepsilon_1 = \frac{M_{f12}}{E \cdot W_f} + \frac{F_2}{A} \qquad \varepsilon_2 = -\frac{M_{f12}}{E \cdot W_f} + \frac{F_2}{A}$$

$$\varepsilon_3 = -\frac{M_{f34}}{E \cdot W_f} + \frac{F_2}{A} \qquad \varepsilon_4 = \frac{M_{f34}}{E \cdot W_f} + \frac{F_2}{A}$$

$$\frac{dV}{V} \cong \frac{K}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) = \frac{K}{4} \cdot \varepsilon_{TOT}$$

si calcola l'espressione di ε_{TOT}

$$\varepsilon_{TOT} = \left(\frac{M_{f12}}{E \cdot W_f} + \frac{F_2}{A} \right) - \left(-\frac{M_{f12}}{E \cdot W_f} + \frac{F_2}{A} \right) + \left(-\frac{M_{f34}}{E \cdot W_f} + \frac{F_2}{A} \right) - \left(\frac{M_{f34}}{E \cdot W_f} + \frac{F_2}{A} \right)$$

$$\varepsilon_{TOT} = 2 \cdot \left(\frac{M_{f12}}{E \cdot W_f} - \frac{M_{f34}}{E \cdot W_f} \right)$$

Essendo lineare l'andamento del momento flettente lungo il corpo, risulta

$$M_{f12} - M_{f34} = F_1 \cdot d$$

dove d rappresenta la distanza tra le due coppie di estensimetri 1-2 e 3-4; immettendo la relazione nella precedente, si ottiene:

$$\varepsilon_{TOT} = \frac{2 \cdot F_1 \cdot d}{E \cdot W_f}$$

unendo le relazioni precedenti si giunge alla relazione finale

$$\frac{dV}{V} \cong \frac{K}{2} \cdot \left(\frac{F_1 \cdot d}{E \cdot W_f} \right)$$

L'uscita del canale estensimetrico è proporzionale solamente alla forza di taglio.

Capitolo 3

REVISIONE DEI PEDALI DINAMOMETRICI

Nel presente capitolo vengono descritte le operazioni svolte sui pedali per ripristinare il loro funzionamento. La prima parte è dedicata alla pedivella destra, dalle operazioni di scansione, alla realizzazione dell'attacco, fino a giungere, attraverso l'assemblaggio delle parti, alla geometria definitiva. Nella seconda si descrivono le varie operazioni che sono state seguite per far funzionare il pedale sinistro, dalla sostituzione del perno estensimetrato alla realizzazione dei cablaggi e al riassemblaggio delle sue parti.

3.1 PEDALE DESTRO

Inizialmente si era deciso di installare il pedale dinamometrico con il suo attacco sulla pedivella a lunghezza variabile SRM, ma non essendo più disponibile, si è scelto di realizzare una modifica su una in possesso. Attraverso opportune lavorazioni meccaniche sulla pedivella è stato creato l'alloggiamento per poter accoppiare le due parti. Nello studio preliminare si era cercato di valutare se il posizionamento dei due pezzi fosse possibile: la necessità di lasciare un adeguato spazio tra la corona e l'attacco per il passaggio della catena, e le tolleranze richieste per l'accoppiamento delle due parti, hanno fatto scartare lavorazioni di tentativo. Si è quindi deciso di riprogettare al CAD sia l'attacco pedale che la pedivella così da effettuare un assemblaggio virtuale delle due parti e definire la geometria finale dei pezzi.

3.1.1 MODELLAZIONE PEDIVELLA

Le operazioni di modellazione solida sono state affrontate utilizzando il programma parametrico ProE 3.0 Wildfire che permette di creare e gestire i singoli componenti, l'assemblaggio, la messa in tavola e la gestione dei processi CAM. Data la complessità geometrica della pedivella non si è ritenuto conveniente effettuare una modellazione solida

del pezzo, è risultata più rapida una scansione laser. Questa operazione si è resa necessaria poiché si cercava la massima corrispondenza con il pezzo reale.

Prima di procedere con la scansione si è valutato quale grado di accuratezza assegnare alle varie parti della pedivella: dove non erano richieste lavorazioni meccaniche, per esempio in corrispondenza del “ragno” della guarnitura, la risoluzione è stata tenuta bassa poiché era sufficiente la sola conoscenza degli assi per il posizionamento della corona; nella zona che doveva essere lavorata, invece, la risoluzione era più elevata in quanto l’assemblaggio delle parti richiedeva che le dimensioni fossero esatte. Ottenuta la geometria finale i pezzi sono stati lavorati nel centro di controllo numerico. Il processo è stato diviso in tre fasi: la prima ha permesso di associare un sistema di riferimento locale alla pedivella e di posizionare degli assi di riferimento, la seconda ha realizzato la scansione del pezzo e la terza ha processato le due fasi precedenti parti associandole in unico modello.

La scansione è stata effettuata presso il laboratorio del DAUR utilizzando la macchina disponibile, Figura 3.1. La prima operazione svolta è stata quella di preparare la struttura componibile necessaria per il bloccaggio: sono stati posizionati dei blocchetti calibrati sopra un piano di riscontro modulare che hanno permesso di trovare il posizionamento ottimale e meno invasivo, Figura 3.2, riducendo l’interferenza degli attacchi.



Figura 3.1: Scanner laser



Figura 3.2: Bloccaggio pedivella

Prima di iniziare il processo di scansione della pedivella, sono state definite sulla sua superficie delle zone di interesse: la parte terminale dello stelo, il foro per il fissaggio del pedale e quelli per la corona, il perno quadro. Utilizzando un tastatore è stato possibile individuare su queste superfici, dei punti e, attraverso un'interpolazione dei dati acquisiti, determinare gli assi e fissare un sistema di riferimento locale in corrispondenza dell'asse del movimento centrale. La scansione della pedivella stata divisa in due fasi: nella prima si è depositata, sull'alluminio lucido, una polvere opacizzante allo scopo di ridurre i riflessi dell'ambiente di illuminazione e migliorare la risoluzione. Successivamente è stata completata la digitalizzazione di tutta la superficie muovendo lo scanner lungo il pezzo sia in direzione longitudinale che trasversale e attorno ai vari fori. Particolare attenzione è stata data alla scansione della parte terminale dello stelo, al fine di ottenere la migliore definizione geometrica e dimensionale della zona che sarebbe poi andata ad accoppiarsi con l'attacco pedale nel successivo assemblaggio. I dati acquisiti con il software dello scanner sono stati successivamente rielaborati per poter essere utilizzati in ambiente Pro-E e per correggere eventuali errori avvenuti durante il processo. Sono stati costruiti tre file: il primo contiene le informazioni sul posizionamento degli assi del pedale, della corona e del movimento centrale rispetto ad un piano di riferimento, Figura 3.3.

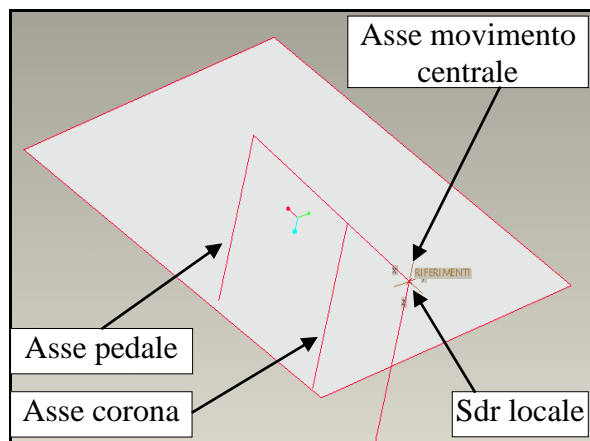


Figura 3.3: Sistema di riferimento e assi

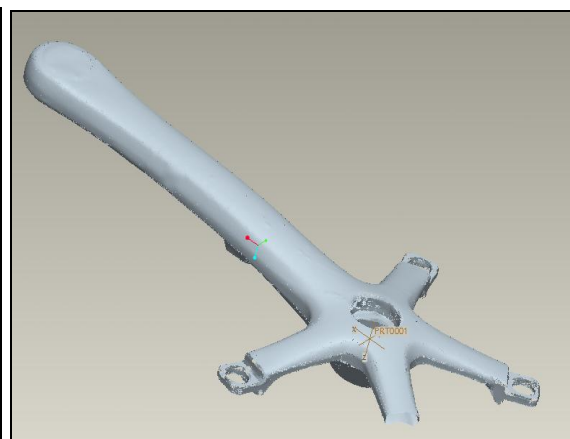


Figura 3.4: Scansione completa pedivella

Il secondo file contiene la digitalizzazione di tutta la pedivella. Il formato scelto è stato quello stereo litografico poiché era sufficiente la visualizzazione degli ingombri per valutare il posizionamento di altri componenti. Il corpo risulta privo di volume ed è

rappresentato da una superficie di spessore infinitesimo, Figura 3.4.

Nel terzo è contenuta la parte terminale dello stelo. L'elemento si presentava come un guscio di spessore infinitesimo privo di volume, con una superficie non continua e che non era possibile modellare, Figura 3.5. Attraverso le operazioni di post elaborazione è stato possibile chiudere le superfici e generare all'interno un volume Figura 3.6, infatti non è possibile operare con superfici che non siano continue e su oggetti privi di volume .

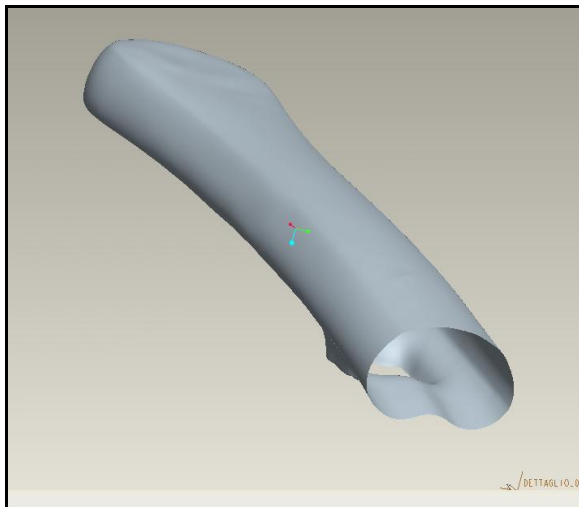


Figura 3.5: Estremità aperta

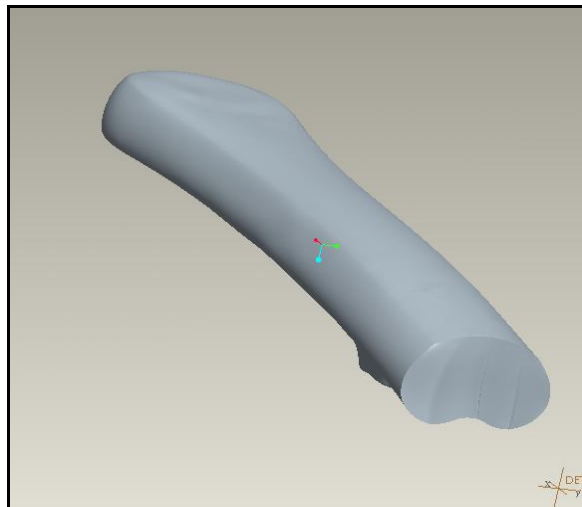


Figura 3.6: Estremità chiusa

Si è poi provveduto ad assemblare l'estremità solida sulla scansione della parte terminale solida, Figura 3.7, in modo che risultasse un unico elemento .

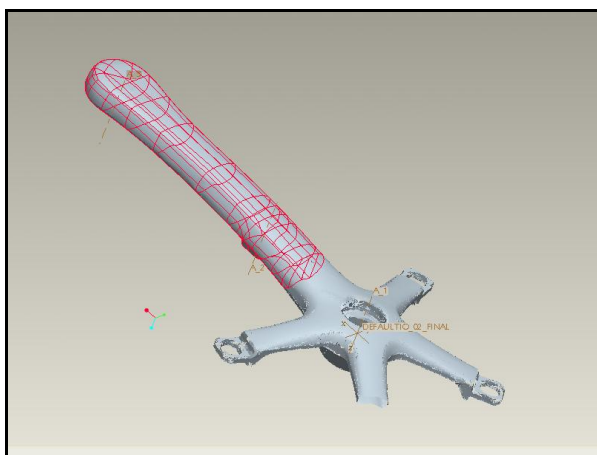


Figura 3.7: Assemblaggio completo



Figura 3.8: Attacco pedale

3.1.2 MODELLAZIONE ATTACCO

L'attacco è stato modellato con il CAD parametrico. Si è partiti rilevando le geometrie di un componente identico e non installabile sulla pedivella per via delle dimensioni. La successiva fase di assemblaggio ha permesso di determinare i parametri finali prima della lavorazione al centro di lavoro, Figura 3.8.

3.1.3 MODELLAZIONE PLACCHETTA

La placchetta è un elemento posizionato sull'attacco e serve a tenere unita la pedivella con l'attacco. Viene posizionata nella relativa asola e permette di variare la distanza tra le due parti così da ottenere un pedale a lunghezza variabile, Figura 3.9.

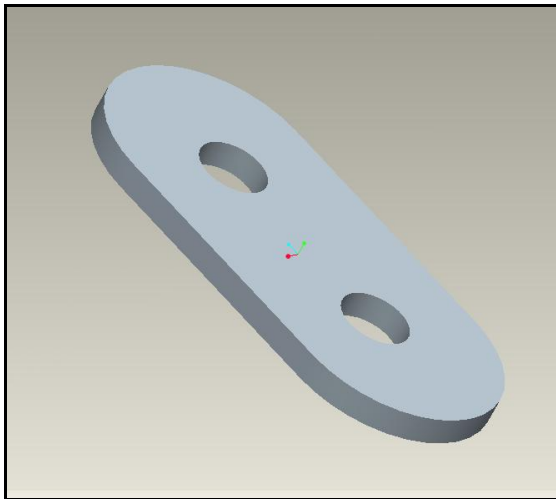


Figura 3.9: Placchetta

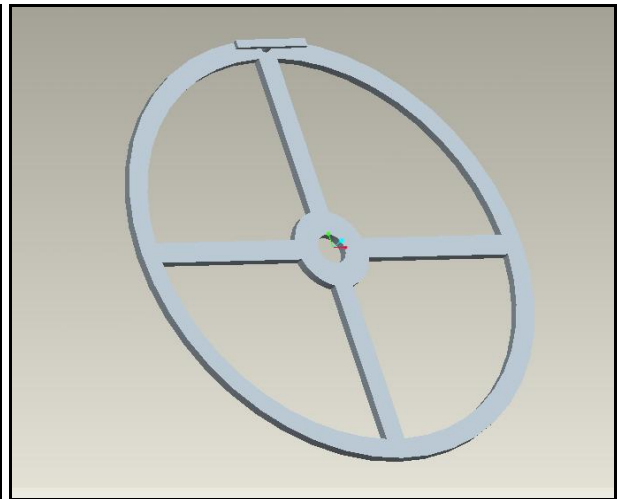


Figura 3.10: Corona

3.1.4 MODELLAZIONE CORONA

Si è deciso di modellare la corona esterna con un elemento che avesse le stesse dimensioni di quella reale ma una geometria molto semplice. Questa scelta è stata fatta in quanto era prioritario determinare gli ingombri presenti tra le parti e le possibili interferenze durante l'assemblaggio, Figura 3.10.

3.1.5 ASSEMBLAGGIO

Dopo aver modellato i vari pezzi, si è proceduto con l'assemblaggio delle parti . Questa fase è stata necessaria per valutare: il corretto posizionamento dell'attacco pedale sulla pedivella e gli ingombri con la corona per il passaggio della catena. Si è preso come componente di base (o default) la pedivella e a partire da questa tutti gli altri elementi sono stati collocati. La modellazione parametrica ha permesso di modificare le dimensioni di alcuni elementi durante l'assemblaggio e di determinarne i valori finali. In Figura3.11 è visibile l'assemblaggio definitivo, in Figura3.12 la vista esplosa.

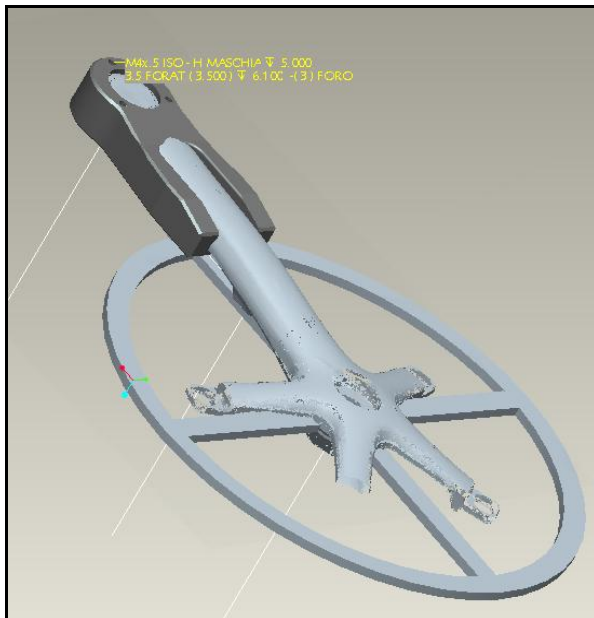


Figura 3.11: Assemblaggio completo

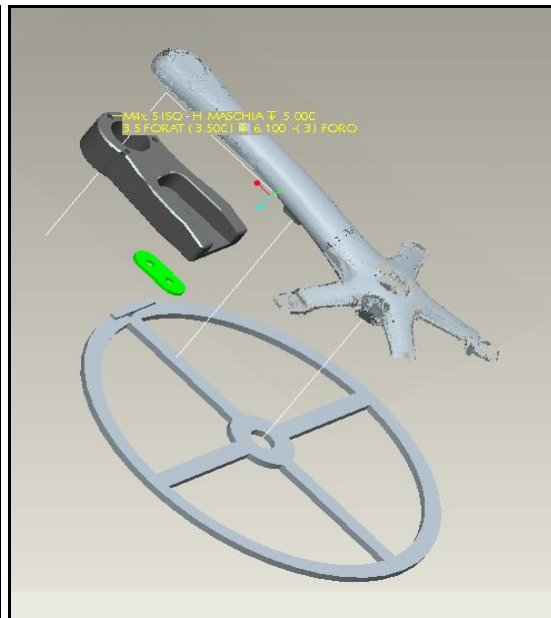


Figura 3.12: Vista esplosa

Per poter ricavare la forma della pedivella sono stati utilizzati gli operatori booleani: queste le feature avanzate permettono di manipolare i volumi delle parti, sommandoli o sottraendoli. Con un processo di sottrazione tra le due parti assemblate, Figura 3.13, è stato possibile ricavare la geometria finale della pedivella, Figura 3.14.

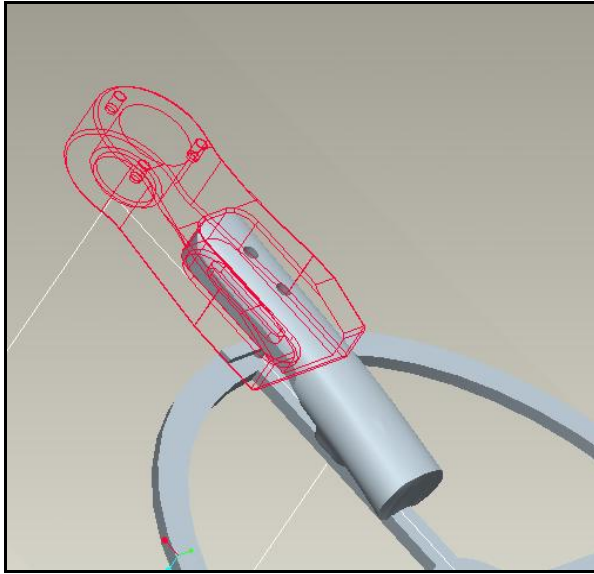


Figura 3.13 Parti assemblate

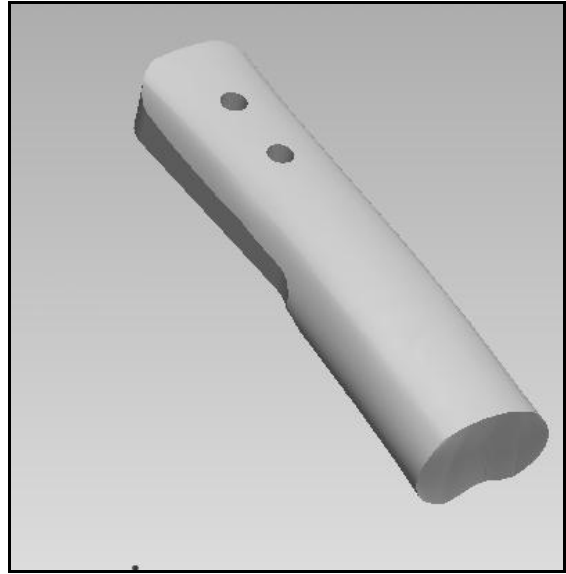


Figura 3.14 Materiale asportato

3.1.6 LAVORAZIONI MECCANICHE

Le lavorazioni meccaniche sui pezzi sono state effettuate nell'officina meccanica presente nel Dipartimento di Ingegneria Industriale. Una pedivella integra è stata posizionata sul centro di lavoro a controllo numerico ed è stato ricavato il profilo finale del pezzo per asportazione di materiale, Figura 3.15. L'attacco pedale e la placchetta sono stati ricavati dal pieno e assemblati con il corpo pedale, Figura 3.16.



Figura 3.15: Profilo pedivella



Figura 3.16: Attacco assemblato con il pedale

3.2 PEDALE SINISTRO

Il pedale sinistro non era funzionante, si è pertanto provveduto all'estrazione del perno per una valutazione del suo stato: rimuovendo il potenziometro, smontando la ghiera di serraggio e togliendo il connettore dalla scatola. Successivamente il perno è stato estratto e, non essendo possibile la riparazione, è stato sostituito con un altro estensimetrato e funzionante, Figura 3.17.

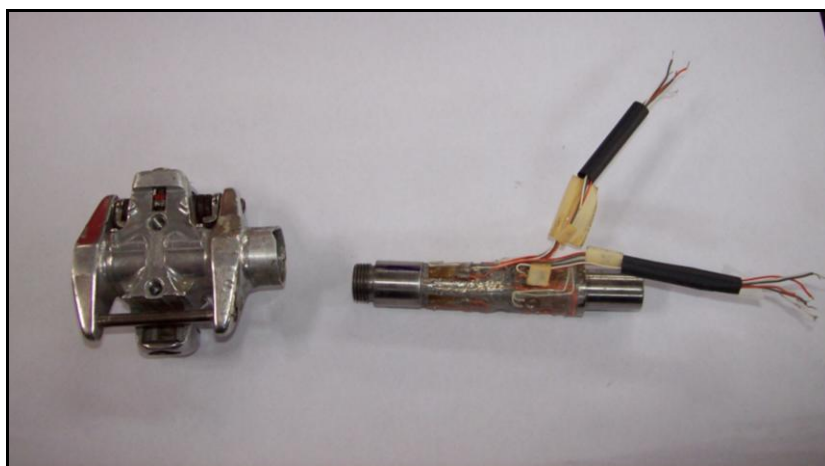


Figura 3.17: Nuovo perno e carcassa pedale

Dopo aver riposizionato il perno nel pedale, ogni collegamento del ponte al connettore è stato rifatto secondo lo schema riportato in Tabella 3.1 e seguendo la numerazione di Figura 3.18.

Ponte	CH	V	+	-	G
PNL	3	ARANCIO <input type="checkbox"/>	BIANCO <input type="checkbox"/>	BIANCO <input type="checkbox"/>	GRIGIO <input type="checkbox"/>
Pin		2	3	4	5
PTL	4	ARANCIO <input type="checkbox"/>	BIANCO <input type="checkbox"/>	BIANCO <input type="checkbox"/>	GRIGIO <input type="checkbox"/>
Pin		11	12	14	15

Tabella3.1: Collegamenti del ponte di Whetastone

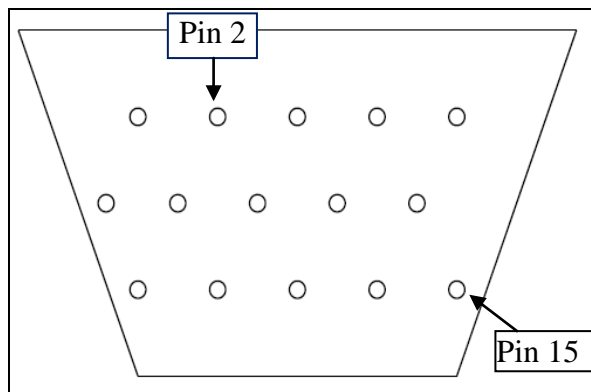


Figura 3.18: Numerazione connettore

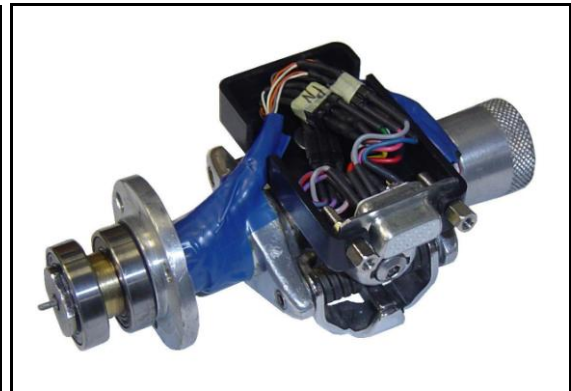


Figura 3.19: Pedale assemblato

Fissato il connettore sulla scatola, si è provveduto al montaggio della ghiera di bloccaggio, all'inserimento del potenziometro e dei cuscinetti, Figura 3.19. Il pedale è stato poi montato nella pedivella Figura 3.20.



Figura 3.20: Pedale sinistro assemblato

3.3 CABLAGGIO CAVO

I pedali per poter funzionare devono essere alimentati. La tensione di alimentazione viene fornita dal pocket EMG che funziona anche da acquirente, misurando l'entità dello sbilanciamento del ponte a seguito dell'applicazione delle forze. Per collegare il connettore

del pedale con la scatola di amplificazione, è stato utilizzato un cavo multipolare con caratteristiche tali da essere flessibile e resistente. Su ogni pedale è stato impiegato un cavo schermato con un numero di conduttori sufficienti almeno per due canali. Le estremità dei conduttori relativi ai due pedali sono state collegate alle spine seriali da 15 Pin ciascuna secondo lo schema riportato in Tabella 3.2, quelle rivolte verso la scatola di amplificazione fissate ad un'unica spina a 25 Pin.

COLLEGAMENTO SPINA15 PIN SERIALE DEL PEDALE CON MORSETTIERA 25 PIN				
Spazio bianco assenza di collegamento				
PEDALE DX			SCATOLA AMPLIFICAZIONE	
numero del pin spina seriale 15	Convenzione	Forza	Canale	numero del morsetto spina da 25
1		-	-	
2	V			9
3	+	PNR	C1	10
4	-			11
5	G			12
6				
7				
8				
9				
10				
11	V	PTR	C2	13
12	+			14
13				
14	-	PTR	C2	15
15	G			16
PEDALE SX			SCATOLA AMPLIFICAZIONE	
numero del pin spina seriale 15	Convenzione	Forza	Canale	numero del morsetto spina da 25
1				
2	V			17
3	+	PNL	C3	18
4	-			19
5	G			20
6				
7				
8				
9				
10				
11	V	PTL	C4	22
12	+			23
13				
14	-	PTL	C4	24
15	G			25

Tabella 3.2: Schema collegamenti cavo

CAPITOLO 4

TARATURA DEI PEDALI

Nel presente capitolo si riportano le attività di taratura di un elemento estensimetrato. Si descrivono le operazioni seguite durante la taratura dei pedali e tutte le operazioni che permettono di ottenere le costanti di proporzionalità.

4.1 LA TARATURA

Per taratura di un componente estensimetrato si intende definirne le caratteristiche statiche, ponendolo in un ambiente controllato. Variando un solo ingresso alla volta è possibile misurare gli effetti che questo provoca sul segnale di uscita. Così facendo si riesce a determinare la correlazione esistente tra il sistema di carico (N) e i segnali rilevati dai vari canali (mV). In una cella di carico, si pongono gli estensimetri in modo che la loro orientazione coincida con la direzione di applicazione di una sola forza, così che siano sensibili solo ad essa. In questo caso, la relazione che lega la forza applicata alla deformazione misurata è lineare e la sensibilità dell'estensimetro al carico è rappresentabile con un'unica costante. Nel caso della cella di carico del pedale agiscono contemporaneamente due forze, PN e PT, allora si fa in modo di misurare la sensibilità dei due canali per ognuna delle forze applicate: dato il vettore dei carichi statici applicati al sistema, si vuole determinare la matrice di sensibilità costituita dalle costanti di proporzionalità che legano tale vettore agli sbilanciamenti rilevati dal ponte di Wheatstone. La relazione che lega la matrice di sensibilità con i carichi applicati ed i segnali in uscita è data dalla seguente equazione matriciale, che può essere così interpretata: il segnale rilevato dal ponte estensimetrico dipende dal prodotto tra il modulo del carico applicato in una data direzione ed il coefficiente di sensibilità del canale in quella direzione.

$$\{\Delta V\}_{[mV]} = [S_{[F-mV]}] \{F\}_{[N]}$$

Nel caso in cui una cella di carico sia sensibile a forze in un'unica direzione, l'equazione matriciale sopra scritta diventa una semplice equazione lineare, dove ad uno sbilanciamento corrisponde l'unica forza del sistema; nel caso invece di una cella che senta sistemi di forze multiassiali, l'equazione è matriciale. Poiché abbiamo una cella multicomponente diretta, in fase di taratura si vuole conoscere la sensibilità di ogni canale per ognuna delle forze del vettore dei carichi, si ipotizza che valga la sovrapposizione degli effetti per la linearità del sistema. Nel caso di ciascun pedale si hanno due grandezze di forza in ingresso a cui corrisponderanno due canali in uscita per lo sbilanciamento.

$$\begin{Bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_1 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ F_2 \end{Bmatrix}$$

I coefficienti s_{ij} vengono determinati sollecitando la cella con una singola componente del vettore di forza $\{F\}$ per volta e misurando il corrispondente vettore in uscita $\{\Delta V\}$. Eseguendo una regressione lineare tra ingresso applicato e ogni singola componente del vettore in uscita si determina la colonna dei coefficienti s_{ij} .

Nel caso ideale si dovrebbero ottenere dei coefficienti non nulli lungo la diagonale, relativi ai soli canali sensibili alla componente di forza applicata.

Invertendo la matrice di sensibilità si ricava quella di taratura e le relative costanti c_{ij} ,

$$[C] = [S]^{-1}$$

in questo modo è possibile determinare il vettore delle forze noto quello degli sbilanciamenti.

$$\{F\}_{[N]} = [C]_{[mV-F]} \{\Delta V\}_{[mV]}$$

4.2 PROGETTO DEL BANCO DI TARATURA

Ai fini della taratura non si era ritenuto opportuno estrarre il perno dal pedale in quanto si correva il rischio di danneggiare la cella, e non era neppure possibile individuare un punto di applicazione della forza sulla superficie di contatto, senza che il pedale ruotasse attorno al proprio asse.

La prima parte del lavoro ha preso in considerazione questo aspetto: è stata realizzata una struttura da fissare al pedale con una geometria tale che fosse possibile allineare la retta di azione del carico con il piano di simmetria del perno. In questo modo si sono potuti applicare i carichi statici PN e PT sul pedale in corrispondenza del punto di applicazione delle forze (FAP).



Figura 4.1: Profilo sezione quadrata

La struttura, inoltre, doveva essere in grado di reggere i carichi assegnati e facile da montare; si configurava, Figura 4.1, come un profilo in acciaio a sezione quadrata che presentava una finestra laterale per il collegamento del cavo di alimentazione con il pedale e delle asole per fissare le viti ad occhio che consentivano di agganciare il cordino in acciaio e regolarla loro posizione

Per vincolare il la scarpa al pedale è utilizzato un sistema di bloccaggio rapido. Composto da una placchetta metallica che va ad innestarsi in una guida. La placchetta è tenuta in posizione da un gancio collegato ad una molla precaricata. In questo modo è garantito il contatto continuo tra pedale e scarpa, permettendo la trasmissione delle forze. La placchetta viene sganciata attraverso una extrarotazione del piede.

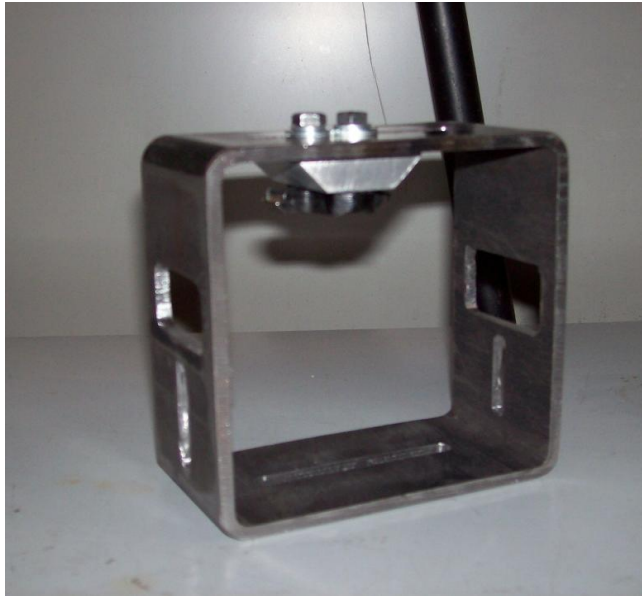


Figura 4.2: Placchetta fissata al profilo

Si è utilizzato lo stesso sistema per fissare il profilo sul pedale e trasmettere i carichi attraverso la placchetta. Tra i due elementi è stato interposto un distanziale che permettesse il posizionamento e il centraggio, Figura 4.2. Con questa soluzione è stato possibile trasmettere i carichi nelle due direzioni: normale (PN) alla superficie di contatto e tangenziale (PT).

L'asola del profilo ha permesso di spostare la vite fino ad allineare la retta di azione del carico con il piano di simmetria del perno per ognuna delle due direzioni, impedendo che il pezzo potesse ruotare. Si è così ottenuto il disaccoppiamento delle forze, aumentando la sensibilità del canale nella direzione di prova,.

La seconda parte del lavoro ha riguardato la scelta della struttura che permettesse di vincolare il pedale e fosse sufficientemente rigida. Si è utilizzata una torre fissata al basamento del banco prova, all'estremità è stata posizionata una piastra per bloccare il pedale. Per sostenere le masse e quindi le forze applicate, si è utilizzato un porta pesi collegato tramite un cordino metallico alle viti ad anello.

Si è provveduto a collegare il cavo dal pedale alla scatola di amplificazione e infine al pocket EMG, si è rilevata la tensione di alimentazione di ciascun ponte ed azzerato lo sbilanciamento prima di partire con la taratura.

4.3 RAMPE DI CARICO

Si descrive in dettaglio la procedura di taratura eseguita sul pedale sinistro nelle due direzioni. Si è sollecitato il trasduttore con una singola componente del vettore $\{F\}$ per volta e per ciascuna direzione di carico, la prova è stata ripetuta due volte eseguendo una

rampa di carico e scarico per avere una misura della dispersione dei dati raccolti, i valori ottenuti sono stati poi mediati. La procedura è stata ripetuta con le stesse fasi anche per il destro.

PEDALE SINISTRO-L

- Carico in direzione PN,

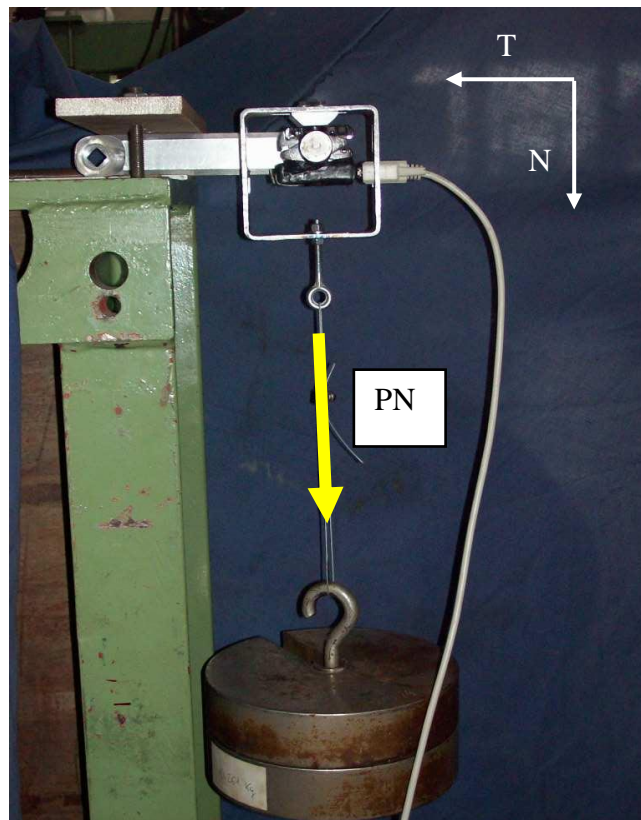


Figura 4.3: Taratura del pedale applicando il carico in direzione N

All'inizio della prova si è verificato l'allineamento del cordino con l'asta porta pesi e si è iniziata la prova. Ad ogni aumento o diminuzione del carico si attendevano alcuni secondi affinché lo stato di deformazione del perno assumesse un valore costante. Sono state eseguite due prove per ciascuna direzione.

Nel pedale sinistro, a seguito dell'applicazione di un carico, si rileva uno sbilanciamento dei ponti estensimetrici relativi ai canali 3 e 4. In Tabella 4.1 viene indicato, per ogni passo

della rampa di carico, il valore del carico applicato e gli sbilanciamenti rilevati nei due canali.

Di seguito si riportano i diagrammi relativi alla prova evidenziando le rette d'interpolazione lineare e i relativi coefficienti di correlazione, Figura 4.4.

Rampa di carico	Massa [kg]	PNL [N]	Ch3 [mV/V]	Ch4 [mV/V]
1	0	0	0,01190	0,00595
2	10,3	100,94	0,08333	0,00496
3	20,575	201,635	0,15575	0,00099
4	30,85	302,33	0,22817	-0,00298
5	41,125	403,025	0,29960	-0,00694
6	51,4	503,72	0,37500	-0,01091
7	60,6	593,88	0,43948	-0,01190
8	51,4	503,72	0,37401	-0,00992
9	41,125	403,025	0,29861	-0,00595
10	30,85	302,33	0,22718	-0,00198
11	20,575	201,635	0,15476	0,00198
12	10,3	100,94	0,08135	0,00496
13	0	0	0,01091	0,00595

Tabella 4.1 rampe di carico PNL

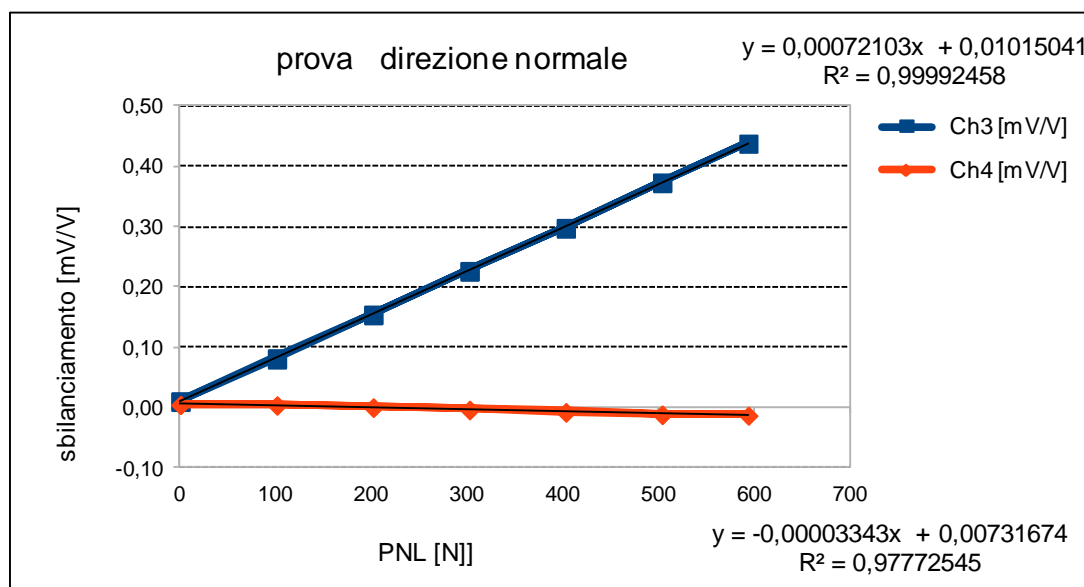


Figura 4.4: Rette di interpolazione per carico PNL

I risultati ottenuti dai diagrammi sono i seguenti, il coefficienti di sensibilità ottenuti come pendenza m della retta di interpolazione dei dati sperimentali e i coefficienti di correlazione R per indicare la linearità.

Coefficiente di sensibilità S_{11} 0,00072103 [mV/VN]

Coefficiente di correlazione per S_{11} 0,9999

Coefficiente di sensibilità S_{21} -0,00003343 [mV/VN]

Coefficiente di correlazione per S_{21} 0,9777

- Carico in direzione PT.

Per effettuare la taratura nella direzione tangenziale è stato sufficiente ruotare il pedale di 90 gradi, e riposizionare la vite ad anello. La procedura seguita è identica a quella usata per la direzione normale. Di seguito vengono riportati in Tabella 4.2 i risultati delle rampe di carico e in Figura 4.5 i diagrammi relativi alla prova.

