

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale
In Ingegneria Aerospaziale**

Tesi di Laurea Magistrale

Progettazione di handcycle da record di velocità



Relatore

prof. Cristiana Delprete
ing. Paolo Baldissera

firma del relatore (dei relatori)

.....

Candidato

Nicola Dan Maries

firma del candidato

.....

A.A. 2019/20

Sommario

Abstract.....	3
Abstract (English).....	4
Lista delle figure.....	5
Nomenclatura	7
Introduzione	1
Capitolo 1: Stato dell'arte	2
Introduzione	2
Ergonomia e prestazioni	6
Posizione reclinata.....	15
Introduzione della WHPSC.....	19
Presentazione del Team Policumbent.....	22
Conclusione e oggetto della tesi.....	23
Capitolo 2: Materiali e metodi	25
Impostazione del progetto	25
Fase preliminare	29
Scelta delle ruote	32
Aerodinamica preliminare	34
Analisi performance.....	39
Definizione della geometria dello sterzo.....	39
Calcolo dei rapporti di trasmissione	44
Incontro con atleti e scansione 3D	49
Ottimizzazione carena	52
Progettazione telaio	53
Tecnologie costruttive	54
Elettronica.....	55

Capitolo 3: Risultati	59
Introduzione	59
Fase preliminare	59
Ruote.....	59
Analisi performance.....	60
Scelta tra le configurazioni AP e ATP	60
Rapporti di trasmissione.....	61
Stabilità	62
Progettazione telaio	64
Conclusione	66
Ringraziamenti.....	67
Team Policumbent	68
Citazioni	70

Abstract

La progettazione di una handcycle da record di velocità deve considerare tanti parametri di progetto, per la maggior parte di essi non esistono studi specifici. Era chiaro già dall'inizio del 1900 che l'aerodinamica giocasse un ruolo fondamentale sulla prestazione sportiva, infatti è il punto di partenza per la progettazione di un veicolo a propulsione umana destinato a tentare un record di velocità; si stima una spesa di circa il 70% di potenza per vincere la resistenza aerodinamica alla velocità di 136 km/h in configurazione reclinata, carenata a due ruote. Secondo parametro più influente è la resistenza al rotolamento, ridotta scegliendo i copertoncini più performanti a disposizione, dopo i necessari test in laboratorio. I punti salienti della progettazione si focalizzano sulla posizione di pedalata per esprimere la potenza massima e sulla geometria del telaio per la maneggevolezza ad alte velocità, senza mai trascurare la sicurezza del ciclista essendo presenti alti rischi a tali velocità. Parte del progetto consta nell'individuazione delle necessità personali degli atleti coinvolti, in quanto l'handcycle è progettata su misura e deve rispettare requisiti fisiologici, spesso molto diversificati. La squadra studentesca dedicata al progetto deve occuparsi di tutti gli aspetti, anche di quelli produttivi, quindi bisogna studiare la resistenza dei componenti, la loro produzione ed assemblaggio fino al prototipo pronto in pista. Molte scelte progettuali si basano su un bagaglio ingegneristico pregresso e risulta dunque fondamentale l'esperienza pluriennale della squadra nella progettazione, realizzazione e guida dei veicoli a propulsione umana per la stessa competizione in differenti categorie. Per rendere il mezzo competitivo è richiesto effettuare una serie di cicli di collaudo, riprogettazioni e miglioramenti prima della gara; per questo i test in pista sono una preziosa risorsa e richiedono l'organizzazione meticolosa delle attività e delle persone.

In ultima analisi, l'obiettivo dell'autore è la progettazione del mezzo e la gestione della squadra con una pianificazione delle attività fino alla data della competizione, la quale è prevista essere a settembre 2022, dopo tre anni dall'inizio delle attività.

Abstract (English)

The design of a human powered speed record handcycle must consider many project parameters and for most of them there are no specific studies in literature. Since 1900 it was clear that aerodynamics plays a key role on sports performance, indeed it is the starting point for the design of a human powered vehicle intended to attempt a speed record; it is estimated that about 70% of the power is spent on overcoming aerodynamic drag at the speed of 136 km/h in a reclined and faired two wheels configuration. The second most influent parameter is the rolling resistance, reduced by choosing the most performing available tire, studied through the appropriate laboratory tests. The highlights of the design focus on the cycling position necessary to express the maximum power and on the frame geometry for good handling at high speed, always keeping in mind the safety of the cyclist given the high risk at this speed. Part of the project consists in identifying the personal needs of the athletes involved, as the handcycle is custom designed and must meet physiological requirements, often very diversified. The student team involved in the project must take care of every single aspect, even the productive one, therefore it is required to study components' resistance, the ease of manufacture and assembly till the first prototype. Many design choices are based on the team's engineering know-how, therefore the multi-year experience for the same competition in different categories in designing, manufacturing and riding human powered vehicles is a key factor. Beneficial to have a competitive handcycle is performing of a series of testing, redesign and upgrade before the race; for this reason testing on track is a valuable resource and therefore the tests require meticulous organisation of activities and personnel.

Ultimately, the author's aim is the design of the vehicle and the team management with the planning of the activities until the competition's date, which is expected to be in September 2022.

Lista delle figure

Figura 1: in alto sedia a rotelle per pallacanestro, in basso sedia a rotelle per rugby ed a destra sedia a rotelle da corsa categoria T54. Churton et al. [4]	3
Figura 2: handcycle agganciabile muscolare. livingspinal.com	4
Figura 3: handcycle categoria H3, potenza a braccia – Vittorio Podestà, nazionale italiana. ...	5
Figura 4: handcycle categoria H5, potenza a braccia e tronco - Diego Colombari, nazionale italiana.	5
Figura 5: profilo di coppia applicata al movimento centrale per diverse posizioni e potenze. Vegter et al.[21].....	8
Figura 6: tempi di attivazione muscolare in diverse configurazioni. Litzenberger et al. [17]..	10
Figura 7: a) impugnatura con angolo regolabile, b) forza tangenziale media per angolo 0°. Kramer et al. [3].....	13
Figura 8: foto di gruppo delle 18 squadre in gara nel 2019, 20° anniversario.....	20
Figura 9: SR305, ultimo tratto del tracciato di gara.	20
Figura 10: partenza assistita (alto a sinistra), arrivo assistito (alto a destra) e passaggio all'arrivo.....	22
Figura 11: Flowchart del progetto; verde=completato, arancione=in corso, nero=da fare. ...	26
Figura 12: CTS, supporto centrale in titanio, incollaggi e collegamenti con i pannelli sandwich. Head et al. [1], ulvteam.co.uk	30
Figura 13: energia cinetica turbolenta e sollecitazione di taglio a parete del prototipo Arion4. Head et al. [1]	31
Figura 14: banco prova rotolamento a sinistra e motore elettrico con controllore a destra..	33
Figura 15: stampo in alluminio per ruota ETRTO 405, schiuma di PVC e tessuti di fibra di carbonio.....	34
Figura 16: schematizzazione del telaio con i 3 parametri principali.....	42
Figura 17: piano normale all'asse di sterzo e dimensioni di forze e bracci.....	42
Figura 18: Design Table guida del modello SolidWorks.	43
Figura 19: foglio Excel delle coppie agenti sullo sterzo e grafico angolo sterzo/coppia squilibrante in funzione delle velocità.	43
Figura 20: analisi di stabilità al ribaltamento.	45
Figura 21: schematizzazione trasmissione.	46
Figura 22: scanalature per agevolare il cambio marcia.	47
Figura 23: schematizzazione utilizzo SRM (giallo=corona, blu=pedivella, F=fronte SRM, R= retro SRM).	48
Figura 24: scansione 3D di Vittorio Podestà sulla sua handcycle da competizione.	51

Figura 25: Diego Colombari sulla sua handcycle categoria H5 e manichino scalato e posizionato in una carena.	51
Figura 26: scansione 3D e manichino di Simone Chiarolla.	51
Figura 27: trasmissione a pacco pignoni flottante su prototipo Taurus. Brevettato.....	57
Figura 28: sistema di visione, (alto-sinistra) fotogramma 200 m all'arrivo, (basso-sinistra) carena e plexiglass, (destra) schermi all'arrivo con telemetria.	58
Figura 29: grafico potenza/velocità per gli pneumatici ETRTO 406.	60
Figura 30: definizione rapporti di trasmissione, RPM e velocità.	62
Figura 31: grafico angolo di sterzo/coppia squilibrante per la configurazione angolo dell'asse di sterzo=35°, avancorsa=97mm, avanzamento=137mm. Ingrandimento della zona 0 – 1° di sterzo.	63
Figura 32: carreggiata fissa a 350 mm, passo variabile, risultati per traiettoria di raggio 145 metri evidenziati in verde.	64