Rampa di carico	Massa [kg]	PTL [N]	Ch3 [mV/V]	Ch4 [mV/V]
1	0	0	0,00000	-0,00298
2	10,3	100,94	0,00000	0,06250
3	20,575	201,635	0,00099	0,12996
4	30,85	302,33	0,00198	0,19246
5	41,125	403,025	0,00198	0,25694
6	51,4	503,72	0,00298	0,32143
7	41,125	403,025	0,00198	0,25694
8	30,85	302,33	0,00099	0,19246
9	20,575	201,635	0,00099	0,12996
10	10,3	100,94	-0,00099	0,06349
11	0	0	0,00099	-0,00198

Tabella 4.2 rampe di carico PTL

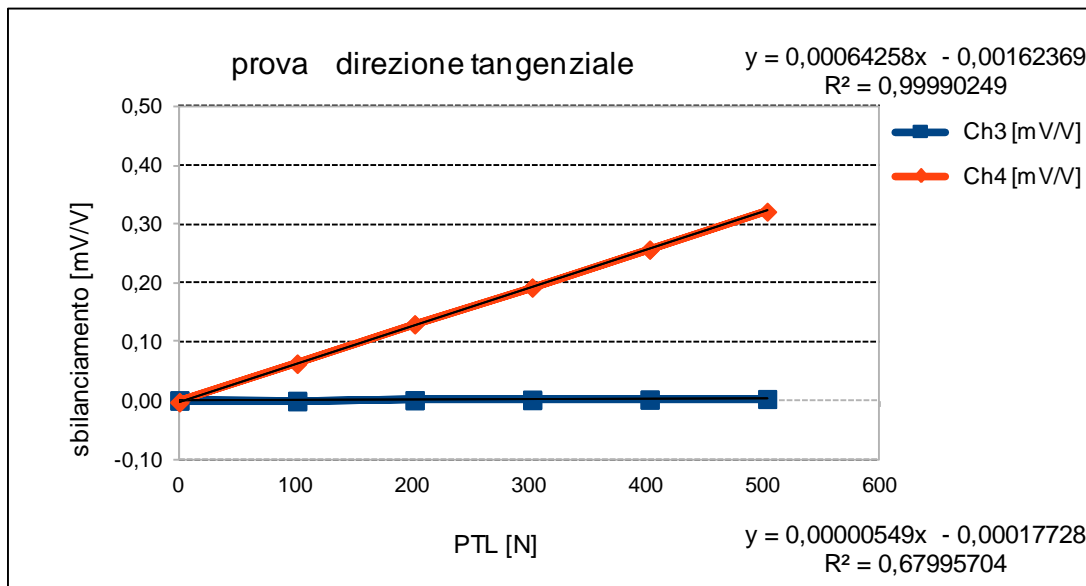


Figura 4.5 Rette di interpolazione per carico PTL

I coefficienti

Coefficiente di sensibilità S_{22} 0,00064258 [mV/VN]

Coefficiente di correlazione per S_{22} 0,9999

Coefficiente di sensibilità S_{12} 0,00000549 [mV/VN]

Coefficiente di correlazione per S_{12} 0,6799

Operando una media dei coefficienti ottenuti dalle due rampe di carico, sono stati determinati i termini s_{ij} della matrice di sensibilità S ,

La matrice di sensibilità S risulta ;

0,0007223000	0,0000047000
-0,0000323900	0,0006425850

che invertita diventa $C = S^{-1}$

1384,01	-10,12
69,76	1555,70

Permettendo di determinare i carichi applicati noti gli sbilanciamenti dei canali.

$$\begin{Bmatrix} PN \\ PT \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1384 & -10 \\ 69 & 1555 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Ch_3 \\ Ch_4 \end{Bmatrix}$$

PEDALE DESTRO – R

La procedura seguita è identica a quella usata nel pedale sinistro per entrambe le direzioni di carico. Nel pedale destro, si rileva uno sbilanciamento dei ponti estensimetrici relativi ai canali 1 e 2

- Carico in direzione PN

Di seguito vengono riportati, in Tabella 4.3, i risultati delle rampe di carico e in Figura 4.6 i diagrammi relativi alla prova.

Rampa di carico	Massa [kg]	PNR [N]	Ch1 [mV/V]	Ch2 [mV/V]
1	0	0	0,01194	0,01294
2	10,3	100,940	0,07761	0,01393
3	20,575	201,635	0,14328	0,01493
4	30,85	302,330	0,20896	0,01493
5	41,125	403,025	0,26965	0,01294
6	51,4	503,720	0,33831	0,01493
7	60,6	593,880	0,39104	0,01592
8	51,4	503,720	0,33930	0,01692
9	41,125	403,025	0,26866	0,01294
10	30,85	302,330	0,20697	0,01493
11	20,575	201,635	0,14129	0,01493
12	10,3	100,940	0,07761	0,01493
13	0	0	0,01194	0,01592

Tabella 4.3 rampe di carico PNR

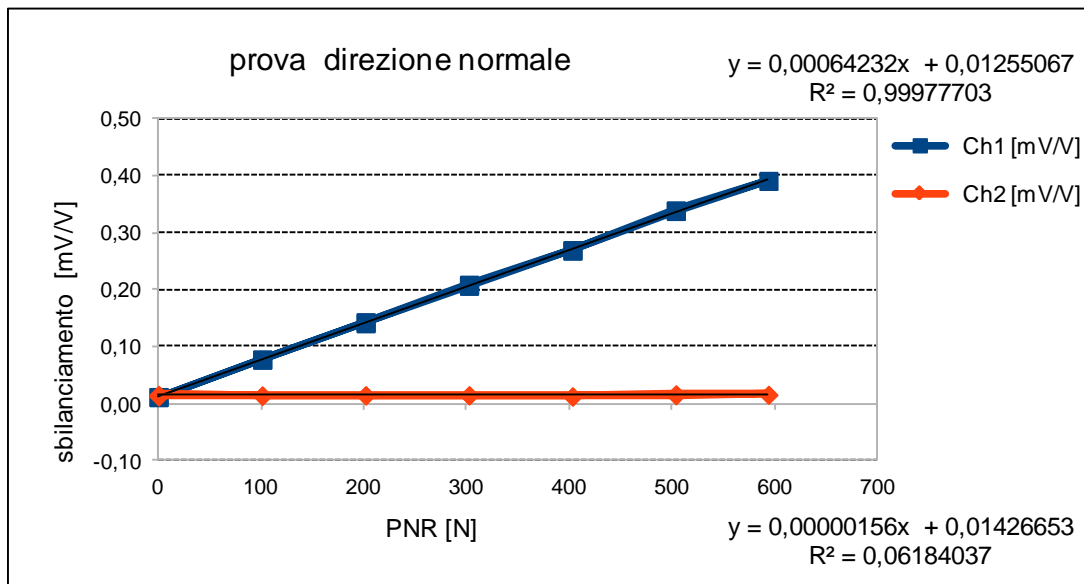


Figura 4.6 Rette di interpolazione per carico PNR

Coefficiente di sensibilità S_{11} 0,00064232 [mV/VN]

Coefficiente di correlazione per S_{11} 0,9997

Coefficiente di sensibilità S_{21} 0,00000156 [mV/VN]

Coefficiente di correlazione per S_{21} 0,06184

- Carico in direzione PT

vengono riportati, in Tabella 4.4, i risultati delle rampe di carico e in Figura 4.7 i diagrammi relativi alla prova

Rampa di carico	Massa [kg]	PTR [N]	Ch1 [mV/V]	Ch2 [mV/V]
1	0	0	0,00995	0,01294
2	10,3	100,94	0,01095	0,06866
3	20,575	201,635	0,01095	0,12438
4	30,85	302,33	0,01095	0,18010
5	41,125	403,025	0,01095	0,23085
6	51,4	503,72	0,00995	0,28458
7	41,125	403,025	0,01095	0,23085
8	30,85	302,33	0,01095	0,18010
9	20,575	201,635	0,01194	0,12438
10	10,3	100,94	0,01294	0,07065
11	0	0	0,01393	0,01990

Tabella 4.4 rampe di carico PTR

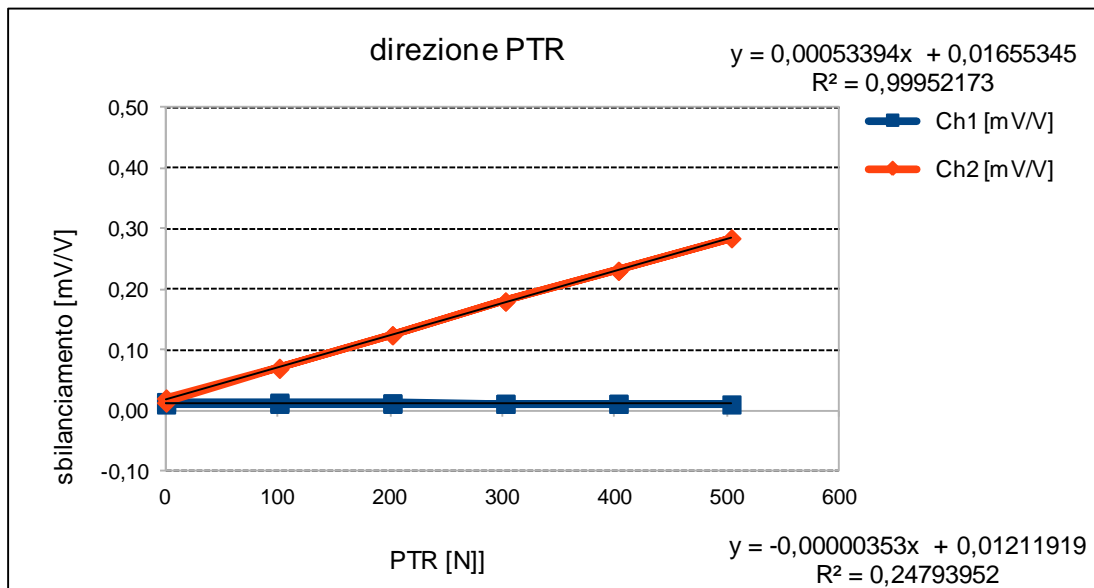


Figura 4.6 Rette di interpolazione per carico PTR

I coefficienti

Coefficiente di sensibilità S_{22} 0,00053394 [mV/VN]

Coefficiente di correlazione per S_{22} 0,9995

Coefficiente di sensibilità S_{12} -0,00000353 [mV/VN]

Coefficiente di correlazione per S_{12} 0,2479

Con la stessa procedura seguita per il pedale sinistro si ottengono

La matrice di sensibilità \mathbf{S} risulta ;

0,000642320	-0,000003530
0,000001560	0,000533394

che invertita diventa $\mathbf{C} = \mathbf{S}^{-1}$

1556,83	10,30
-4,55	1874,76

Permettendo di determinare i carichi applicati noti gli sbilanciamenti dei canali

$$\begin{Bmatrix} PN \\ PT \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1556 & 10 \\ -4 & 1874 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Ch_1 \\ Ch_2 \end{Bmatrix}$$

A seguito della procedura sono state tratte le seguenti considerazioni:

- Assenza di effetti di isteresi dati dalla mancanza di deformazione residua dopo lo scarico;
- Linearità di comportamento nella direzione di prova al variare del carico;
- L'effetto della sensibilità nella direzione ortogonale a quella di applicazione della forza non era trascurabile, essendo influenzata dalla modalità di prova;
- Gli sbilanciamenti rilevati devono essere adimensionalizzati rispetto alla tensione di alimentazione del ponte;

CAPITOLO 5

ALLESTIMENTO DELLE PROVE DI PEDALATA

Nella prima parte di questo capitolo vengono descritte le operazioni svolte per allestire il cicloergometro: revisione delle parti meccaniche ed elettriche, montaggio dei pedali e dell'apparecchiatura di acquisizione, installazione del freno elettrico (rulli), posizionamento dei marker. Nella seconda, le fasi preparatorie allo svolgimento della prova: verifica del funzionamento dei rulli, posizionamento del ciclista, applicazione dei marker al cicloergometro e al ciclista, preparazione dei protocolli. Infine vengono definite le modalità di prova

5.1 IL CICLOERGOMETRO

Il cicloergometro, chiamato anche “bicicletta a geometria variabile”, è una apparecchiatura che replica il posizionamento di una persona sulla bicicletta. Viene utilizzato sia in campo costruttivo, permettendo di definire le misure del telaio, dei componenti e massimizzando le prestazioni dei materiali impiegati, che biomeccanico, andando ad analizzare il gesto atletico ed ottimizzando la posizione in bicicletta. In questo modo si migliora il rendimento della pedalata esprimendo al meglio la potenza prodotta. La caratteristica fondamentale risiede nel fatto che è possibile variare la posizione dei vari elementi che lo compongono consentendo un elevato numero di combinazioni. L'utilizzo di attuatori elettromeccanici ne permette una regolazione in continuo durante la pedalata.

5.1.1 REVISIONE ELETTROMECCANICA

Il cicloergometro, Figura 5.1, è composto da quattro elementi mobili azionati da servomotori e gestiti dal software. Vengono definiti con i seguenti nomi:

1. Posizione manubrio;
2. Tubo inclinato;
3. Tubo reggisella;
4. Avanzamento sella;

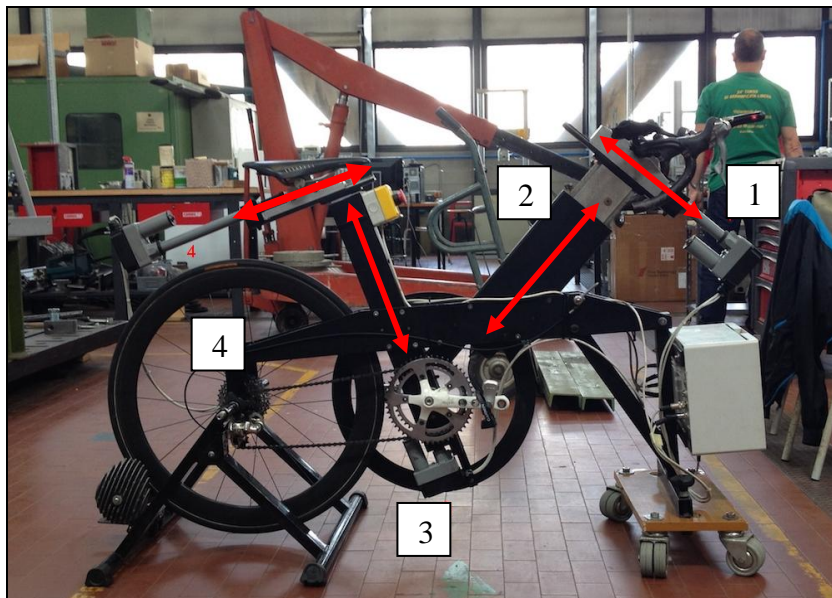


Figura 5.1: Definizione degli elementi e spostamenti ammessi

Ciascuna parte mobile possiede un grado di libertà lungo la direzione di scorrimento ed è fissata ad un servomotore che ne controlla l'avanzamento o l'arretramento. Si è controllato che i componenti quali ruota, manubrio, sella, sostegni dei servomotori fossero fissati correttamente al telaio. Infine si è proceduto con la revisione delle guide, valutando il gioco presente tra i profili, lubrificando le due parti e sostituendo le viti di fissaggio. Anche l'impianto elettrico è stato controllato, verificando il funzionamento dei servomotori, delle prese e dei collegamenti elettrici.

5.1.2 PREPARAZIONE DEL CICLOERGOMETRO

Per svolgere la prova di acquisizione è stato necessario allestire sul cicloergometro, Figura 5.2, le seguenti strumentazioni per la lettura dei segnali:

- Pedale estensimetrato sinistro;
- Pedale estensimetrato destro;
- Cavo seriale di collegamento
- Scatola di amplificazione;
- Acquisitore portatile pocket EMG;
- Freno elettrico (rulli):

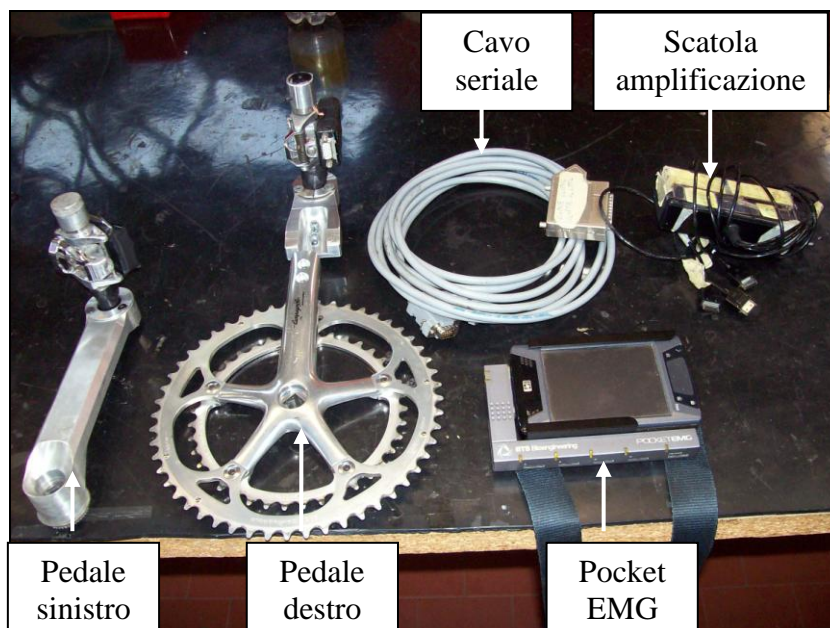


Figura 5.2: Strumentazione utilizzata

Prima del montaggio dei pedali si è posizionato, a filo con la scatola dei connettori, un profilo sagomato in alluminio reso necessario per poter fissare i marker, Figura 5.3. La scatola di amplificazione, collegata al cavo seriale, è stata fissata al supporto posteriore del servomotore, Figura 5.4.



Figura 5.3: Profili fissati ai pedali

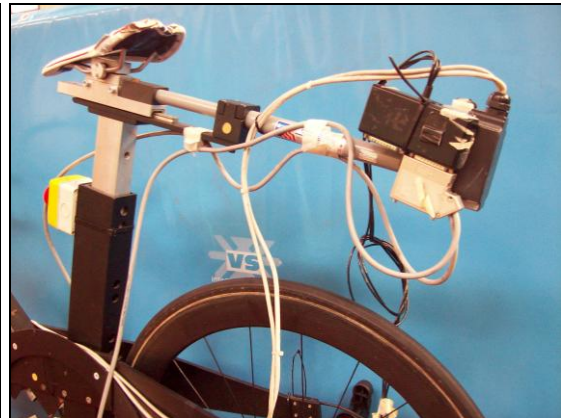


Figura 5.4: Posizione scatola

Posizionato il rullo sul cicloergometro, si è proceduto a posizionare le pedivelle e a collegare ai pedali i cavi seriale, Figura 5.5. Sono stati applicati tre marker sul coperchio del servomotore per individuare dei punti di riferimento, Figura 5.6.



Figura 5.5 Posizionamento rulli e pedivelle



Figura 5.6 Disposizione marker locali

Su ogni pedale sono stati fissati tre marker, due alle estremità del profilo sagomato e uno sul tappo del potenziometro in corrispondenza dell'asse di rotazione. Un quarto in corrispondenza della vite di bloccaggio della pedivella e allineato con l'asse del movimento centrale, Figura 5.7. Attraverso il sistema di visione è stato possibile associare al movimento dei marker quello della pedivella e del pedale durante il ciclo, determinando le caratteristiche del moto come gli angoli θ_c e θ_p , le velocità angolari, le traiettorie, Figura 5.8.

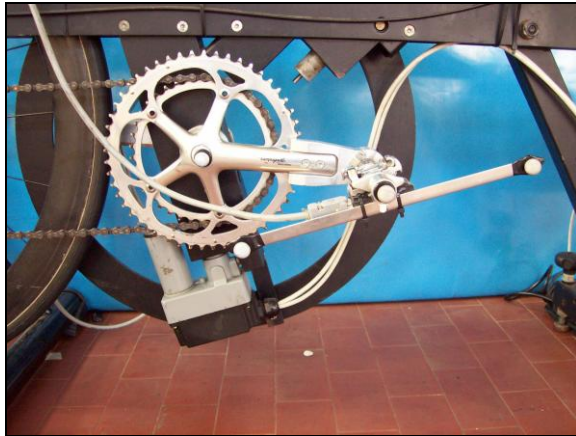


Figura 5.7: Posizionamento marker

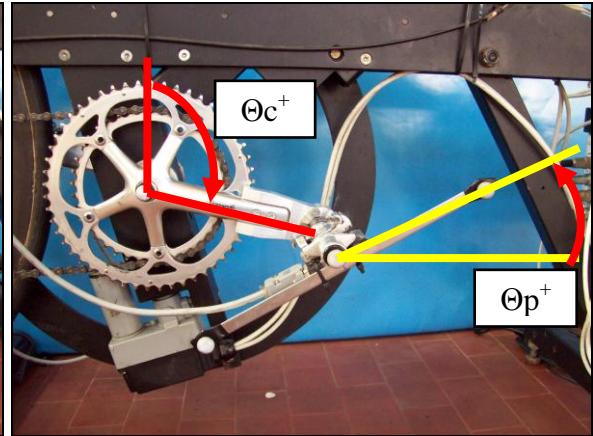


Figura 5.8: Individuazione degli angoli

5.2 ALLESTIMENTO DELLA PROVA

Nella prima parte del paragrafo viene brevemente descritto il funzionamento delle strumentazioni installate sul cicloergometro: del sistema di gestione degli attuatori e del software del rullo. Successivamente viene descritta la procedura di posizionamento dei marker e fissate le condizioni di prova.

5.2.1 POSIZIONAMENTO IN SELLA

Per svolgere la prova è stato necessario far salire l'atleta sul cicloergometro con indossato l'abbigliamento tecnico idoneo: scarpe con attacchi da MTB per potersi agganciare ai pedali e pantaloncini imbottiti. Successivamente si è provveduto a regolare il posizionamento delle varie parti: altezza e avanzamento sella, distanza manubrio, lunghezza del tubo inclinato, nelle posizioni che risultassero più confortevoli. Attraverso un'interfaccia grafica, Figura 5.9, si sono potute controllare le varie parti del cicloergometro, gestendo direttamente i servomotori. Ciascun modulo permetteva di conoscere lo stato di funzionamento del servomotore, controllando la posizione, la velocità e l'accelerazione, determinando la posizione più confortevole per il ciclista, Figura 5.10. Successivamente è stata definita la posizione ottimale del cavo, ovvero fissato alla gamba del ciclista con una fascia elastica, con tale soluzione si è evitata la possibilità che si

potesse infilare tra la catena e la ruota con il rischio di deteriorarsi e riducendo l'intralcio per la pedalata.

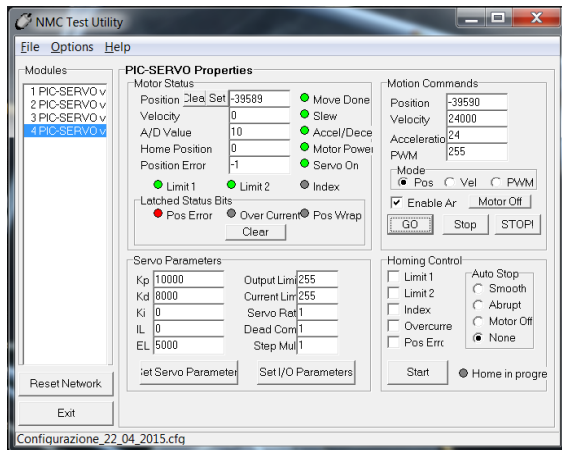


Figura 5.9: Interfaccia del sistema di controllo



Figura 5.10: Posizionamento ciclista

5.2.2 FUNZIONAMENTO RULLI

Il rullo è un'apparecchiatura usata in ambito indoor che simula le condizioni di pedalata che si avrebbero in un'attività all'aperto. Il modello in possesso presso il laboratorio di biomeccanica viene venduto assieme ad un software che permette di gestire l'allenamento. La grande versatilità dell'apparecchiatura permette di scegliere tra le tante prove presenti nel database anche quelle che simulano i percorsi reali. Viene anche data la possibilità all'utente di creare e personalizzare i percorsi per l'allenamento. Vengono brevemente riassunte le caratteristiche:

- Permette di simulare qualsiasi pendenza grazie alla sua unità di resistenza;
- Il software, tenendo conto di tutte le variabili necessarie, calcola la corretta resistenza e indica al rullo di fornirla al ciclista. Il computer si occupa inoltre di mantenere una perfetta corrispondenza tra la distanza percorsa dal ciclista e quella visualizzata sullo schermo;
- Il volano montato permette di ottenere una rotondità di pedalata;

- La frenatura è ottenuta con un freno a polveri magnetiche che variano la loro viscosità in funzione della corrente che le percorre;
- A basse velocità è in grado di fornire centinaia di Watt;
- Precisa simulazione della resistenza della strada, considerando il peso della bici e del ciclista e pendenza del tratto di strada;
- Si possono creare nuove sedute di allenamento definendo i parametri di prova, Figura 5.11;
- Vengono forniti a schermo, Figura 5.12, i dati in tempo reale: distanza dall'inizio della corsa, velocità, frequenza cardiaca, potenza, cadenza di pedalata, pendenza del tratto, tempo dall'inizio della corsa, valori totali e medi delle corse visualizzate;

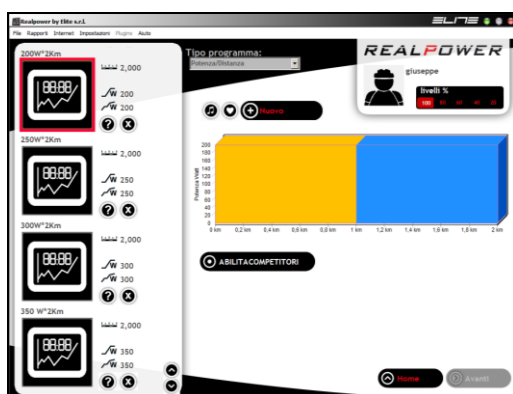


Figura 5.11: Interfaccia definizione prova

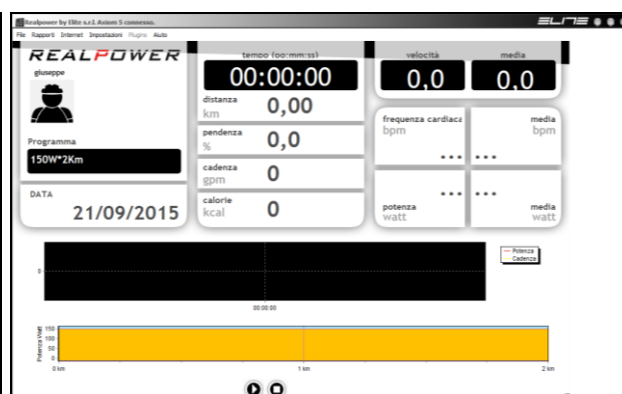


Figura 5.12: Pannello di controllo

5.2.3 APPLICAZIONE DEI MARKER

Si è deciso di integrare alle informazioni ricavabili dall'analisi della pedalata, attraverso il sistema di visione, anche quelle derivanti dalla conoscenza del movimento degli arti. Quindi sono stati applicati dei marker sull'atleta in corrispondenza dei punti anatomici degli arti inferiori e a livello della spalla. Si è proceduto con l'individuazione dei punti sul lato destro, Figura 5.12, poi ripetuti per il sinistro.



Figura 5.12: Disposizione marker

- Vertebra C7;
- Acromion;
- Gran trocantere;
- Epicondilo laterale del femore;
- Testa del perone;
- Malleolo laterale;
- Tallone;
- Quinto metatarso;

Dopo aver definito i punti di reperi, è stato creato un file di modello chiamato “Tracker_BICI” che ha permesso di ricostruire contemporaneamente sia il movimento dei pedali che degli arti inferiori. Il modello è stato diviso in due parti, Figura 5.13, in quella di destra è stata schematizzata la disposizione dei marker associati al cicloergometro, mentre in quella di sinistra dell’atleta. Ogni elemento è stato rinominato per poter essere associato facilmente al marker corrispondente nella fase di ricostruzione del movimento attraverso il programma SMART Tracker.

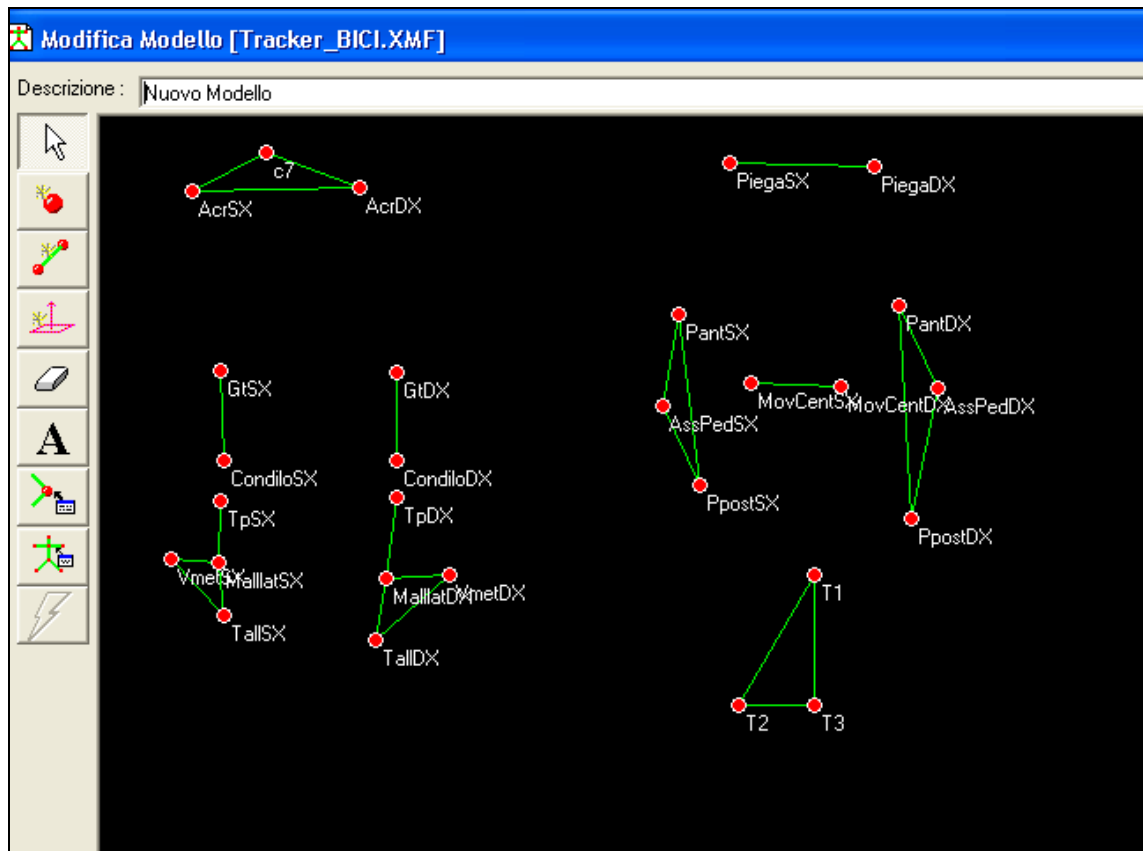


Figura 5.13: Modello di riferimento Traker_BICI

5.3 SVOLGIMENTO PROVE

La prova è stata svolta nel laboratorio di biomeccanica del dipartimento di ingegneria meccanica con le seguenti condizioni:

1. Cinque periodi di pedalata della durata di 60 secondi con diversi livelli di potenza;
2. I livelli scelti sono stati di 150W, 200W, 250W, 300W e 350W, con incrementi di potenza di 50W e mantenuti costanti per la durata della prova;
3. Si è fissato il rapporto di trasmissione tra la corona della pedivella e il pignone della ruota:
4. La prova deve essere eseguita con le modalità di seguito descritte:

- Il ciclista deve essere posizionato sopra il cicloergometro e i cavi fissati adeguatamente alle gambe;
- L'inizio di ciascuna acquisizione deve avvenire con i pedali sganciati;
- Trascorsi alcuni istanti si agganciano i pedali e si inizia a pedalare fino a raggiungere le condizioni di regime, con una velocità costante alla ruota;
- A parametri stazionari si avvia il rullo impostato a potenza costante e si prosegue la prova fino a raggiungere un tempo di 60 secondi e poi viene spento;
- La pedalata prosegue per alcuni secondi fino all'arresto della ruota, i pedali vengono sganciati e si termina l'acquisizione;

CAPITOLO 6

ANALISI DEI DATI

Nel presente capitolo vengono analizzati e discussi i dati sperimentali ricavati dalle cinque prove eseguite nelle modalità indicate nel capitolo precedente. Nella prima parte del capitolo viene descritta la procedura seguita per la ricostruzione del movimento dei marker associati ai pedali e alla pedivella. Nota la cinematica e conoscendo gli sbilanciamenti dei canali è stato possibile determinare le forze e la potenza sviluppate durante la pedalata. Nella seconda parte i dati sperimentali sono analizzati tramite il software excel ed espressi in forma grafica per visualizzare l'andamento delle forze caratteristiche tra le diverse prove.

6.1 ELABORAZIONE DEI SEGNALI

Al termine della prova di pedalata, i dati rilevati dal Poket EMG e dal sistema di visione sono stati archiviati in un unico file. L'operazione successiva è stata quella di ricostruire la posizione dei marker al fine di determinare il movimento del pedale e della pedivella. Figura 6.1, ed associarli allo sbilanciamento.

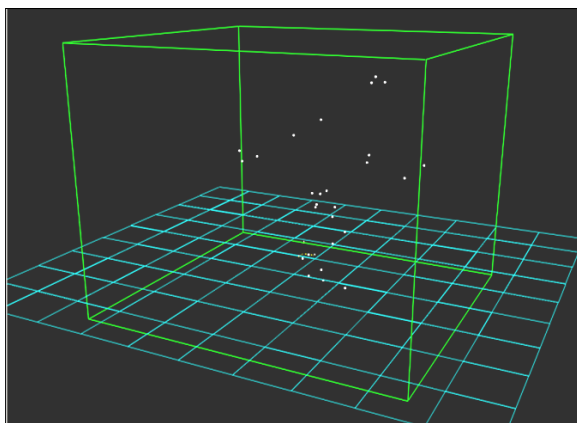


Figura 6: Marker acquisiti

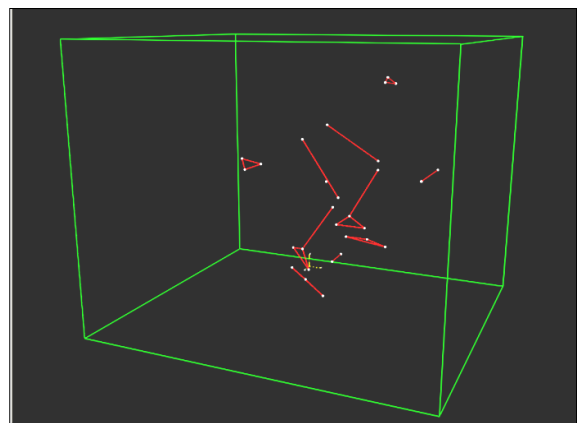


Figura 6.2:Modello tridimensionale

Utilizzando l'applicazione SMART Tracker è stata definita tridimensionalmente la struttura dei pedali e dell'atleta accoppiando ciascun marker al modello e poi ricostruite le traiettorie dei marker sincronizzando i dati acquisiti, Figura 6.2. Il passo successivo è stato caricare il protocollo e utilizzare il programma SMART analyzer per l'analisi dati. Sono state fatte delle considerazioni preliminari:

- La durata complessiva di ciascuna prova era di circa un minuto;
- Sono stati considerati i dati all'interno di una finestra temporale tra i trenta e quaranta secondi in condizioni di velocità costante;
- I cicli di pedalata considerati sono stati quattro;

Osservando il grafico di Figura 6.3 che illustra nei vari istanti del ciclo di pedalata lo spostamento in direzione verticale Y dell'asse pedale, è stato possibile individuare il PMS, punto morto superiore, definito come il punto in corrispondenza del quale l'angolo di pedivella è nullo ed è massima la distanza dal suolo; mentre il PMI, punto morto inferiore, è l'angolo pari a mezzo angolo giro con la distanza dal suolo minima. L'ampiezza dell'oscillazione tra il PMS e il PMI era uguale al doppio della lunghezza della pedivella.

PMS	$\theta_c = 0$ [deg]	$y = 300$ [mm]
PMI	$\theta_c = 180$ [deg]	$y = -50$ [mm]

Analizzando i primi istanti della prova, si è osservata una corrispondenza tra la posizione dell'asse del pedale e il suo sbilanciamento che è iniziato a variare non appena il piede è stato agganciato, Figura 6.4. Gli spostamenti erano espressi in funzione del tempo e la distanza tra ciascun picco rappresentava il periodo impiegato per effettuare una rotazione completa della pedivella; individuati quattro cicli all'interno della finestra temporale è stato possibile determinare il tempo medio della prova. Gli spostamenti e gli sbilanciamenti sono stati normalizzati rispetto al ciclo di pedalata, così da poter analizzare la loro variazione non più in funzione del tempo ma dell'angolo di pedivella.

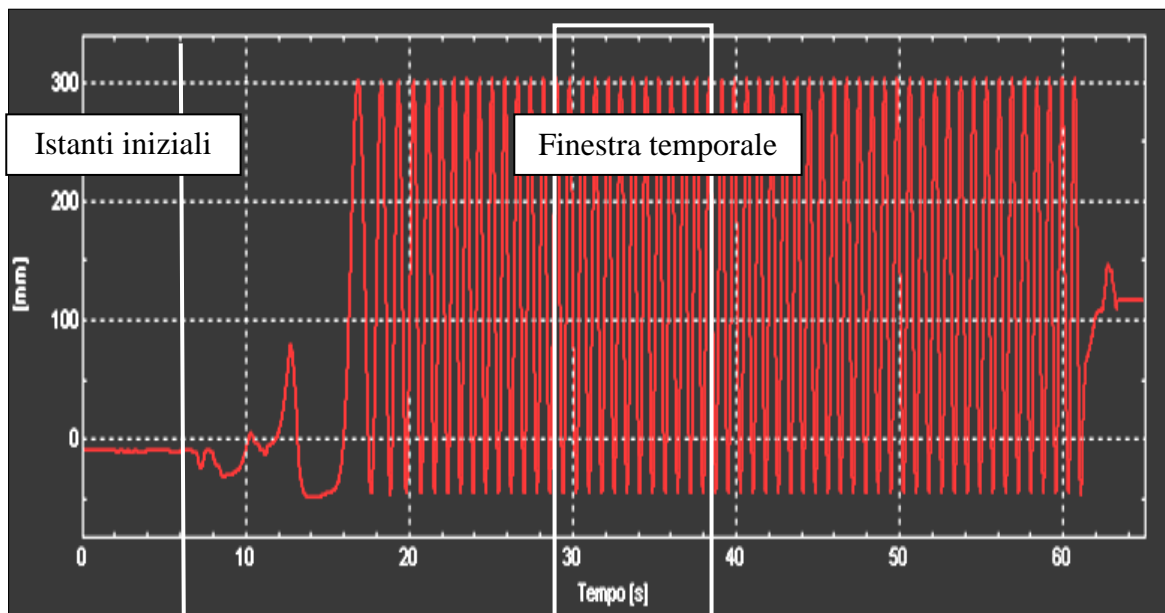


Figura 6.3: Spostamento del perno pedale in funzione del tempo

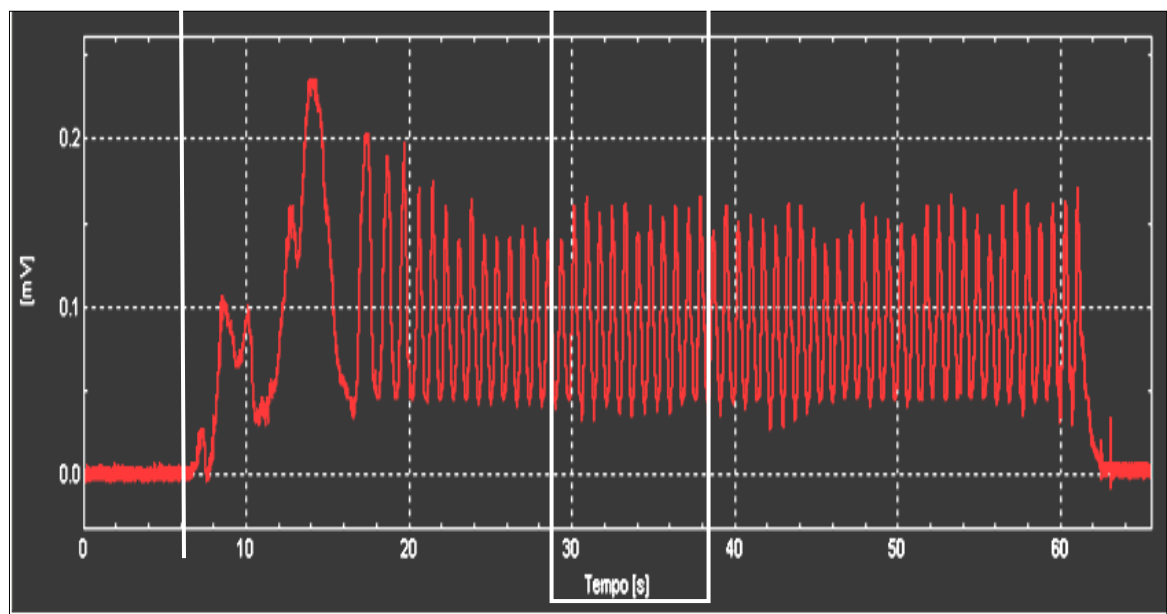


Figura 6.4: Sbilanciamento del ponte in funzione del tempo

Si è potuto diagrammare la variazione dello sbilanciamento di ciascun canale in un unico grafico in funzione del percentuale ciclo ovvero della posizione angolare della pedivella. Infatti al 100% del ciclo corrispondono in proporzione 360 gradi di rotazione, Figura 6.5.

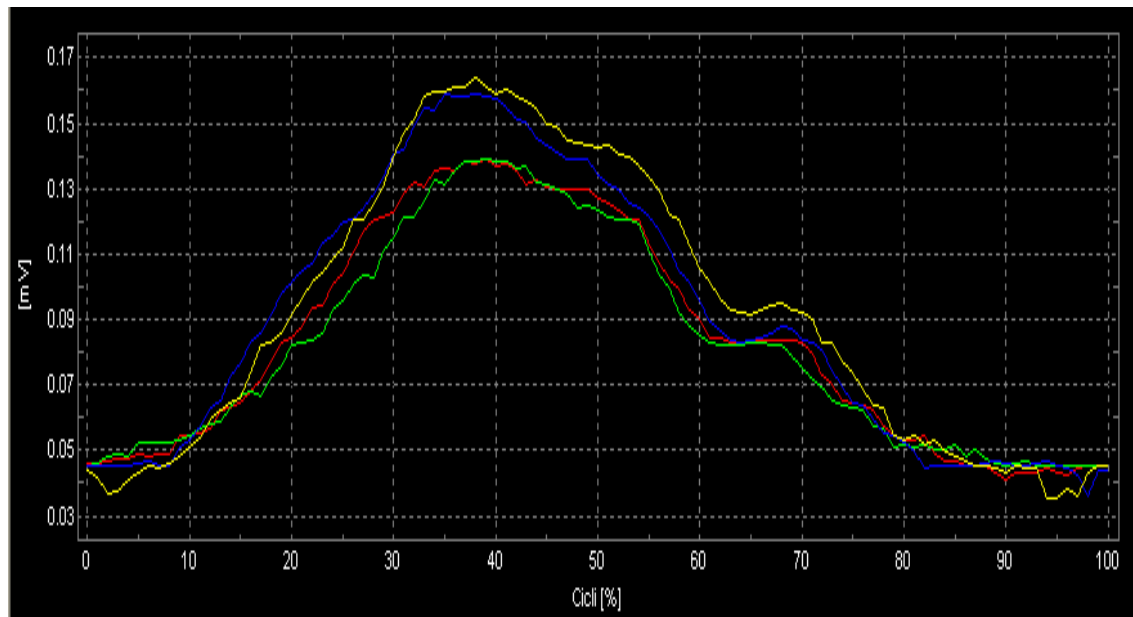


Figura 6.5: Sbilanciamento in funzione dell'angolo di pedivella

Noti gli andamenti, si è determinata una curva che rappresentasse lo sbilanciamento medio delle quattro curve rispetto all'angolo di pedivella, Figura 6.6.

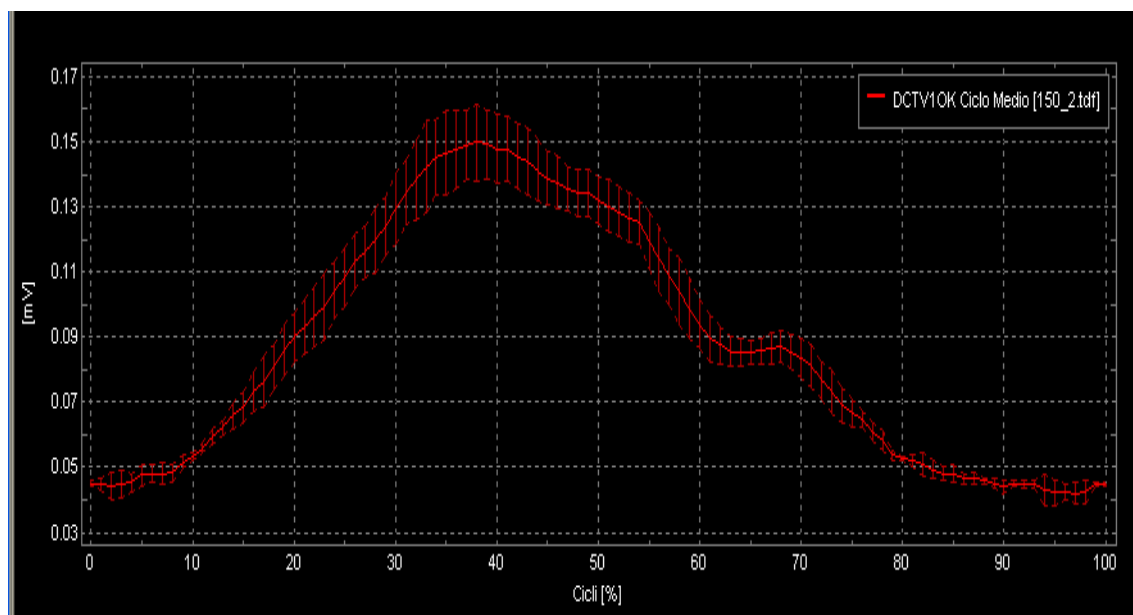


Figura 6.6: Sbilanciamento medio

Le forze misurate dal pedale sono state calcolate attraverso una matrice di conversione derivata direttamente dalle tarature effettuate sul pedale. Nel caso del pedale destro è:

$$\begin{Bmatrix} PN \\ PT \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1556 & 10 \\ -4 & 1874 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Ch_1 \\ Ch_2 \end{Bmatrix}$$

per quello sinistro

$$\begin{Bmatrix} PN \\ PT \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1384 & -10 \\ 69 & 1555 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Ch_3 \\ Ch_4 \end{Bmatrix}$$

dove PN è il carico normale al pedale e PT il carico tangenziale. Noti i carichi si determina la forza risultante PR delle forze che il ciclista impone nella pedalata, Figura 6.7 :

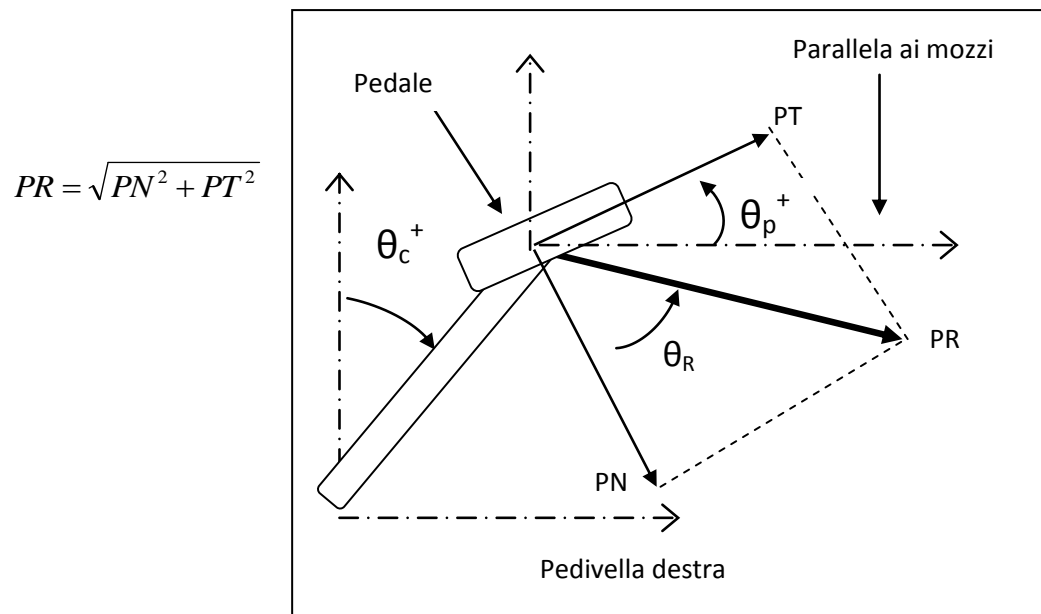


Figura 6.6: Forza risultante PR

le altre forze caratteristiche della pedalata sono Figura 6.7 e Figura 6.8:

Forza Efficace PE, componente della risultante PR che genera momento motore durante la pedalata;

Forza Parallela PP, componente di PR che agisce lungo la direzione della pedivella: essa non ha alcun effetto utile durante la pedalata, ma sollecita la pedivella e il telaio ed affatica il ciclista.

Forza Verticale PV, componente verticale di PR;

Forza Verticale PO, componente orizzontale di PR;

Le grandezze introdotte vengono calcolate attraverso le relazioni:

$$PE = PN \cdot \sin(\vartheta_c + \vartheta_p) + PT \cdot \cos(\vartheta_c + \vartheta_p)$$

$$PP = -PN \cdot \cos(\vartheta_c + \vartheta_p) + PT \cdot \sin(\vartheta_c + \vartheta_p)$$

$$PV = PN \cdot \cos(\vartheta_p) - PT \cdot \sin(\vartheta_p)$$

$$PO = PN \cdot \sin(\vartheta_p) + PT \cdot \cos(\vartheta_p)$$

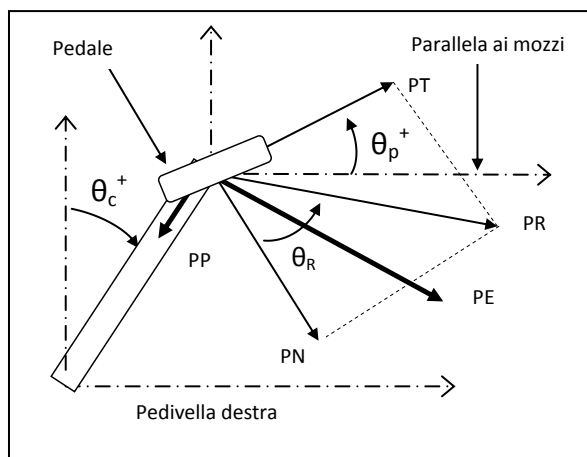


Figura 6.7: Forze PE e PP

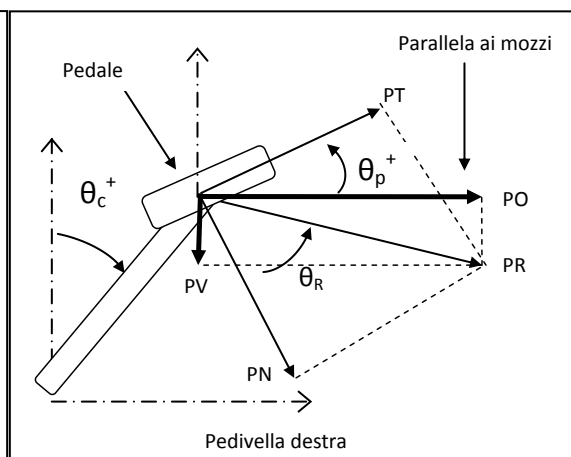


Figura 6.8 Forze: PO e PV

6.2 RISULTATI DELLE PROVE

6.2.1 DIAGRAMMI DELLE FORZE CARATTERISTICHE

Nelle pagine seguenti è stato analizzato l'andamento delle forze caratteristiche PN, PT, PR, PE, PP in funzione dell'angolo di pedivella $0^\circ < \theta_c < 360$ e ponendo tra i due pedali nullo lo sfasamento. Nella parte iniziale sono state descritte le condizioni di svolgimento della prova e riassunti i valori assunti dalle forze caratteristiche in funzione

dell'angolo di pedivella.. Nella seconda parte sono stati riportati i grafici combinati.

Per ciascun pedale sono stati confrontati gli andamenti:

1. PR ; PN e PT;
2. PR ; PE e PP;
3. Potenza istantanea P_{WR} e media P_{WR-MED} ;

Per entrambi i pedali:

1. PR ; PN, PT, PE, PP;
2. Potenza istantanea P_{WR} ;
3. angolo di pedale θ_p ;
4. efficienza di spinta η ;

Per il ciclo di pedalata con uno sfasamento di 180° tra la due pedivelle, è stata determinata la curva della potenza netta e il suo valore medio.

PRIMA PROVA

Nome prova : 150_2.

condizioni di della prova: rapporto di trasmissione 39-18, carico resistente impostato al rullo di 150 Watt per una distanza complessiva di 2 Km.

fasi: posizionamento in sella con pedali sganciati, avvio acquisizione, aggancio pedali ed inizio pedalata, raggiungimento di condizioni di regime con velocità prossima ai 21 Km/h, applicazione del carico resistente, mantenimento nelle condizioni per 40 secondi, arresto della pedalata, sgancio pedali, arresto dell'acquisizione e termine della prova, si è rilevata una velocità media di circa 22 Km/h.

Convenzione per l'angolo pedale: angolo θ_p negativo con rotazione oraria del pedale attorno all'asse del perno rispetto alla direzione di avanzamento.

PEDALE DESTRO-R

Vengono indicate le forze rilevate, i valori massimi, minimi e i relativi angoli di pedivella.

Il pedice a fianco della forza indica a quale pedale fa riferimento.

Forze [N]	Max	Θ_c [deg]	Min	Θ_c [deg]
PN-R	589	140	184	335
PT-R	144	94	19	180
PV-R	590	140	170	331
PO-R	156	97	-163	241
PE-R	435	104	-249	274
PP-R	530	176	-210	11
PR-R	593	140	186	346

I valori di potenza istantanea rilevati, massimi e minimi, sono accompagnati dai relativi angoli di pedivella.

Potenza [W]	Max	Θ_c [deg]	Min	Θ_c [deg]
Pwr-R	604	104	-345	274

La potenza media di ciclo per un pedale.

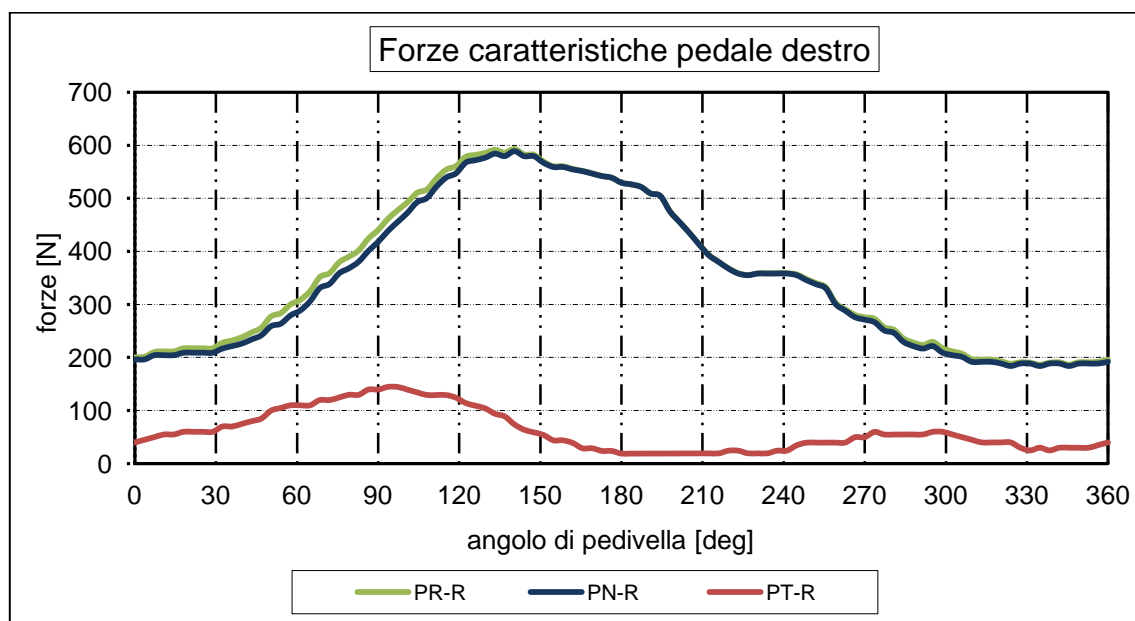
Pwr med.R	75 [W]
-----------	--------

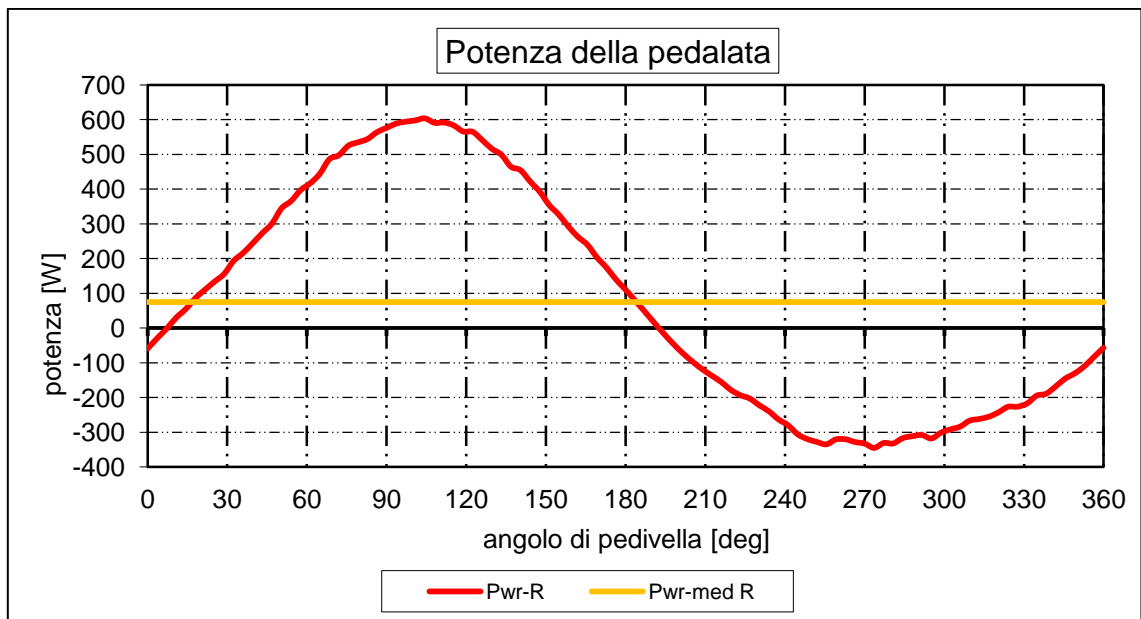
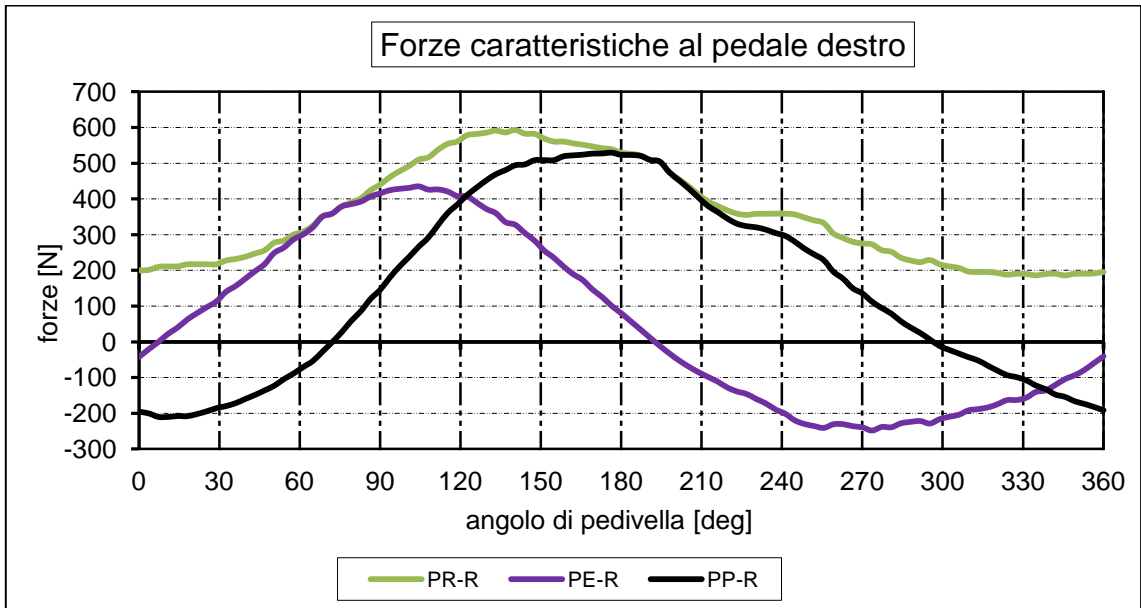
Il tempo medio ciclo.

Durata media ciclo Tc	0,793 [sec]
-----------------------	-------------

GRAFICI OTTENUTI

Le forze e le potenze sono diagrammate in funzione dell'angolo di pedivella.





PEDALE SINISTRO

Vengono indicate le forze rilevate, i valori massimi, minimi e i relativi angoli di pedivella.

Forze [N]	Max	Θ_c [deg]	Min	Θ_c [deg]
PN-L	559	140	152	342
PT-L	126	86	8	346
PV-L	559	140	140	346
PO-L	159	104	-118	281
PE-L	433	83	-235	266
PP-L	516	166	-196	25
PR-L	566	140	152	346

I valori di potenza istantanea rilevati, massimi e minimi, sono accompagnati dai relativi angoli di pedivella.

Potenza [W]	Max	Θ_c [deg]	Min	Θ_c [deg]
Pwr-L	598	83	-324	266

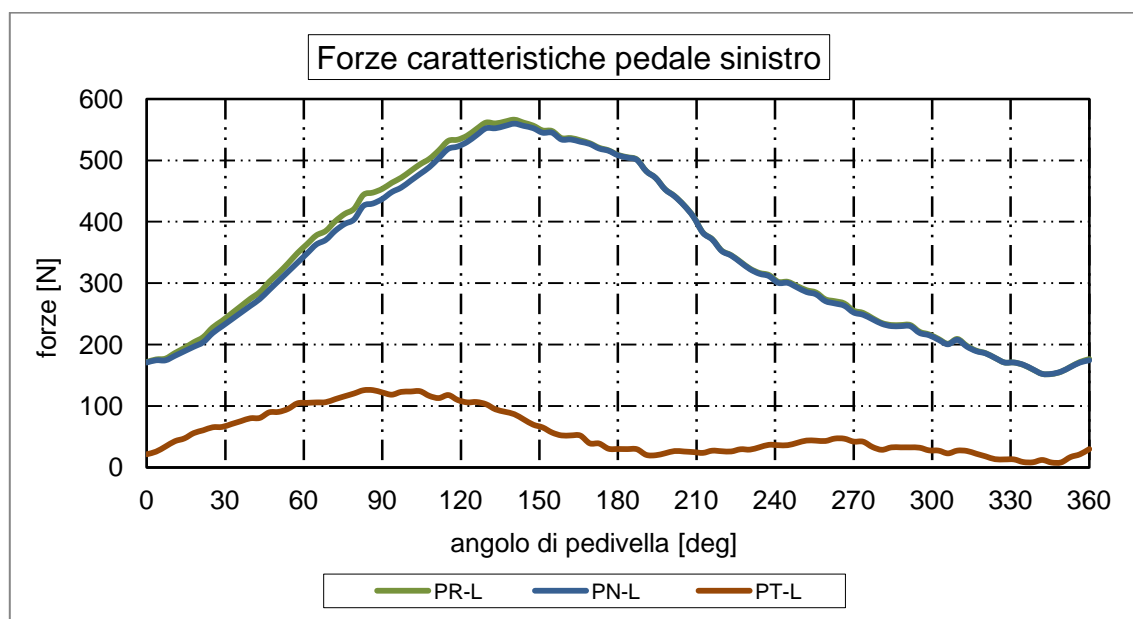
La potenza media di ciclo per il pedale.

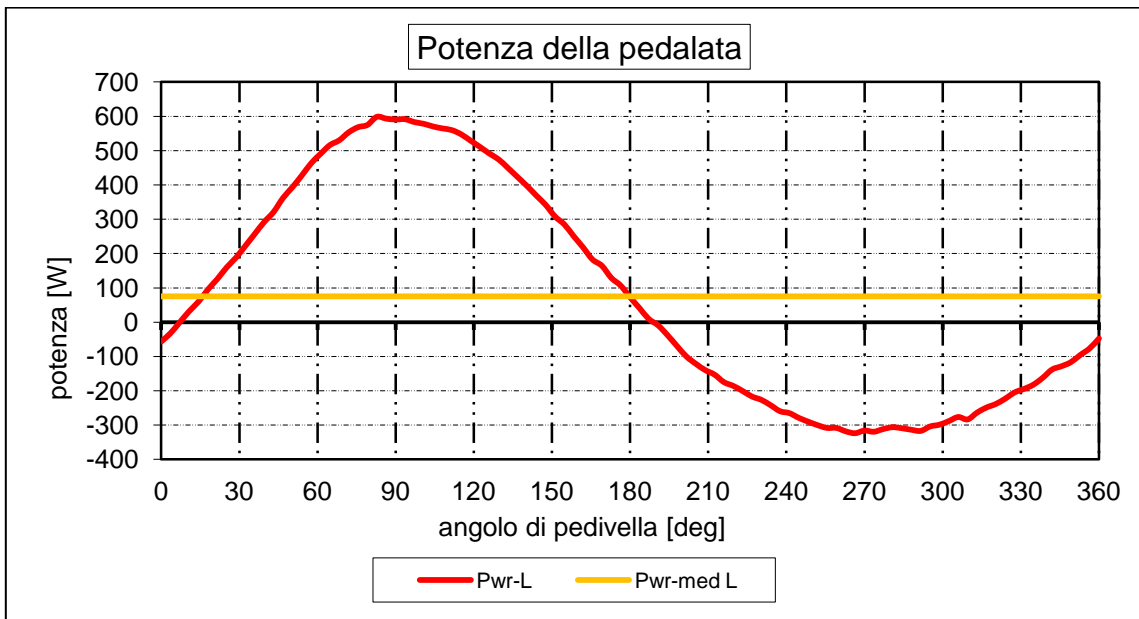
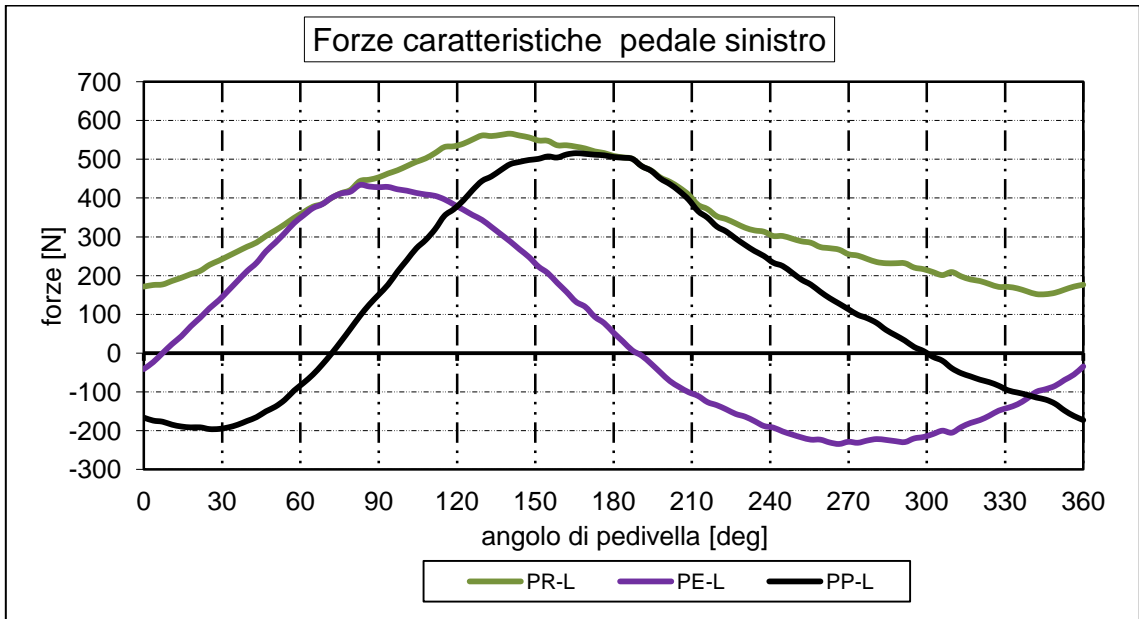
Pwr-med L	76 [W]
-----------	--------

Il tempo medio ciclo.

Durata media ciclo Tc	0,793 [sec]
-----------------------	-------------

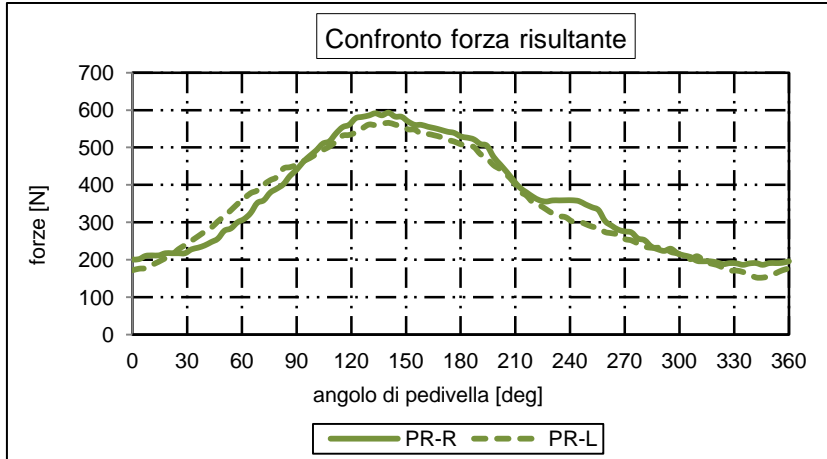
I GRAFICI OTTENUTI



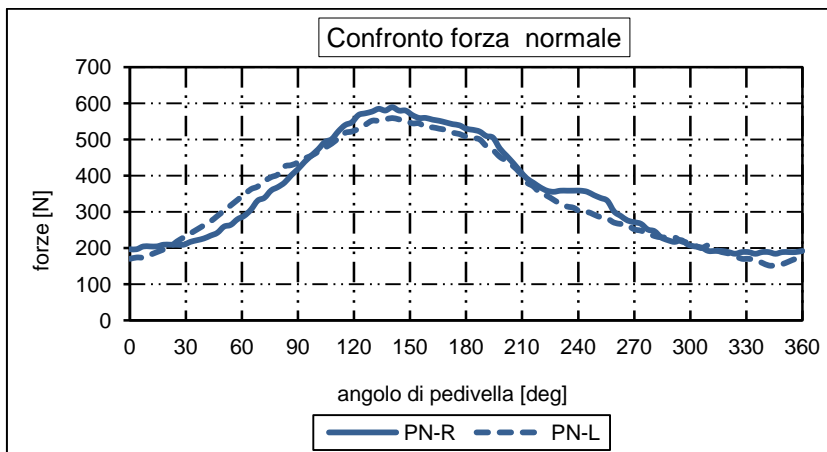


CONFRONTO FORZE SUI PEDALI

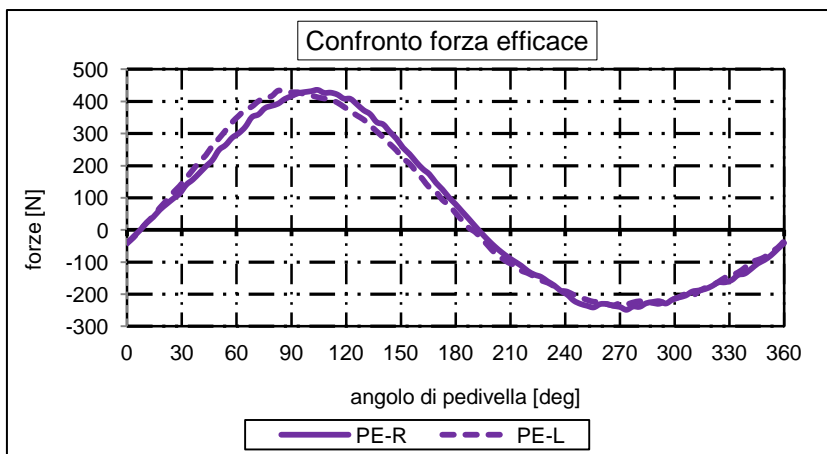
Si confronta la forza caratteristica rispetto ai due pedali, considerando nullo lo sfasamento.



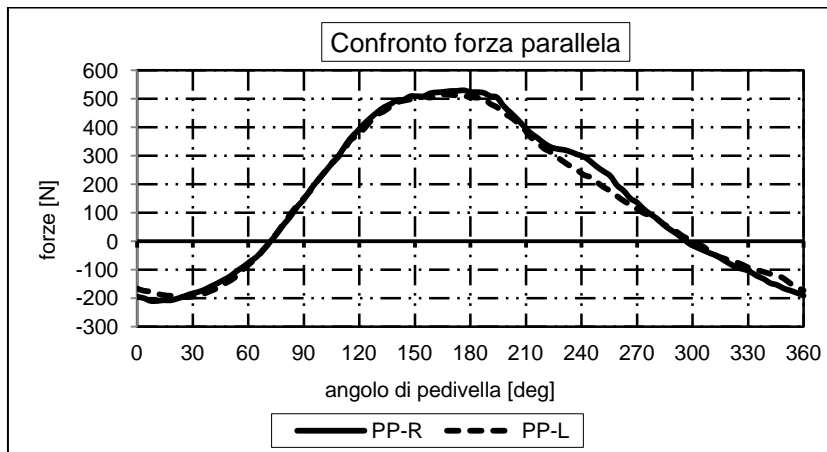
Forze [N]	PR-R	PR-L
Max	593	566
Θ_c [deg]	140	140
Min	186	152
Θ_c [deg]	346	346



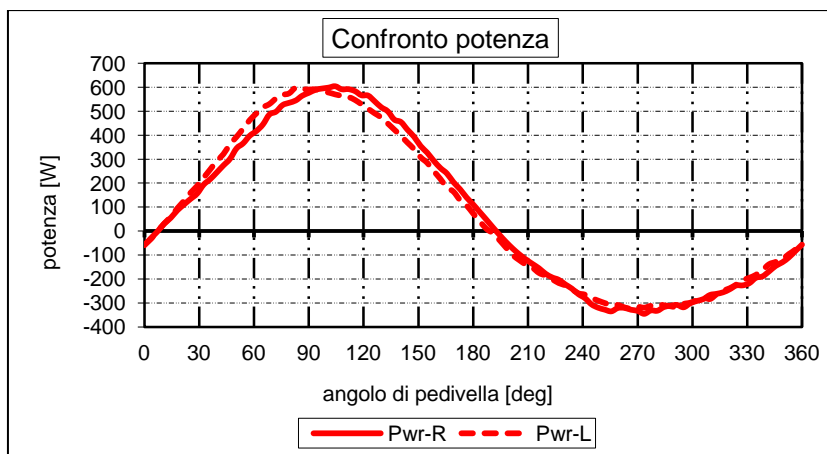
Forze [N]	PN-R	PN-L
Max	589	559
Θ_c [deg]	140	140
Min	184	152
Θ_c [deg]	335	342



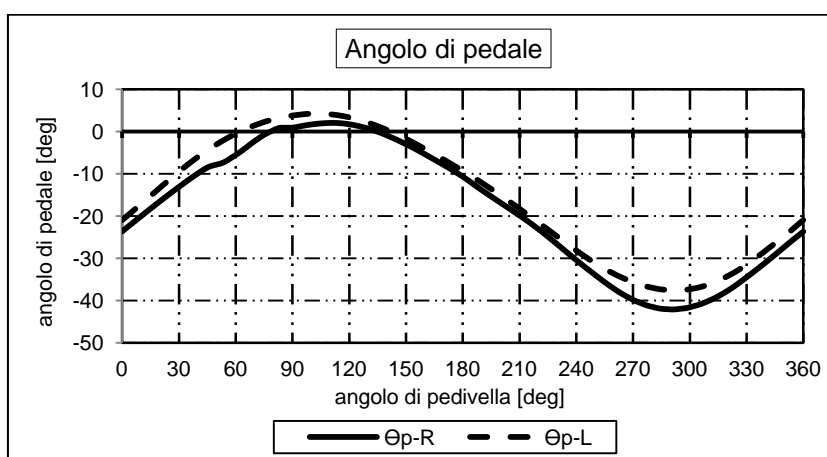
Forze [N]	PE-R	PE-L
Max	435	433
Θ_c [deg]	104	83
Min	-249	-235
Θ_c [deg]	274	266



Forze[N]	PP-R	PP-L
Max	530	516
Θ_c [deg]	176	166
Min	-210	-196
Θ_c [deg]	11	25

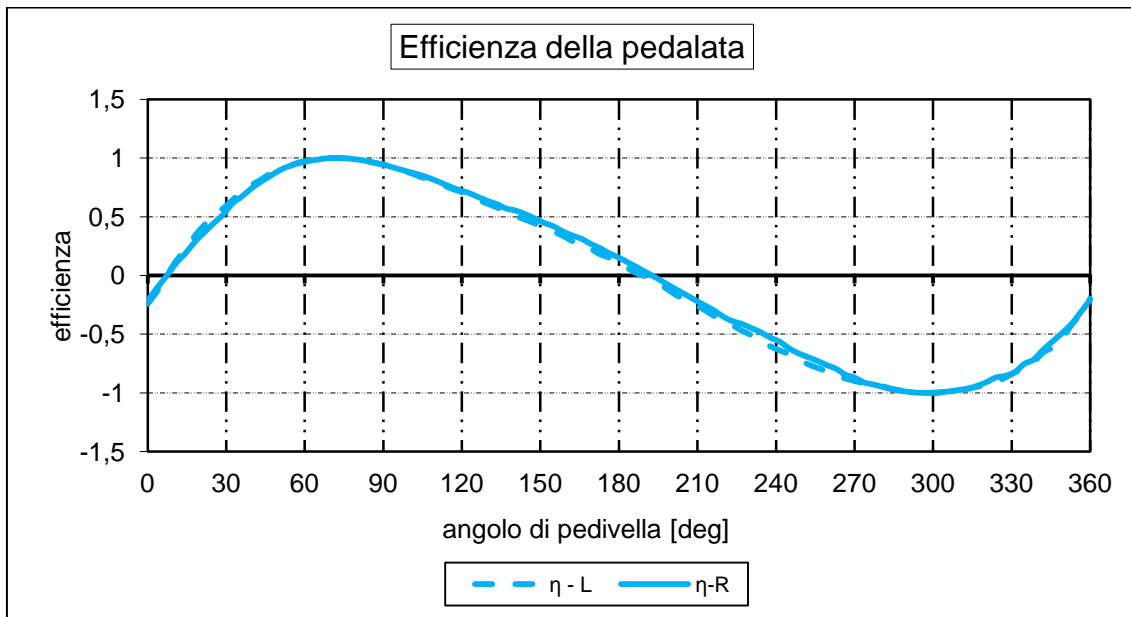


Pot [W]	PwrR	PwrL
Max	604	598
Θ_c [deg]	104	83
Min	-345	-324
Θ_c [deg]	274	266

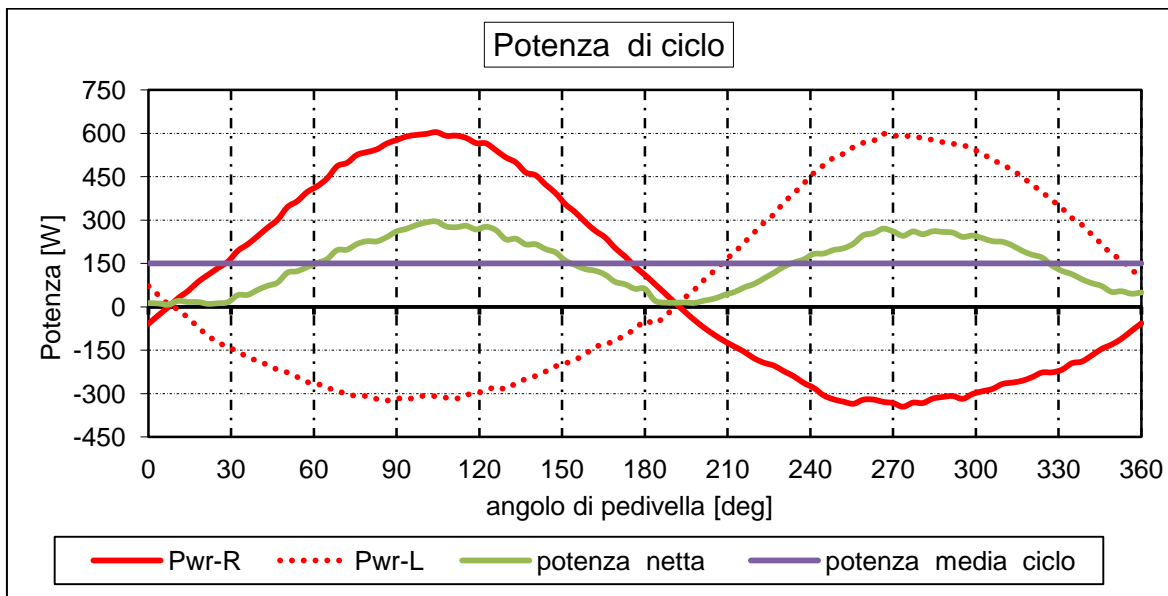


ang]	Θ_p -R	Θ_p -L
Max	2	4
Θ_c [deg]	112	104
Min	-42	-38
Θ_c [deg]	292	292

Si definisce l'efficienza della pedalata come $\eta = PE/PR$ ed è un parametro che permette di valutare il rendimento della pedalata.



La curva della potenza netta di ciclo è ottenuta dalla somma algebrica delle due curve della potenza istantanea di ciascun pedale.



La potenza media del ciclo considerando entrambi i pedali risulta essere di 150 W

SECONDA PROVA

Nome prova : 200_2

condizioni di della prova: rapporto di trasmissione 39-18, carico resistente impostato al rullo di 200 Watt per una distanza complessiva di 2 Km.

fasi: posizionamento in sella con pedali sganciati, avvio acquisizione, aggancio pedali ed inizio pedalata, raggiungimento di condizioni di regime con velocità prossima ai 21 Km/h, applicazione del carico resistente, mantenimento nelle condizioni per 40.secondi, arresto della pedalata, sgancio pedali, arresto dell'acquisizione e termine della prova, si è rilevata una velocità media di circa 20 Km/h.

Convenzione per l'angolo pedale: angolo θ_p negativo con rotazione oraria del pedale attorno all'asse del perno rispetto alla direzione di avanzamento.

PEDALE DESTRO-R

Vengono indicate le forze rilevate, i valori massimi, minimi e i relativi angoli di pedivella.

Il pedice a fianco della forza indica a quale pedale fa riferimento.

Forze [N]	Max	Θ_c [deg]	Min	Θ_c [deg]
PN-R	602	151	108	346
PT-R	168	104	36	331
PV-R	611	151	110	346
PO-R	163	104	-116	256
PE-R	412	108	-207	259
PP-R	563	155	-160	14
PR-R	615	140	114	346

I valori di potenza istantanea rilevati, massimi e minimi, sono accompagnati dai relativi angoli di pedivella.

Potenza [W]	Max	Θ_c [deg]	Min	Θ_c [deg]
Pwr-R	621	108	-312	259

La potenza media di ciclo per un pedale.