Nomenclatura

m. c. = movimento centrale

VO_2 = volume di ossigeno

RPM = *Rotation Per Minute* – rotazioni al minuto

UCI = *Union Cycliste Internationale* – Unione Ciclistica Internazionale

CFD = *Computational Fluid Dynamics* – fluidodinamica computazionale

$C_D A = C_D \cdot A$ = area frontale effettiva

IHPVA = *International Human Powered Vehicle Association*

WHPSC = *World Human Powered Speed Challenge*

HPV = *Human Powered Vehicle* – veicolo a propulsione umana

GPS = *Global Positioning System* – sistema di posizionamento

ATP = *Arm Trunk Power* – pedalata a braccia e busto

AP = *Arm Power* – pedalata a braccia

CAD = *Computer Aided Design* – progettazione assistita dal computer

FEM = *Finite element method* – metodo agli elementi finiti

CNC = *Computerized Numerical Control* – controllo numerico computerizzato

PVC = polivinilcloruro

ETRTO = *European Tyre and Rim Technical Organisation*

X_G = posizione del baricentro

Introduzione

In questo elaborato verrà introdotto il mondo dello sport per persone disabili con approfondimento della disciplina dell'*handcycling*, sport praticato su una bicicletta a tre ruote, triciclo, con l'immissione della potenza attraverso le braccia. Il primo capitolo si focalizza sui risultati della ricerca scientifica effettuata in questo campo con l'obiettivo di ottenere informazioni utili all'impostazione corretta della posizione del ciclista, dell'ergonomia in modo da permettere la produzione efficiente di potenza. Verrà effettuata un'analisi delle soluzioni tecnologiche adottate nel campo dei veicoli a propulsione umana carenati, per impostare al meglio la scelta della configurazione più adatta all'obiettivo del progetto. Parte delle scelte progettuali si baseranno sull'esperienza pluriennale del *Team Policumbent* nella progettazione, realizzazione e guida di veicoli a propulsione umana, carenati e reclinati. La squadra ha partecipato a numerose edizioni della carismatica WHPSC con i prototipi Pulsar, Taurus e Taurus X e sta ultimando il nuovo prototipo maschile per la partecipazione al WHPSC2021. L'obiettivo della sezione Handcycle è progettare, realizzare e scegliere un ciclista professionista per la partecipazione nella categoria *Arm Only* dell'edizione 2022 del WHPSC. Il sottoscritto, in qualità di *project manager*, ha l'obiettivo di organizzare il progetto dal punto di vista delle mansioni, della gestione del tempo e delle risorse assegnate; la parte iniziale del capitolo 2 conterrà il diagramma delle attività. In fase iniziale il progetto consisterà nell'analisi delle soluzioni adottate dai concorrenti nella stessa categoria per stimare la velocità obiettivo, le dimensioni massime e la configurazione generale, filtrando le soluzioni con l'esperienza dei prototipi precedenti della squadra. Essendo l'aerodinamica il fattore più influente sulla spesa di potenza del ciclista, il progetto dovrà partire con il disegno della carena, la quale dovrà essere ottimizzata per ridurre la resistenza aerodinamica e dovrà essere messa in relazione alla stima della potenza che il ciclista può esprimere, per ricavare un dato di velocità finale massima, il quale sarà il parametro di confronto tra diverse soluzioni aerodinamiche. Appurata la competitività del mezzo, si dovranno stabilire i parametri geometrici della handcycle, questi parametri influenzano direttamente la manovrabilità, la stabilità longitudinale e laterale, lo sterzo, la distribuzione delle masse, gli ingombri interni, e altri aspetti. Per ogni aspetto si cercherà di trovare la soluzione migliore possibile, anche se l'esperienza insegna che il compromesso è la soluzione migliore. La preferenza deve essere rivolta all'ottimizzazione aerodinamica, data la sua importanza, ma non verrà mai trascurata la sicurezza delle persone e del progetto. Nelle fasi più avanzate del progetto, infatti, si ottimizzerà la carena con un nuovo programma e si progetterà nel dettaglio l'interno del mezzo, per poi procedere con la produzione e il collaudo.

Capitolo 1: Stato dell'arte

Introduzione

La mobilità delle persone con disabilità è stata servita per la maggior parte dei casi dalla sedia a rotelle classica con un sistema di propulsione manuale sul cerchio delle ruote; questo sistema di trasporto è adatto a piccoli spostamenti in ambienti con spazi ristretti, all'interno di edifici oppure per persone che non hanno la mobilità sufficiente per applicare forza con gli arti superiori e sfruttano la sedia a rotelle elettrica per un'autonomia maggiore. L'introduzione delle persone affette da disabilità nel mondo sportivo è avvenuta dopo la Seconda guerra mondiale con gli studi del Dottor Ludwig Guttmann. Questo periodo storico ha visto aumentare drasticamente il numero di persone affette da lesioni spinali e amputazioni a causa degli orrori della guerra e contestualmente sono nate strutture dedicate alla cura e riabilitazione di questi pazienti. Il Dottor Guttmann ha presto capito che lo sport combinato con le terapie mediche era molto più efficace dal punto di vista medico, fisico e psicologico. Ai tempi del dopoguerra l'accesso allo sport per persone disabili poteva avvenire solo in strutture attrezzate, come l'ospedale di Stoke Mandeville gestito dal suddetto dottore, in quanto la valorizzazione, l'integrazione e la tutela dei disabili non erano ancora sufficientemente sviluppate e le attrezzature non erano tecnologicamente adatte per l'utilizzo sportivo autonomo da parte degli interessati. Con l'avanzamento tecnologico nel campo sono stati considerati sport sempre più impegnativi e competitivi, come la maratona e le gare in pista, e sono nate associazioni a livello mondiale e locale per l'organizzazione di eventi sportivi e l'assistenza degli atleti nella pratica sportiva. Quando pensiamo alla pratica sportiva la sedia a rotelle può essere uno strumento valido se utilizzata in alcuni ambienti adatti: tennis, ping-pong, pallacanestro, rugby, scherma, lancio del peso e giavellotto, tiro con l'arco e molti altri sport; in Figura 1 esempi di evoluzioni della sedia a rotelle per fini sportivi. Se proviamo a pensare ad uno sport simile al ciclismo, dove sono richieste alte velocità e postura aerodinamica con l'immissione di una potenza elevata e costante nel tempo, la sedia a rotelle non rappresenta più un mezzo adatto. Gli infortuni agli arti superiori e alle spalle sono comuni negli atleti che praticano sport in carrozzina ad alti livelli, questo perché si accumulano stress e fatica nei muscoli e nelle articolazioni delle spalle, che non sono efficaci nell'effettuare movimenti ciclici ad alta intensità. Ci sono studi specializzati dal punto di vista medico per una pratica sportiva in carrozzina senza rischi, ma esulano dall'argomento di questa tesi. Un sistema a pedivelle o leveraggi è molto più efficace e meno pericoloso. L'atleta può generare una potenza maggiore, ottenendo velocità superiori che possono essere mantenute più a lungo nel tempo. Da questa scoperta sono nati i mezzi definiti *handcycle*, i quali sfruttano lo

stesso principio di funzionamento della bicicletta tradizionale, quindi un sistema di propulsione a ruote azionato da una catena, corone e pignoni messo in movimento dalle pedivelle. [4, 6, 18, 19, 20]



Figura 1: in alto sedia a rotelle per pallacanestro, in basso sedia a rotelle per rugby ed a destra sedia a rotelle da corsa categoria T54. Churton et al. [4]

In particolare nel campo delle handcycle, in base alla tipologia di disabilità, una persona disabile può scegliere tra diversi mezzi per la mobilità e per lo sport. Per una mobilità ricreativa o sportiva non agonistica si può optare per handcycle agganciabili direttamente alla carrozzina di uso comune dove l'handcycle è un componente separato costituito dalla ruota anteriore, sistema di trasmissione della potenza e sistema di sterzata. Una volta assemblata la handcycle alla sedia a rotelle il sistema costituisce un mezzo a 3 ruote con trazione anteriore (Figura 2); le rotelline di stabilità della carrozzina vengono alzate dal suolo una volta combinate le due parti insieme, per non influenzare negativamente il moto.



Figura 2: handcycle agganciabile muscolare. livingspinal.com

Per attività sportive di alto livello è necessario scegliere handcycle con telaio fisso, studiate appositamente per soddisfare i bisogni dell'atleta, quindi l'ergonomia e la regolabilità dei mezzi è fondamentale. In base alle possibilità di ogni persona si può optare per una generazione della potenza con le sole braccia (Figura 3) o sfruttando le braccia e i muscoli del tronco per immettere potenza (Figura 4). La scelta tra queste possibilità è guidata principalmente dai bisogni dell'atleta e dalle caratteristiche della competizione. La configurazione che prevede l'utilizzo delle sole braccia solitamente è reclinata, quindi il corpo è in una posizione distesa con il torso rilassato su uno schienale inclinato rispetto all'orizzontale di un angolo piccolo, le gambe sono distese verso l'anteriore del mezzo e supportate da appoggi fissi lungo la ruota anteriore e le braccia azionano le pedivelle posizionate sopra la pancia del ciclista, dove si trova il movimento centrale.



Figura 3: handcycle categoria H3, potenza a braccia – Vittorio Podestà, nazionale italiana.



Figura 4: handcycle categoria H5, potenza a braccia e tronco - Diego Colombari, nazionale italiana.

Il complesso handcycle e atleta conferiscono al mezzo un baricentro molto basso aumentando la stabilità e l'aerodinamicità. La forza espressa dal ciclista in fase di spinta è scaricata attraverso le spalle all'ampio sedile e la reazione alla fase di tiro sulle pedivelle è generata dal peso del ciclista, spesso ancorato al telaio grazie a cinture; il sistema di bloccaggio del tronco con cinture nella zona dell'addome serve anche a conferire stabilità al corpo, condizione

necessaria per atleti con lesioni spinali alte, le quali portano a perdita di sensibilità di parte del busto. La configurazione denominata "inginocchiata" (Figura 4) si riferisce a quegli atleti che possono sfruttare anche i muscoli del tronco, come schiena e addome, per fornire spinta al mezzo. La posizione del corpo è completamente diversa: il ciclista scarica il suo peso sul sedile e sugli appoggi delle ginocchia mentre la parte inferiore delle gambe è piegata sotto la seduta; esiste anche una configurazione meno comune dove il ciclista è seduto con le gambe leggermente flesse verso l'anteriore della handcycle. La forza necessaria per la pedalata viene conferita dalle braccia e dal tronco in fase di spinta, mentre viene immessa meno energia in fase di tiro, dove il ciclista deve sollevare il proprio peso attivando i muscoli addominali e applicando una forza di tiro con le braccia. Questo sistema può portare a sviluppare una potenza maggiore rispetto alla configurazione reclinata, ma ha lo svantaggio aerodinamico di una sezione frontale maggiore. In tutti i casi la sterzata viene effettuata applicando una forza diversa nelle braccia e portando la forcella a ruotare verso la direzione desiderata; durante questo movimento si può continuare a pedalare se l'ingombro delle pedivelle lo consente. Le handcycle hanno un sistema di cambio marcia a deragliatore e pacco pignoni, applicato alla ruota anteriore, così come anche il freno primario e quello di emergenza sono posizionati sulla forcella ed agiscono sulla ruota anteriore. Non può essere applicato un sistema frenante sulle ruote posteriori, perché anche una leggera differenza di frenata tra le due ruote porterebbe la handcycle a sterzare perdendo il controllo del mezzo, soprattutto in occasioni di emergenza. L'handcycle a telaio fisso è costruita in tubi di alluminio per un utilizzo amatoriale e si opta per materiali avanzati, come i compositi in fibra di carbonio o il titanio, per atleti professionisti. [11]

Ergonomia e prestazioni

In letteratura si possono trovare una moltitudine di articoli che trattano implicazioni di tipo medico, psicologico e riabilitativo, questo elaborato non si focalizza su questi aspetti, in quanto l'obiettivo è la costruzione di una handcycle da competizione e la scelta di un atleta di alto livello, per il quale il mezzo sarà sviluppato su misura seguendo le sue necessità mediche già determinate a priori. La valutazione di alcuni articoli di tipo biomeccanico improntati alla pratica sportiva rimane interessante per stabilire la miglior scelta progettuale nei confronti dell'obiettivo sportivo.

Al contrario del ciclismo tradizionale, la pratica dell'handcycling può essere effettuata in due modalità diverse: pedalata sincrona e pedalata asincrona. La pedalata sincrona vede le pedivelle montate allo stesso angolo sul movimento centrale, quindi le braccia seguono lo stesso movimento nella fase di spinta e di tiro. La pedalata asincrona è del tutto equivalente

alla pedalata sulle biciclette tradizionali, quindi le pedivelle sono posizionate in opposizione di angolo e mentre un braccio spinge l'altro tira. La scelta più comune per gli atleti di handcycle è la pedalata sincrona, perché questa garantisce una simmetrica distribuzione delle forze sulla forcella e quindi una maggior stabilità longitudinale, soprattutto ad alte velocità; in più gli studi di Van Der Woude et al. [18] hanno dimostrato che la pedalata sincrona è più efficiente e più stabile di quella asincrona. I parametri utilizzati per stabilire questi vantaggi sono frequenza cardiaca, frequenza respiratoria e volume di ossigeno consumato. L'efficienza della pedalata è risultata essere maggiore per la configurazione sincrona rispetto all'asincrona con una differenza sempre più marcata all'aumentare della cadenza. L'utilizzo dei muscoli stabilizzatori laterali per mantenere il corpo in posizione e correggere la direzionalità del mezzo è stato indicato come principale differenza tra le due configurazioni. Il gruppo di controllo era costituito da persone non costrette all'uso della sedia a rotelle, quindi tali risultati potrebbero variare con un gruppo di controllo con lesioni spinali più o meno gravi. Essendo i test effettuati a bassa potenza e bassa cadenza, è logico pensare che gli effetti positivi della pedalata sincrona aumentino con l'aumentare delle velocità.

La progettazione di una handcycle da competizione deve passare, prima di tutto, dall'interfaccia uomo-macchina, in quanto bisogna fornire il massimo dell'ergonomia con l'attenzione alla massima efficienza e potenza, per questo sono stati presi in considerazione precedenti studi sui parametri che influiscono sulla prestazione sportiva: posizione del movimento centrale, inclinazione e altezza dello schienale, lunghezza delle pedivelle, larghezza delle impugnature, angolo di inclinazione delle impugnature. I recenti studi dei maggiori esperti nel campo della ricerca sull'ergonomia dei mezzi sportivi per persone con disabilità, Vegter, Mason, Sporrel, Stone, Woude e Goosey-Tolfrey [21], hanno indagato l'influenza dell'avanzamento orizzontale del movimento centrale (m. c.) sulla flessione del gomito, avanzamento della spalla, cinetica della propulsione e risposta fisiologica. Le prove sono state effettuate su un gruppo di 12 partecipanti maschi, non disabili, senza precedente esperienza sullo sport in questione, con età media di 25 anni e altezza media 182 cm. La scelta di un gruppo di persone non allenate alla pratica dell'handcycle è metodologica, perché si cerca di evitare che l'abitudine muscolare ad una posizione specifica possa influenzare i risultati delle prove. Importante introduzione degli autori è la definizione della posizione del movimento centrale come distanza dall'angolo acromatico (punto localizzato dell'acromion, osso della spalla) al centro dell'impugnatura con pedivella orizzontale nella posizione più lontana dell'atleta; precedentemente veniva utilizzato l'angolo di flessione del gomito con mano sull'impugnatura nella posizione più lontana, questo però non tiene conto

Capitolo 1: Stato dell'arte

dell'avanzamento della spalla e porta ad una non ripetibilità delle misure. La variazione della posizione del movimento centrale durante le prove è stata effettuata in base alla percentuale della lunghezza del braccio per ogni atleta, considerando 94, 97, 100 e 103 %, mentre l'altezza è stata impostata per avere 20 mm di margine tra le impugnature e il corpo. I parametri cinematici considerati sono la coppia massima e minima, misurati sia per la fase di tiro, sia di spinta e la percentuale di lavoro svolto nella fase di tiro rispetto al lavoro totale sul giro. I parametri fisiologici sono: volume di ossigeno consumato e anidride carbonica prodotta (VO_2 e CO_2), frequenza cardiaca, rapporto di scambio respiratorio, dispendio di energia ed efficienza meccanica lorda. Le prove sono svolte per la durata di 3 minuti a cadenza costante di 70 RPM e a potenza costante di 30 e 60 W. Con l'aumentare della distanza del movimento centrale si verifica una diminuzione in flessione del gomito e un aumento dell'avanzamento della spalla, questo porta ad una variazione della distribuzione del lavoro lungo l'intero giro di pedivelle e tra le fasi di tiro e spinta. Una posizione vicina del m. c. (linea azzurra nella Figura 5: profilo di coppia applicata al movimento centrale per diverse posizioni e potenze. Vegter et al.[21]) porta ad avere una distribuzione più omogenea lungo l'intero arco di pedalata, con conseguenti punti morti e picchi meno accentuati, e un'equilibratura tra la percentuale di lavoro svolto tra le fasi di tiro (da 30° a 220°) e spinta (da 220° a 30°).

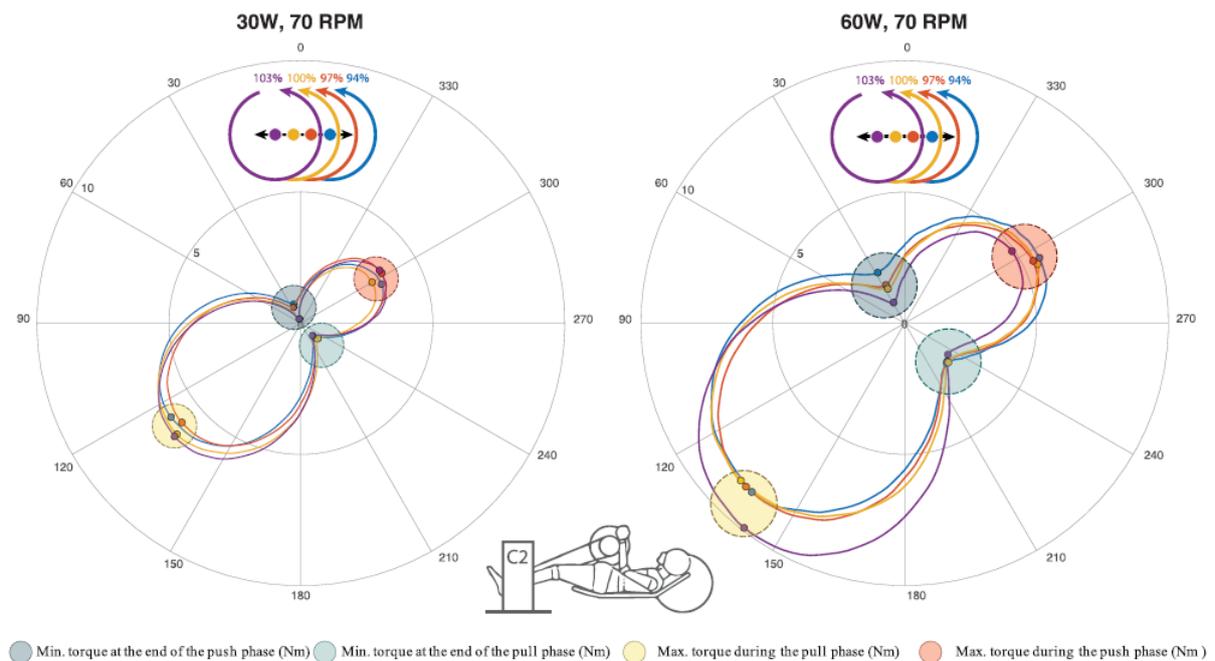


Figura 5: profilo di coppia applicata al movimento centrale per diverse posizioni e potenze. Vegter et al.[21]

La variazione della posizione del m. c. non ha portato a nessun tipo di correlazione con i parametri fisiologici (VO_2 , efficienza meccanica lorda, etc.), quindi non si può definire una posizione ottimale basandosi su questo studio. Resta valida la considerazione sulla distribuzione più uniforme del lavoro durante il ciclo con posizione del m. c. al 94% della lunghezza del braccio, che porta ad una fluttuazione minore della velocità in condizioni reali. Considerando che durante le prove diversi atleti hanno assunto avanzamenti delle spalle e flessioni dei gomiti diversi per le stesse posizioni relative del m. c., si enfatizza l'utilità della definizione standardizzata della posizione del m. c. e si ipotizza che la produzione di lavoro avvenga sia attraverso il movimento delle braccia, sia con l'avanzamento delle spalle. Infine, si ipotizza che ci sia una libertà di movimento nella posizione del m. c. senza impattare direttamente sulla produzione di energia, quindi si può regolare anche in base al tipo di prestazione sportiva richiesta. La non correlazione tra posizione del m. c. e l'efficienza meccanica è stata verificata anche da uno studio del 2014 di Arnet et al. [2], dove si fecero prove modificando sia altezza che profondità del m. c.; la differenza sostanziale in questo studio è che il gruppo di studio era composto da tredici atleti con disabilità.