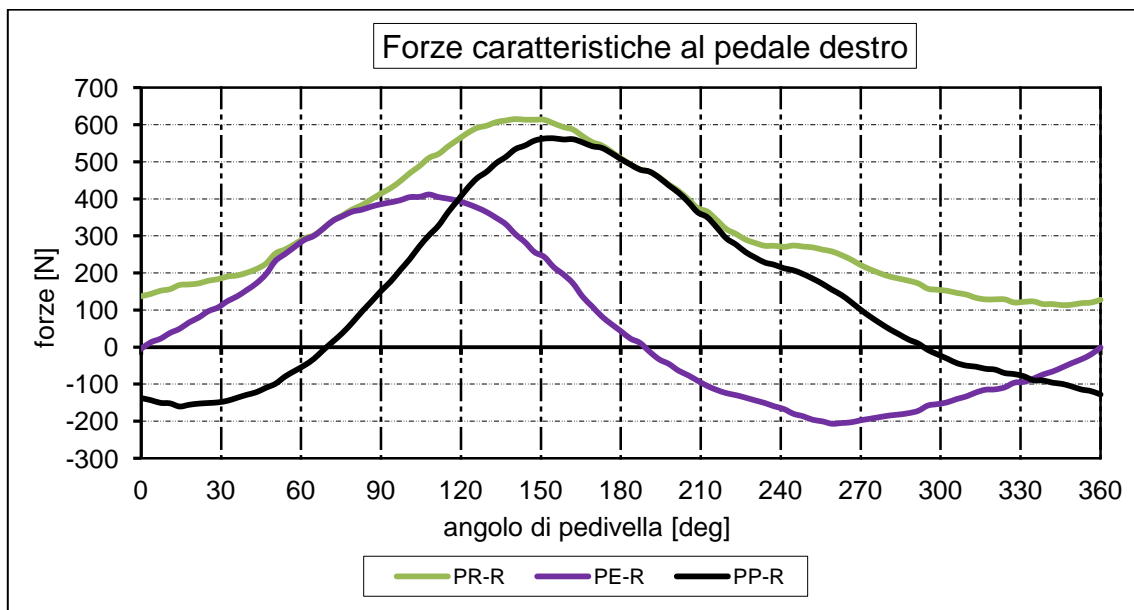
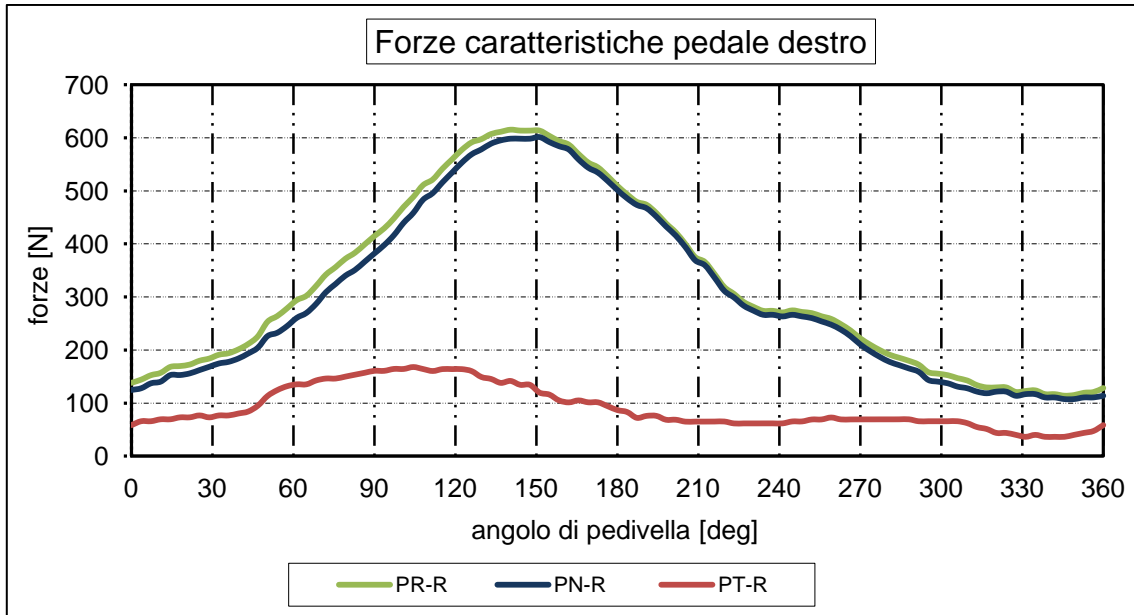
Pwr-med R	94 [W]
-----------	--------

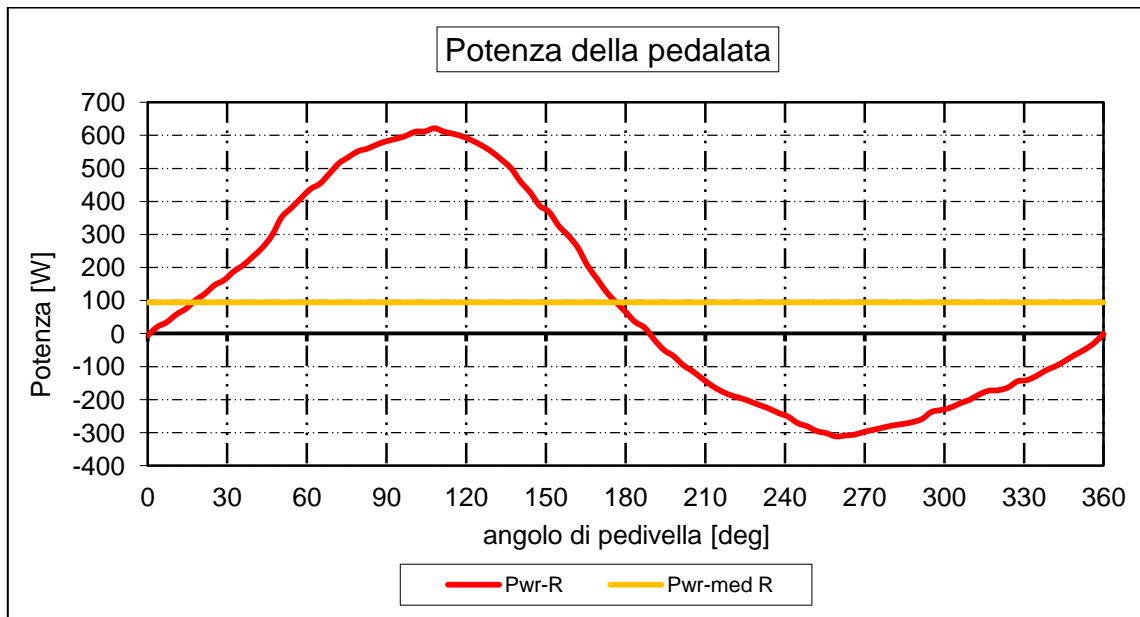
Il tempo medio ciclo.

Durata media ciclo T_c	0,729 [sec]
--------------------------	-------------

GRAFICI OTTENUTI

Le forze e le potenze sono diagrammate in funzione dell'angolo di pedivella.





PEDALE SINISTRO

Vengono indicate le forze rilevate, i valori massimi, minimi e i relativi angoli di pedivella.

Forze [N]	Max	Θ_c [deg]	Min	Θ_c [deg]
PN-L	602	137	90	349
PT-L	152	112	2	338
PV-L	602	137	81	338
PO-L	178	112	-108	238
PE-L	444	97	-180	270
PP-L	540	148	-153	29
PR-L	613	137	90	349

I valori di potenza istantanea rilevati, massimi e minimi, sono accompagnati dai relativi angoli di pedivella.

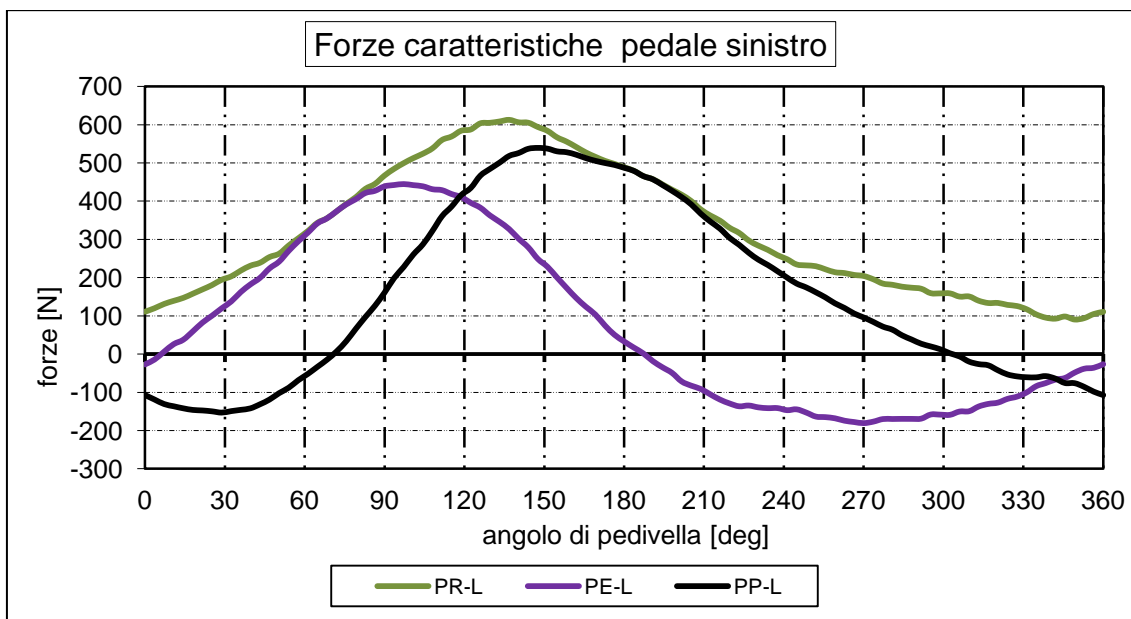
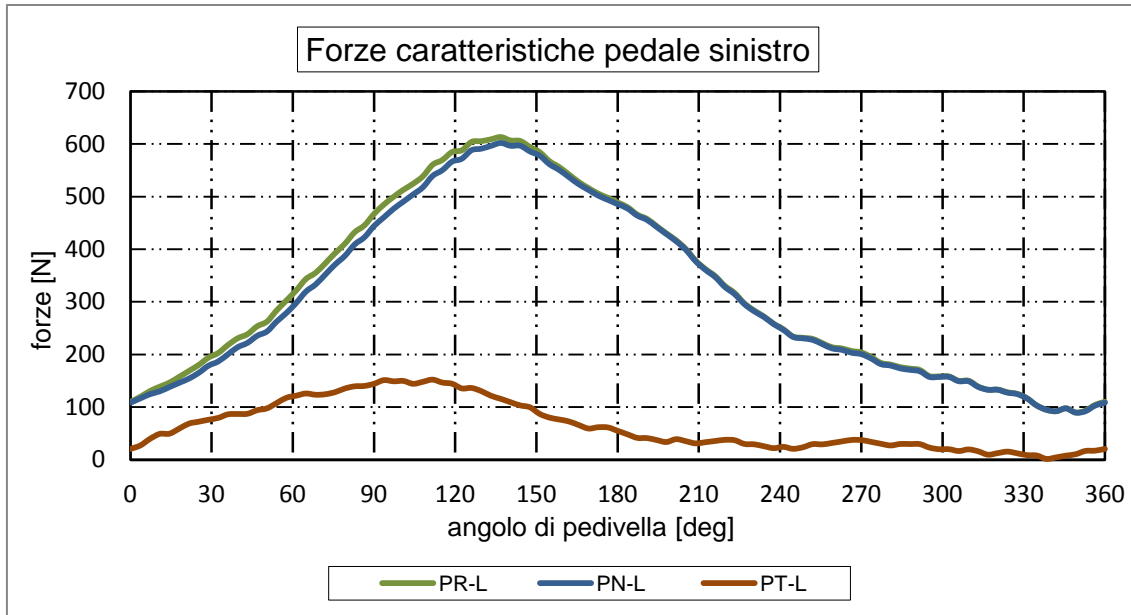
Potenza [W]	Max	Θ_c [deg]	Min	Θ_c [deg]
Pwr-L	670	97	-272	270

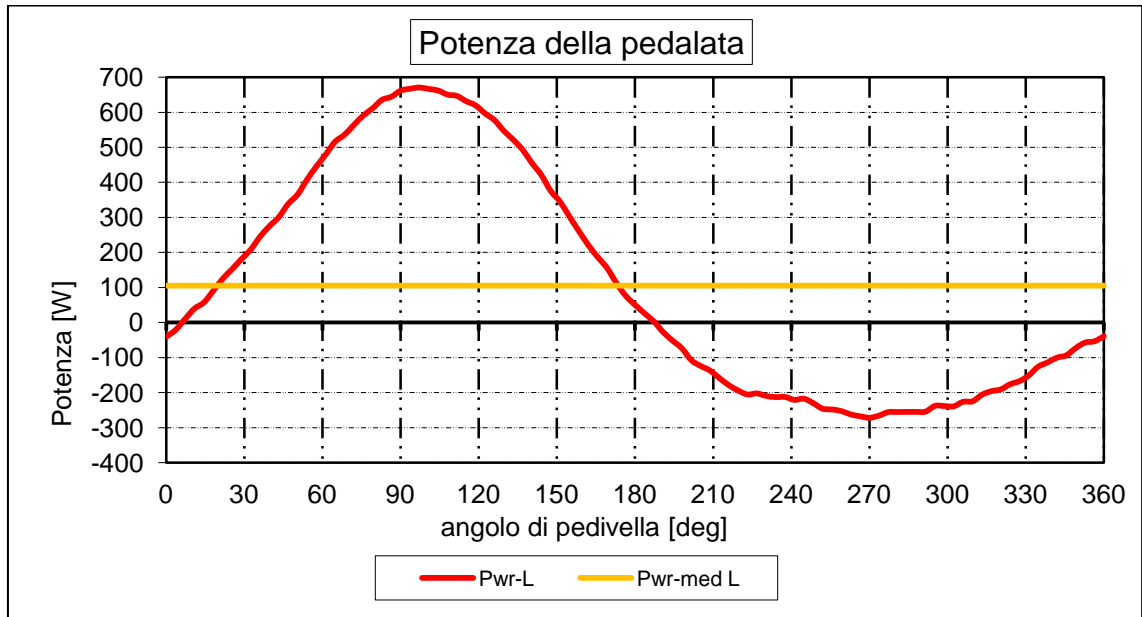
La potenza media di ciclo per un pedale.

Pwr-med R	105 [W]
-----------	---------

GRAFICI OTTENUTI

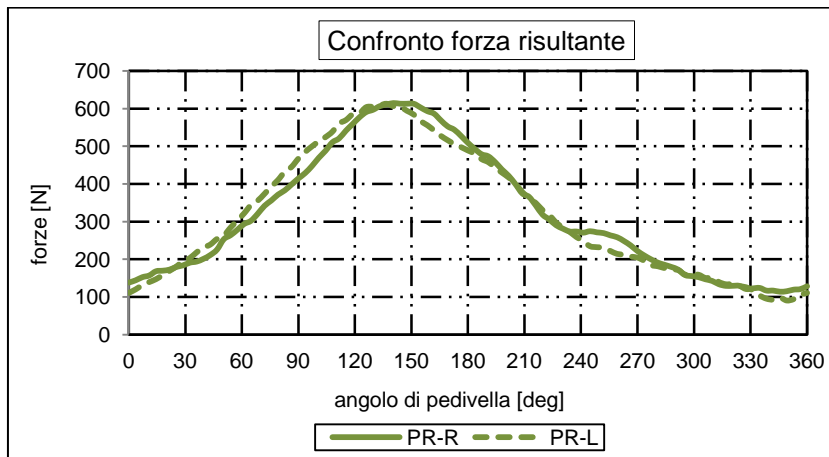
Le forze e le potenze sono diagrammate in funzione dell'angolo di pedivella



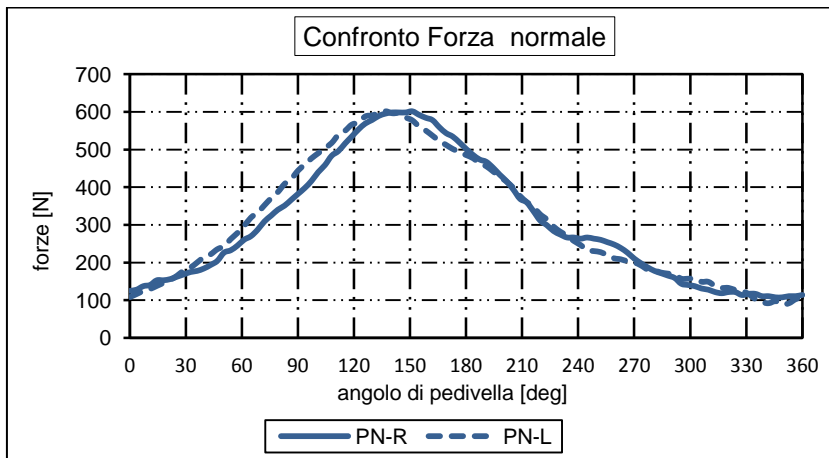


CONFRONTO FORZE SUI PEDALI

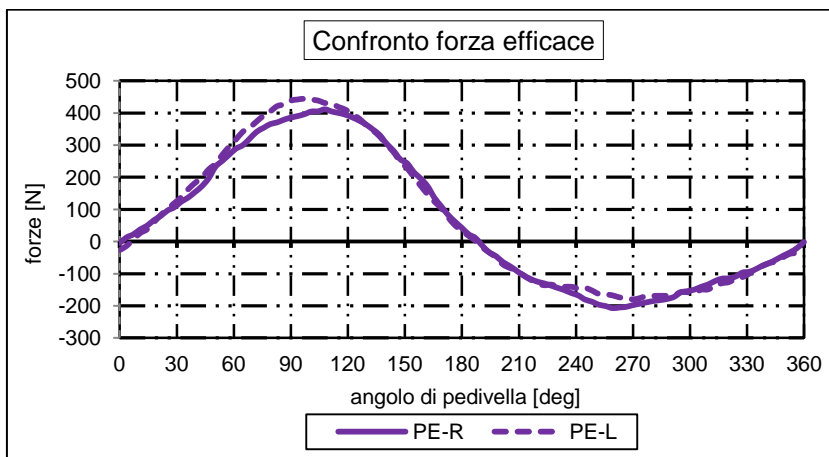
Si confronta la forza caratteristica rispetto ai due pedali, considerando nullo lo sfasamento



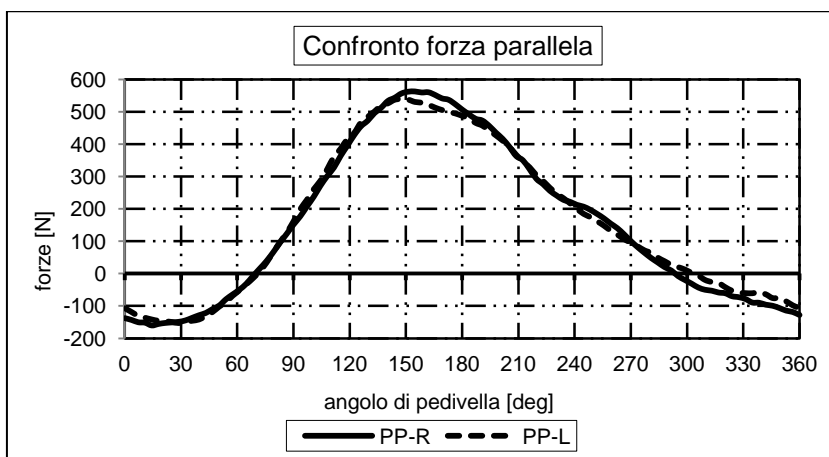
Forze[N]	PR-R	PR-L
Max	615	613
Θ_c [deg]	140	137
Min	114	90
Θ_c [deg]	346	349



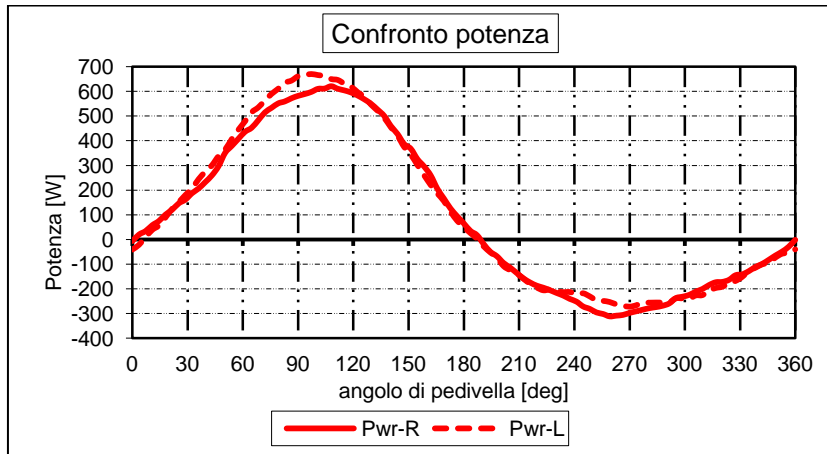
Forze[N]	PN-R	PN-L
Max	602	602
Θ_c [deg]	151	137
Min	108	90
Θ_c [deg]	346	349



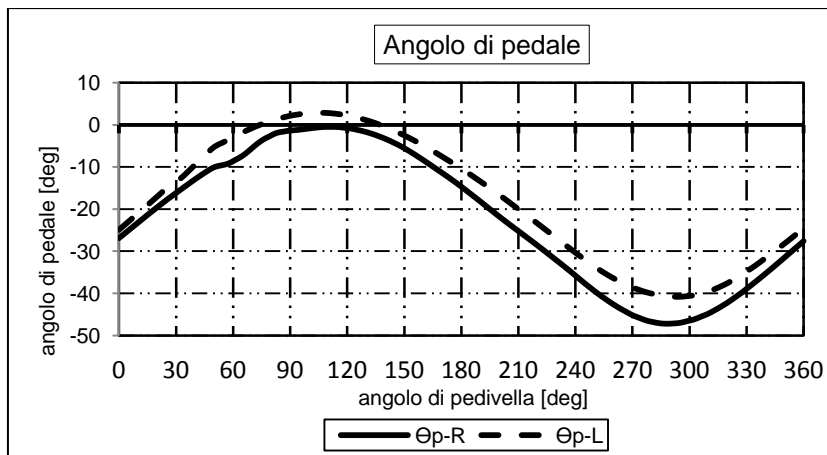
Forze[N]	PE-R	PE-L
Max	412	444
Θ_c [deg]	108	97
Min	-206	-180
Θ_c [deg]	259	270



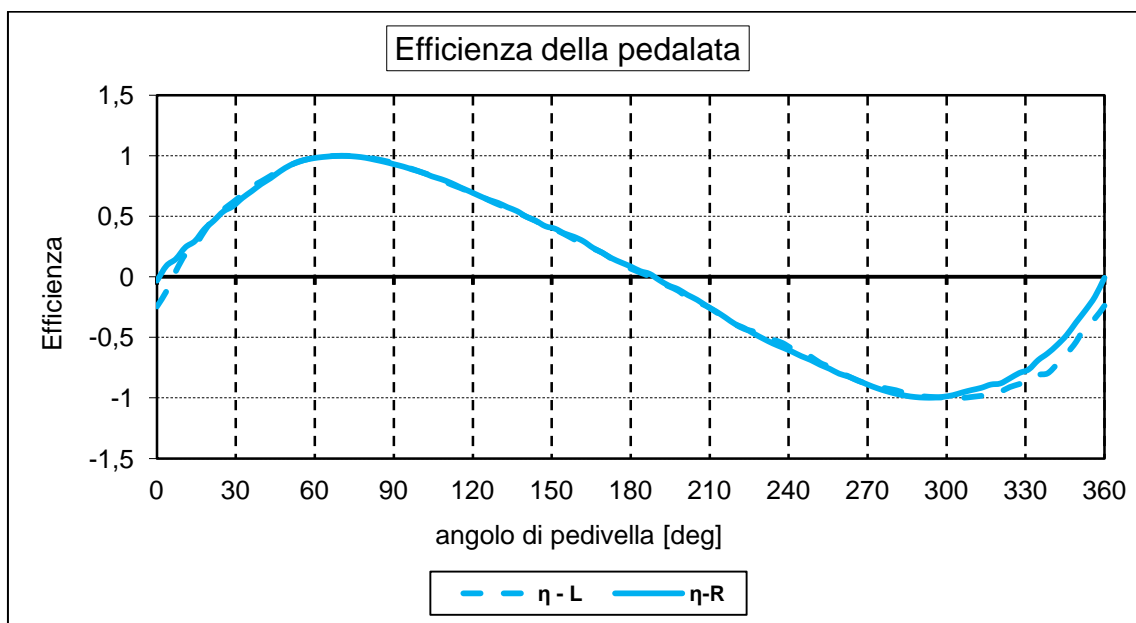
Forze[N]	PP-R	PP-L
Max	563,5	539,5
Θ_c [deg]	155	148
Min	-160	-153
Θ_c [deg]	14	29

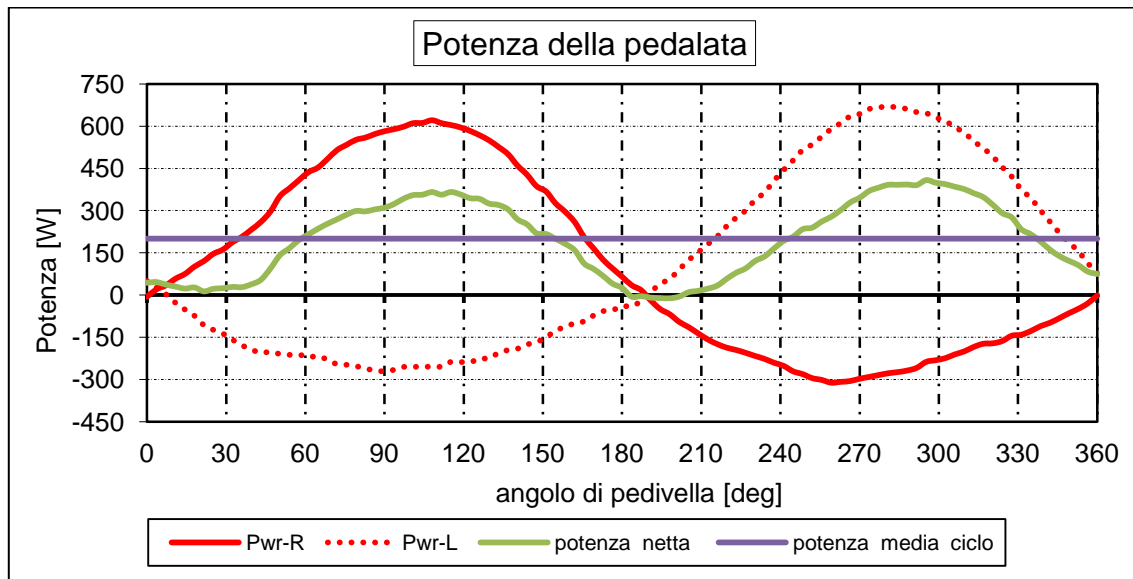


Pot [W]	PwrR	PwrL
Max	621	670
Θ_c [deg]	108	97
Min	-312	-272
Θ_c [deg]	259	270



Ang	Θ_pR	Θ_pL
Max	-1	3
Θ_c [deg]	112	108
Min	-47	-41
Θ_c [deg]	288	295





La potenza media del ciclo considerando entrambi i pedali risulta essere di 201 W

TERZA PROVA

Nome prova : 250_2

condizioni di della prova: rapporto di trasmissione 39-18, carico resistente impostato al rullo di 250 Watt per una distanza complessiva di 2 Km.

fasi: posizionamento in sella con pedali sganciati, avvio acquisizione, aggancio pedali ed inizio pedalata, raggiungimento di condizioni di regime con velocità prossima ai 21 Km/h, applicazione del carico resistente, mantenimento nelle condizioni per 40.secondi, arresto della pedalata, sgancio pedali, arresto dell'acquisizione e termine della prova, si è rilevata una velocità media di circa 21 Km/h.

Convenzione per l'angolo pedale: angolo θ_p negativo con rotazione oraria del pedale attorno all'asse del perno rispetto alla direzione di avanzamento.

PEDALE DESTRO-R

Vengono indicate le forze rilevate, i valori massimi, minimi e i relativi angoli di pedivella. Il pedice a fianco della forza indica a quale pedale fa riferimento

Forze [N]	Max	Θ_c [deg]	Min	Θ_c [deg]
PN-R	586	148	86	338
PT-R	132	79	16	335
PV-R	591	151	79	338
PO-R	134	108	-112	252
PE-R	410	104	-160	263
PP-R	542	151	-153	22
PR-R	594	148	87	338

I valori di potenza istantanea rilevati, massimi e minimi, sono accompagnati dai relativi angoli di pedivella.

Potenza [W]	Max	Θ_c [deg]	Min	Θ_c [deg]
Pwr-R	611	104	-239	263

La potenza media di ciclo per un pedale.

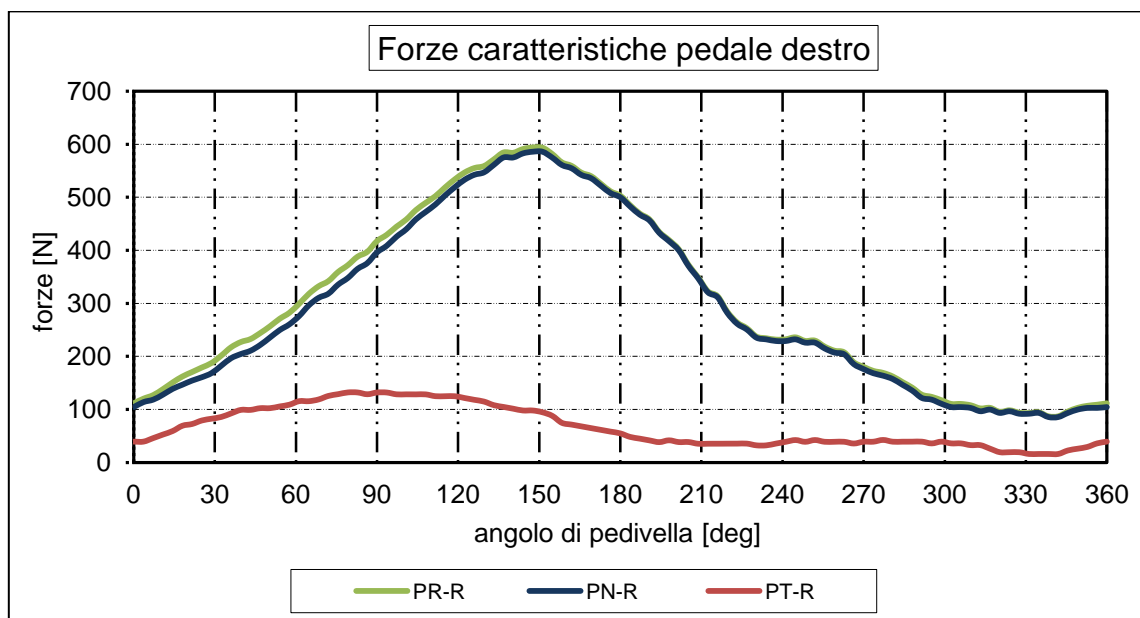
Pwr-med R	115 [W]
-----------	---------

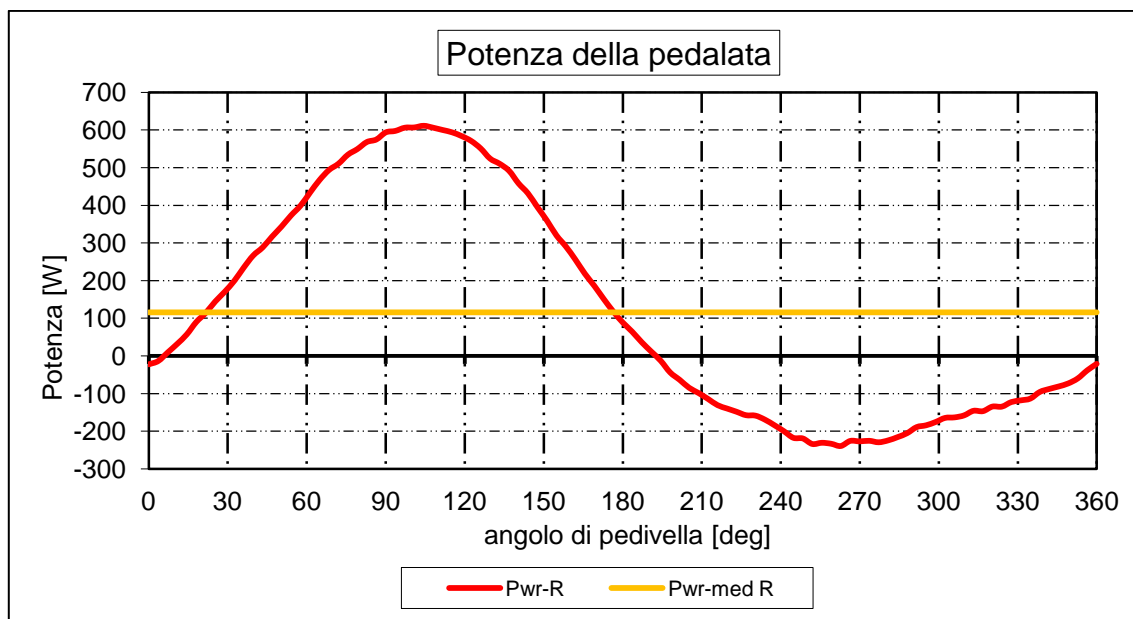
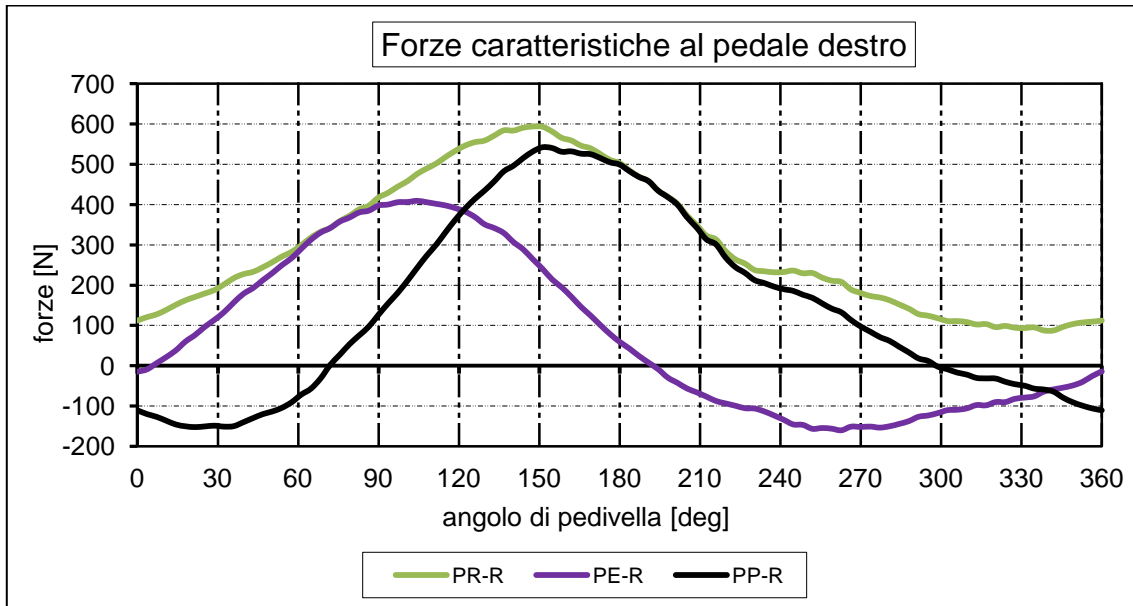
Il tempo medio ciclo.

Durata media ciclo Tc	0,737 [sec]
-----------------------	-------------

GRAFICI OTTENUTI

Le forze e le potenze sono diagrammate in funzione dell'angolo di pedivella





PEDALE SINISTRO

Vengono indicate le forze rilevate, i valori massimi, minimi e i relativi angoli di pedivella.

Forze [N]	Max	Θ_c [deg]	Min	Θ_c [deg]
PN-L	613	137	101	331
PT-L	153	101	13	331
PV-L	613	137	90	331
PO-L	175	101	-93	238
PE-L	465	94	-156	284
PP-L	533	148	-177	22
PR-L	622	137	101	335

I valori di potenza istantanea rilevati, massimi e minimi, sono accompagnati dai relativi angoli di pedivella.

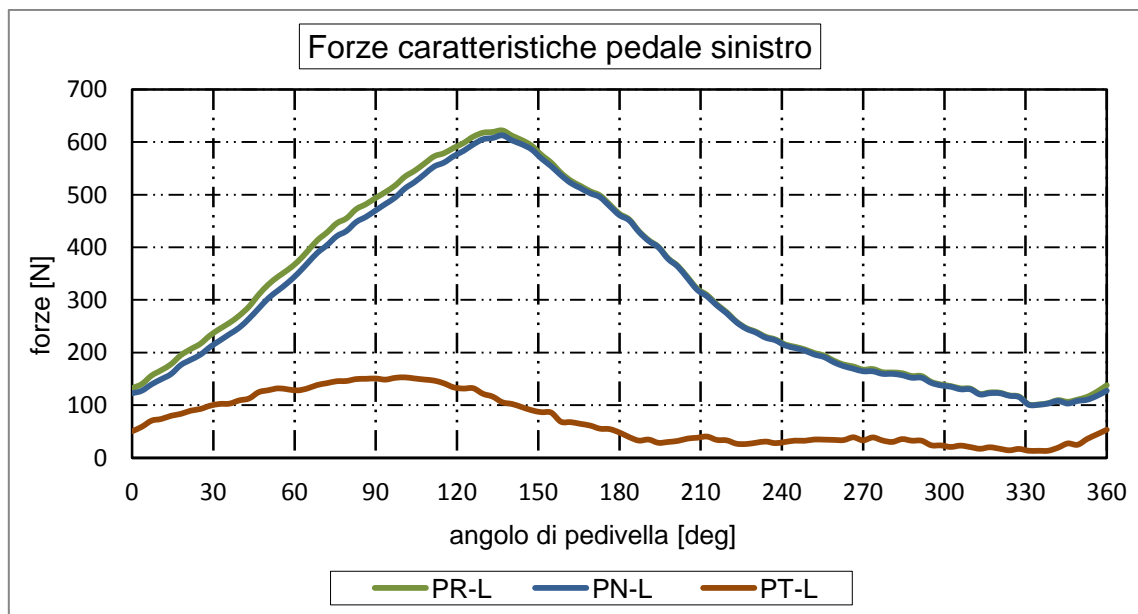
Potenza [W]	Max	Θ_c [deg]	Min	Θ_c [deg]
Pwr-L	689	94	-231	284

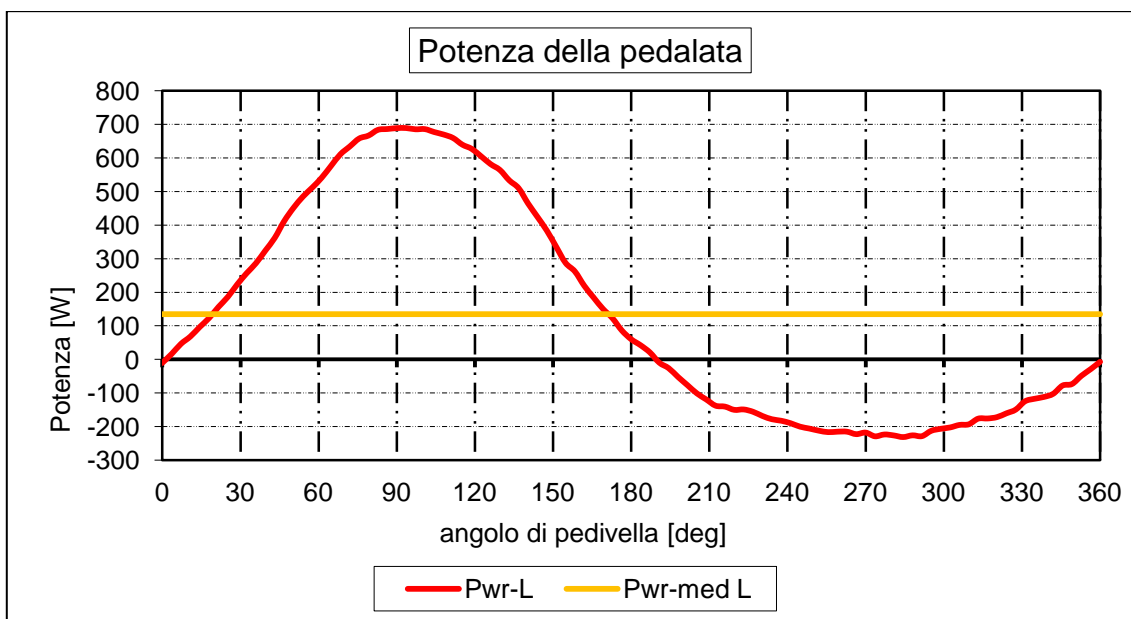
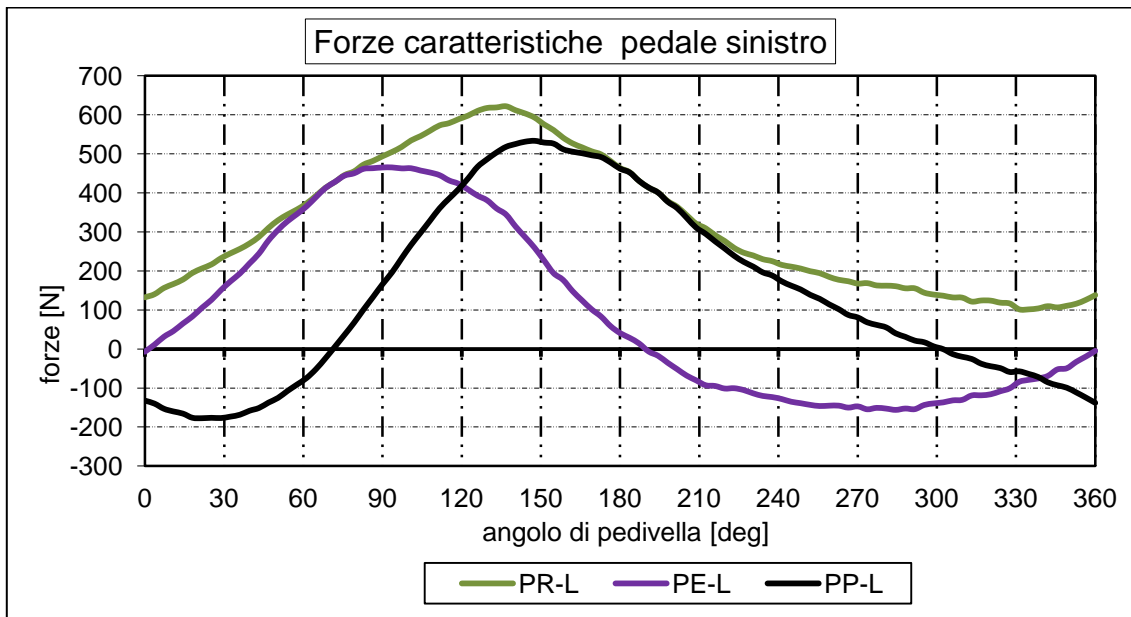
La potenza media di ciclo per un pedale

Pwr-med L	135 [W]
-----------	---------

GRAFICI OTTENUTI

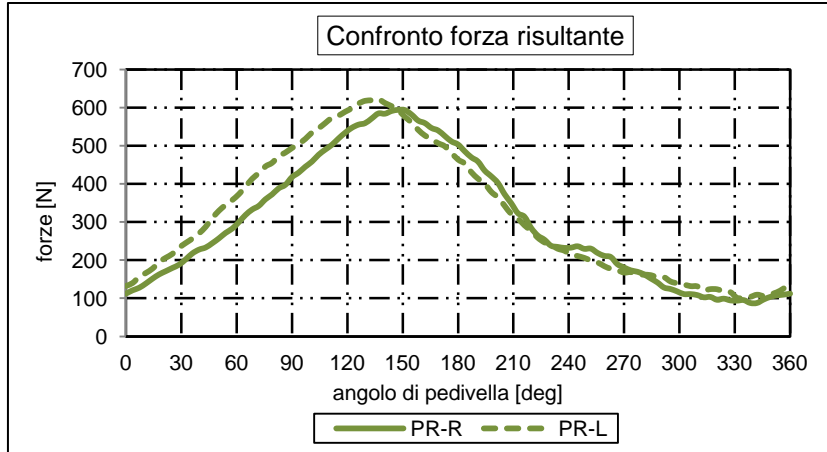
Le forze e le potenze sono diagrammate in funzione dell'angolo di pedivella