Mentre la maggior parte degli studi di laboratorio sono eseguiti a livelli di potenza molto bassi oppure su gruppi di studio senza disabilità, quindi senza precedente esperienza in sedia a rotelle o su handcycle, l'articolo di Litzenberger et al. [17] si riferisce a misurazioni di laboratorio effettuate su un atleta plurimedagliato alle Paralimpiadi ed è svolto ad alti livelli di potenza (130, 160, 190 W). I parametri variati durante i 22 test hanno interessato la lunghezza delle pedivelle, la posizione del movimento centrale e la posizione dello schienale. Gli apparati utilizzati per le prove sono di tipologia medica e valutano l'attività di ogni muscolo che contribuisce alla pedalata. Sono applicati elettrodi per rilevare l'attività di attivazione e disattivazione dei muscoli attraverso elettromiografia, è effettuata l'integrazione della curva rappresentante l'ampiezza del segnale muscolare per avere un'indicazione dello sforzo muscolare e viene rilevata la posizione delle pedivelle durante l'intero ciclo di pedalata, questo per correlare l'attività muscolare con le fasi di pedalata lungo l'angolo giro. I risultati dell'articolo riportano che la posizione verticale del movimento centrale influenza il tempo di attivazione dei muscoli e l'angolo di pedalata alla quale tale attività inizia e cessa. Nella Figura 6 l'abbassamento del movimento centrale viene riportato con il primo numero della didascalia, dove "2" risulta essere la seconda posizione dal basso e "4" la posizione più alta di una staffa di regolazione a fori equidistanti. Alzando il movimento centrale l'attività muscolare presenta uno schema analogo a quello di una posizione più bassa, ma il tutto viene traslato indietro (senso antiorario) sulla fase di pedalata; il deltoide e il tricipite presentano una durata

dell'attivazione in opposizione, quindi mentre il deltoide viene attivato più a lungo per posizioni basse il tricipite lavora per meno tempo e viceversa. Agendo sull'altezza dello schienale si ottiene un comportamento opposto a quello della posizione del movimento centrale, quindi alzando lo schienale (il secondo numero della didascalia indica: "1" posizione bassa e "2" rialzato di 5 cm) si osserva un anticipo di fase nell'attività muscolare con stessa distribuzione di durata (Figura 6). Questo suggerisce che sia la posizione relativa tra spalle e movimento centrale ad influenzare il comportamento dei muscoli lungo la fase di pedalata.

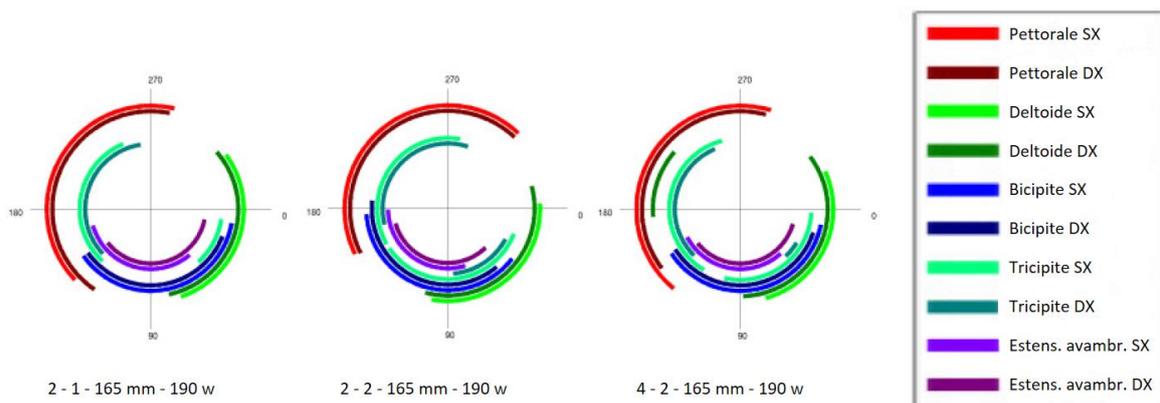


Figura 6: tempi di attivazione muscolare in diverse configurazioni. Litzenberger et al. [17]

Modificando la lunghezza delle pedivelle (160mm, 165mm utilizzata regolarmente dall'atleta e 175mm) si è osservato che lo schema di attivazione dei muscoli non viene alterato ma varia l'ampiezza del segnale, eseguendo un'integrazione di questo si ottiene lo sforzo netto muscolare, quindi l'energia metabolica spesa per generare i watt fissati nella prova. Le pedivelle corte e quelle lunghe hanno generato più sforzo nei muscoli a potenza fissa mentre la lunghezza con sforzo minore per i muscoli è risultata essere quella originariamente utilizzata dall'atleta. La valutazione dello sforzo è stata eseguita durante tutte le variazioni, ma nessuna è risultata essere meno faticosa rispetto alla posizione originale. Questo risultato può essere interpretato in due modi: l'atleta era già in una configurazione ottimale e non erano necessarie variazioni oppure il tempo di adattamento dei muscoli non è stato sufficiente e quindi le variazioni di configurazione hanno portato a sforzi maggiori.

Per analizzare nel dettaglio cosa accade modificando solo i parametri lunghezza delle pedivelle e distanza tra le impugnature, bisogna citare lo studio di Krämer et al. [12]. L'ipotesi avanzata per lo studio precedente sull'abitudine muscolare a specifiche configurazioni non può sussistere per gruppi di studio che non hanno avuto esperienze pregresse con una handcycle,

questa è stata una delle preoccupazioni che hanno portato alla scelta di candidati inesperti per questo studio. Le prove in laboratorio sono state effettuate su un ergometro inerziale che permette, oltre alla regolazione della lunghezza delle pedivelle e la distanza tra le impugnature, anche la posizione in altezza e profondità del movimento centrale, in modo che sia perfettamente adattabile a tutto il gruppo di studio di 25 persone e quindi permetta di avere un angolo di 15° all'articolazione del gomito in posizione di massima estensione. Per permettere l'espressione di potenza anche in fase di tiro delle pedivelle è stato utilizzato un sistema di cinghie per fissare la parte superiore del tronco allo schienale, pratica utilizzata anche dagli atleti professionisti. Limitazione della prova per una generalizzazione verso l'handcycle è l'ergometro fisso, quindi l'atleta non deve preoccuparsi di stabilizzare il mezzo e può esprimere più potenza rispetto ad una prova su strada. La prova è strutturata con una fase di riscaldamento libera, una fase intermedia per famigliarizzare con le condizioni del test e la rilevazione finale durante le prime dieci rivoluzioni delle pedivelle a potenza massima. Durante la prova sono state rilevate la potenza istantanea applicata alla massa rotante inerziale, la cadenza e l'angolo istantaneo delle pedivelle, successivamente vengono tracciati i grafici di potenza/rivoluzione e di potenza/cadenza. Per ogni partecipante i parametri della prova sono stati definiti in base a percentuali di dimensioni fisiologiche, quindi durante i test sono state impostate pedivelle di lunghezza del 19, 22,5 e 26% della distanza tra spalle e movimento centrale e larghezza tra le impugnature del 72, 85 e 98% della larghezza delle spalle. Con l'analisi statistica è risultato che una variazione della lunghezza delle pedivelle del 7% della distanza tra spalle e movimento centrale produce una variazione del 12% nella potenza massima espressa e che una variazione della distanza tra le impugnature del 26% della larghezza delle spalle produce solo l'1% di variazione della potenza massima espressa. Non sono state osservate influenze tra lunghezza delle pedivelle e larghezza delle impugnature. La potenza massima è stata registrata per la configurazione pedivelle lunghe e larghezza intermedia (26% distanza spalle - movimento centrale e 85% larghezza spalle). Dal confronto con lo studio sulle pedivelle di Goosey-Trolfey et al. [7] e in accordo con i risultati riportati dall'articolo in esame, deriva che la lunghezza delle pedivelle alla potenza massima e all'efficienza massima è nell'intorno dell'intervallo 180 e 190 mm. La cadenza alla quale la potenza massima viene espressa per le pedivelle di lunghezza più performante (media 190 ± 1 mm) è risultata essere 107 RPM, la quale decresce fortemente aumentando la lunghezza delle pedivelle. La potenza massima raggiunta dal sottogruppo maschile con le diverse lunghezze di pedivella è compresa nell'intervallo 873 e 1009 W, valori non molto inferiori a quelli riportati per il ciclismo tradizionale (1149 – 1194 W) da Martin e Spirduso (2001) [14], citati nell'articolo; si enfatizza come una variazione del 15% della lunghezza delle pedivelle per

il ciclismo a gambe generi una variazione del 4% sul valore massimo di potenza, specificando, invece, come nell'handcycle la lunghezza delle pedivelle influisca molto di più sulla potenza massima, come riportato precedentemente. Riepilogando la lunghezza delle pedivelle influisce molto sulla potenza massima esprimibile e la potenza massima è stata registrata per pedivelle lunghe 26% della distanza spalle - movimento centrale con larghezza delle impugnature poco influente ad una cadenza di 107 RPM.

Come anticipato nel paragrafo precedente, Goosey-Trolfrey et al. [7] hanno eseguito uno studio sull'efficienza della pedalata variando i parametri di lunghezza delle pedivelle e cadenza di pedalata, affermando che tra le pedivelle da 180 e 220 mm, la più corta risulta essere più efficiente, indipendentemente dalla cadenza (70 e 85 RPM). Le misurazioni fisiologiche prese in considerazione per valutare i cambiamenti sono il massimo volume di ossigeno consumato per minuto, frequenza cardiaca, efficienza netta e lorda. Le prove sono eseguite a potenza costante di 90 W per quattro minuti su una handcycle sportiva con un gruppo di 8 ciclisti di alto livello dipendenti da sedia a rotelle. Questo studio è stato riportato per affinità al precedente, anche se le basse potenze in gioco, le limitate configurazioni prese in considerazione e l'anno di pubblicazione (2007) non posso dare indicazioni applicabili alla tesi in questione.

Molte prove di laboratorio si basano sulla scelta a priori di una potenza e una cadenza, quindi non si riesce a cogliere come la cinematica e la cinetica dell'atleta vengano alterate quando il livello di carico aumenta, per questo Quittmann et al. [16] hanno tentato di dimostrare come un atleta su handcycle reagisce all'aumentare del carico di pedalata. Il gruppo di studio è composto da 12 atleti allenati ma senza esperienza di handcycling, i quali hanno eseguito la prova su una handcycle da competizione, collegata ad un ergometro. L'incremento di carico della prova è stato stabilito essere di 20 W ogni 5 minuti fino al limite di ogni partecipante, mediamente il valore massimo raggiunto di potenze è stato 131 W con un massimo di 160 W. La prova ha portato a stabilire che l'incremento di carico altera il profilo cinematico dell'atleta, andando a peggiorare la prestazione sportiva massima, in particolare si nota un aumento del lavoro svolto durante la fase di tiro, aumento dell'avanzamento della spalla e minor flessione del gomito e tentativi di intervenire con i muscoli del tronco. Per ottenere una prestazione massima migliore bisogna mantenere regolare il profilo cinematico iniziale, senza chiamare in causa altri muscoli oppure modificando la posizione base con l'avanzamento delle spalle. Il fatto che il lavoro svolto in fase di tiro aumenti con l'aumentare del carico, anche per un profilo cinematico ottimale, suggerisce agli atleti di handcycle di rinforzare il muscolo più sollecitato durante questa fase, il bicipite brachiale.

Ulteriore parametro utile per impostare l'interfaccia ciclista-handcycle è l'angolo di inclinazione delle impugnature rispetto alla verticale, questo influenza direttamente la potenza sviluppata dal ciclista, come affermato nello studio di Kramer et al. [3]. Lo studio è stato effettuato su un gruppo di 16 persone senza disabilità e senza esperienza pregressa con la pratica dell'handcycling, di età media 26 anni. La struttura di prova utilizzata è una handcycle con schienale ad un'inclinazione di 70° rispetto all'orizzontale, questo porta i risultati ad essere poco significativi per l'obiettivo della tesi, ma comunque vengono riportati non essendo presenti altre fonti utili. Le impugnature sono rese inclinabili attraverso un pivot centrale e una vite che regola l'angolo, angoli positivi portano le mani verso una posizione prona e angoli negativi verso una supina, il sistema è completato da un strain gauge (Figura 7) per misurare la forza tangenziale applicata e quindi calcolare il lavoro applicato sull'angolo giro delle pedivelle, anche esso monitorato durante la prova per correlare le forze agli angoli. La prova si è svolta a potenza costante uguale al 20% della massima espressa durante una fase preliminare e a cadenza fissata a 70 RPM, mediamente quindi il valore della potenza durante le prove per i diversi partecipanti è di 90 W. La prova è stata eseguita per ogni candidato con diversi angoli fissi (-30°, -15°, 0°, 15°, 30°) e con le impugnature libere di variare l'angolo. L'inclinazione delle impugnature è risultata essere sufficientemente influente solo nei settori 150°-210° e 30°-90°, per cui sono risultate migliori le inclinazioni -15° e +30°, rispettivamente. Visto che la maggior forza tangenziale è prodotta nel settore *pull down* (30°-90°), tiro verso il

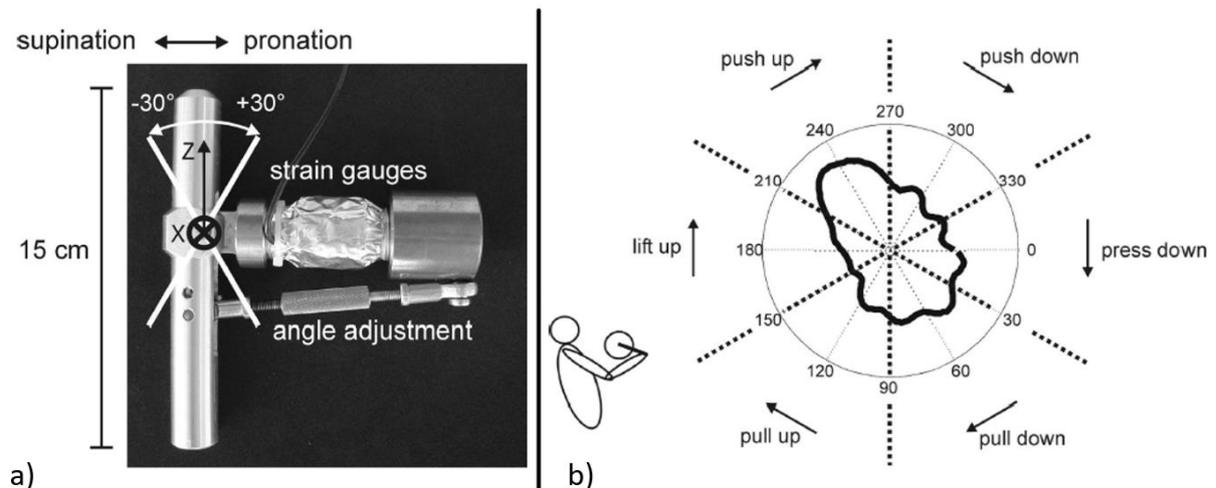


Figura 7: a) impugnatura con angolo regolabile, b) forza tangenziale media per angolo 0°. Kramer et al. [3]

basso, rispetto al *lift up* (150°-210°), è stata indicata come inclinazione ottimale quella a +30°, perché genera un lavoro maggiore. La prova con inclinazione libera non ha portato significativi

miglioramenti sulla generazione di potenza, quindi non è indicata come un miglioramento. Essendo questo articolo pubblicato nel 2010 come studio preliminare, notando anche le differenze di impostazione del mezzo oggetto della tesi, le indicazioni riportate hanno un'influenza limitata sulla progettazione in esame.

È importante interrogarsi anche sulla percezione degli esperti del settore per progettare secondo i loro bisogni e non solo secondo i dati di laboratorio; questo è stato l'obiettivo di Stone, Tolfrey et al. [6] nell'articolo che raccoglie interviste ad atleti, allenatori e costruttori di handcycle. L'argomento principale è la prestazione di resistenza, per la quale sono stati indentificati come fattori chiave il confort, la stabilità e la produzione efficace di potenza. Il confort è risultato critico per l'utilizzo nel lungo termine del mezzo, quindi per le sessioni di allenamento e per una prestazione di resistenza. La mancanza di confort si traduce nell'impossibilità di eseguire le sessioni di allenamento, portando a prestazioni sportive negative. Quando il mezzo non è impostato correttamente per l'atleta si possono verificare lesioni come piaghe da decubito, che portano a dolori e lunghi periodi di guarigione, o nel peggiore dei casi lesioni alla colonna vertebrale in corrispondenza della cervicale o del torace. Il confort è direttamente influenzato dalla struttura di supporto e dal materiale costituente lo schienale. È emerso che in commercio non sono presenti soluzioni adatte alle esigenze degli atleti in fatto di appoggi e schienali, perché la schiena di ogni individuo ha caratteristiche particolari, maggiormente diversificate se si considerano le lesioni spinali o altre disabilità che possono portare ad asimmetrie. Il tutto è peggiorato dal fatto che gli atleti con lesioni spinali non hanno la sensibilità per indicare come modificare gli appoggi, questo porta il processo di adattamento del mezzo a durare alcuni mesi tramite molte modifiche successive. La stabilità è un punto di partenza fondamentale per poter generare elevate potenze in maniera efficiente, questo implica che le gambe, il tronco e la testa rimangano rilassate e immobili sugli appoggi mentre si esercita forza sulle pedivelle; si cerca di evitare di avere scorrimenti sul sedile e movimenti della testa o contratture di muscoli che non intervengono sulla propulsione. Per ottenere questo la forma dei cuscini di supporto sul sedile deve essere adatta all'atleta, si applicano cinghie addominali per portare la parte bassa del corpo ad essere sempre in contatto con il telaio e si ricerca una certa rigidità nella struttura in modo da non perdere potenza in deformazioni nel momento della spinta delle braccia. Importante notare che gli atleti di categorie con lesioni più gravi, H1-H3, sono intrinsecamente meno stabili e necessitano più supporti laterali rispetto agli atleti delle categorie H4-H5; questo si intuisce anche perché gli atleti con lesioni più in basso sulla colonna oppure con amputazioni hanno una sensibilità maggiore o completa e riescono ad anticipare i momenti di non stabilità del