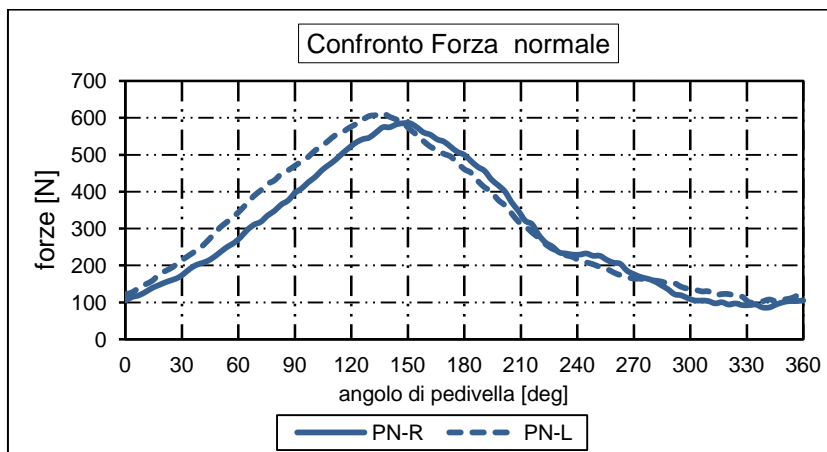


CONFRONTO FORZE SUI PEDALI

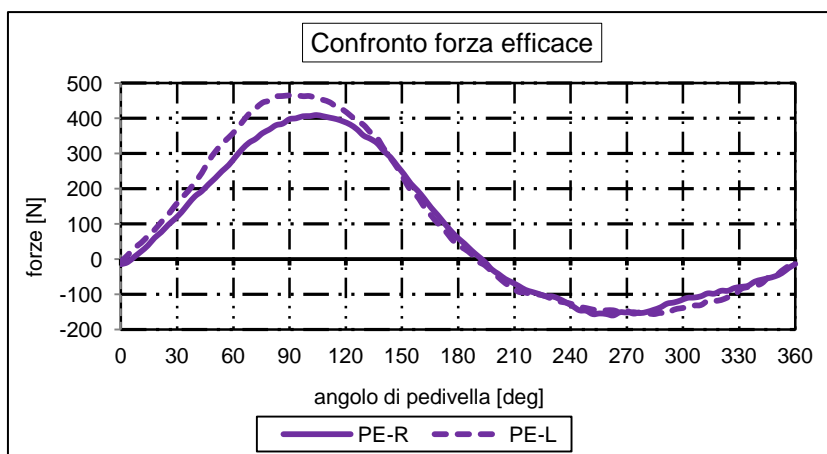
Si confronta la forza caratteristica rispetto ai due pedali, considerando nullo lo sfasamento



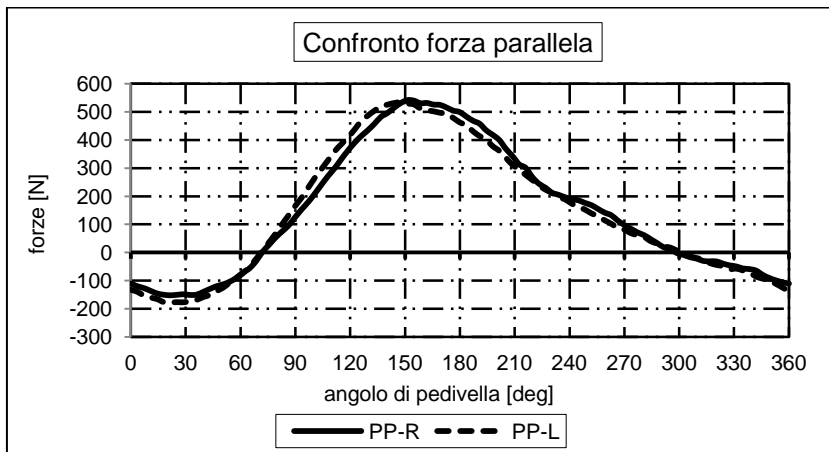
Forze[N]	PR-R	PR-L
Max	594	622
Θ_c [deg]	148	137
Min	87	101
Θ_c [deg]	338	331



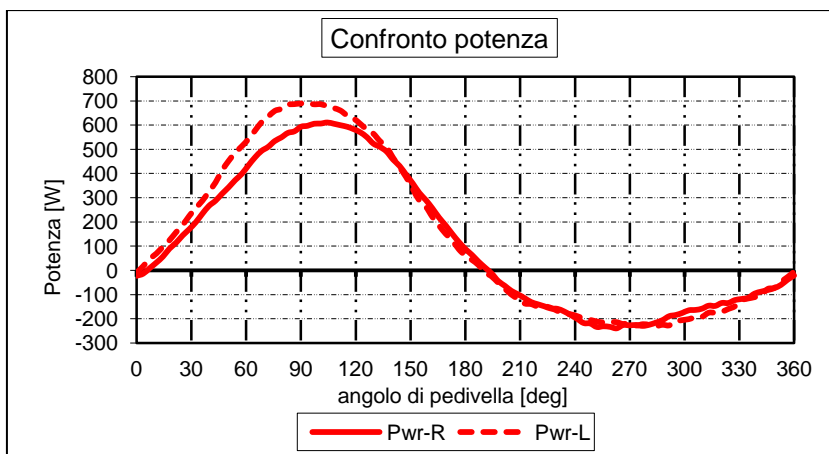
Forze[N]	PN-R	PN-L
Max	586	613
Θ_c [deg]	148	137
Min	86	101
Θ_c [deg]	338	331



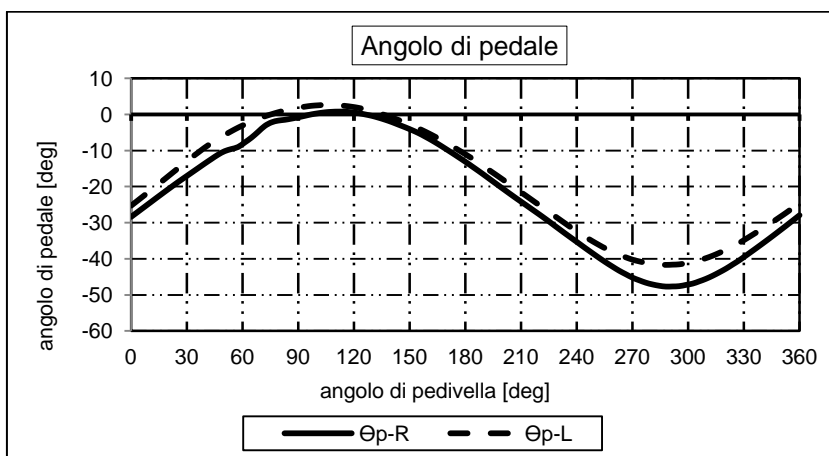
Forze[N]	PE-R	PE-L
Max	410	465
Θ_c [deg]	104	94
Min	-160	-156
Θ_c [deg]	263	284



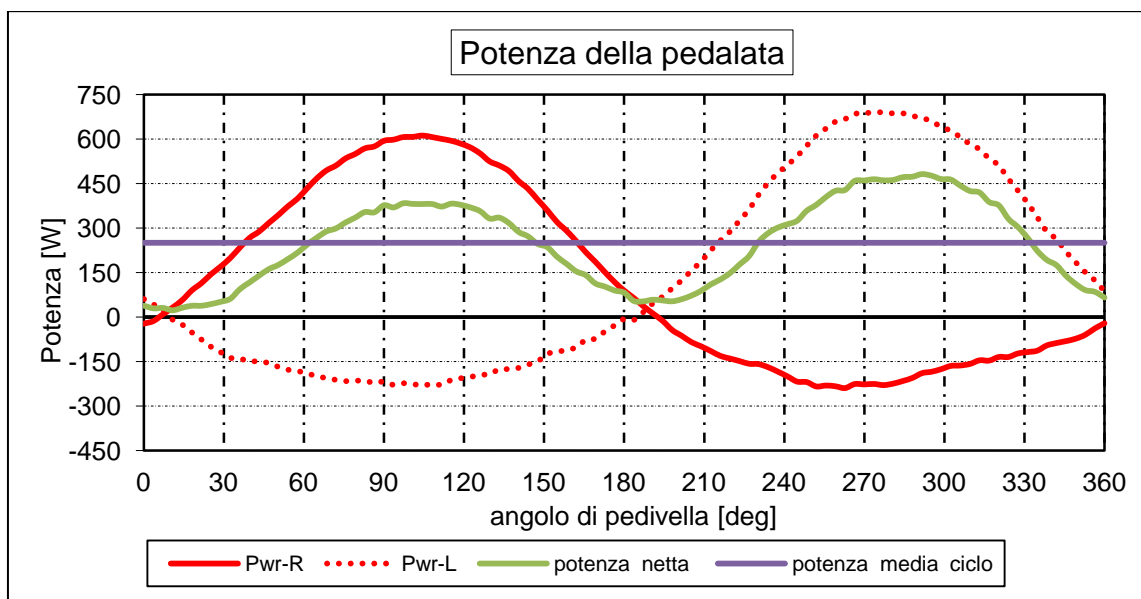
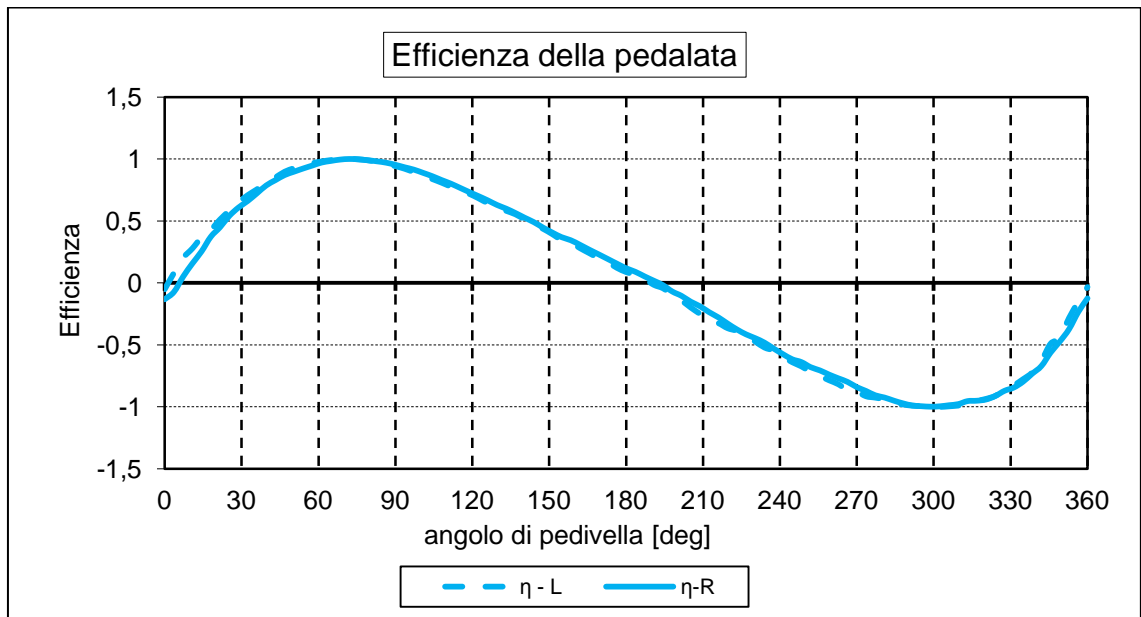
Forze[N]	PP-R	PP-L
Max	542	533
Θ_c [deg]	151	148
Min	-153	-177
Θ_c [deg]	22	22



Pot[W]	Pwr-R	Pwr-L
Max	611	689
Θ_c [deg]	104	94
Min	-239	-231
Θ_c [deg]	263	284



ang	Θ_{p-R}	Θ_{p-L}
Max	1	3
Θ_c [deg]	112	104
Min	-48	-42
Θ_c [deg]	288	288



La potenza media del ciclo considerando entrambi i pedali risulta essere di 251 W

QUARTA PROVA

Nome prova : 300_2

condizioni di della prova: rapporto di trasmissione 39-18, carico resistente impostato al rullo di 300 Watt per una distanza complessiva di 2 Km.

fasi: posizionamento in sella con pedali sganciati, avvio acquisizione, aggancio pedali ed inizio pedalata, raggiungimento di condizioni di regime con velocità prossima ai 21 Km/h, applicazione del carico resistente, mantenimento nelle condizioni per 40.secondi, arresto della pedalata, sgancio pedali, arresto dell'acquisizione e termine della prova, si è rilevata una velocità media di circa 21 Km/h.

Convenzione per l'angolo pedale: angolo θ_p negativo con rotazione oraria del pedale attorno all'asse del perno rispetto alla direzione di avanzamento.

PEDALE DESTRO-R

Vengono indicate le forze rilevate, i valori massimi, minimi e i relativi angoli di pedivella.

Il pedice a fianco della forza indica a quale pedale fa riferimento

Forze [N]	Max	Θ_c [deg]	Min	Θ_c [deg]
PN-R	668	144	86	328
PT-R	162	79	25	324
PV-R	667	144	80	328
PO-R	179	101	-108	202
PE-R	485	108	-143	259
PP-R	610	155	-202	29
PR-R	672	144	89	328

I valori di potenza istantanea rilevati, massimi e minimi, sono accompagnati dai relativi angoli di pedivella.

Potenza [W]	Max	Θ_c [deg]	Min	Θ_c [deg]
Pwr-R	714	108	-211	259

La potenza media di ciclo per un pedale

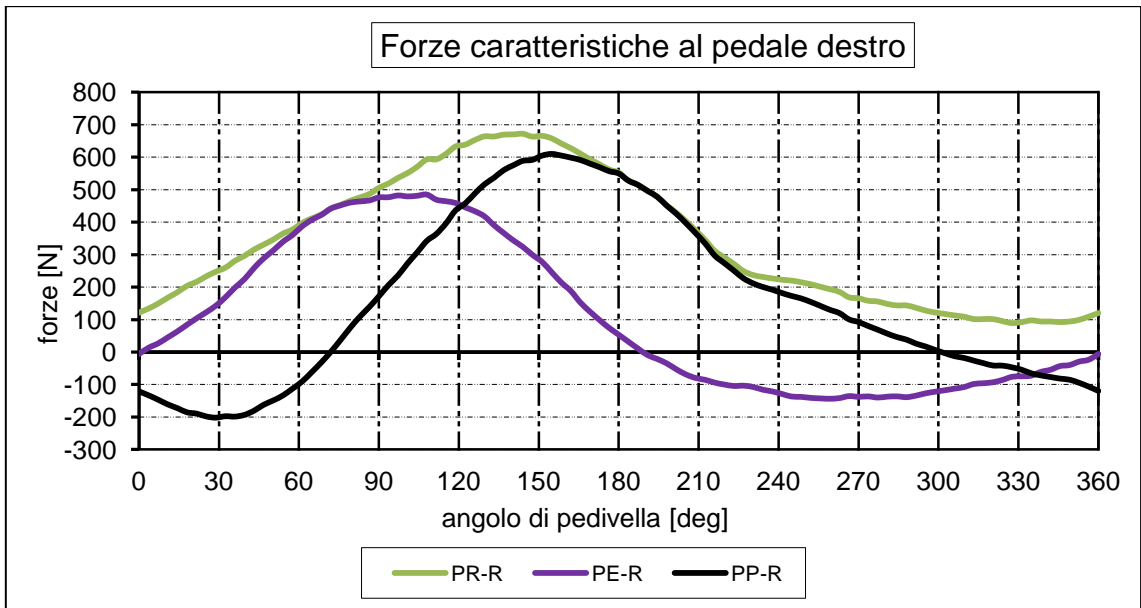
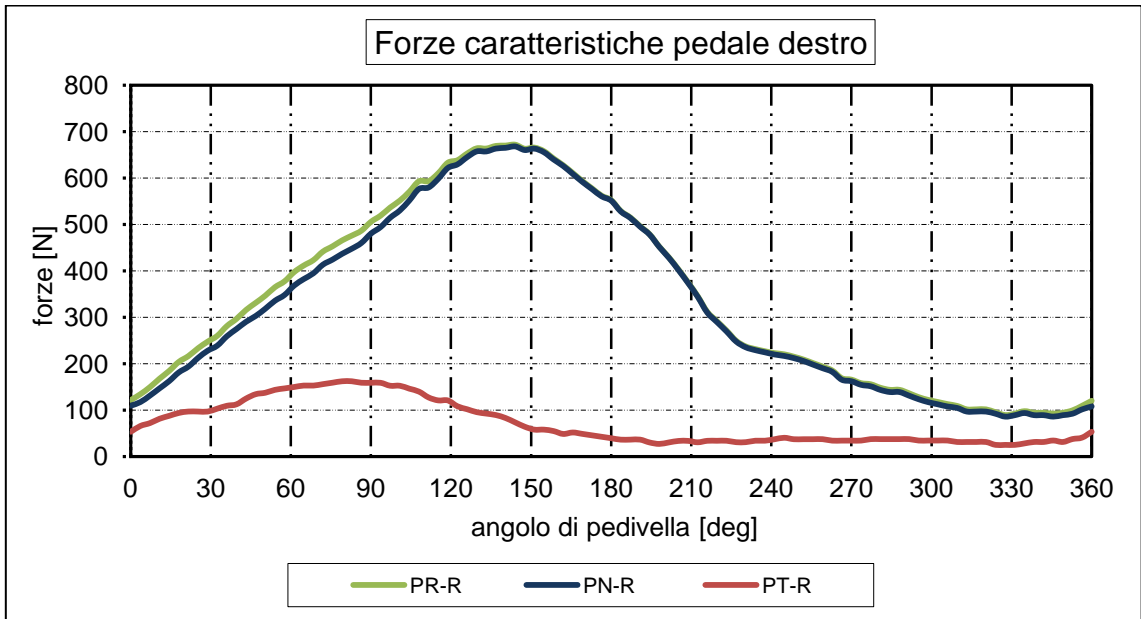
Pwr-med R	154 [W]
-----------	---------

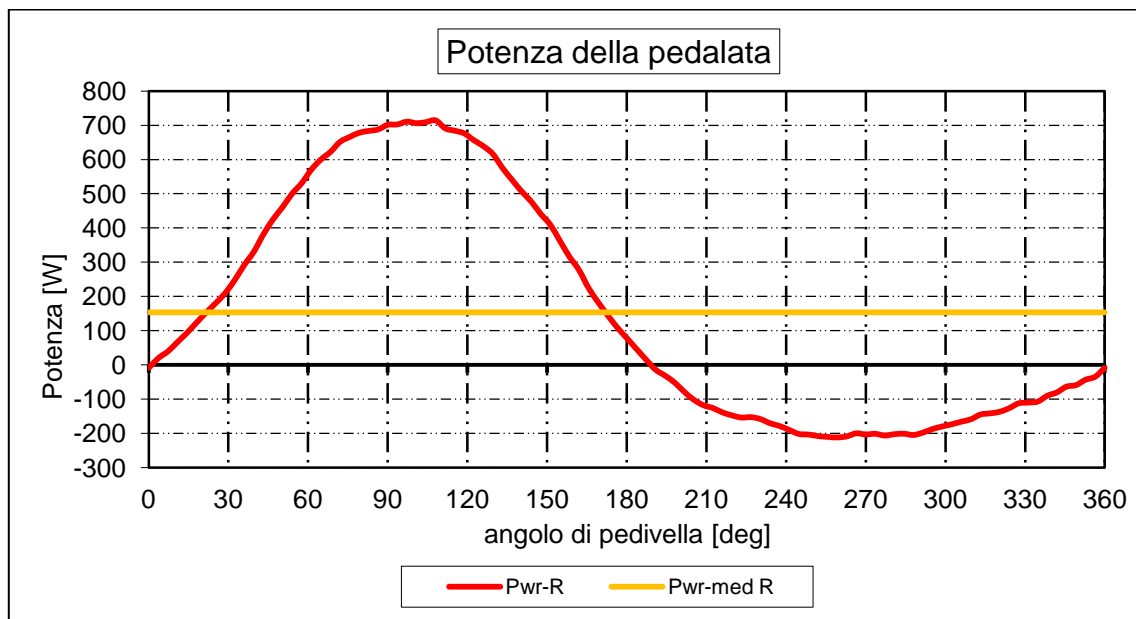
Il tempo medio ciclo.

Durata media ciclo Tc	0,746 [sec]
-----------------------	-------------

GRAFICI OTTENUTI

Le forze e le potenze sono diagrammate in funzione dell'angolo di pedivella





PEDALE SINISTRO

Vengono indicate le forze rilevate, i valori massimi, minimi e i relativi angoli di pedivella.

Forze [N]	Max	Θ_c [deg]	Min	Θ_c [deg]
PN-L	665	133	93	338
PT-L	175	86	5	331
PV-L	660	133	84	338
PO-L	198	108	-85	259
PE-L	522	86	-150	266
PP-L	595	148	-180	29
PR-L	675	133	94	338

I valori di potenza istantanea rilevati, massimi e minimi, sono accompagnati dai relativi angoli di pedivella

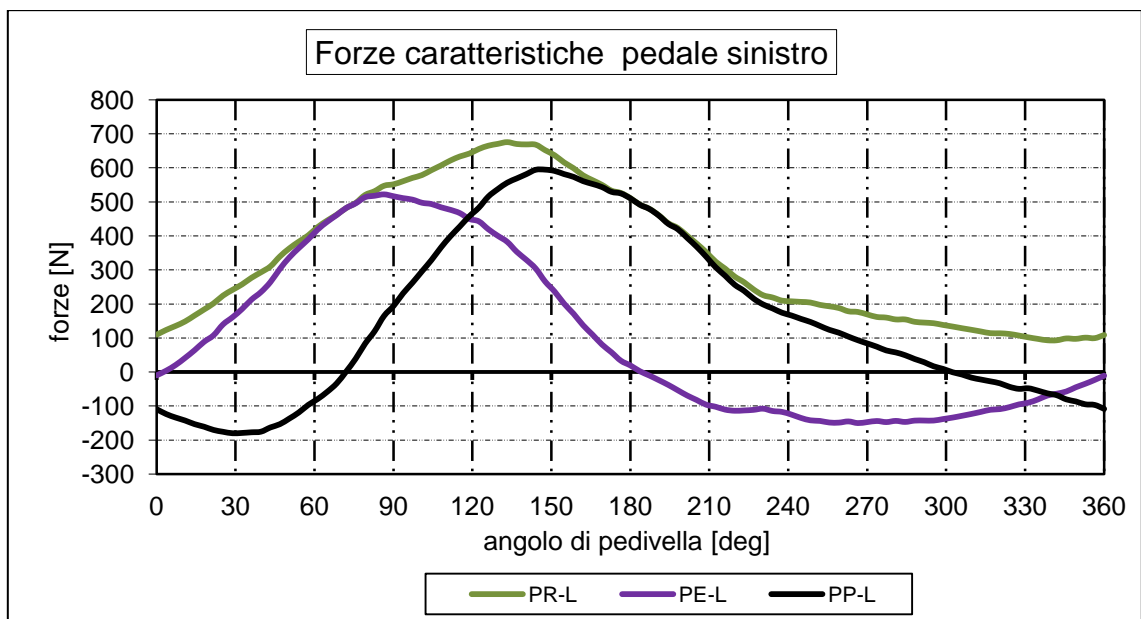
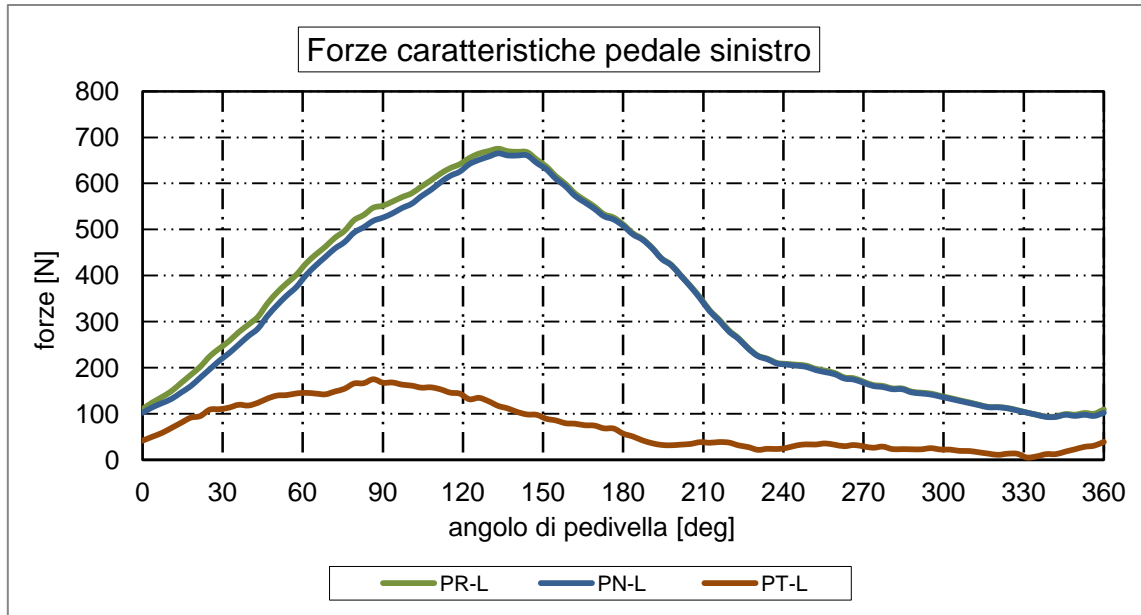
Potenza [W]	Max	Θ_c [deg]	Min	Θ_c [deg]
Pwr-L	765	86	-220	266

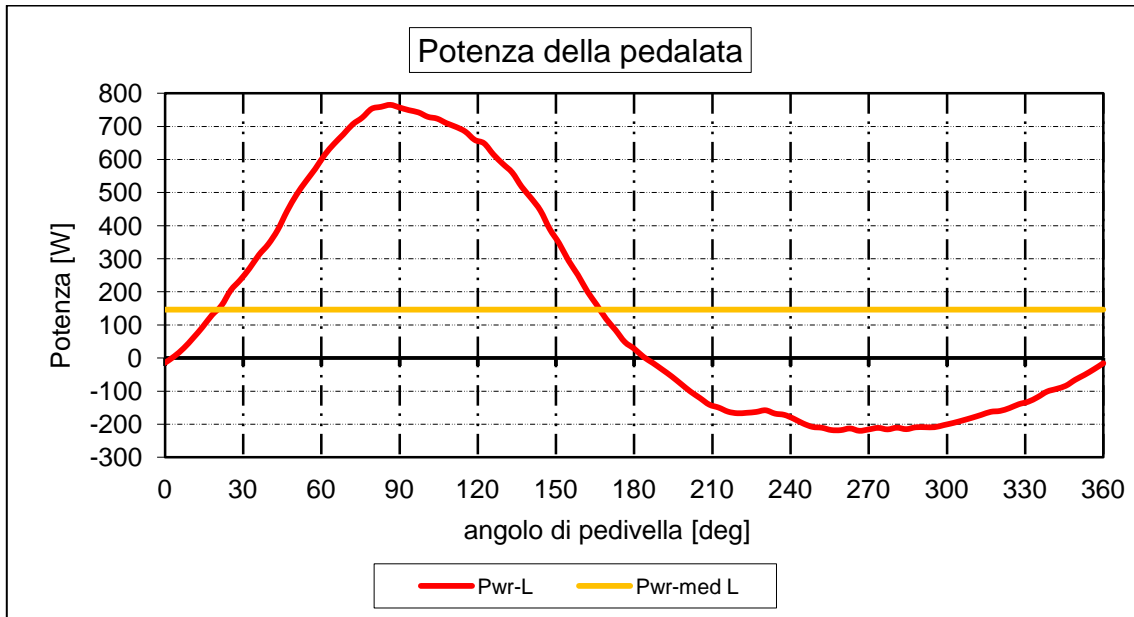
La potenza media di ciclo per un pedale

Pwr-med L	147 [W]
-----------	---------

GRAFICI OTTENUTI

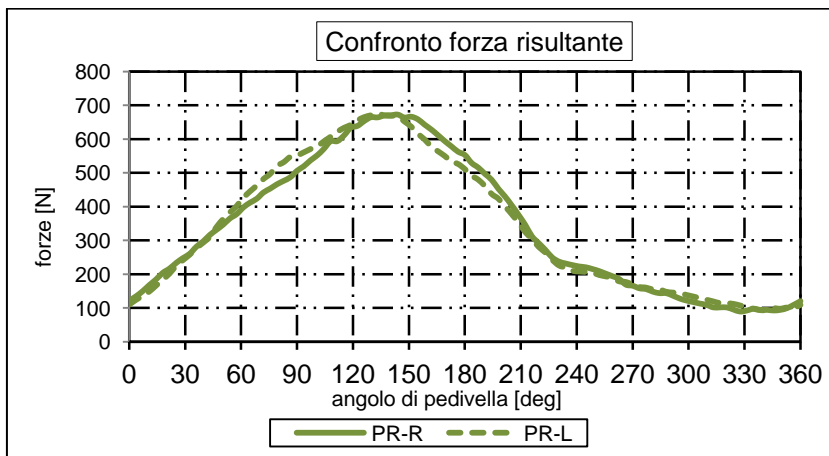
Le forze e le potenze sono diagrammate in funzione dell'angolo di pedivella



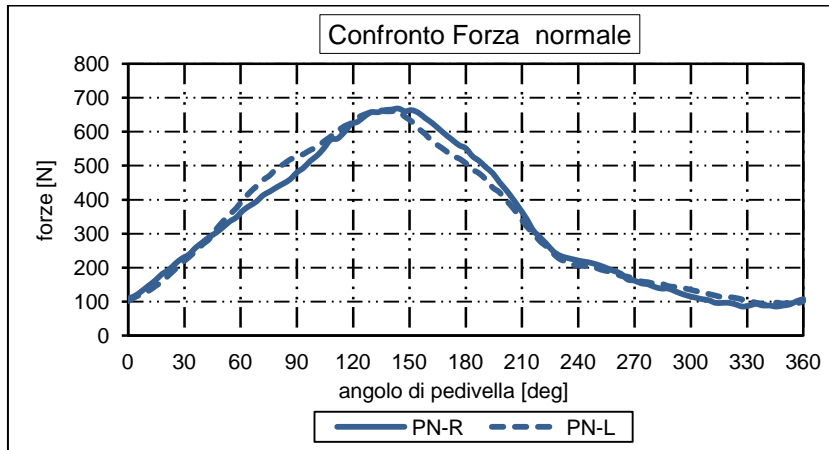


CONFRONTO FORZE SUI PEDALI

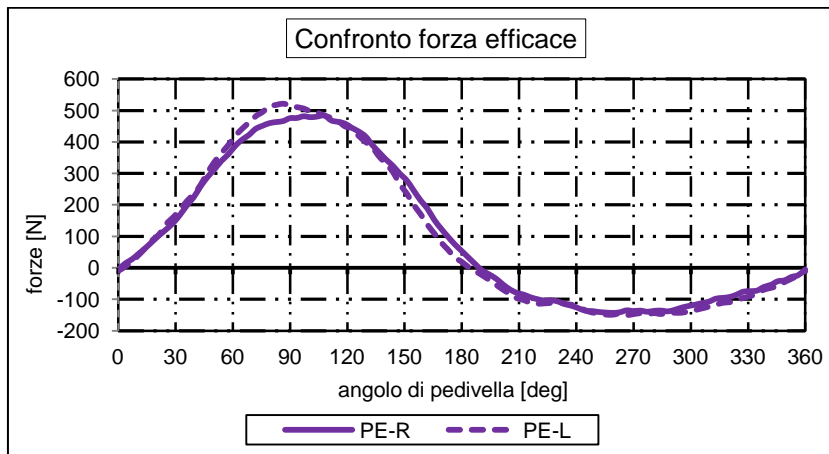
Si confronta la forza caratteristica rispetto ai due pedali, considerando nullo lo sfasamento



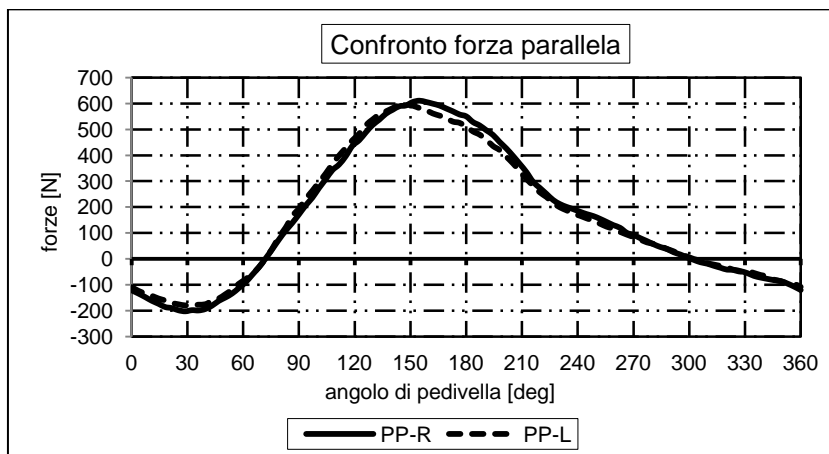
Forze[N]	PR-R	PR-L
Max	672	675
Θ_c [deg]	144	133
Min	89	94
Θ_c [deg]	328	338



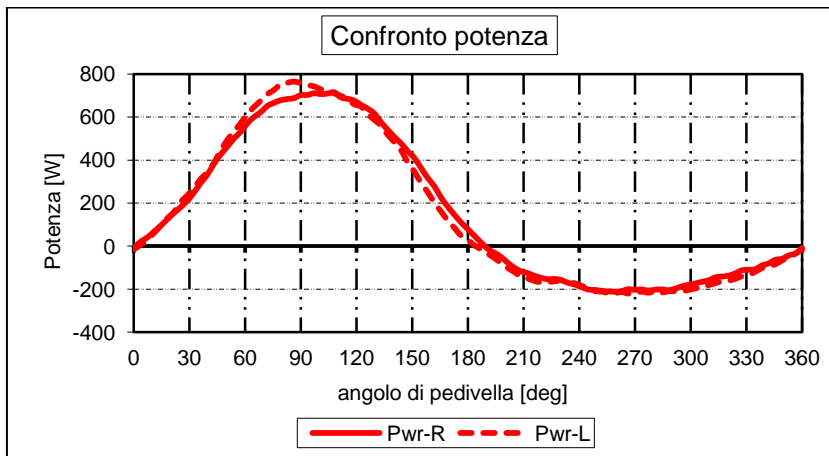
Forze[N]	PN-R	PN-L
Max	668	665
Θ_c [deg]	144	133
Min	86	93
Θ_c [deg]	328	338



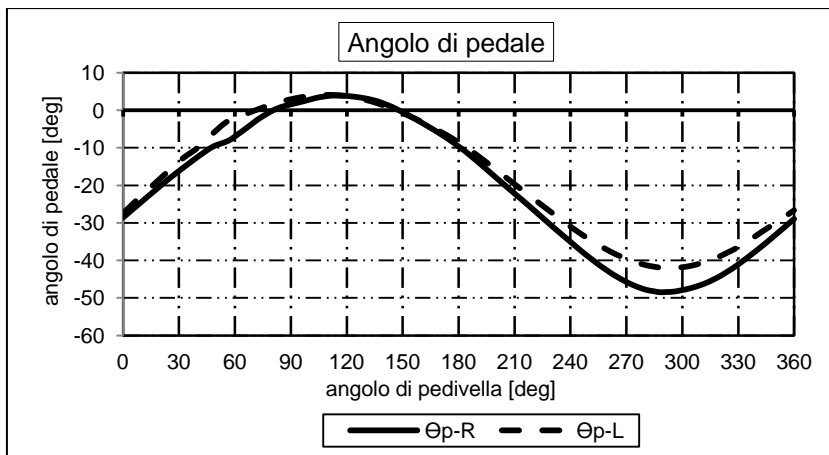
Forze[N]	PE-R	PE-L
Max	485	522
Θ_c [deg]	108	86
Min	-143	-150
Θ_c [deg]	259	266



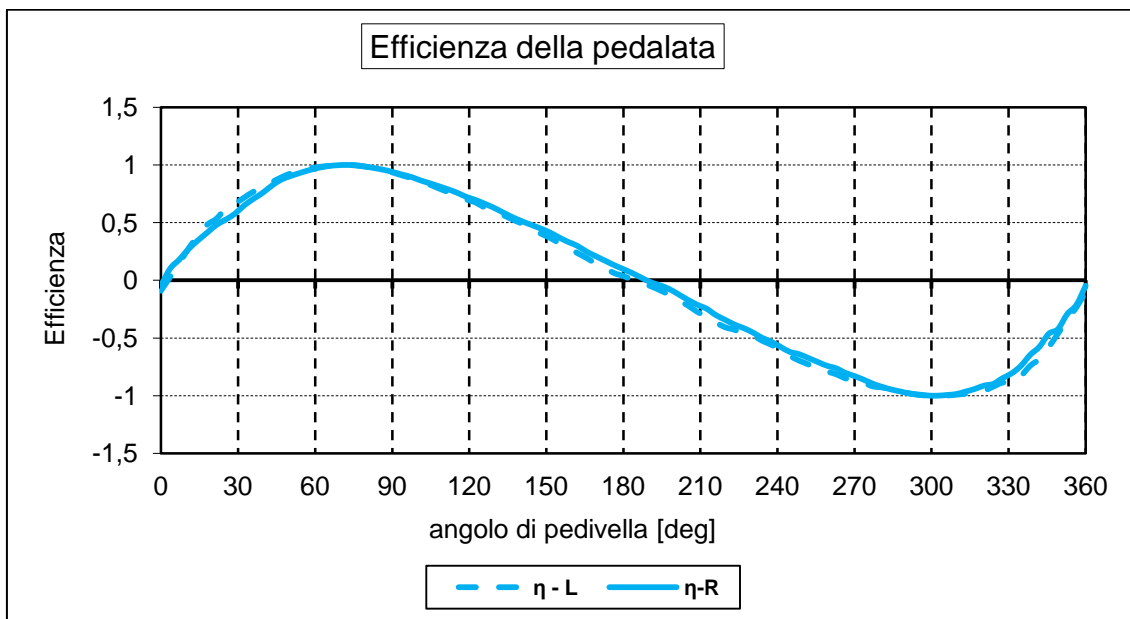
Forze[N]	PP-R	PP-L
Max	611	595
Θ_c [deg]	155	148
Min	-202	-180
Θ_c [deg]	29	29

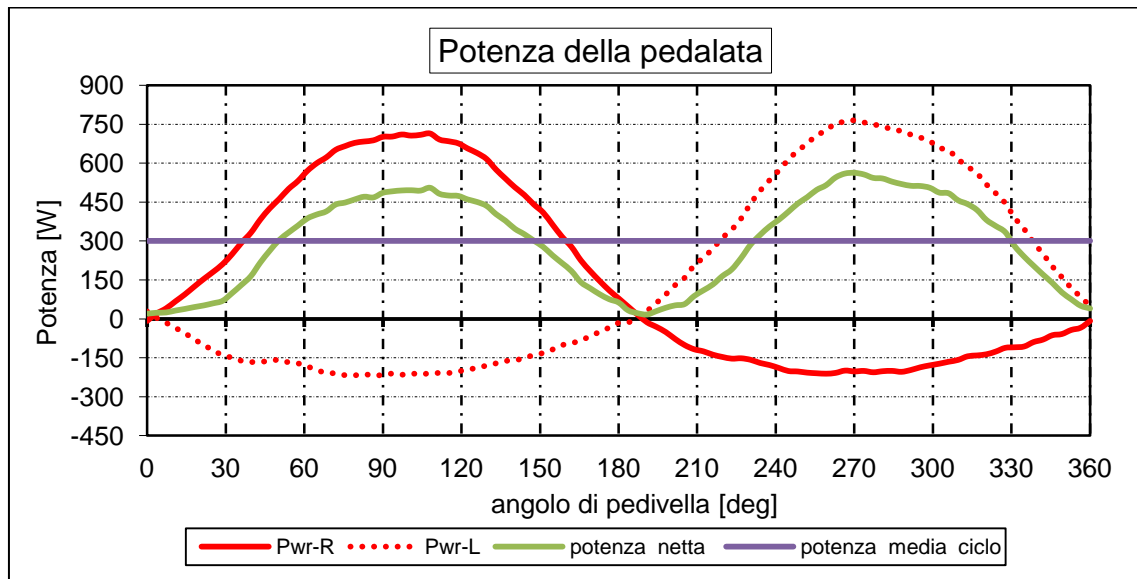


Pot [W]	Pwr-R	Pwr-L
Max	714	765
Θ_c [deg]	108	86
Min	-211	-220
Θ_c [deg]	259	266



ang	Θ_p-R	Θ_p-L
Max	4	4
Θ_c [deg]	115	112
Min	-48	-42
Θ_c [deg]	288	295





La potenza media del ciclo considerando entrambi i pedali risulta essere di 300W

QUINTA PROVA

Nome prova : 350_2

condizioni di della prova: rapporto di trasmissione 39-18, carico resistente impostato al rullo di 350 Watt per una distanza complessiva di 2 Km.

fasi: posizionamento in sella con pedali sganciati, avvio acquisizione, aggancio pedali ed inizio pedalata, raggiungimento di condizioni di regime con velocità prossima ai 21 Km/h, applicazione del carico resistente, mantenimento nelle condizioni per 40.secondi, arresto della pedalata, sgancio pedali, arresto dell'acquisizione e termine della prova, si è rilevata una velocità media di circa 20 Km/h.

Convenzione per l'angolo pedale: angolo θ_p negativo con rotazione oraria del pedale attorno all'asse del perno rispetto alla direzione di avanzamento.

PEDALE DESTRO-R

Vengono indicate le forze rilevate, i valori massimi, minimi e i relativi angoli di pedivella.