veicolo, riuscendo a correggere prima. Per la produzione di potenza sono stati identificati quattro principali parametri: posizione verticale e orizzontale del movimento centrale, lunghezza delle pedivelle, larghezza delle manopole e la posizione delle spalle e addome dell'atleta. L'obiettivo è capire la posizione relativa perfetta tra corpo e pedivelle per cercare di ottenere un trasferimento di potenza lungo tutto l'angolo giro della pedalata. In analogia con il ciclismo tradizionale, la posizione orizzontale del movimento centrale deve garantire un leggero angolo di flessione del gomito (indicativamente 15°) nel punto di massima estensione. L'altezza del movimento centrale è ridotta al minimo, si fanno considerazioni sul margine necessario per poter pedalare senza interferenze con forcella dritta e in fase di sterzata. La posizione delle spalle dovrebbe essere sotto quella del movimento centrale, sia per questioni aerodinamiche, sia per massimizzare la generazione di potenza. La larghezza delle impugnature è indicata uguale o leggermente inferiore alla larghezza delle spalle. Queste indicazioni sono vaghe ed è anche indicato nel testo che necessitano di ulteriori studi. Gli atleti intervistati erano limitati dall'uso di componenti commerciali, quindi la scelta della lunghezza delle pedivelle ricade tra 160 mm e 175mm; questo parametro è stato indicato come molto influente sulla produzione di potenza e gli atleti hanno mostrato interesse nel ridurre la lunghezza per aumentare le prestazioni. Considerazioni interessanti, ma non esaustive, sono riportate in relazioni alla lunghezza delle pedivelle: le pedivelle in commercio sono della stessa lunghezza delle pedivelle del ciclismo tradizionale, nonostante gli arti superiori sono mediamente 30% più corti. Se si accorciassero le pedivelle del 30% si potrebbe abbassare il movimento centrale e la posizione dell'atleta migliorando l'aerodinamica. Considerando la cinematica degli arti si comprende che la posizione orizzontale del movimento centrale influisce sulla cinematica del gomito, mentre la posizione verticale influisce sulle articolazioni delle spalle e del polso. Indicazioni importanti sono fornite per evitare il processo di settaggio per tentativi, che risulta molto dispendioso di tempo; gli atleti che si possono permettere la spesa più elevata scelgono uno schienale in fibra di carbonio modellato direttamente con un calco della loro schiena.

Posizione reclinata

Per vincere la resistenza aerodinamica alla velocità di 30 km/h un ciclista spende circa 80% della sua potenza e può arrivare fino al 94% alla velocità di 50 km/h [8, 13], risulta quindi evidente che per ottenere più energia cinetica dall'energia muscolare sia necessario ottimizzare l'aerodinamica. Questo concetto aveva preso piede già all'inizio del 1900 con l'invenzione delle prime biciclette reclinate e successivamente carenate; in pochi anni di sviluppo erano stati infranti moltissimi record prima detenuti da biciclette tradizionali, ma

questi non furono mai approvati dall'UCI (*Union Cycliste Internationale*), che per di più bandì le biciclette reclinate e le appendici aerodinamiche da qualsiasi competizione dal 1938. Da quegli anni e fino agli anni '70 non ci furono evoluzioni per questo tipo di veicoli, fino a quando non venne realizzata la carenatura completa per una bicicletta tradizionale e furono effettuati test di coast-down per dimostrare che la riduzione di resistenza aerodinamica era del 60% rispetto alla stessa bicicletta senza carenatura. I dati scientifici presentati nell'anno 1973 suscitarono interesse e Ronald Skarin, ciclista olimpico americano, stabilì 5 record mondiali l'anno successivo generando molto clamore. Questo spinse, nel 1975, ad organizzare una competizione internazionale senza le limitazioni imposte dall'UCI, alla quale parteciparono principalmente veicoli reclinati con soluzioni ingegneristiche molto diversificate (pedalata supina, prona, tandem, immissione della potenza con gambe e braccia contemporaneamente, etc.). Alcuni partecipanti di questa gara fondarono l'anno successivo la International Human Powered Vehicle Association (IHPVA), la quale si prefigge l'obiettivo di organizzare competizioni e registrare record nel campo dei veicoli a propulsione umana senza alcuna restrizione sul design. Da allora i record di velocità per questi veicoli sono aumentati costantemente. Dopo la breve introduzione storica, nello stesso articolo si paragonano i coefficienti di resistenza aerodinamica (*drag coefficient*) di diverse configurazioni: rispetto alla bicicletta classica con ciclista in posizione normale (coefficiente 1), il ciclista professionista in posizione aerodinamica ottiene un coefficiente di 0.88, il ciclista in posizione reclinata 0,77 e un mezzo a 3 ruote carenato e reclinato un coefficiente di 0.11 [8]. Valutando il dato più appropriato della stessa tabella, quindi l'area frontale effettiva (*effective frontal area*) (coefficiente di resistenza aerodinamica moltiplicato la proiezione dell'area frontale), si ottiene rispettivamente: 0,399, 0,316, 0,269 e 0,046 m². Chiarito il ruolo dell'aerodinamica si analizza il secondo aspetto maggiormente influente sulla prestazione, la resistenza al rotolamento. Per migliorare questo aspetto è sufficiente scegliere gli pneumatici più performanti sul mercato, analizzando i dati in maniera scientifica, e non ci sono particolari accortezze che l'atleta può avere, a parte la pressione di gonfiaggio indicata dal costruttore.

Per analizzare dati più attuali (2014) bisogna prendere in considerazione i risultati ottenuti da Marco Belloli et al. [13] presso la galleria del vento del Politecnico di Milano. La sperimentazione aerodinamica è stata effettuata sui due atleti italiani, Vittorio Podestà (categoria H3) e Alessandro Zanardi (categoria H5), con i rispettivi mezzi da competizione, posizionando gli atleti nelle due tipiche configurazioni di gara: fase propulsiva, caratterizzata dal movimento del corpo per immettere potenza, e fase aerodinamica, dove non si spinge sui pedali ma ci si preoccupa solo di posizionare il corpo in modo da diminuire la resistenza

aerodinamica. I dati della galleria del vento tengono conto del contributo aerodinamico delle ruote, perché queste sono messe in movimento dall'atleta e da rulli elettrici integrati nella pedana della galleria; questo permette ai ciclisti di pedalare come in una gara e rende i dati più attendibili, rispetto alla sola configurazione statica. I dati della galleria del vento sono stati confrontati con quelli ottenuti da sensori posizionati sulle biciclette durante un allenamento su circuito. Con un approccio energetico si riesce a risalire al $C_D A$ (area frontale effettiva) grazie alla scomposizione delle potenze in gioco durante la pedalata, invertendo la relazione di conservazione di energia. Da notare che il metodo sperimentale in pista è affetto da errore perché la potenza dovuta al cambio di altitudine non è precisa, essendo rilevata con il GPS, i segnali forniti dai sensori, soprattutto quello di potenza, sono affetti da rumore e difficilmente analizzabili senza approssimazioni o medie. I dati ottenuti nell'articolo sono riportati nella Tabella 1:

Tabella 1: $C_D A$ rilevati (m^2). Marco Belloli et al. [13].

[m^2]	Galleria		Pista	
Atleta	Propulsiva	Aerodinamica	Propulsiva	Aerodinamica
Podestà, H3	0,21	0,20	0,245	0,204
Zanardi, H5	0,22	0,13	0,202	0,139

I dati sono confrontati con la configurazione aerodinamica di un ciclista tradizionale di *Time Trial*, quindi altamente ottimizzato per una minima resistenza aerodinamica, e risultano essere dello stesso ordine di grandezza o inferiori. Il ciclista di TT mediamente ha un coefficiente $C_D A$ di $0,220 m^2$. I numeri portano a concludere che il $C_D A$ diminuisca quando l'atleta non pedalando assume una posizione aerodinamica, questo è più evidente per Zanardi, infatti si ha una riduzione del 40% in fase aerodinamica rispetto a quella propulsiva. I dati di galleria evidenziano che gli atleti della categoria H3 variano poco il coefficiente considerato tra le due fasi, questo è logicamente in accordo perché il corpo dell'atleta non cambia posizione, ma solo le braccia vengono spostate; i dati in pista sono in leggero disaccordo, mostrando un divario maggiore, ma bisogna ricordare le approssimazioni su questo metodo.