Il pedice a fianco della forza indica a quale pedale fa riferimento

Forze [N]	Max	Θ_c [deg]	Min	Θ_c [deg]
PN-R	594	130	67	335
PT-R	145	68	7	324
PV-R	592	137	56	324
PO-R	153	94	-95	248
PE-R	454	101	-118	274
PP-R	512	148	-184	29
PR-R	599	130	68	335

I valori di potenza istantanea rilevati, massimi e minimi, sono accompagnati dai relativi angoli di pedivella

Potenza [W]	Max	Θ_c [deg]	Min	Θ_c [deg]
Pwr-R	712	101	-185	274

La potenza media di ciclo per un pedale

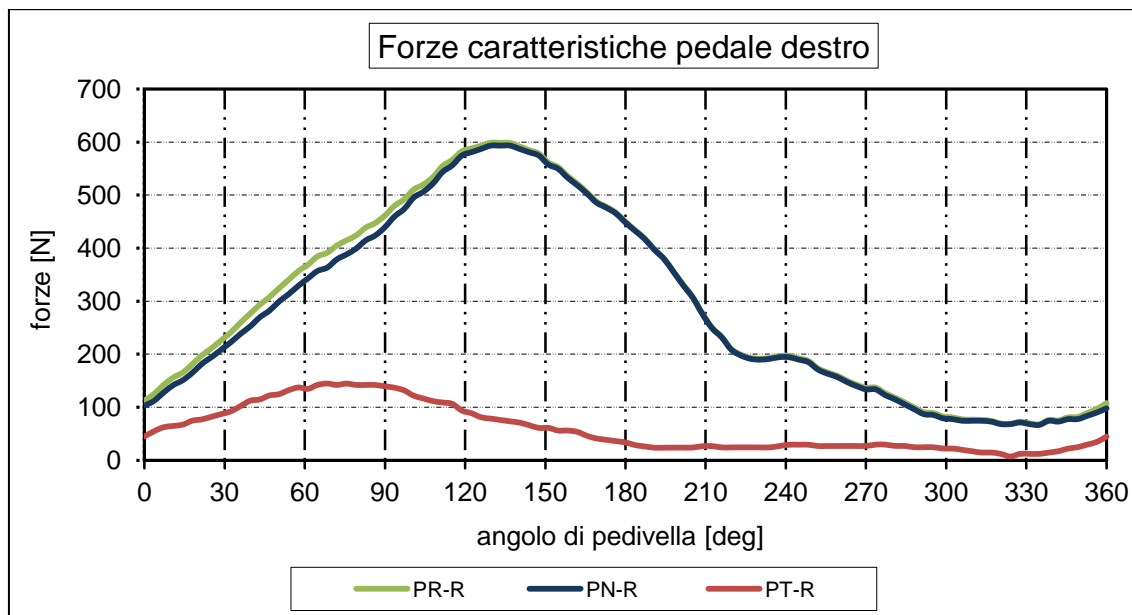
Pwr-med R	163 [W]
-----------	---------

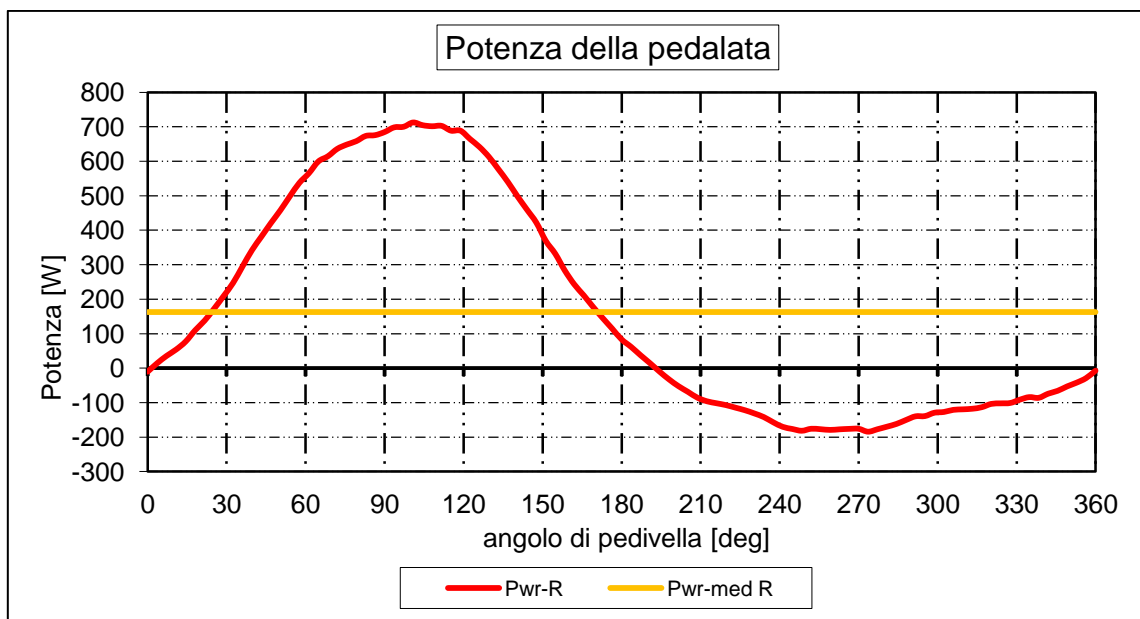
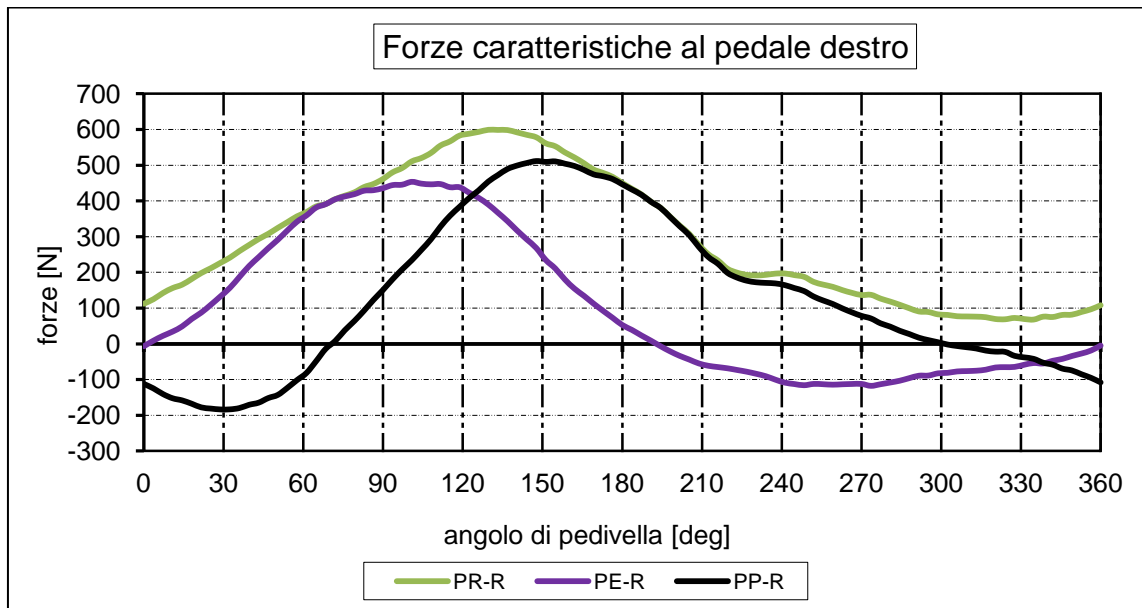
Il tempo medio ciclo.

Durata media ciclo T_c	0,7 [sec]
--------------------------	-----------

GRAFICI OTTENUTI

Le forze e le potenze sono diagrammate in funzione dell'angolo di pedivella





PEDALE SINISTRO

Vengono indicate le forze rilevate, i valori massimi, minimi e i relativi angoli di pedivella.

Forze [N]	Max	Θ_c [deg]	Min	Θ_c [deg]
PN-L	658	126	69	331
PT-L	156	76	3	331
PV-L	654	126	58	331
PO-L	187	101	-76	252
PE-L	526	101	-120	288
PP-L	547	144	-207	29
PR-L	670	126	69	331

I valori di potenza istantanea rilevati, massimi e minimi, sono accompagnati dai relativi angoli di pedivella

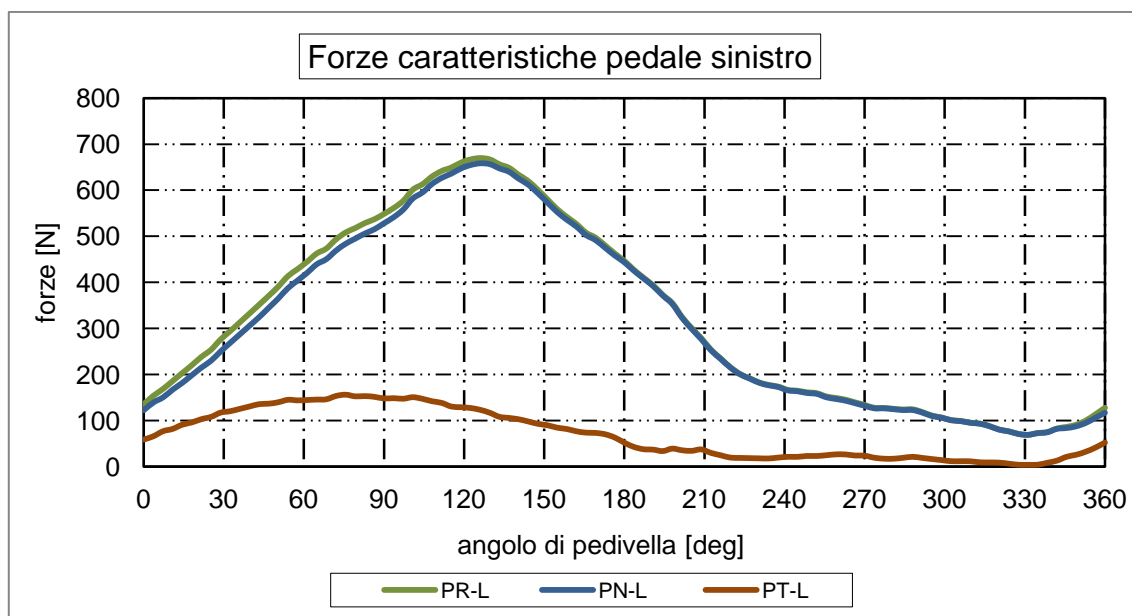
Potenza [W]	Max	Θ_c [deg]	Min	Θ_c [deg]
Pwr-L	827	101	-188	288

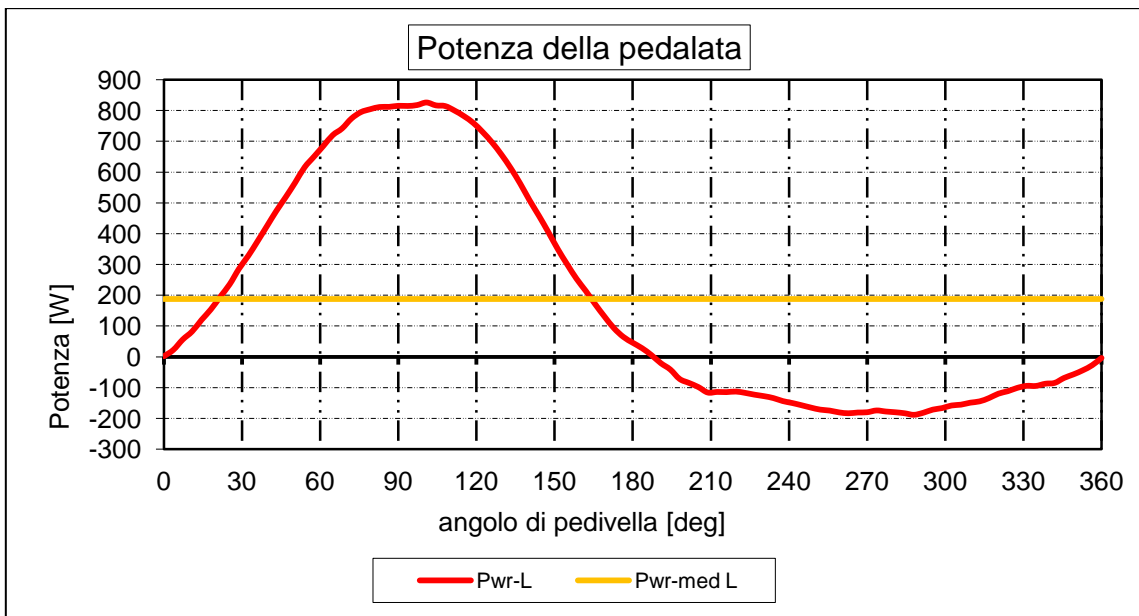
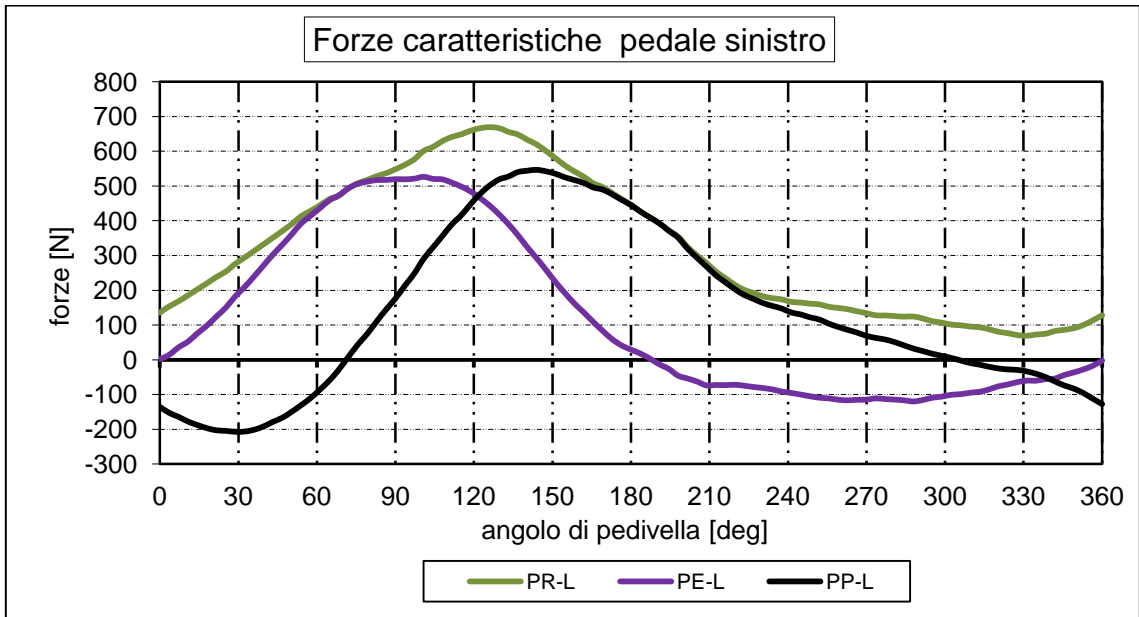
La potenza media di ciclo per un pedale

Pwr-med R	188 [W]
-----------	---------

GRAFICI OTTENUTI

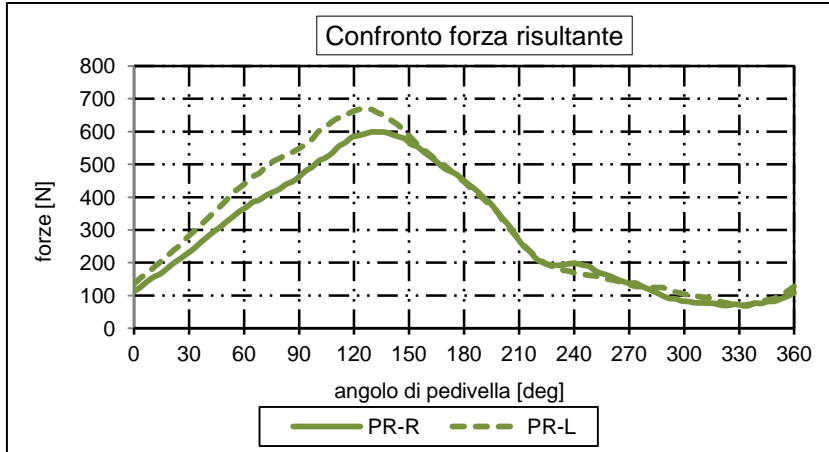
Le forze e le potenze sono diagrammate in funzione dell'angolo di pedivella



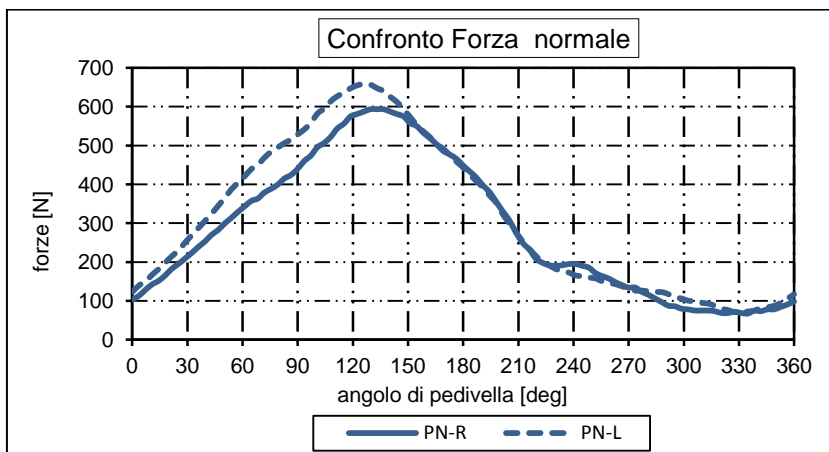


CONFRONTO FORZE SUI PEDALI

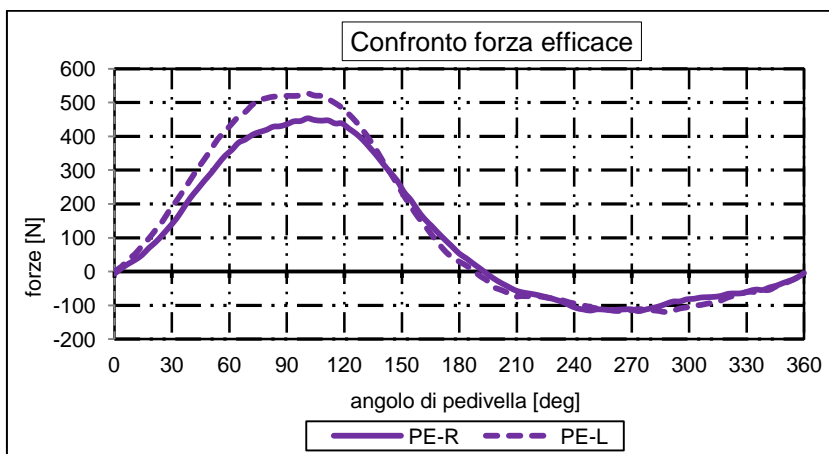
Si confronta la forza caratteristica rispetto ai due pedali, considerando nullo lo sfasamento



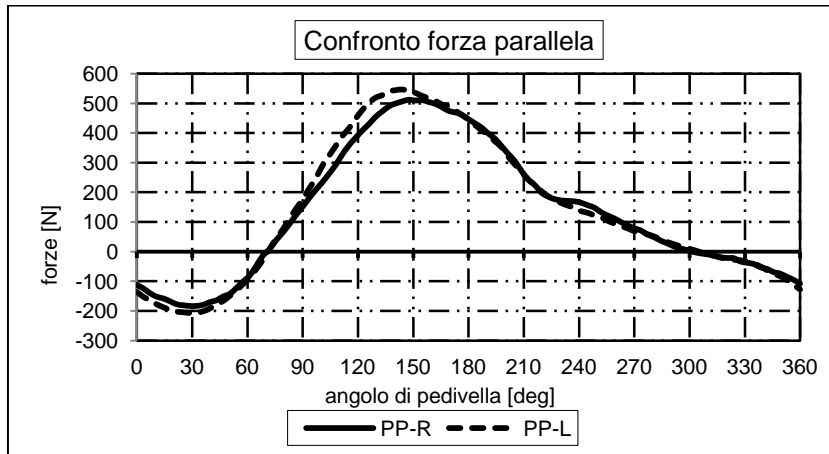
Forze[N]	PR-R	PR-L
Max	599	670
Θ_c [deg]	130	126
Min	68	69
Θ_c [deg]	335	331



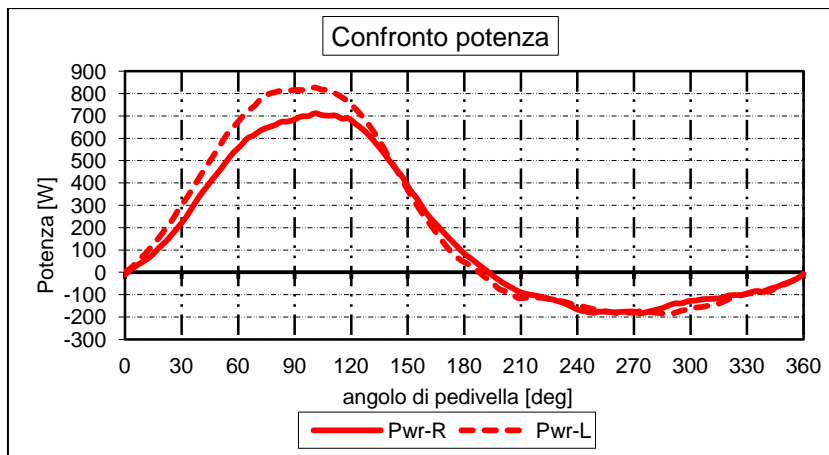
Forze[N]	PN-R	PN-L
Max	594	658
Θ_c [deg]	130	126
Min	67	69
Θ_c [deg]	335	331



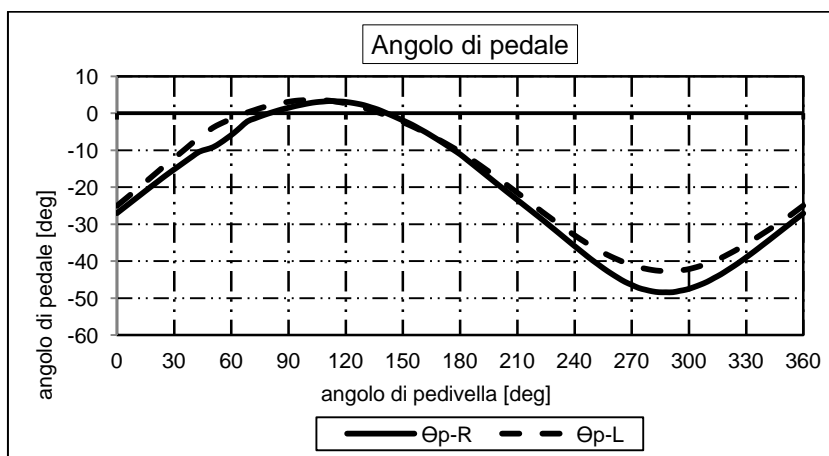
Forze[N]	PE-R	PE-L
Max	454	526
Θ_c [deg]	101	101
Min	-118	-120
Θ_c [deg]	274	288



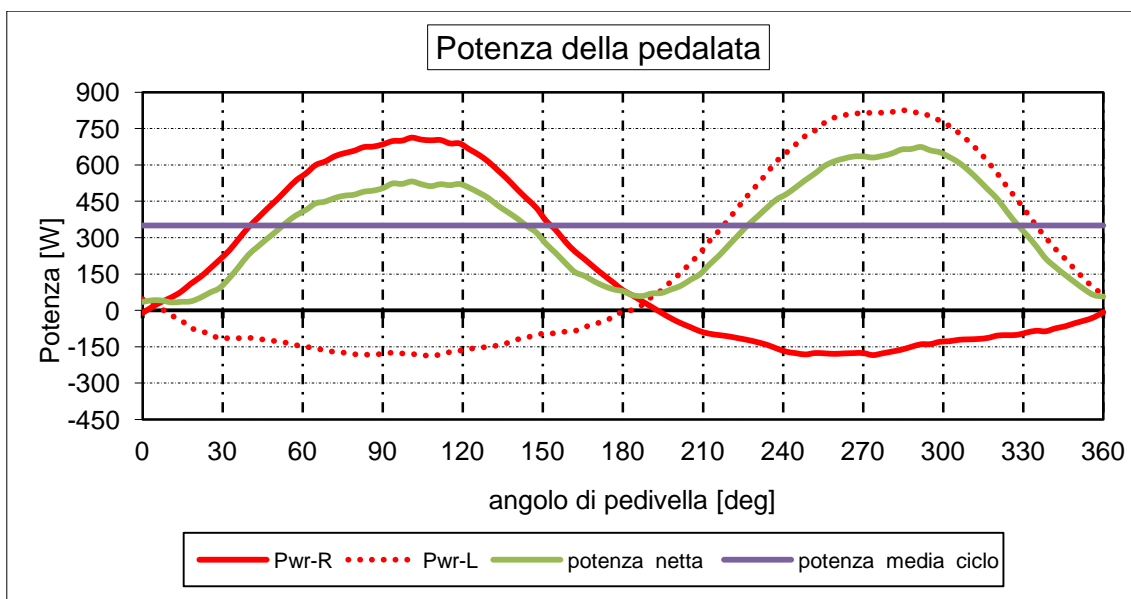
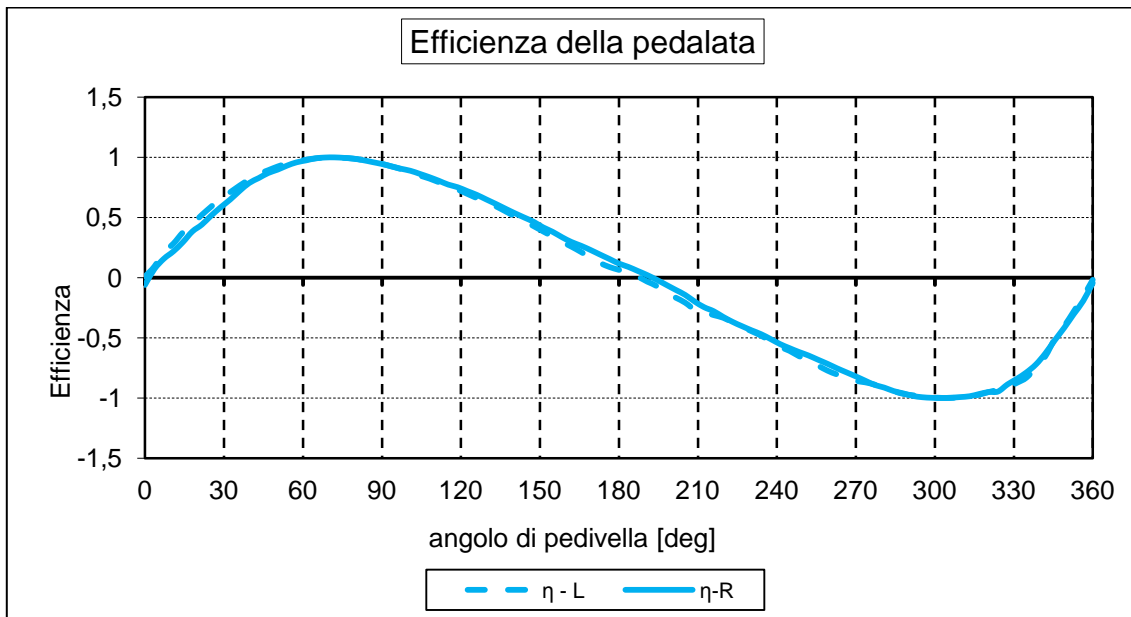
Forze[N]	PP-R	PP-L
Max	512	547
Θ_c [deg]	148	144
Min	-184	-207
Θ_c [deg]	29	29



Pot[W]	PwrR	PwrL
Max	712	827
Θ_c [deg]	101	101
Min	-185	-188
Θ_c [deg]	274	288



ang	Θ_p -R	Θ_p -L
Max	3	4
Θ_c [deg]	112	104
Min	-48	-43
Θ_c [deg]	288	292

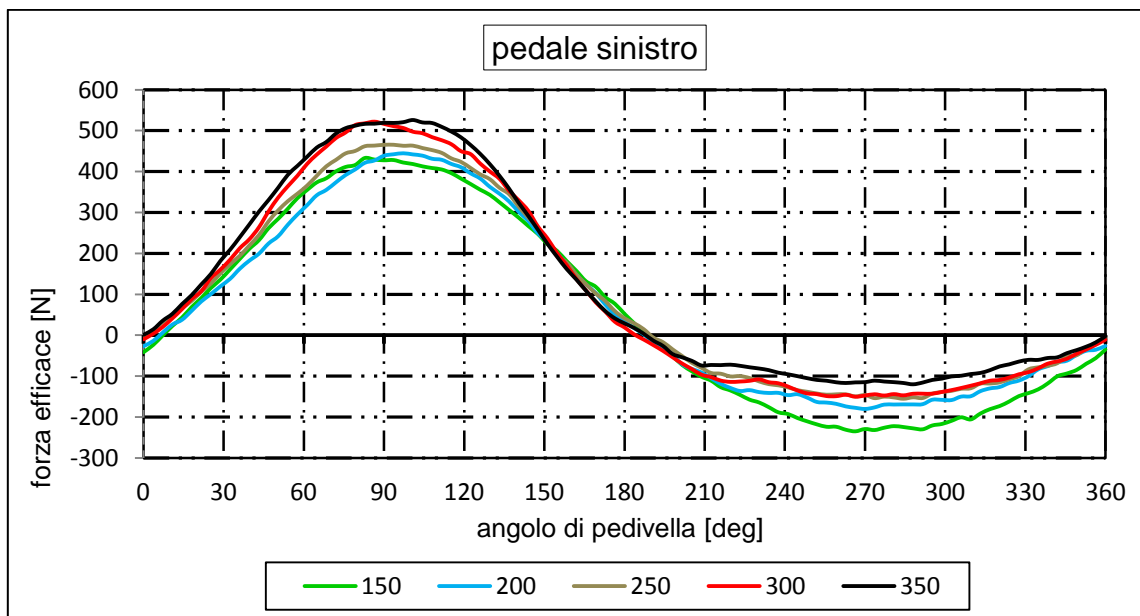
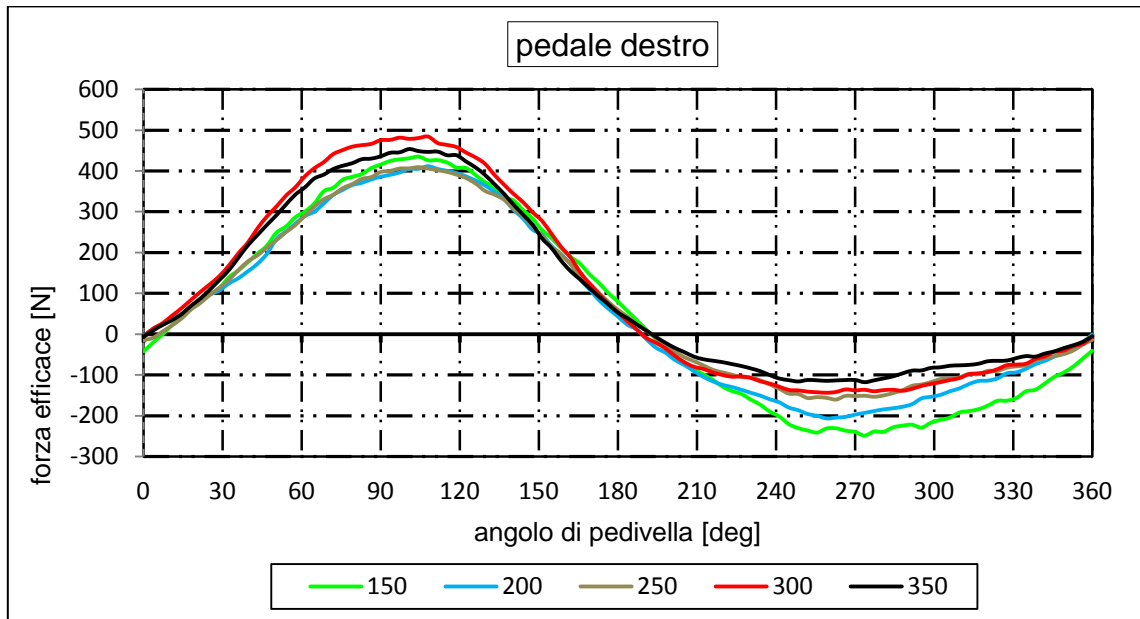


La potenza media del ciclo considerando entrambi i pedali risulta essere di 350 W

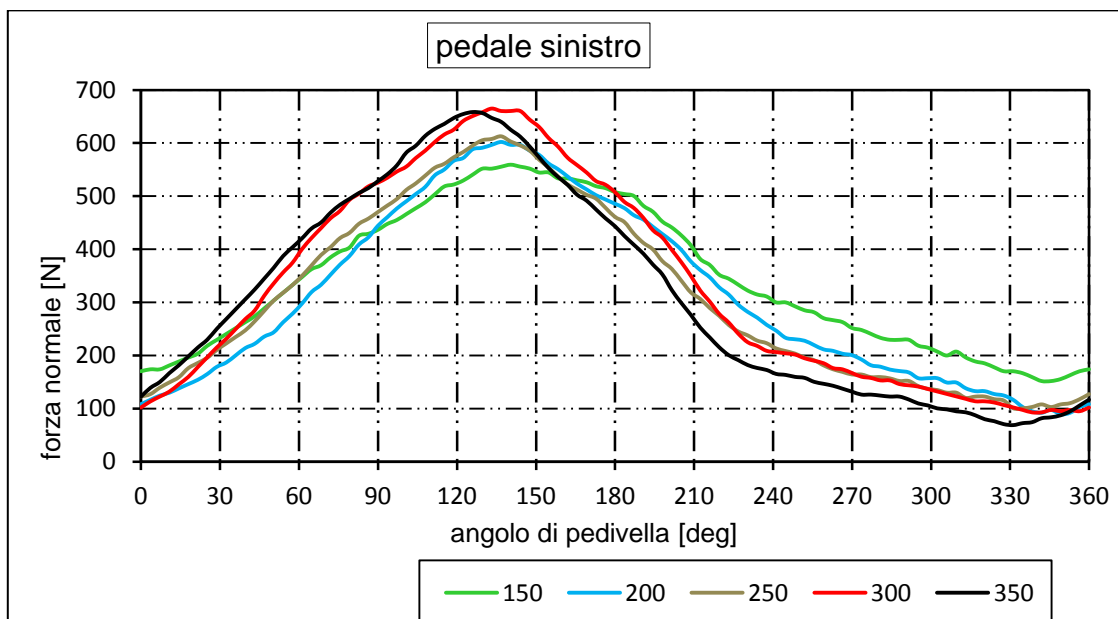
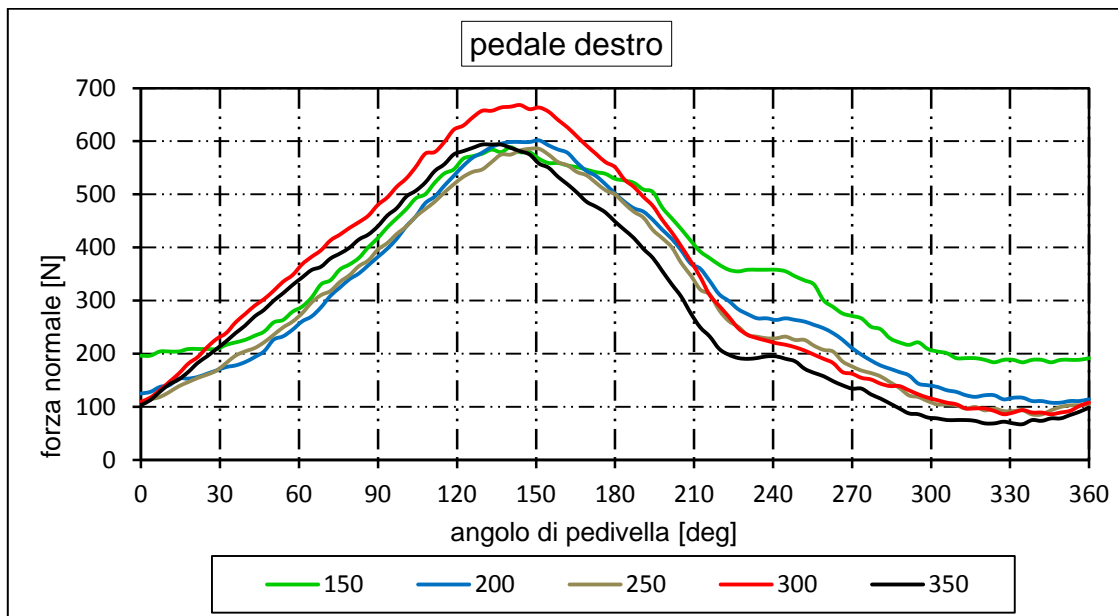
6.2.2 CONFRONTO CURVE CARATTERISTICHE

Nei grafici seguenti si riassume 'andamento della forze caratteristiche nelle cinque prove per ciascun pedale.

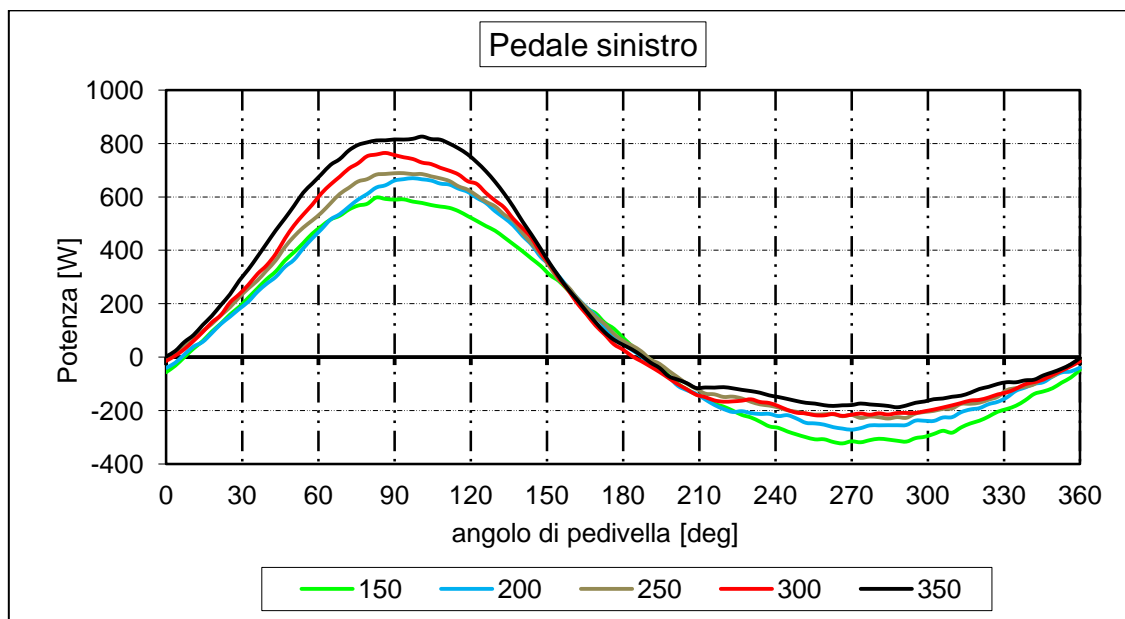
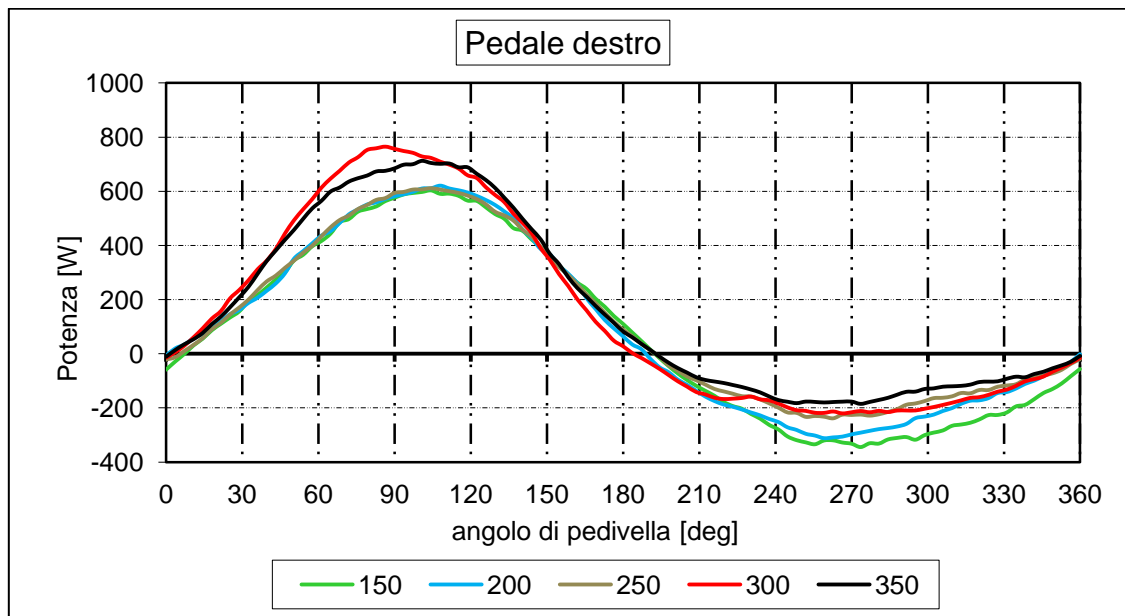
La forza efficace PE ha il seguente andamento



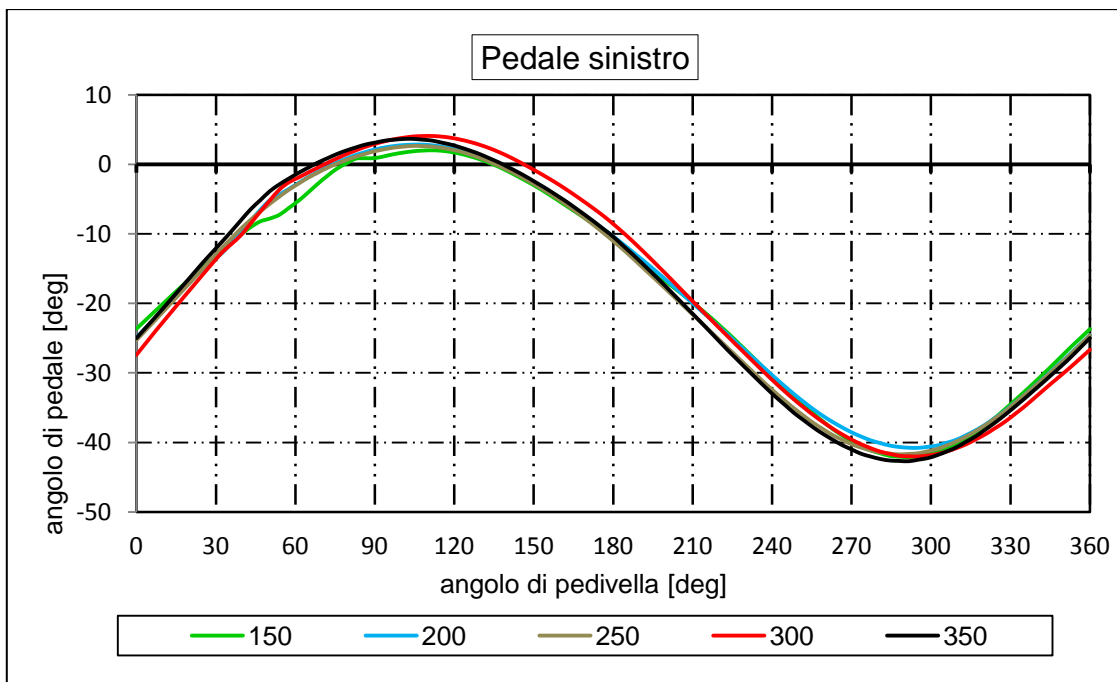
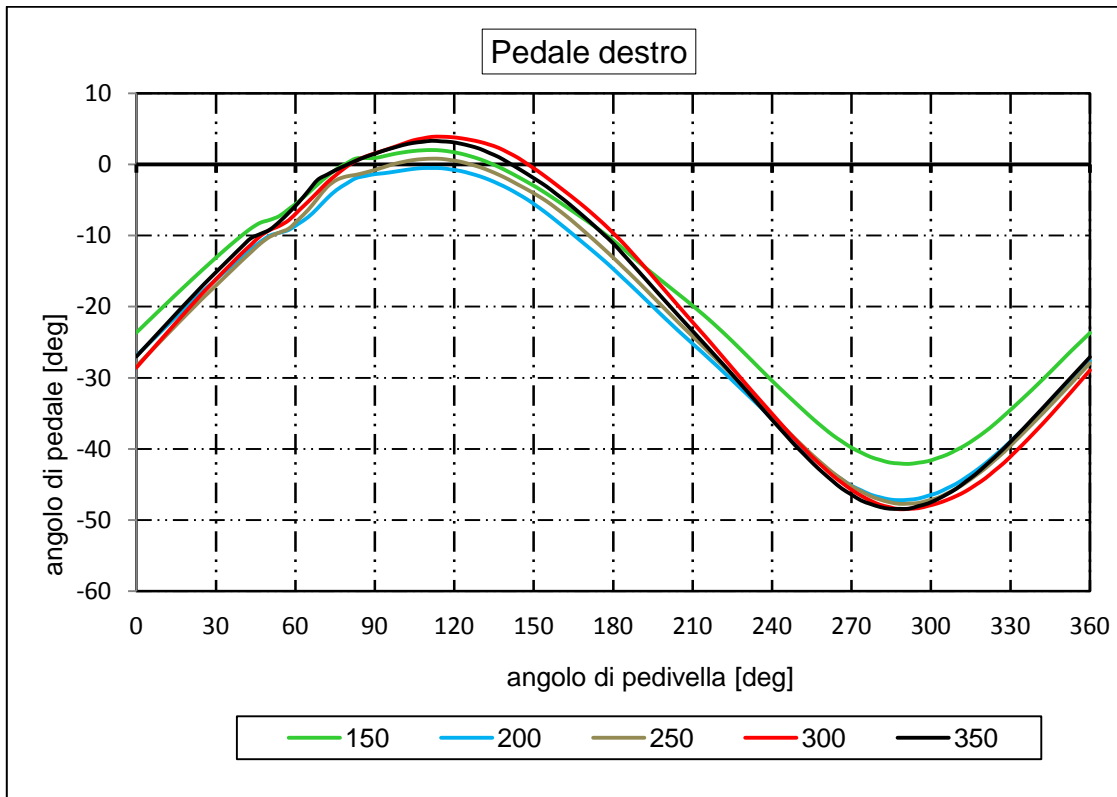
La forza normale PN ha il seguente andamento.