Nel progettare un mezzo destinato a velocità elevate bisogna prendere in considerazione, oltre all'aerodinamica frontale, il comportamento in condizioni di vento laterale. Gli studi di Mannion et al. [15] e di Fintelman et al., citati nell'articolo per confronto al ciclismo tradizionale, si prefiggono l'obiettivo di analizzare il comportamento aerodinamico di una

handcycle da competizione in due configurazioni differenti: versione da strada, quindi con le tre ruote raggiate e versione da cronometro, con le tre ruote a disco. È utile ricordare a questo punto che la resistenza al moto del ciclista si considera come forza contraria alla direzione del moto e non alla direzione del vento, come avviene solitamente per i profili alari; questo è rilevante in quanto un vento puramente laterale non compie lavoro resistente sul moto del ciclista. Le simulazioni effettuate da prima in galleria del vento su modello in scala per la validazione del modello CFD e successivamente con geometrie più accurate in ambiente CFD hanno interessato uno spettro tra -10° e $+20^\circ$ con salti di 5° di direzione del vento. La configurazione stradale presenta una forza aerodinamica resistente maggiore del 14% tra 0° e 15° , la quale decresce per angoli superiori, mentre la configurazione da cronometro aumenta la forza resistente solo del 3,3% tra 0° e 5° , con una successiva diminuzione fino a valori del 6% inferiori a 20° rispetto a 0° . Questo conferma il fatto che le ruote a disco e il casco aerodinamico sono utili per migliorare la prestazione anche in condizioni di vento laterale. La riduzione di resistenza, però, ha un aspetto di rischio intrinseco, le ruote a disco riescono ad accompagnare le linee di flusso in modo più ordinato generando forze laterali di grandi entità. Con vento a 20° la configurazione con ruote raggiate risente di una forza laterale 160% maggiore rispetto alla forza frontale, mentre la configurazione TT arriva fino al 560%. Queste forze elevate riportano l'attenzione sulla stabilità del mezzo; nell'ambito ciclistico tradizionale non si montano mai ruote a disco anteriormente, perché le grandi forze laterali genererebbero un momento di sterzata tale da rendere precaria la manovrabilità della bicicletta. Lo studio in questione ha analizzato la stabilità del mezzo calcolando i momenti generati dalle forze aerodinamiche in condizione di vento a 20° ed è risultato che il momento di imbardata è maggiore di quello di rollio attorno all'asse di possibile ribaltamento e che comunque questi momenti non sono significativamente grandi, questo è dovuto al fatto che la handcycle ha 3 ruote, angolo di sterzo relativamente basso (rispetto all'orizzontale) e il baricentro è molto basso; tutti questi fattori gli conferiscono una stabilità maggiore rispetto ad una bicicletta e quindi l'utilizzo di 3 ruote a disco potrebbe essere una soluzione valida per aumentare le prestazioni durante una competizione, anche in ambiente soggetto a vento. La scomposizione dei fattori concorrenti alle forze aerodinamiche ha permesso di stabilire dove si può migliorare per le future ottimizzazioni: sia per quanto riguarda la resistenza aerodinamica frontale, sia la forza laterale, l'handcycle (inteso come veicolo) contribuisce per la maggior percentuale, mentre il ciclista contribuisce tra il 5% e il 40%. Questi dati suggeriscono che la posizione di un atleta H3, quindi reclinata, è aerodinamicamente la miglior scelta per un veicolo a propulsione umana. Da tenere in considerazione che le simulazioni CFD sono state effettuate con un

modello statico, quindi sia ruote sia braccia ferme, mettendo in movimento queste parti si potrebbero ottenere numeri diversi.

Introduzione della WHPSC

La categoria dei veicoli a propulsione umana comprende una moltitudine di mezzi, però è chiaro dai risultati registrati nell'ultimo secolo che i veicoli reclinati e carenati sono i più efficienti e possono raggiungere le più alte velocità. Essendo questi veicoli stati banditi dalle competizioni UCI, sono nate associazioni HPV (*Human Powered Vehicle*) internazionali e nazionali per registrare i record nelle diverse categorie ed organizzare eventi. L'evento più carismatico è la *World Human Powered Speed Challenge* (Figura 8: foto di gruppo delle 18 squadre in gara nel 2019 Figura 8) svolta annualmente a Battle Mountain, Nevada sulla *State Route 305* (Figura 9), una strada statale caratterizzata da una pendenza media di -0.6% dove ne vengono utilizzati 8 km per accelerare i veicoli fino alla trappola di 200 m dentro la quale viene calcolata la velocità media. Il record *200 meter flying start speed trial* (velocità media nei 200 metri finali con partenza assistita) nella categoria *Men, Arms only, Single rider* è stato stabilito da Ken Talbot a 83.02 km/h con Arion4 e la squadra University of Liverpool Velocipede nel settembre del 2018 [9]. La IHPVA, *International human Powered Vehicle Association*, è nata con l'obiettivo di permettere ai veicoli reclinati e carenati di partecipare a competizioni riconosciute e veder registrare i record stabiliti, quindi, in contrapposizione alle limitanti regole dell'UCI, non ci sono vincoli di design. Ci sono comunque regole vigenti per la competizione WHPSC, le quali hanno il solo obiettivo della sicurezza dei partecipanti: l'ispezione tecnica di inizio evento verifica che il mezzo abbia un sistema di frenata adatto alla velocità in gioco, che la struttura non presenti pericoli, che l'atleta possa essere estratto dalla carena in tempi brevi, cioè che lo staff tecnico riesca ad accedere all'interno anche nell'eventualità che il ciclista non sia cosciente, che i sistemi elettronici siano completamente ridondati, che quindi non siano presenti singoli punti di vulnerabilità e che il ciclista abbia dei sistemi di ritenuta al telaio, per non subire danni nel caso di ribaltamento del mezzo. La prima edizione della competizione a Battle Mountain è stata nel 2000, quando si era identificata la strada con le condizioni migliori possibili: pendenza molto ridotta e sempre costante di -0,6%, altitudine di 1450 metri sopra il livello del mare, circa 11 km di rettilineo destinabili alla competizione e condizioni dell'asfalto ottime; come molte caratteristiche strade americane nel mezzo del deserto, si trovano anche ottime condizioni di sicurezza in caso di perdita di controllo del veicolo, le sponde ribassate sono costituite da terra ed erba secca. La quota di questo altipiano del Nevada permette di avere aria meno densa rispetto a quote più basse e il clima desertico con temperature medie intorno ai 25-35°C e umidità mediamente tra lo 0%

Capitolo 1: Stato dell'arte

e il 20%, permettono di avere aria con le seguenti caratteristiche (rilevate durante una delle migliori prestazioni durante la competizione):

- Densità: $1,01722 \text{ kg/m}^3$
- Viscosità dinamica: $1,83692 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (poiseuille)
- Pressione: $85598,8 \text{ Pa}$

Le giornate di gara sono 6, i primi giorni si effettuano le qualifiche su una distanza di 4 km dove bisogna dimostrare di poter raggiungere una velocità minima stabilita, una partenza



Figura 8: foto di gruppo delle 18 squadre in gara nel 2019, 20° anniversario.



Figura 9: SR305, ultimo tratto del tracciato di gara.

accettabile e un arrivo in sicurezza, questo permette ai veicoli di accedere alla fase serale sul tracciato lungo (8 km) e cominciare i tentativi di record. Correre la sera ha dei vantaggi rispetto la mattina: le condizioni climatiche sono migliori in termini di temperatura dell'aria, umidità ridotta, temperatura alta dell'asfalto e alte possibilità di incontrare vento con velocità bassa, in quanto alle ore del tramonto avviene un'inversione della direzione del vento che può essere quasi nullo in una finestra di 10 minuti circa, per questo motivo è molto importante stabilire una strategia di scelta del momento della partenza, basata sull'esperienza e sulle previsioni del vento. Ogni tentativo di record avviene con le fasi rappresentate nella Figura 10. La partenza è assistita perché il veicolo a 2 ruote non ha equilibrio da fermo e perché il ciclista non ha modo di interagire con l'esterno per mantenere la bicicletta verticale, per i veicoli a 3 ruote è comunque permesso assistere il veicolo in partenza, sempre rispettando la distanza massima permessa da regolamento per toccare la carena, 15 metri, utile per aiutare il ciclista a superare la difficoltosa partenza dovuta a rapporti di trasmissione molto lunghi. Per effettuare una partenza senza cadute è opportuno che il lanciatore (persona che tocca la carena) si alleni nel gestire l'equilibrio e la spinta per fornire sia velocità iniziale sufficiente e sia equilibrio a basse velocità, nel caso che qualcosa vada storto sono presenti altre due persone di supporto pronte ad intervenire. La fase centrale è caratterizzata dalla percorrenza degli 8 km di tracciato dove è opportuno mantenere una potenza erogata monotona crescente, con il picco massimale verso gli ultimi km, solitamente il tracciato è percorso in circa 5/6 minuti dai veicoli più veloci, quindi la prestazione richiesta è simile ad uno sprint lungo, piuttosto che alla resistenza. Il rischio maggiore durante questa fase è il vento laterale, che può generare coppie sullo sterzo e destabilizzare il mezzo, mentre risulta essere sempre rovinosa la caduta dovuta a foratura di uno pneumatico. Secondo regolamento per questioni di sicurezza ogni mezzo deve essere seguito da un'autovettura nella quale siano presenti i membri della squadra per dare assistenza in caso di emergenza o caduta e un organizzatore per gestire le comunicazioni con la partenza e l'arrivo. Dopo i 200 metri di rilevazione della velocità e l'arrivo, cominciano i 1,5 km di strada leggermente in salita dove bisogna frenare il veicolo, azione che deve cominciare da subito e deve essere dosata adeguatamente in quanto l'energia cinetica è considerevole e si rischia di arrivare nella zona di arrivo con velocità troppo elevata se non si freno sufficientemente oppure si rischia di danneggiare l'impianto frenante se le temperature aumentano eccessivamente con frenate eccessive. La procedura di assistenza all'arrivo è la più delicata, in quando bisogna sincronizzare 2, 3 o 4 persone con il ciclista e bisogna avere la sensibilità di arrivare con una velocità sufficiente per avere ancora equilibrio, ma abbastanza bassa da permettere alle persone a piedi di toccare il veicolo in

sicurezza; il tutto è reso ancora più difficoltoso dal fatto che il ciclista percepisce l'ambiente esterno solamente attraverso due telecamere poste sul muso della carena. Non è raro



Figura 10: partenza assistita (alto a sinistra), arrivo assistito (alto a destra) e passaggio all'arrivo.

assistere ad arrivi pericolosi o di veicoli che perdono il controllo e strisciano sull'asfalto. I veicoli a tre ruote sono soggetti a meno rischio di stabilità, ma un'eventuale foratura genera sempre un evento con pericolo di ribaltamento e il vento può intervenire con forze laterali sulla carena che inducono coppie di sterzata.