La potenza istantanea ha il seguente andamento



L'angolo di pedale ha il seguente andamento

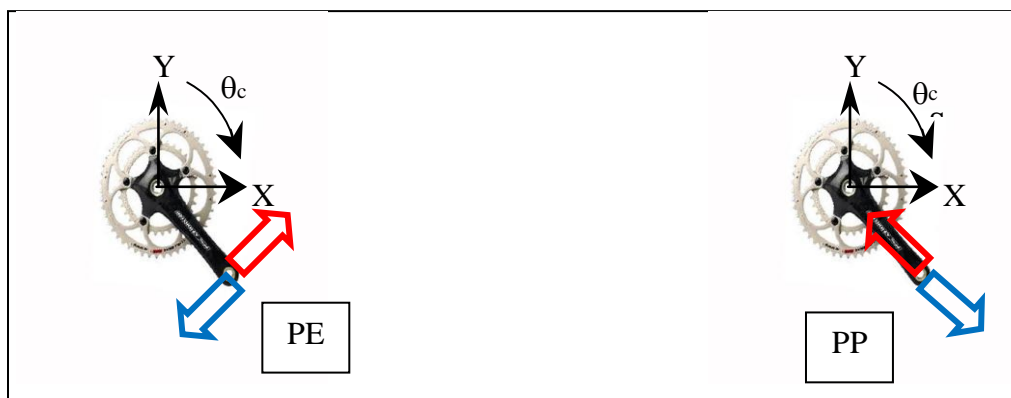


6.2.3 DIAGRAMMI POLARI

Si vuole dare una spiegazione dei diagrammi polari elaborati con il software MATLAB. Si sono considerate le forze caratteristiche scambiate durante il ciclo di pedalata in un giro completo di pedivella con $0^\circ < \theta_c < 360^\circ$. I vettori rappresentanti il modulo della forza sono stati disegnati su di un piano contenente una serie di circonferenze concentriche, ognuna di esse indica un preciso valore del modulo della forza, i vettori hanno origine lungo la circonferenza di modulo 0N. In funzione del segno della forza il vettore è stato disegnato all'interno della circonferenza "0N" se è negativo e all'esterno se il modulo è positivo. Ogni circonferenza è stata suddivisa in 12 settori, ognuno con un'estensione angolare di 30° . Le estremità di ciascun vettore sono state collegate a formare un contorno a rappresentare l'andamento della forza durante un giro completo di pedivella.

I diversi stati di sollecitazione agenti sulla pedivella sono stati definiti con due colori. Nel caso della forza parallela PP, quando la pedivella viene sollecitata a compressione il valore assunto è negativo e viene rappresentato con un vettore di colore rosso.

La forza parallela PP, viene assunta positiva quando la pedivella è soggetta a trazione e viene rappresentata da un vettore di colore blu. Nel caso della forza efficace PE, viene assunta positiva quando genera un momento motore che muove la bicicletta ed è rappresentata da un vettore di colore blu ortogonale all'asse della pedivella. Viene assunta negativa nel caso contrario. A fianco di ciascun diagramma sono state aggiunte delle icone a indicare il colore assunto dal vettore delle forze, se positive o negative. Si è scelta una convenzione per definire il pedale destro e sinistro e il vettore delle forze, Figura 6.9.



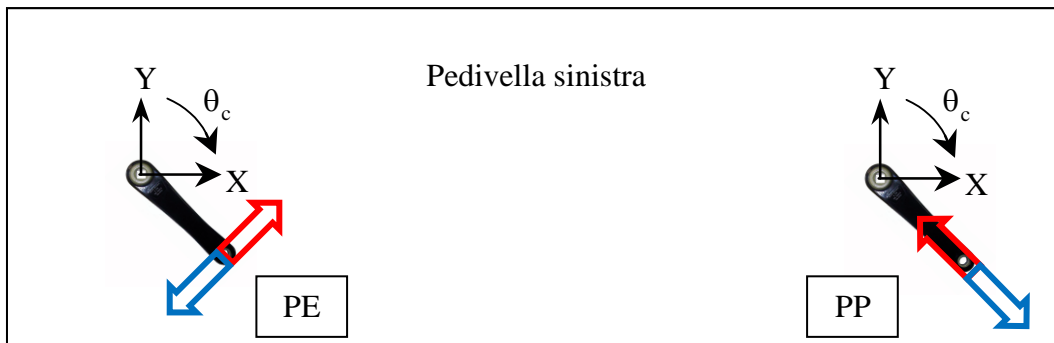
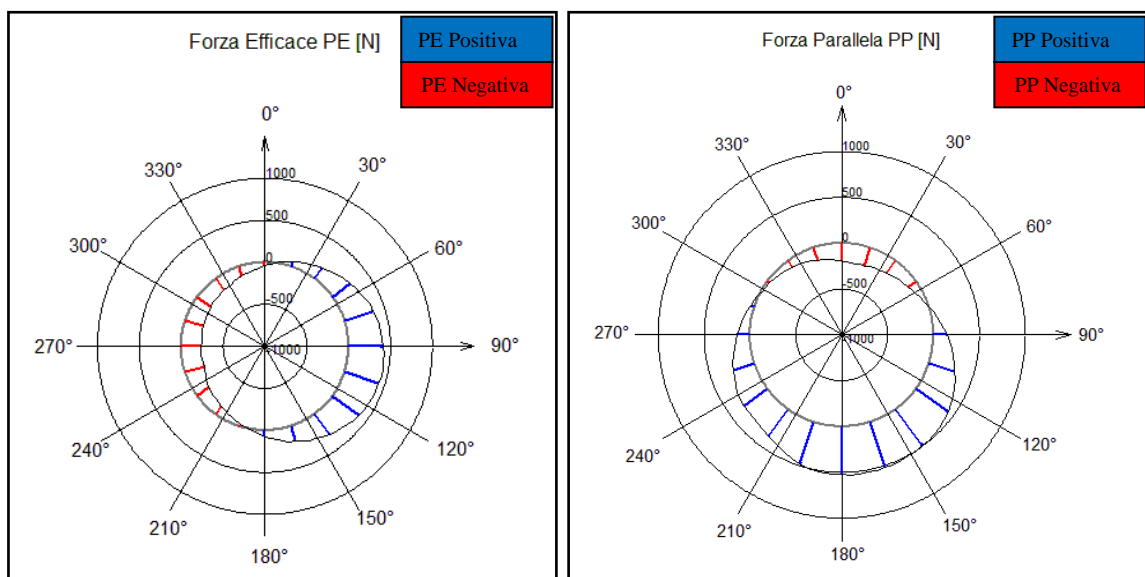


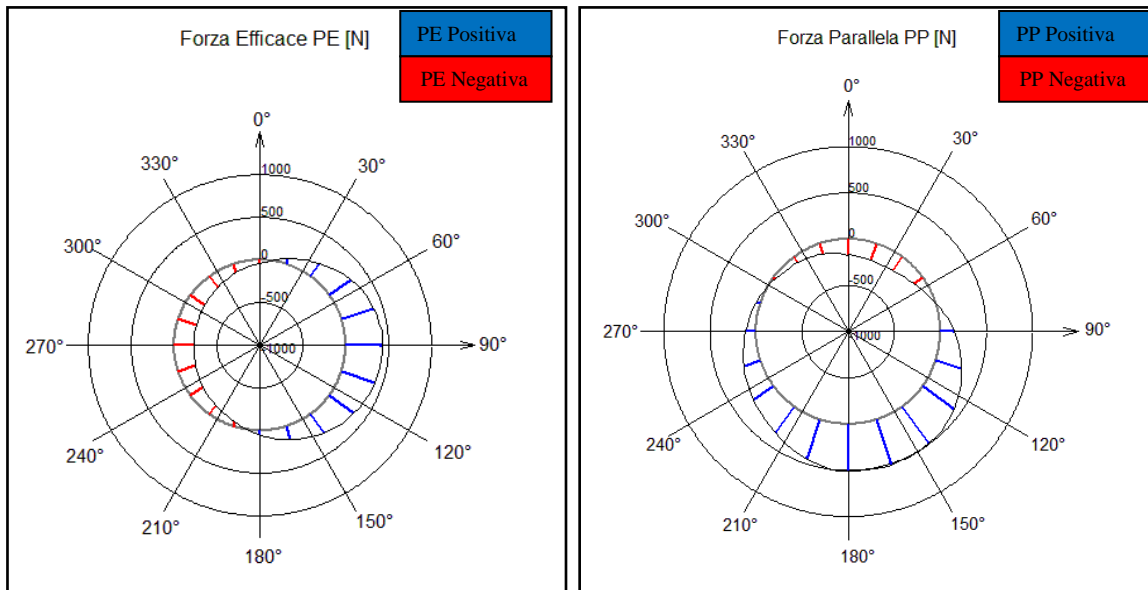
Figura 6.9: Convenzione per la rappresentazione delle forze

PRIMA PROVA

Si riportano i grafici della forza efficace e parallela della pedivella destra

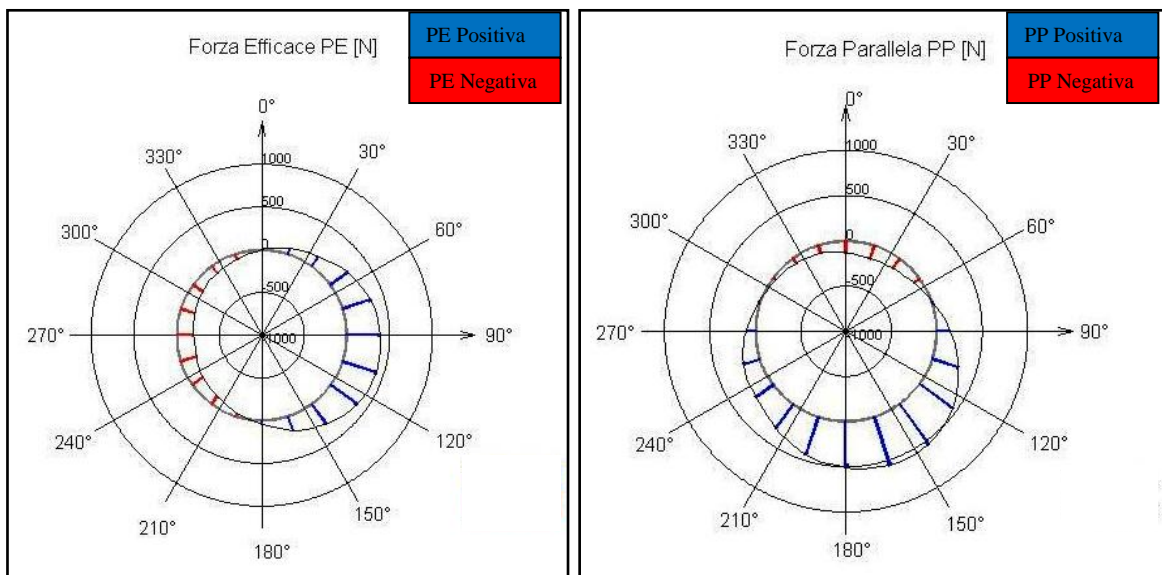


Si riportano i grafici della forza efficace e parallela della pedivella sinistra.

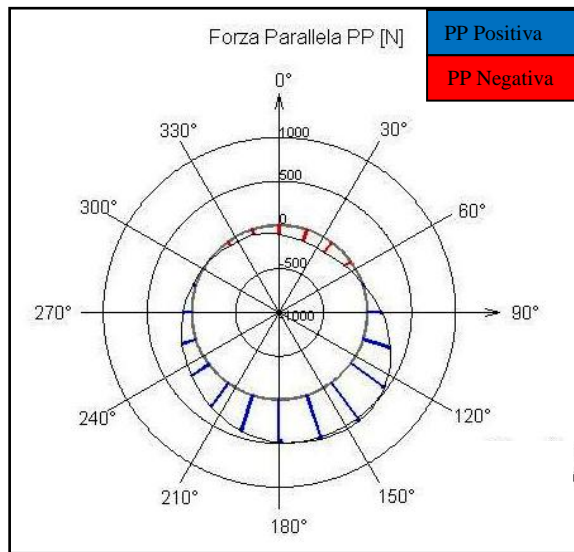
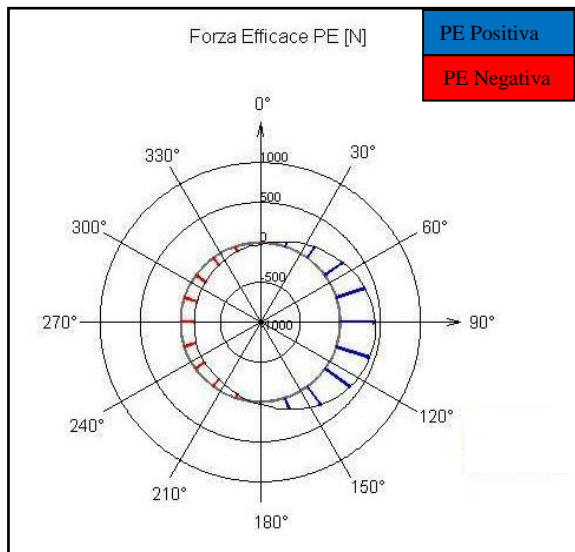


SECONDA PROVA

Si riportano i grafici della forza efficace e parallela della pedivella destra.

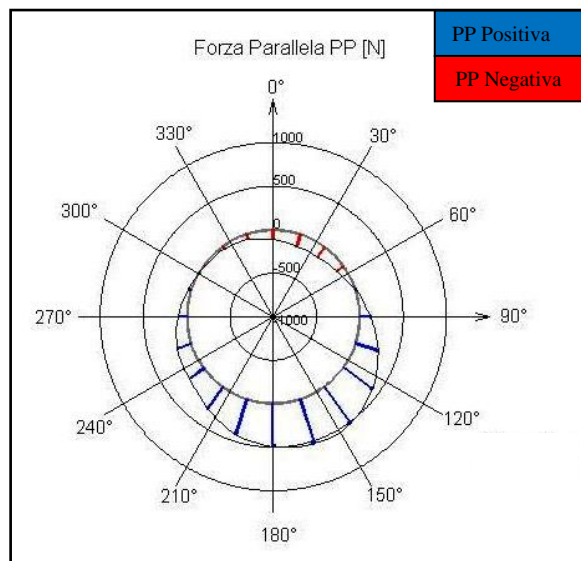
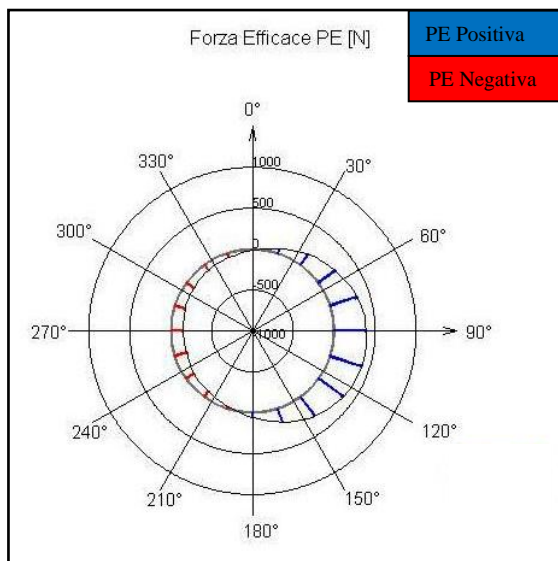


Si riportano i grafici della forza efficace e parallela della pedivella sinistra

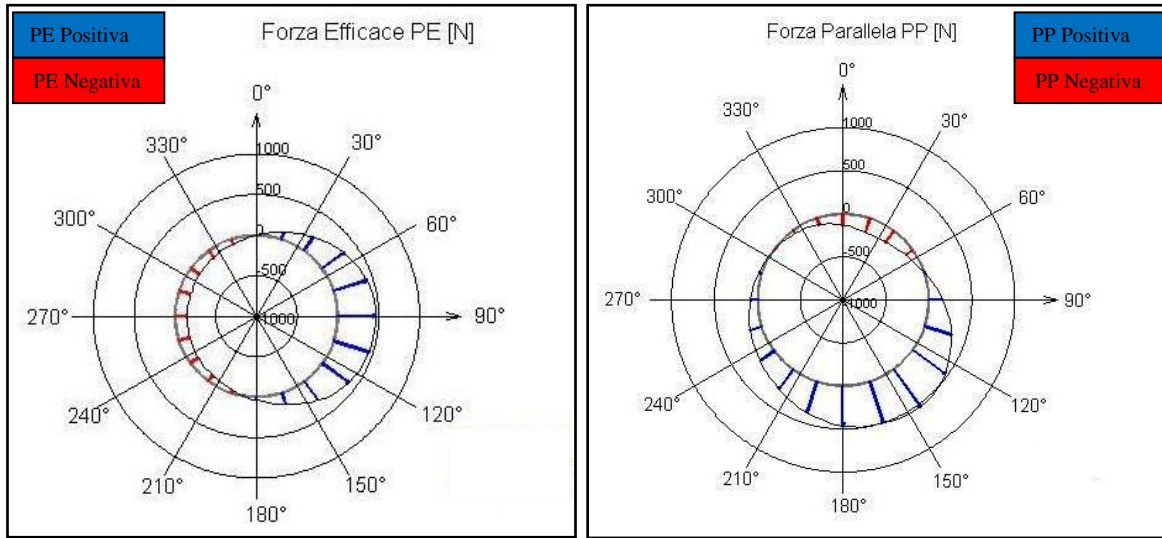


TERZA PROVA

Si riportano i grafici della forza efficace e parallela della pedivella destra

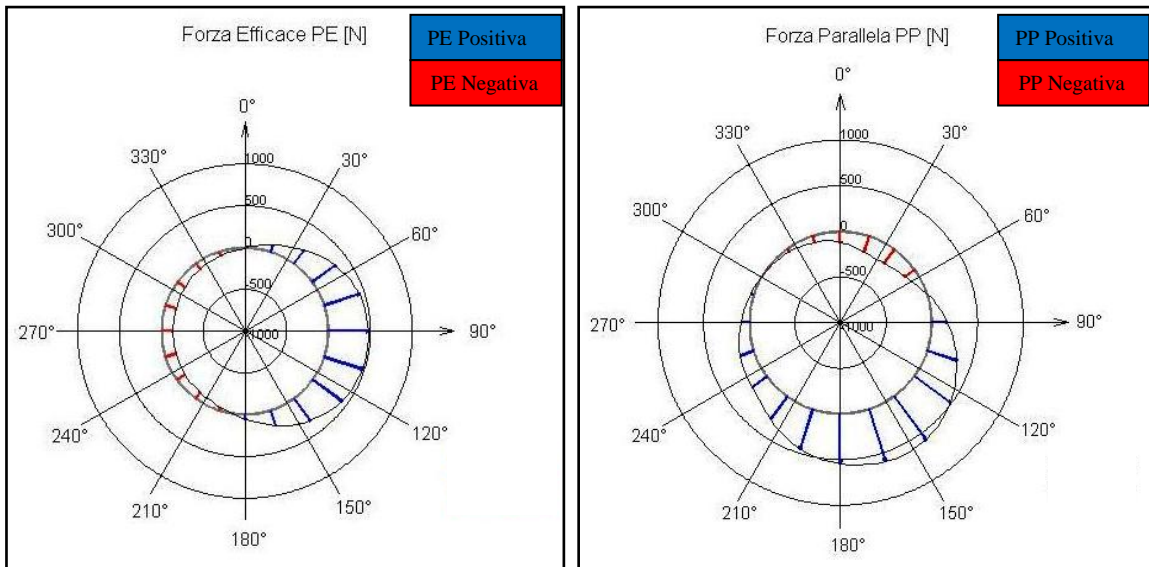


Si riportano i grafici della forza efficace e parallela della pedivella sinistra.

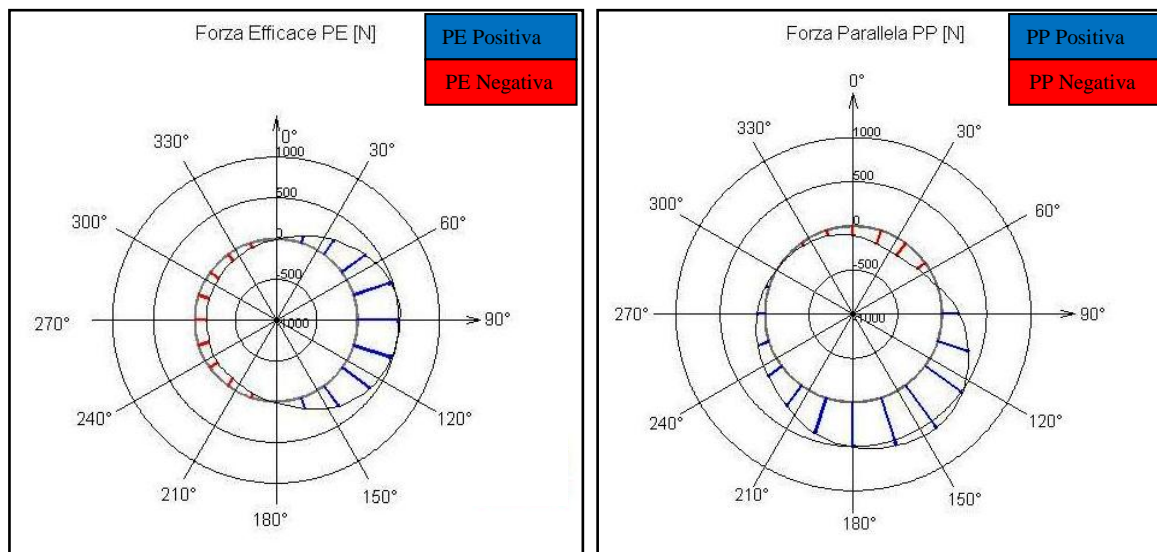


QUARTA PROVA

Si riportano i grafici della forza efficace e parallela della pedivella destra.

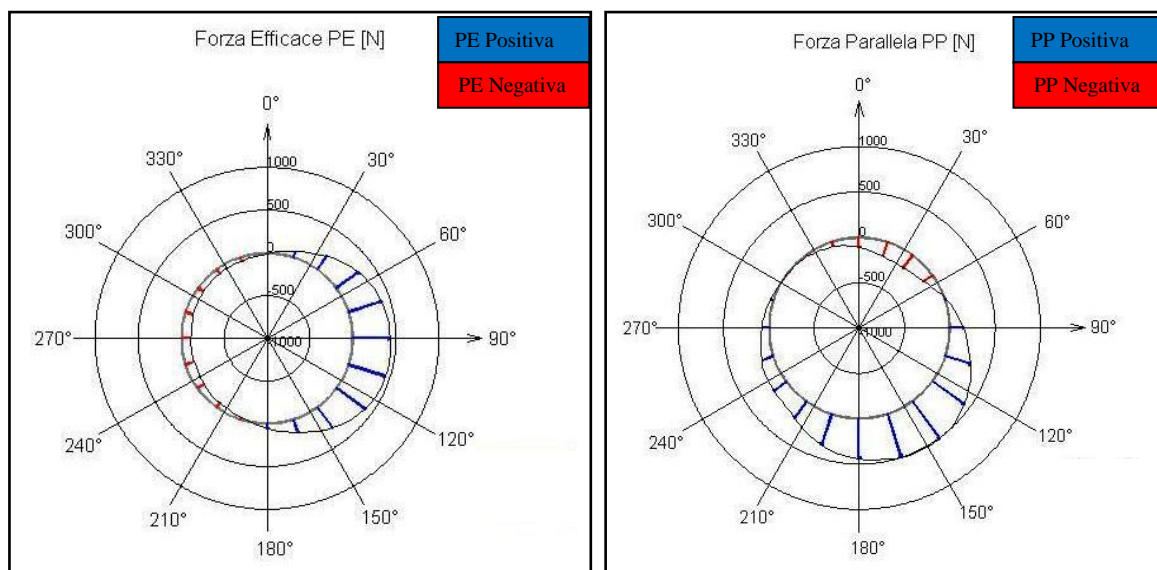


Si riportano i grafici della forza efficace e parallela della pedivella sinistra.

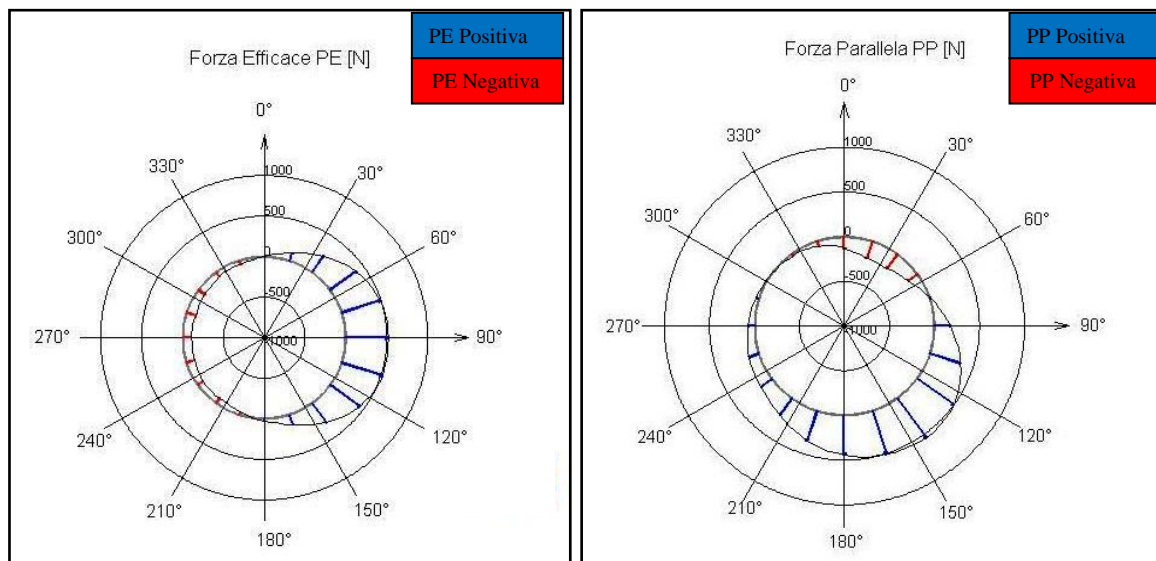


QUINTA PROVA

Si riportano i grafici della forza efficace e parallela della pedivella destra.



Si riportano i grafici della forza efficace e parallela della pedivella sinistra.



Osservazioni risultati prove

Curve caratteristiche a parità di potenza confrontando i pedali destro e sinistro.

Si osserva che le curve caratteristiche hanno un andamento tendenziale all'aumentare del carico imposto da 150W a 350W: crescono maggiormente sul pedale sinistro rispetto al destro. Questo fatto non dipende dal malfunzionamento dei pedali bensì dalla forza impressa, evidenziando una asimmetria dell'atleta che all'aumentare della resistenza "spinge" maggiormente con la gamba sinistra. Questo fatto si può osservare in tutte le componenti delle forze caratteristiche ed è maggiormente evidente nella curva della potenza istantanea.

Confronto di una curva caratteristica al variare delle prove

Dal confronto della curva della potenza al variare delle cinque prove si nota che la maggiore potenza prodotta non si traduce in un aumento del valore di picco durante la spinta ma in una migliore fase di recupero, aumentando l'area del il ciclo medio.

confronto angolo di pedale al variare delle prove

L'andamento assunto dall'angolo di pedale è sinusoidale e si osserva che: durante la fase di spinta le curve tendono a distanziarsi mentre nel recupero tendono ad avvicinarsi.

Confronto diagrammi polari al variare delle prove per entrambi i pedali

Si osserva che a bassa potenza (150 W) l'area sottesa dai vettori delle forze PE e PP è molto maggiore rispetto a quella riscontrabile nelle prove a 350W e questo è in linea con quanto detto prima.

CONCLUSIONI

In questa tesi è stata offerta la possibilità di comprendere le reali forze che vengono scambiate durante il ciclo di pedalata e analizzare il gesto atletico che le ha prodotte. Per giungere ai diagrammi delle forze, alla potenza sviluppata dall'atleta e all'influenza che ne deriva da un determinato posizionamento in sella, si è dovuto suddividere il lavoro in più fasi. In quest'ultima parte si ripercorrono le varie parti della tesi mettendo in evidenza le osservazioni più rilevanti e i problemi riscontrati. La possibilità di utilizzare dei pedali dinamometrici e comprenderne il funzionamento è stato uno degli aspetti più interessanti in quanto ha permesso di confrontarsi con dei problemi pratici ai quali si è giunti ad una soluzione.

La necessità di dover riprogettare l'attacco del pedale è stata una delle operazioni più complesse in quanto doveva essere modellato tenendo in considerazione gli ingombri necessari al passaggio della catena e che non fosse troppo sporgente una volta installato. Anche la scansione della pedivella è stata importante poiché su di essa sono stati posizionati tutti i riferimenti.

Dopo la realizzazione dell'attacco si è provveduto alla sostituzione del perno del pedale sinistro, l'operazione di inserimento del nuovo ha richiesto un'elevata precisione in quanto dovevano essere perfettamente allineati i piani di riferimento in corrispondenza degli estensimetri. Anche l'operazione successiva di chiusura dei vari conduttori provenienti dagli otto ponti estensimetri in un unico conduttore è stata un'operazione complessa e delicata.

Non essendo possibile estrarre il perno per effettuare una taratura statica dei pedali, si è adottata la soluzione del profilo a sezione quadrata. Questo ha permesso di ricavare lo stesso la matrice di taratura ma la procedura risultava abbastanza complessa in quanto il pedale tendeva a ruotare attorno al proprio asse non appena il carico era fuori dal piano di mezzeria del perno.

Ripristinato il funzionamento dei pedali si è provveduto ad allestire il cicloergometro per le prove da svolgere. La fase successiva è stata quella di implementare un protocollo con il sistema di visione che permettesse di elaborare le acquisizioni sia dei pedali che dei marker.

Il protocollo così ha permesso di analizzare in tempo reale sia i dati legati alla cinematica come: gli angoli al ginocchio, alla caviglia, la rotazione del pedale e della pedivella sia quelli legati alla dinamica come: le forze scambiate dai pedali durante la pedalata. Si sono così potuti valutare dei parametri caratteristici quali l'efficienza della pedalata, la potenza prodotta e l'andamento delle forze.

L'integrazione di queste due analisi è stata la uno degli aspetti più interessanti di questo lavoro di tesi in quanto ha permesso di comprendere quanto sia importante il corretto posizionamento in bici e quanto esso influisca sulle prestazioni.

Bibliografia

Mirco Lucchetta

Acquisizione in fuoristrada dei carichi al pedale di bicicletta MTB e analisi di vita a fatica,
Tesi di Laurea Università di Padova A.A. 1996-97

Normativa internazionale

UNI-ISO 8090 “terminologia” anno 1987

Normativa nazionale italiana

UNI 10395 biciclette, condizioni di sicurezza anno 1992

F. Angrilli

Corso di misure meccaniche, termiche e collaudi di strumenti di misura, Cedam Padova
1998

G. Concheri, A. Tosetti

Elementi di disegno e normativa, Libreria Cortina Padova 1996

E. Iurzolla, A. Tosetti

Tolleranze dimensionali ed accoppiamenti UNI-ISO, Libreria Cortina Padova 1999

G. Concheri, S. Dulli, V. Milanese

Tecniche di modellazione solida Feature, Libreria Cortina Padova 1996

Pocket EMG

User documentation

Mauro Galvan

Implementazione di un protocollo per l'analisi della camminata, Tesi di Laurea Università
di Padova A.A. 2010-11

Serasin Luca

Bioingegneria del movimento e controllo qualità, Tesi di laurea, Università di Padova
A.A. 2009-10


```
%APPENDICE A
```

```
%PROGRAMMA IN MATLAB
```

```
%Questo programma permette di diagrammare le forze caratteristiche al pedale utilizzando come dati di input i valori in formato .txt dei segnali precedentemente elaborati con il software Somat Ease.
```

```
clc  
close all  
clear all
```

```
[filename pathname]=uigetfile('.xls');  
path=[pathname filename];
```

```
fileexcel=xlsread(path);
```

```
Ang_Crank=fileexcel(:,1);
```

```
PT=fileexcel(:,2);
```

```
PN=fileexcel(:,3);
```

```
FR=fileexcel(:,4);
```

```
Ang_PR=fileexcel(:,5);
```

```
Ang_Ped=fileexcel(:,6);
```

```
PP=fileexcel(:,7);
```

```
PE=fileexcel(:,8);
```

```
Ang_FR =(180- Ang_PR -Ang_Crank + Ang_Ped )
```

```
Ang_FR_o=(270-Ang_Crank-Ang_FR );
```

```
%Ang_FR_o=(90)-Ang_FR;
```

```
Ang_Ped_o=- (Ang_Ped);
```

```
Raggiof=2200;  
Raggio=1000;
```

```
theta=[0:.01:2*pi];  
x=Raggio*cos(theta);  
y=Raggio*sin(theta);
```

```
Raggio1=125;
x1=Raggio1*cos(theta);
y1=Raggio1*sin(theta);

Raggio2=250;
x2=Raggio2*cos(theta);
y2=Raggio2*sin(theta);

Raggio3=375;
x3=Raggio3*cos(theta);
y3=Raggio3*sin(theta);

Raggio4=500;
x4=Raggio4*cos(theta);
y4=Raggio4*sin(theta);

Raggio5=625;
x5=Raggio5*cos(theta);
y5=Raggio5*sin(theta);

Raggio6=750;
x6=Raggio6*cos(theta);
y6=Raggio6*sin(theta);

Raggio7=875;
x7=Raggio7*cos(theta);
y7=Raggio7*sin(theta);

Raggio8=1000;
x8=Raggio8*cos(theta);
y8=Raggio8*sin(theta);

Raggio9=1125;
x9=Raggio9*cos(theta);
y9=Raggio9*sin(theta);

Raggio10=1250;
x10=Raggio10*cos(theta);
y10=Raggio10*sin(theta);

Raggio11=1375;
x11=Raggio11*cos(theta);
y11=Raggio11*sin(theta);

Raggio12=1500;
x12=Raggio12*cos(theta);
y12=Raggio12*sin(theta);

Raggio13=1625;
x13=Raggio13*cos(theta);
```

y13=Raggio13*sin(theta);

Raggio14=1750;
x14=Raggio14*cos(theta);
y14=Raggio14*sin(theta);

Raggio15=1875;
x15=Raggio15*cos(theta);
y15=Raggio15*sin(theta);

Raggio16=2000;
x16=Raggio16*cos(theta);
y16=Raggio16*sin(theta);

Raggio17=2125;
x17=Raggio17*cos(theta);
y17=Raggio17*sin(theta);

Raggio18=2250;
x18=Raggio18*cos(theta);
y18=Raggio18*sin(theta);

Raggio19=2375;
x19=Raggio19*cos(theta);
y19=Raggio19*sin(theta);

Raggio20=2500;
x20=Raggio20*cos(theta);
y20=Raggio20*sin(theta);

Raggio21=2625;
x21=Raggio21*cos(theta);
y21=Raggio21*sin(theta);

Raggio22=2750;
x22=Raggio22*cos(theta);
y22=Raggio22*sin(theta);

Raggio23=2875;
x23=Raggio23*cos(theta);
y23=Raggio23*sin(theta);

Raggio24=3000;
x24=Raggio24*cos(theta);
y24=Raggio24*sin(theta);

Raggio25=2500;
x25=Raggio25*cos(theta);
y25=Raggio25*sin(theta);

Raggio26=2600;

```

x26=Raggio26*cos(theta);
y26=Raggio26*sin(theta);

Raggio27=2700;
x27=Raggio27*cos(theta);
y27=Raggio27*sin(theta);

Raggio28=2800;
x28=Raggio28*cos(theta);
y28=Raggio28*sin(theta);

Raggio29=2900;
x29=Raggio29*cos(theta);
y29=Raggio29*sin(theta);

Raggio30=3000;
x30=Raggio30*cos(theta);
y30=Raggio30*sin(theta);

xc=Raggio*sin(Ang_Crank*pi/180);
yc=Raggio*cos(Ang_Crank*pi/180);
xcf=Raggiof*sin(Ang_Crank*pi/180);
ycf=Raggiof*cos(Ang_Crank*pi/180);

xp=100*cos(Ang_Ped_o*pi/180);
yp=100*sin(Ang_Ped_o*pi/180);

xr=FR.*cos(Ang_FR_o*pi/180);
yr=FR.*sin(Ang_FR_o*pi/180);

ur_pp=PP.*sin(Ang_Crank*pi/180);
vr_pp=PP.*cos(Ang_Crank*pi/180);

ur_PE=PE.*sin(Ang_Crank*pi/180);
vr_PE=PE.*cos(Ang_Crank*pi/180);

xfr=FR.*sin((Ang_FR+180)*pi/180);
yfr=FR.*cos((Ang_FR+180)*pi/180);

RaggiofPP=2625;
RaggiofPE=3125;
alpha=[0 30 60 90 120 150 180 210 240 270 300 330];
xfPE=RaggiofPE*cos(alpha*pi/180);
yfPE=RaggiofPE*sin(alpha*pi/180);
xfPP=RaggiofPP*cos(alpha*pi/180);
yfPP=RaggiofPP*sin(alpha*pi/180);
figure(1)

%subplot(2,2,1)

```

```

hold on
axis([-3000 4000 -3000 3500])
%grid on
%plot(x1,y1,':k');
%plot(x2,y2,':k');
%plot(x3,y3,':k');
plot(x4,y4,'k');
%plot(x5,y5,':k');
%plot(x6,y6,':k');
%plot(x7,y7,':k');
plot(x8,y8,'Color',[.5 .5 .5],'LineWidth',2);
%plot(x9,y9,':k');
%plot(x10,y10,':k');
%plot(x11,y11,':k');
plot(x12,y12,'k');
%plot(x13,y13,':k');
%plot(x14,y14,':k');
%plot(x15,y15,':k');
plot(x16,y16,'k');
%plot(x17,y17,':k');
%plot(x18,y18,':k');
%plot(x19,y19,':k');
plot(x20,y20,'k');
%plot(x21,y21,':k');
%plot(x22,y22,':k');
%plot(x23,y23,':k');
%plot(x24,y24,'k');
%plot(x25,y25,'k');
%plot(x26,y26,':k');
%plot(x27,y27,':k');
%plot(x28,y28,':k');
%plot(x29,y29,':k');
%plot(x30,y30,'k');

text(xfPP(1),yfPP(1),' 90°','FontSize',11);
text(xfPP(2),yfPP(2),' 60°','FontSize',11);
text(xfPP(3),yfPP(3),' 30°','FontSize',11);
text(xfPP(4),yfPP(4),' 0°','FontSize',11);
text(xfPP(5),yfPP(5),'330°','FontSize',11);
text(xfPP(6),yfPP(6),'300°','FontSize',11);
text(xfPP(7),yfPP(7),'270°','FontSize',11);
text(xfPP(8),yfPP(8),'240°','FontSize',11);
text(xfPP(9),yfPP(9),'210°','FontSize',11);
text(xfPP(10),yfPP(10),' 180°','FontSize',11);
text(xfPP(11),yfPP(11),'150°','FontSize',11);
text(xfPP(12),yfPP(12),'120°','FontSize',11);

quiver(0,0,2825,0,0,'k','LineWidth',1);
quiver(0,0,0,2825,0,'k','LineWidth',1);

```

```

%PP=abs (PP);

%xlabel('N')
%ylabel('N')
%title('Forza Parallela PP','FontSize',12)
%text(3000,0,' x ','FontSize',13);
text(0,3000,' Forza Parallela PP [N] ','FontSize',12);
%line([4000 4100],[-3000 -3000],'Color','k','LineWidth',3);
%text(1500,1600,'Scala:100 N','FontSize',12);
text(2600,-2500,0,'PP negativa','BackgroundColor',[1 0
0],'EdgeColor','k');
text(2600,-2050,0,'PP positiva','BackgroundColor',[0 0
1],'EdgeColor','k');

text(10,-50,0,'-1000','FontSize',7);
text(10,560,0,'-500','FontSize',7);
text(10,1060,0,'0','FontSize',7);
text(10,1560,0,'500','FontSize',7);
text(10,2060,0,'1000','FontSize',7);
text(10,2560,0,'1500','FontSize',7);
%text(0,3060,0,'2000','FontSize',7);

for i=1:12
    line([0 xfPP(i)],[0 yfPP(i)'],'Color','k','LineWidth',1);
end

for j=1:5:length(PP)
    if PP(j)<0;
        u(j)=-ur_pp(j);
        v(j)=-vr_pp(j);

    else
        u(j)=ur_pp(j);
        v(j)=vr_pp(j);
        quiver(xc(j),yc(j),u(j),v(j),0,'Color','b','LineWidth',2);

    end

end

for j=1:5:length(PP)
    if PP(j)>0;
        u(j)=-ur_pp(j);
        v(j)=-vr_pp(j);

    else
        u(j)=ur_pp(j);
        v(j)=vr_pp(j);
        quiver(xc(j),yc(j),u(j),v(j),0,'Color','r','LineWidth',2);

    end

end
end

```

```

PP=abs (PP);

for j=1:length (PP)
    if PP(j)<0;
        u(j)=-ur_pp(j);
        v(j)=-vr_pp(j);
    else
        u(j)=ur_pp(j);
        v(j)=vr_pp(j);
    end
end

for j=1:length (PP)-1
    line ([xc(j)+u(j) xc(j+1)+u(j+1)], [yc(j)+v(j)
yc(j+1)+v(j+1)], 'Color', 'k', 'LineWidth', 1);
end

axis equal
%contourcmap ([0:125:1750], 'jet', 'colorbar', 'on', 'location', 'vertical');
axis equal
%plot (xc, yc, 'ko');

%subplot (2, 2, 2)

figure (2)

hold on
axis ([-4000 5000 -3600 4000]);

%grid on
%plot (x1, y1, ':k');
%plot (x2, y2, ':k');
%plot (x3, y3, ':k');
plot (x4, y4, 'k');
%plot (x5, y5, ':k');
%plot (x6, y6, ':k');
%plot (x7, y7, ':k');
plot (x8, y8, 'Color', [.5 .5 .5], 'LineWidth', 2);
%plot (x9, y9, ':k');
%plot (x10, y10, ':k');
%plot (x11, y11, ':k');
plot (x12, y12, 'k');
%plot (x13, y13, ':k');
%plot (x14, y14, ':k');
%plot (x15, y15, ':k');
plot (x16, y16, 'k');

```

```

%plot(x17,y17,':k');
%plot(x18,y18,':k');
%plot(x19,y19,':k');
plot(x20,y20,'k');
%plot(x21,y21,':k');
%plot(x22,y22,':k');
%plot(x23,y23,':k');
plot(x24,y24,'k');
%plot(x25,y25,'k');
%plot(x26,y26,':k');
%plot(x27,y27,':k');
%plot(x28,y28,':k');
%plot(x29,y29,':k');
%plot(x30,y30,'k');

text(xfPE(1),yfPE(1),' 90°','FontSize',11);
text(xfPE(2),yfPE(2),' 60°','FontSize',11);
text(xfPE(3),yfPE(3),' 30°','FontSize',11);
text(xfPE(4),yfPE(4),' 0°','FontSize',11);
text(xfPE(5),yfPE(5),'330°','FontSize',11);
text(xfPE(6),yfPE(6),'300°','FontSize',11);
text(xfPE(7),yfPE(7),'270°','FontSize',11);
text(xfPE(8),yfPE(8),'240°','FontSize',11);
text(xfPE(9),yfPE(9),'210°','FontSize',11);
text(xfPE(10),yfPE(10),' 180°','FontSize',11);
text(xfPE(11),yfPE(11),'150°','FontSize',11);
text(xfPE(12),yfPE(12),'120°','FontSize',11);

quiver(0,0,3500,0,0,'k','LineWidth',1);
quiver(0,0,0,3500,0,'k','LineWidth',1);
%PE=abs(PE);

%xlabel('N')
%ylabel('N')
%text(3500,0,' x ','FontSize',13);
%text(0,3500,' z ','FontSize',13);
%title('Forza Efficace PE','FontSize',12);
text(0,3500,' Forza Efficace PE [N] ','FontSize',12);
text(3000,-2500,0,'PE positiva','BackgroundColor',[0 0
1],'EdgeColor','k');
text(3000,-3000,0,'PE negativa','BackgroundColor',[1 0
0],'EdgeColor','k');
%line([4000 4100],[-3000 -3000],'Color','b','LineWidth',3);
%text(1500,1600,'Scala:100 N','FontSize',12);
axis equal

text(10,-50,0,'-1000','FontSize',7);
text(10,560,0,'-500','FontSize',7);
text(10,1060,0,'0','FontSize',7);
text(10,1560,0,'500','FontSize',7);
text(10,2060,0,'1000','FontSize',7);
text(10,2560,0,'1500','FontSize',7);
text(0,3060,0,'2000','FontSize',7);

```

```

for i=1:12
    line([0 xfPE(i)], [0 yfPE(i)], 'Color', 'k', 'LineWidth', 1);
end
for k=1:5:length(PE)
    if PE(k)<0;
        u(k)=-ur_PE(k);
        v(k)=-vr_PE(k);

        else
            u(k)=ur_PE(k);
            v(k)=vr_PE(k);
            quiver(xc(k), yc(k), u(k), v(k), 0, 'Color', 'b', 'LineWidth', 2);

        end

    end

end

for k=1:5:length(PE)
    if PE(k)>0;
        u(k)=-ur_PE(k);
        v(k)=-vr_PE(k);

        else
            u(k)=ur_PE(k);
            v(k)=vr_PE(k);
            quiver(xc(k), yc(k), u(k), v(k), 0, 'Color', 'r', 'LineWidth', 2);

        end

    end

end

PE=abs(PE);

for k=1:length(PE)
    if PE(k)<0;
        u(k)=-ur_PE(k);
        v(k)=-vr_PE(k);
    else
        u(k)=ur_PE(k);
        v(k)=vr_PE(k);
    end
end

for k=1:length(PE)-1
    line([xc(k)+u(k) xc(k+1)+u(k+1)], [yc(k)+v(k)
yc(k+1)+v(k+1)], 'Color', 'k', 'LineWidth', 1);
end

%contourcmap([0:125:1750], 'jet', 'colorbar', 'on', 'location', 'vertical');
axis equal

```

```

%plot(xc,yc,'ko');

figure(3)

hold on
%grid on
axis([-1500 2000 -1300 2000])

plot(x,y,'k');
quiver(0,0,1500,0,0,'k','LineWidth',1);
quiver(0,0,0,1500,0,'k','LineWidth',1);
text(1500,0,'x','FontSize',13);
text(0,1500,'z','FontSize',13);
%line([1600 1700],[-900 -900],'Color','r','LineWidth',3);
%text(1500,1600,'Scala:100 N','FontSize',12);
%xlabel('N')
%ylabel('N')
title('Forza Risultante PR [N]','FontSize',12);

for i=1:5:length(FR)
    line([xc(i)-xp(i) xc(i)+xp(i)], [yc(i)-yp(i)
yc(i)+yp(i)], 'LineWidth',2);
    line([0 xc(i)], [0 yc(i)], 'Color','k','LineWidth',1);
end
for i=1:5:length(FR)
    if and(FR(i)<125,FR(i)>0);
        quiv-
er(xc(i)+xr(i),yc(i)+yr(i),+xr(i),+yr(i),0,'Color',[0,0,1],'LineWidth',2)
;
        end
        if and(FR(i)<250,FR(i)>125);
            quiver(xc(i)+xr(i),yc(i)+yr(i),-xr(i),-
yr(i),0,'Color',[0,0.2,1],'LineWidth',2);
        end
        if and(FR(i)<375,FR(i)>250);
            quiver(xc(i)+xr(i),yc(i)+yr(i),-xr(i),-
yr(i),0,'Color',[0,0.4,1],'LineWidth',2);
        end
        if and(FR(i)<500,FR(i)>375);
            quiver(xc(i)+xr(i),yc(i)+yr(i),-xr(i),-
yr(i),0,'Color',[0,0.6,1],'LineWidth',2);
        end
        if and(FR(i)<625,FR(i)>500);
            quiver(xc(i)+xr(i),yc(i)+yr(i),-xr(i),-
yr(i),0,'Color',[0,1,0],'LineWidth',2);
        end
        if and(FR(i)<750,FR(i)>625);
            quiver(xc(i)+xr(i),yc(i)+yr(i),-xr(i),-
yr(i),0,'Color',[0.3,1,0],'LineWidth',2);

```

```

        end
        if and(FR(i)<875,FR(i)>750);
            quiver(xc(i)+xr(i),yc(i)+yr(i),-xr(i),-
yr(i),0,'Color',[0.6,1,0],'LineWidth',2);
        end
        if and(FR(i)<1000,FR(i)>875);
            quiver(xc(i)+xr(i),yc(i)+yr(i),-xr(i),-
yr(i),0,'Color',[1,1,0],'LineWidth',2);
        end
        if and(FR(i)<1125,FR(i)>1000);
            quiver(xc(i)+xr(i),yc(i)+yr(i),-xr(i),-
yr(i),0,'Color',[1,0.9,0],'LineWidth',2);
        end
        if and(FR(i)<1250,FR(i)>1125);
            quiver(xc(i)+xr(i),yc(i)+yr(i),-xr(i),-
yr(i),0,'Color',[1,0.8,0],'LineWidth',2);
        end
        if and(FR(i)<1375,FR(i)>1250);
            quiver(xc(i)+xr(i),yc(i)+yr(i),-xr(i),-
yr(i),0,'Color',[1,0.6,0],'LineWidth',2);
        end
        if and(FR(i)<1500,FR(i)>1375);
            quiver(xc(i)+xr(i),yc(i)+yr(i),-xr(i),-
yr(i),0,'Color',[1,0.4,0],'LineWidth',2);
        end
        if and(FR(i)<1625,FR(i)>1500);
            quiver(xc(i)+xr(i),yc(i)+yr(i),-xr(i),-
yr(i),0,'Color',[1,0.4,0],'LineWidth',2);
        end
        if and(FR(i)<1750,FR(i)>1625);
            quiver(xc(i)+xr(i),yc(i)+yr(i),-xr(i),-
yr(i),0,'Color',[1,0,0],'LineWidth',2);
        end
    end

end
contourcmap([0:250:2000],'jet','colorbar','on','location','vertical');
axis equal

%plot(xc,yc,'ko');

axis equal

figure(4)
%subplot(2,2,1)

hold on

axis([-3500 3000 -3000 2800]);

%grid on
%plot(x1,y1,':k');

```

```

%plot(x2,y2,':k');
%plot(x3,y3,':k');
plot(x4,y4,'k');
%plot(x5,y5,':k');
%plot(x6,y6,':k');
%plot(x7,y7,':k');
plot(x8,y8,'k');
%plot(x9,y9,':k');
%plot(x10,y10,':k');
%plot(x11,y11,':k');
plot(x12,y12,'k');
%plot(x13,y13,':k');
%plot(x14,y14,':k');
%plot(x15,y15,':k');
%plot(x16,y16,'k');

%line([0 -1500],[0 0],'Color',[.5 .5 .5],'LineWidth',16);
%text(-1300,0,'FRdivivella','FontSize',12);
%line([-1350 -1400],[0 50],'Color','k','LineWidth',1.5);
%line([-1400 -1450],[50 0],'Color','k','LineWidth',1.5);
%line([-1450 -1400],[0 -50],'Color','k','LineWidth',1.5);
%line([-1400 -1350],[-50 0],'Color','k','LineWidth',1.5);

%axis equal
quiver(0,0,-1550,0,0,'k','LineWidth',1);
quiver(0,0,0,1550,0,'k','LineWidth',1);
text(-1575,0,'PP [N]','FontSize',12);
text(0,1375,'PE [N]','FontSize',12);
%line([2800 2900],[-1800 -1800],'Color','r','LineWidth',3);
%text(1500,1600,'Scala:100 N','FontSize',12);

text(10,-50,0,'0','FontSize',7);
text(10,560,0,'500','FontSize',7);
text(10,1060,0,'1000','FontSize',7);
text(10,1560,0,'1500','FontSize',7);
%text(10,2060,0,'2000','FontSize',7);

%xlabel('N')
%ylabel('N')
title('Diagramma di PR solidale alla pedivella','FontSize',12);

%for i=2:2:24
%quiver(xfr(i),yfr(i),-xfr(i),-yfr(i),0,'Color','k','LineWidth',2);
%end

colore=colormap(jet(101));

for i=1:5:length(PE)
quiver(xfr(i),yfr(i),-xfr(i),-yfr(i),'Color', colore(i,:), 'LineWidth',2);

```

```

end
% for i=3
%   quiver(xfr(i),yfr(i),-xfr(i),-
yfr(i),0,'Color',[0,0.2,1],'LineWidth',2);
% end
% for i=5
%   quiver(xfr(i),yfr(i),-xfr(i),-
yfr(i),0,'Color',[0,0.4,0],'LineWidth',2);
% end
% for i=7
%   quiver(xfr(i),yfr(i),-xfr(i),-
yfr(i),0,'Color',[0,0.6,1],'LineWidth',2);
% end
% for i=9
%   quiver(xfr(i),yfr(i),-xfr(i),-
yfr(i),0,'Color',[0,1,0],'LineWidth',2);
% end
% for i=11
%   quiver(xfr(i),yfr(i),-xfr(i),-
yfr(i),0,'Color',[0.7,1,0],'LineWidth',2);
% end
% for i=13
%   quiver(xfr(i),yfr(i),-xfr(i),-
yfr(i),0,'Color',[1,0,0],'LineWidth',2);
% end
% for i=15
%   quiver(xfr(i),yfr(i),-xfr(i),-
yfr(i),0,'Color',[1,0.9,0],'LineWidth',2);
% end
% for i=17
%   quiver(xfr(i),yfr(i),-xfr(i),-
yfr(i),0,'Color',[1,0.7,0],'LineWidth',2);
% end
% for i=19
%   quiver(xfr(i),yfr(i),-xfr(i),-
yfr(i),0,'Color',[1,0.5,0],'LineWidth',2);
% end
% for i=21
%   quiver(xfr(i),yfr(i),-xfr(i),-
yfr(i),0,'Color',[1,0.3,0],'LineWidth',2);
% end
% for i=23
%   quiver(xfr(i),yfr(i),-xfr(i),-
yfr(i),0,'Color',[1,0,0],'LineWidth',2);
% end

for i=1:length(PE)-1
    line([xfr(i) xfr(i+1)],[yfr(i) yfr(i+1)'],'Color','k','LineWidth',1);
end
%contourcmap([0:125:1750],'jet','colorbar','on','location','vertical');
axis equal

%text(xfr(1),yfr(1),' 0°','FontSize',11);

```

```

%text(xfr(3),yfr(3),' 30°','FontSize',11);
%text(xfr(5),yfr(5),' 60°','FontSize',11);
%text(xfr(7),yfr(7),' 90°','FontSize',11);
%text(xfr(9),yfr(9),' 105°','FontSize',11);
%text(xfr(11),yfr(11),' 120°','FontSize',11);
%text(xfr(13),yfr(13),' 150°','FontSize',11);
%text(xfr(15),yfr(15),' 180°','FontSize',11);
%text(xfr(17),yfr(17),' 210°','FontSize',11);
%text(xfr(19),yfr(19),' 240°','FontSize',11);
%text(xfr(21),yfr(21),' 270°','FontSize',11);
%text(xfr(23),yfr(23),' 300°','FontSize',11);
%text(xfr(25),yfr(25),' 330°','FontSize',11);
alpha=[0:0.01:pi];

%subplot(2,2,3)

figure(5)

hold on
%grid on
axis([-1500 2000 -1300 2000])

plot(x,y,'k');
quiver(0,0,1500,0,0,'k','LineWidth',1);
quiver(0,0,0,1500,0,'k','LineWidth',1);
text(1500,0,'x','FontSize',13);
text(0,1500,'z','FontSize',13);
%line([1600 1700],[-900 -900],'Color','r','LineWidth',3);
%text(1500,1600,'Scala:100 N','FontSize',12);
%xlabel('N')
%ylabel('N')
title('Forza Risultante PR alla pedivella','FontSize',12);

%for i=1:24
    %line([xc(i)-xp(i) xc(i)+xp(i)],[yc(i)-yp(i)
yc(i)+yp(i)'],'LineWidth',2);
%end
%for i=1:24
    %line([0 xc(i)],[0 yc(i)'],'Color','k','LineWidth',1);
%end
    for i=1:5:length(PE)
        quiver(xc(i)+xr(i),yc(i)+yr(i),-xr(i),-
yr(i),0,'Color',colore(i,:), 'LineWidth',2);
        line([0 xc(i)],[0 yc(i)'],'Color','k','LineWidth',1);
        line([xc(i)-xp(i) xc(i)+xp(i)],[yc(i)-yp(i)
yc(i)+yp(i)'],'LineWidth',2);
        end
    %    for i=3
    %        quiver(xc(i)+xr(i),yc(i)+yr(i),-xr(i),-
yr(i),0,'Color',[0,0.2,1],'LineWidth',2);

```

```

%     line([0 xc(i)], [0 yc(i)], 'Color', 'k', 'LineWidth', 1);
%     line([xc(i)-xp(i) xc(i)+xp(i)], [yc(i)-yp(i)
yc(i)+yp(i)], 'LineWidth', 2);
%     end
%     for i=5
%     quiver(xc(i)+xr(i), yc(i)+yr(i), -xr(i), -
yr(i), 0, 'Color', [0, 0.4, 0], 'LineWidth', 2);
%     line([0 xc(i)], [0 yc(i)], 'Color', 'k', 'LineWidth', 1);
%     line([xc(i)-xp(i) xc(i)+xp(i)], [yc(i)-yp(i)
yc(i)+yp(i)], 'LineWidth', 2);
%     end
%     for i=7
%     quiver(xc(i)+xr(i), yc(i)+yr(i), -xr(i), -
yr(i), 0, 'Color', [0, 0.6, 1], 'LineWidth', 2);
%     line([0 xc(i)], [0 yc(i)], 'Color', 'k', 'LineWidth', 1);
%     line([xc(i)-xp(i) xc(i)+xp(i)], [yc(i)-yp(i)
yc(i)+yp(i)], 'LineWidth', 2);
%     end
%     for i=9
%     quiver(xc(i)+xr(i), yc(i)+yr(i), -xr(i), -
yr(i), 0, 'Color', [0, 1, 0], 'LineWidth', 2);
%     line([0 xc(i)], [0 yc(i)], 'Color', 'k', 'LineWidth', 1);
%     line([xc(i)-xp(i) xc(i)+xp(i)], [yc(i)-yp(i)
yc(i)+yp(i)], 'LineWidth', 2);
%     end
%     for i=11
%     quiver(xc(i)+xr(i), yc(i)+yr(i), -xr(i), -
yr(i), 0, 'Color', [0.7, 1, 0], 'LineWidth', 2);
%     line([0 xc(i)], [0 yc(i)], 'Color', 'k', 'LineWidth', 1);
%     line([xc(i)-xp(i) xc(i)+xp(i)], [yc(i)-yp(i)
yc(i)+yp(i)], 'LineWidth', 2);
%     end
%     for i=13
%     quiver(xc(i)+xr(i), yc(i)+yr(i), -xr(i), -
yr(i), 0, 'Color', [1, 0, 0], 'LineWidth', 2);
%     line([0 xc(i)], [0 yc(i)], 'Color', 'k', 'LineWidth', 1);
%     line([xc(i)-xp(i) xc(i)+xp(i)], [yc(i)-yp(i)
yc(i)+yp(i)], 'LineWidth', 2);
%     end
%     for i=15
%     quiver(xc(i)+xr(i), yc(i)+yr(i), -xr(i), -
yr(i), 0, 'Color', [1, 0.9, 0], 'LineWidth', 2);
%     line([0 xc(i)], [0 yc(i)], 'Color', 'k', 'LineWidth', 1);
%     line([xc(i)-xp(i) xc(i)+xp(i)], [yc(i)-yp(i)
yc(i)+yp(i)], 'LineWidth', 2);
%     end
%     for i=17
%     quiver(xc(i)+xr(i), yc(i)+yr(i), -xr(i), -
yr(i), 0, 'Color', [1, 0.7, 0], 'LineWidth', 2);
%     line([0 xc(i)], [0 yc(i)], 'Color', 'k', 'LineWidth', 1);
%     line([xc(i)-xp(i) xc(i)+xp(i)], [yc(i)-yp(i)
yc(i)+yp(i)], 'LineWidth', 2);
%     end
%     for i=19

```

```

%     quiver(xc(i)+xr(i),yc(i)+yr(i),-xr(i),-
yr(i),0,'Color',[1,0.5,0],'LineWidth',2);
%     line([0 xc(i)], [0 yc(i)], 'Color','k','LineWidth',1);
%     line([xc(i)-xp(i) xc(i)+xp(i)], [yc(i)-yp(i)
yc(i)+yp(i)], 'LineWidth',2);
%     end
%     for i=21
%     quiver(xc(i)+xr(i),yc(i)+yr(i),-xr(i),-
yr(i),0,'Color',[1,0.3,0],'LineWidth',2);
%     line([0 xc(i)], [0 yc(i)], 'Color','k','LineWidth',1);
%     line([xc(i)-xp(i) xc(i)+xp(i)], [yc(i)-yp(i)
yc(i)+yp(i)], 'LineWidth',2);
%     end
%     for i=23
%     quiver(xc(i)+xr(i),yc(i)+yr(i),-xr(i),-
yr(i),0,'Color',[1,0,0],'LineWidth',2);
%     line([0 xc(i)], [0 yc(i)], 'Color','k','LineWidth',1);
%     line([xc(i)-xp(i) xc(i)+xp(i)], [yc(i)-yp(i)
yc(i)+yp(i)], 'LineWidth',2);
%     end
%
%contourcmap([0:125:1750],'jet','colorbar','on','location','vertical');
axis equal

%ra=25;
%rb=50;
%xa=ra*cos(alpha-90*pi/180);
%ya=ra*sin(alpha-90*pi/180);
%plot(xa,ya,'-k');

%plot(xfr,yfr,'ko');

axis equal

figure(6)
hold on
%grid on
axis([-1200 1400 -2800 1800])

plot(x,y,'k');
quiver(0,0,1300,0,0,'k','LineWidth',1);
quiver(0,0,0,1300,0,'k','LineWidth',1);
text(1500,0,'x','FontSize',13);
text(0,1500,'z','FontSize',13);
%line([1300 1400],[-900 -900],'Color','k','LineWidth',2);
%text(1500,1600,'Scala:100 N','FontSize',12);
%xlabel('N')
%ylabel('N')
title('Forza Verticale PV [N]','FontSize',12);

```

```

for i=1:5:length(PE)
    line([xc(i)-xp(i) xc(i)+xp(i)], [yc(i)-yp(i)
yc(i)+yp(i)], 'LineWidth', 2);
end

for i=1:5:length(PE)
    line([0 xc(i)], [0 yc(i)], 'Color', 'k', 'LineWidth', 1);
end
    for i=1:length(PE)
        pv(i)=[FR(i)*cos((atan(PT(i)/PN(i))-(-
1*Ang_Ped(i)*pi/180+Ang_Crank(i)*pi/180)))]];
    end

PV=abs(pv);

for i=1:5:length(PE)
    if and(PV(i)<125, PV(i)>0);
        quiver(xc(i), yc(i), 0, -PV(i), 0, 'Color', [0,0,1], 'LineWidth', 2);
    end
    if and(PV(i)<250, PV(i)>125);
        quiver(xc(i), yc(i), 0, -PV(i), 0, 'Color', [0,0.2,1], 'LineWidth', 2);
    end
    if and(PV(i)<375, PV(i)>250);
        quiver(xc(i), yc(i), 0, -PV(i), 0, 'Color', [0,0.4,1], 'LineWidth', 2);
    end
    if and(PV(i)<500, PV(i)>375);
        quiver(xc(i), yc(i), 0, -PV(i), 0, 'Color', [0,0.6,1], 'LineWidth', 2);
    end
    if and(PV(i)<625, PV(i)>500);
        quiver(xc(i), yc(i), 0, -PV(i), 0, 'Color', [0,1,0], 'LineWidth', 2);
    end
    if and(PV(i)<750, PV(i)>625);
        quiver(xc(i), yc(i), 0, -PV(i), 0, 'Color', [0.3,1,0], 'LineWidth', 2);
    end
    if and(PV(i)<875, PV(i)>750);
        quiver(xc(i), yc(i), 0, -PV(i), 0, 'Color', [0.6,1,0], 'LineWidth', 2);
    end
    if and(PV(i)<1000, PV(i)>875);
        quiver(xc(i), yc(i), 0, -PV(i), 0, 'Color', [1,1,0], 'LineWidth', 2);
    end
    if and(PV(i)<1125, PV(i)>1000);
        quiver(xc(i), yc(i), 0, -PV(i), 0, 'Color', [1,0.9,0], 'LineWidth', 2);
    end
    if and(PV(i)<1250, PV(i)>1125);
        quiver(xc(i), yc(i), 0, -PV(i), 0, 'Color', [1,0.8,0], 'LineWidth', 2);
    end
    if and(PV(i)<1375, PV(i)>1250);
        quiver(xc(i), yc(i), 0, -PV(i), 0, 'Color', [1,0.6,0], 'LineWidth', 2);
    end
    if and(PV(i)<1500, PV(i)>1375);
        quiver(xc(i), yc(i), 0, -PV(i), 0, 'Color', [1,0.4,0], 'LineWidth', 2);
    end
end

```

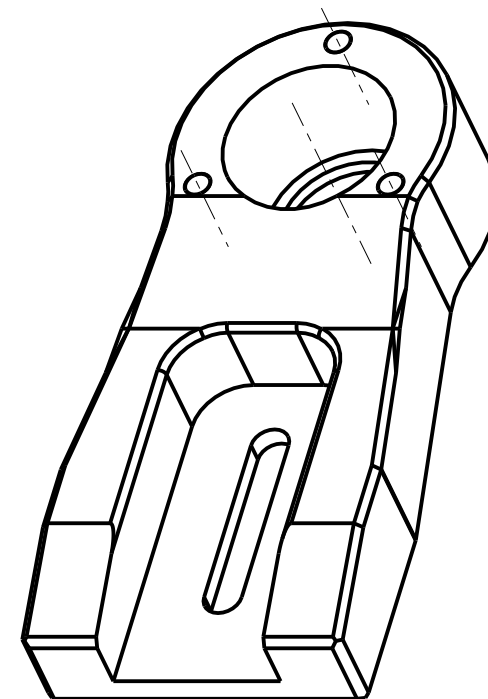
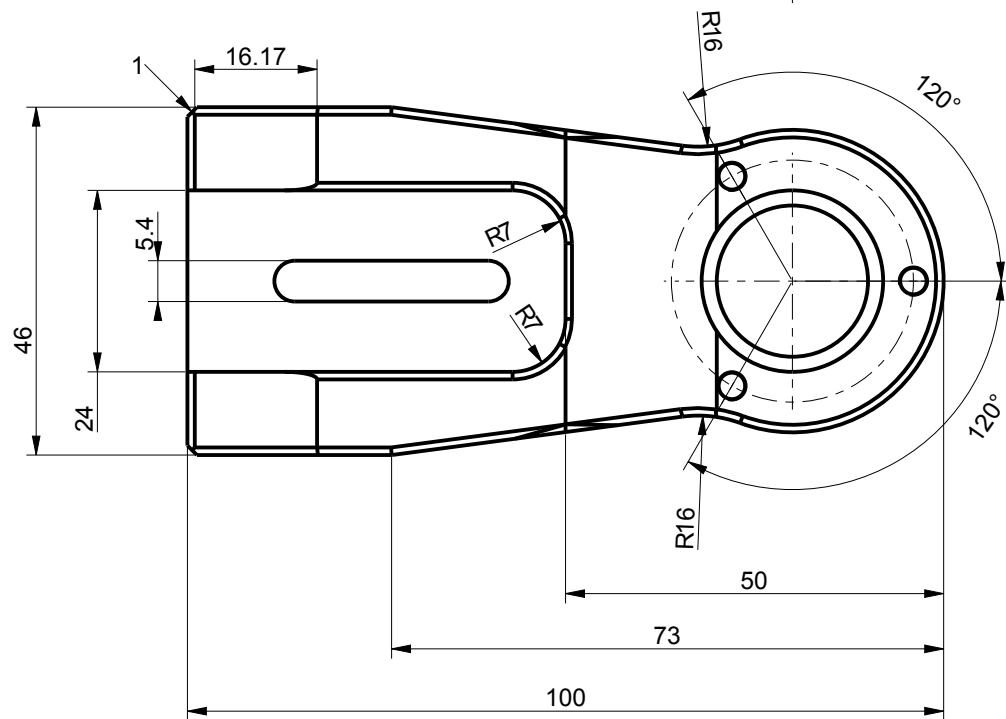
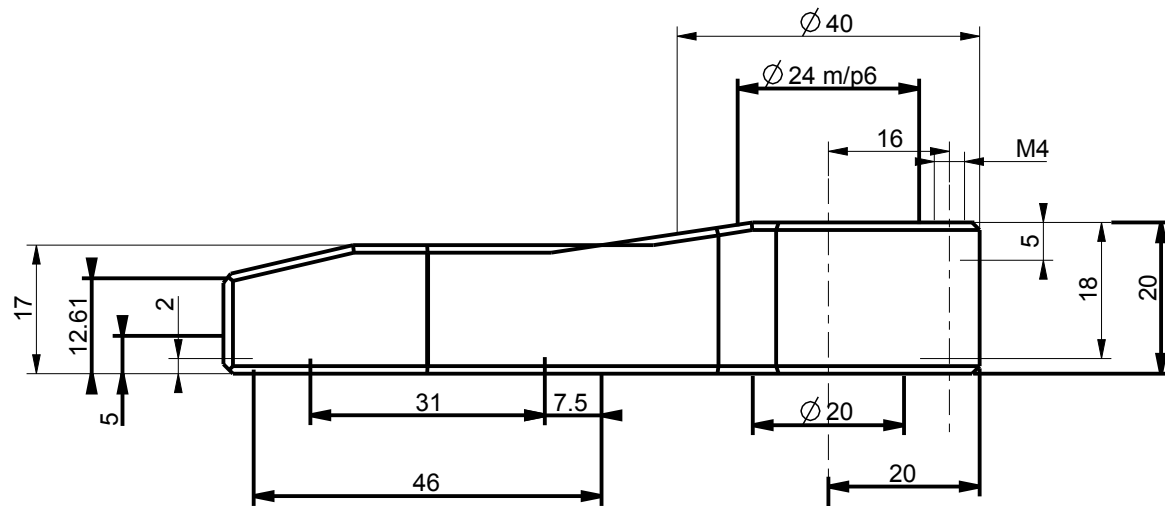
```

    if and(PV(i)<1625,PV(i)>1500);
        quiver(xc(i),yc(i),0,-PV(i),0,'Color',[1,0.4,0],'LineWidth',2);
    end
    if and(PV(i)<1750,PV(i)>1625);
        quiver(xc(i),yc(i),0,-PV(i),0,'Color',[1,0,0],'LineWidth',2);
    end

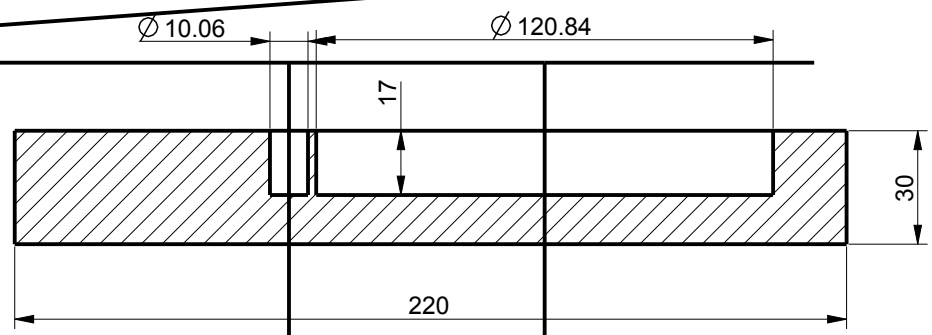
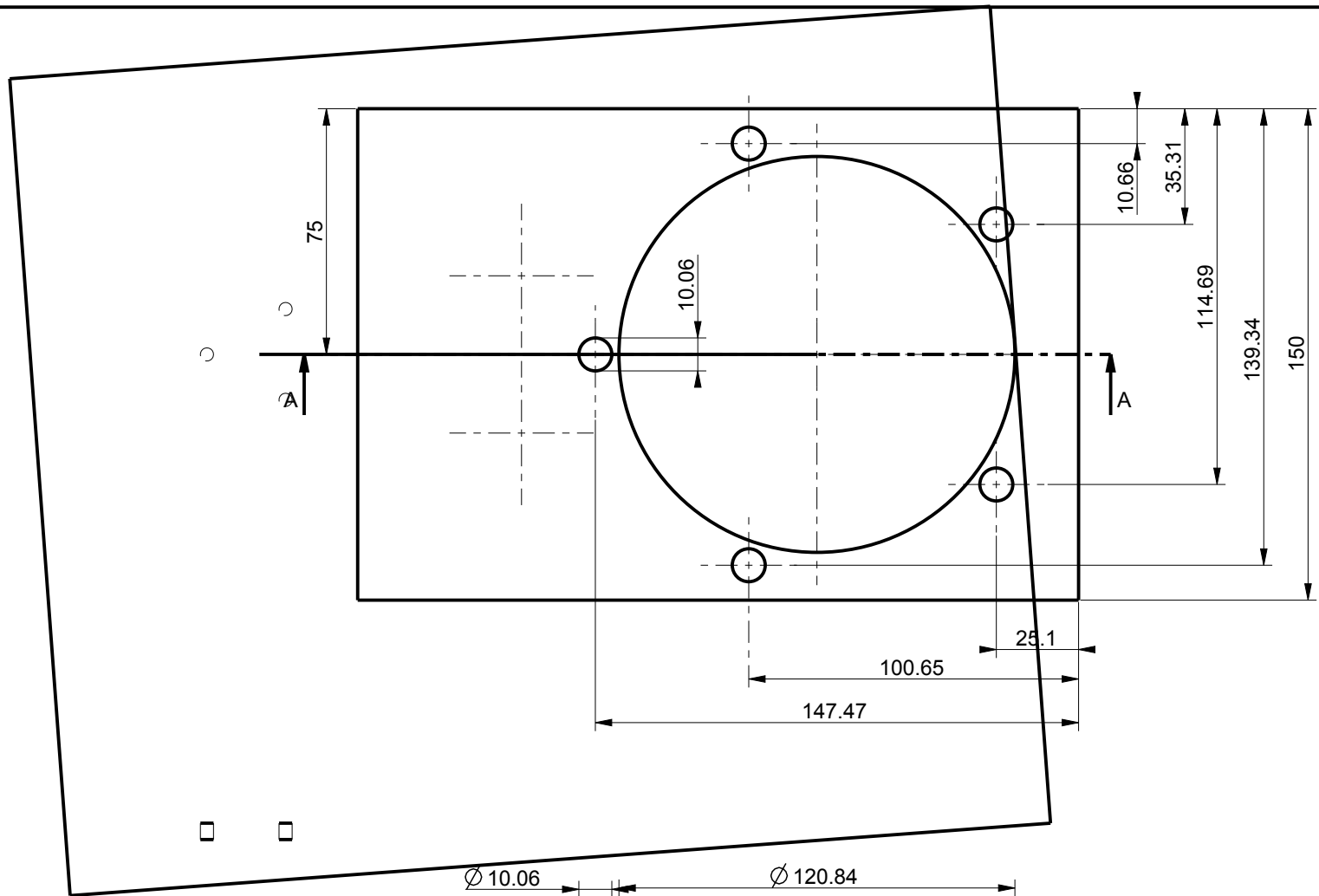
end
for i=1:5:length(PE)-1
    line([xc(i) xc(i+1)], [yc(i)-PV(i) yc(i+1)-
PV(i+1)], 'Color', 'k', 'LineWidth', 1);
end
axis equal
    contourcmap([0:250:2000], 'jet', 'colorbar', 'on', 'location', 'vertical');
%plot(xc,yc, 'ko');

axis equal

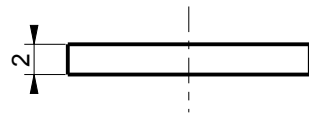
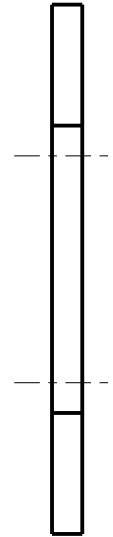
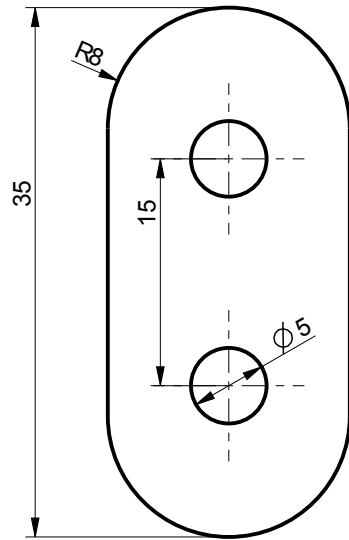
```



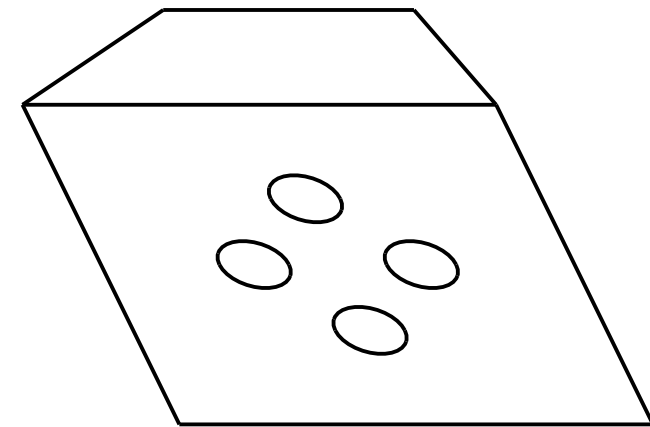
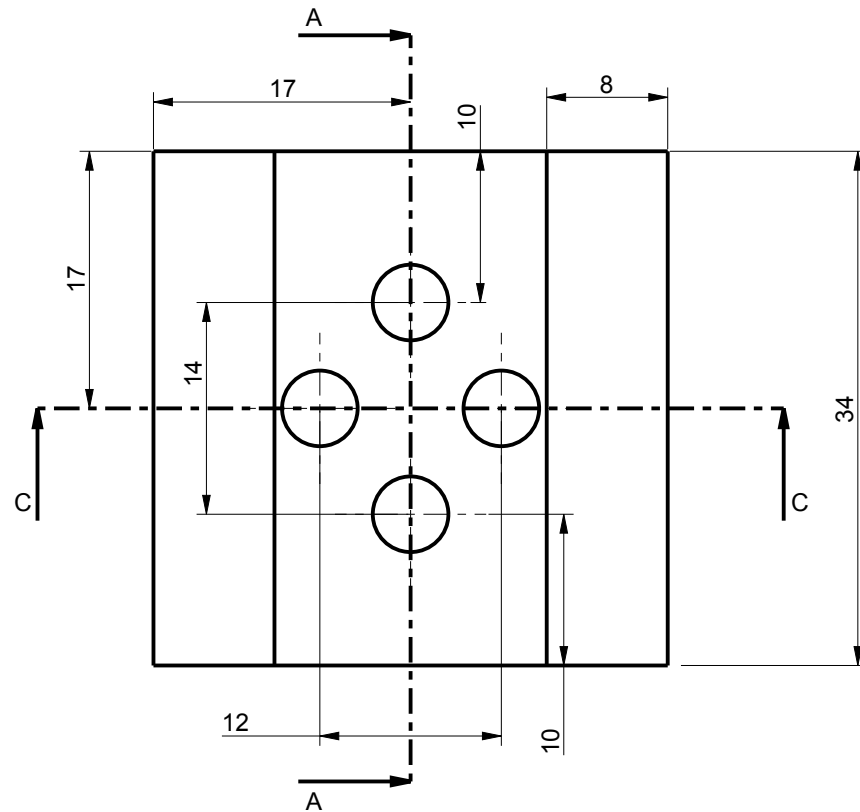
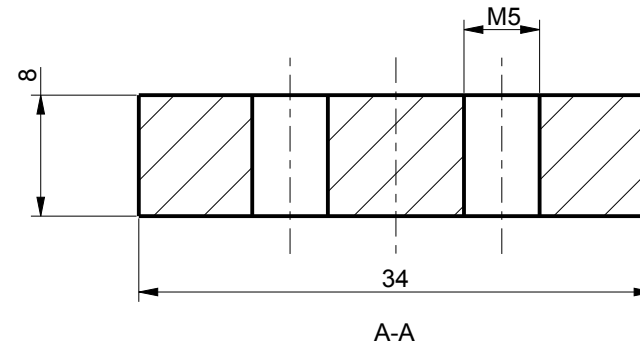
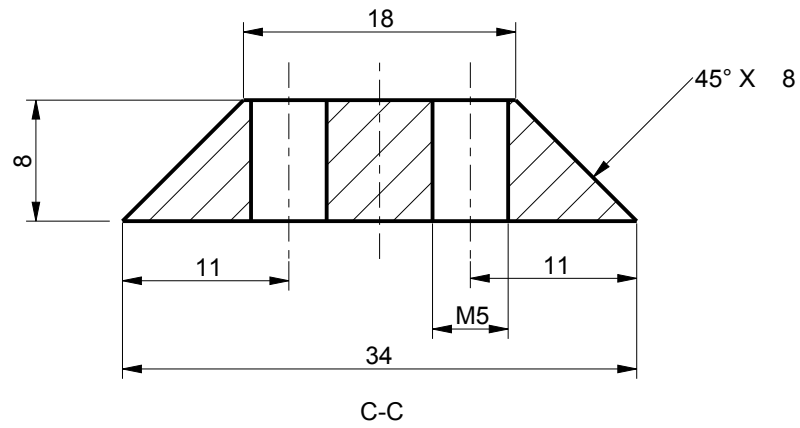
UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA DIP.ING. MECCANICA	SCALA
SCHIAVON ALESSIO	1:1
ATTACCO PER FISSAGGIO PEDALE ESTENSIMETRATO	TAVOLA 1



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA DIP.ING. MECCANICA	SCALA 1:2
SCHIAVON ALESSIO	
PIASTRA PER FISSAGGIO PEDIVELLA	TAVOLA 4



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA DIP.ING. MECCANICA	SCALA 2:1
SCHIAVON ALESSIO	
PIASTRA DI BLOCCAGGIO ATTACCO	TAVOLA 2



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA DIP.ING. MECCANICA	SCALA
SCHIAVON ALESSIO	2:1
DISTANZIALE PLACCHETTA	TAVOLA 3