Presentazione del Team Policumbent

Il Team Policumbent è una squadra di studenti del Politecnico di Torino impegnati nella progettazione, realizzazione e guida di veicoli a propulsione umana carenati e reclinati. Inizialmente si era partito da mezzi di trasporto per uso urbano e con l'idea di promuovere una mobilità più ecosostenibile, ma dal 2014 l'obiettivo si è spostato su competizioni da record, come la WHPSC a Battle Mountain, alla quale la squadra ha preso parte ogni anno dopo la prima presenta nel 2015. Con l'aumentare dell'esperienza in questo campo, il fascino tra gli studenti dell'università e la conoscenza sul territorio nazionale, il gruppo, guidato dalla professoressa Cristiana Delprete e dall'ingegnere Paolo Baldissera, si è espanso ambendo a

traguardi sempre più alti: record nazionale maschile, record europeo maschile, record mondiale maschile, record mondiale femminile e record mondiale handcycle.

Il progetto handcycle è cominciato dall'incontro del Team Policumbent con la multinazionale Eaton, impegnata già nell'organizzazione del Giro d'Italia Handbike. Eaton ha deciso di sponsorizzare il progetto in vista di uno sviluppo triennale con l'obiettivo di partecipare alla WHPSC del 2022 con una handcycle carenata.

Conclusione e oggetto della tesi

La ricerca nell'ambito delle persone con disabilità si focalizza molto sull'aspetto medico e riabilitativo e poco sull'aspetto sportivo. Questo è dimostrato dal fatto che i pochi studi trovati in letteratura sull'argomento handcycle sportiva di alto livello si riferiscono agli ultimi anni del 1900 e i pochi articoli trovati tra il 2015 e il 2020 sono spesso indicati come studi iniziali, spesso eseguiti su un gruppo di studio composto da persone non disabili. Il potersi interfacciare direttamente con atleti di alto livello, vincitori di medaglie alle Paraolimpiadi o a competizioni mondiali o nazionali, è molto utile per avere un quadro più preciso sulle ultime soluzioni ingegneristiche direttamente adottate dagli esperti e sulle percezioni e necessità individuali. Risulta chiaro anche dagli articoli scientifici che il mondo dell'handcycling non è standardizzato e che quindi è necessaria una progettazione specifica per ogni atleta; questa non standardizzazione deriva dalla natura non standardizzata delle lesioni che portano all'utilizzo di tali mezzi. I dati e le indicazioni raccolte nel capitolo 1 sono utili per impostare il progetto nella direzione meglio descritta dagli studi preliminari finora effettuati nell'ambito dell'handcycling, però risulta essere necessario eseguire ulteriori prove di laboratorio con ergometro, per identificare le soluzioni più adatte ai candidati piloti della nostra squadra. L'oggetto della tesi è la progettazione del veicolo a propulsione umana basato su handcycle, carenato e reclinato con l'obiettivo della competizione WHPSC 2022 e la pianificazione delle attività fino a settembre del 2022. La prima parte del Capitolo 2 tratterà della progettazione aerodinamica del mezzo: questa attività si basa sul *know how* della squadra, costruito gradualmente con la progettazione dei precedenti 3 veicoli costruiti a partire dal 2013. Per questo argomento non si specifica quali sono le metodologie e le basi teoriche dettagliate alla base delle simulazioni CFD, in quanto il gruppo Aerodinamica della squadra se ne occupa specificatamente; le modalità e le basi teoriche del metodo sono già state oggetto di tesi da parte di altri membri della squadra o ex studenti. Abbinata alla simulazione CFD vi è la simulazione della prestazione sportiva specifica per la competizione, questa si basa su un metodo energetico calibrato sulle condizioni ambientali e sportive riscontrate durante le precedenti competizioni, è utile correlare i risultati aerodinamici ai risultati sportivi, quindi la

velocità massima, in modo da sperimentare anche diverse configurazioni di potenza in base ai candidati piloti. Di questi argomenti si occupa nel dettaglio il reparto Analisi dati della squadra. A valle di queste due analisi si stabilisce la configurazione migliore tra *Arm Trunk Power* (pedalata a braccia e busto) e *Arm Power* (pedalata reclinata a braccia). Prima di progettare l'interno del mezzo e stabilire i parametri di interfaccia uomo-macchina, bisogna stabilire i parametri geometrici dello sterzo, passo e carreggiata. Questo viene effettuato con due analisi di stabilità: la prima più importante studia la dinamica del veicolo per definire i parametri di inclinazione dell'asse di sterzo e l'avanzamento in modo da avere un momento stabilizzante sullo sterzo a tutte le velocità e per tutti gli angoli di sterzo plausibili, la seconda indaga il possibile ribaltamento del mezzo in base a velocità e raggio di curva minimo. Essendo i componenti commerciali per handcycle studiati per raggiungere velocità dell'ordine massimo di 60 km/h, bisogna progettare la trasmissione in modo che si possano raggiungere le velocità da record con una cadenza ottimale e garantire comunque una partenza agevole con i rapporti di trasmissione commerciali, questo problema viene risolto con l'introduzione di un rinvio con funzione di moltiplicare. Come più volte riportato, la progettazione non può prescindere dalle necessità specifiche di ogni atleta candidato a diventare pilota, quindi un incontro e una raccolta dati è necessaria. A valle di ciò si può progettare l'interno della handcycle definendo i parametri ergonomici che influenzano la produzione di potenza, la stabilità e il confort cercando di stare negli ingombri limitati dalla carena. Una seconda fase aerodinamica è necessaria, in quanto la sezione dedicata ha accesso a software di ottimizzazione CFD automatici, ma questi devono lavorare nell'introno degli ingombri finali, quindi una prima progettazione interna è necessaria; questo passaggio è una novità rispetto agli anni precedenti e ci si aspetta di ottenere una forma aerodinamicamente migliore rispetto a quelle disegnate su CAD basandosi sull'esperienza e sull'iterazione manuale CFD-CAD. La fase finale della progettazione consta nelle scelte costruttive e nella realizzazione dei disegni esecutivi del telaio e dei componenti meccanici per definire totalmente il mezzo. Le tecniche costruttive coinvolgono la lavorazione di macchina di metalli, la realizzazione di componenti compositi in fibra di carbonio con la tecnica del sacco del vuoto e stampo, componenti generati con manifattura additiva ed eventualmente rinforzati con fibre lunghe, etc. la progettazione elettronica è un processo parallelo fino al momento dell'implementazione sul veicolo, in quanto i componenti utilizzati sono standard e già definiti in base ad affidabilità e qualità sui precedenti prototipi. Questo comprende il sistema di visione tramite camere e schermi, sensoristica per acquisizione dei dati e sistema di comunicazione.

Capitolo 2: Materiali e metodi

L'autore di questo elaborato scrive in qualità di *Project Manager* della sezione Handcycle del Team Policumbent, quindi parte del lavoro presentato deriva da ricerca ed esperienza personale e parte dalla gestione delle sezioni della squadra dedicate ad aspetti specifici come aerodinamica, progettazione meccanica, analisi FEM, gestione logistica e budget, analisi dati ed elettronica.

Impostazione del progetto

In Figura 11 è presente il diagramma temporale del progetto con l'intento di riassumere l'impostazione metodologica che guida il lavoro di progettazione a partire dall'approccio con gli atleti fino alla competizione. Il primo blocco si riferisce all'aerodinamica e alla simulazione di una ipotetica prestazione in condizioni di gara; questo approccio è considerato atipico, perché la norma vuole che la progettazione di un mezzo parta dall'interno, quindi telaio, geometria, meccanica per poi progettare il guscio esterno. Per il progetto in questione, così come anche per tutti i precedenti progetti della squadra, è fondamentale partire invece dalla forma esterna, fare delle ipotesi sulla competitività del mezzo e poi focalizzarsi sull'interno del veicolo. Questa scelta, considerata errata da molti, ha un ragionamento logico alla base: la competizione si basa su veicoli a propulsione umana il cui fine è il raggiungimento della velocità massima negli ultimi 200 metri di un tracciato lungo circa 8 km (5 miglia), la potenza disponibile all'atleta è limitata e difficilmente aumentabile, la percentuale di potenza spesa per vincere la resistenza aerodinamica a velocità tipica da competizione è del 70% circa (su Taurus con Andrea Gallo alla velocità di 136 km/h la resistenza aerodinamica dissipa il 70,56% della potenza sviluppata); questa percentuale giustifica il perché è necessario progettare a partire dall'aerodinamica, non si possono fare compromessi che influiscano negativamente questo aspetto, anzi, bisogna cercare a posteriori di realizzare un mezzo nel quale si possa pedalare in sicurezza ed in modo efficiente. Gli input per il disegno delle prime carene, in fase di studio di fattibilità, sono gli ingombri di pedalata, carreggiata e passo del veicolo misurati a partire dalle esigenze degli atleti interessati a partecipare come piloti per la squadra. È importante non soffermarsi solo sull'aerodinamica, ma effettuare anche una simulazione di performance sportiva, perché la potenza espressa dalle diverse categorie di atleti prese in considerazione varia e bisogna cercare di tradurre la potenza e l'aerodinamica in risultato finale, quindi velocità. Una volta presa la decisione sulla configurazione da adottare per la competizione, l'interesse si sposta verso l'interno della carena, dove la progettazione meccanica e strutturale deve trovare la soluzione più adatta alla pedalata dal punto di vista degli ingombri, posizione dell'atleta,

Capitolo 2: Materiali e metodi

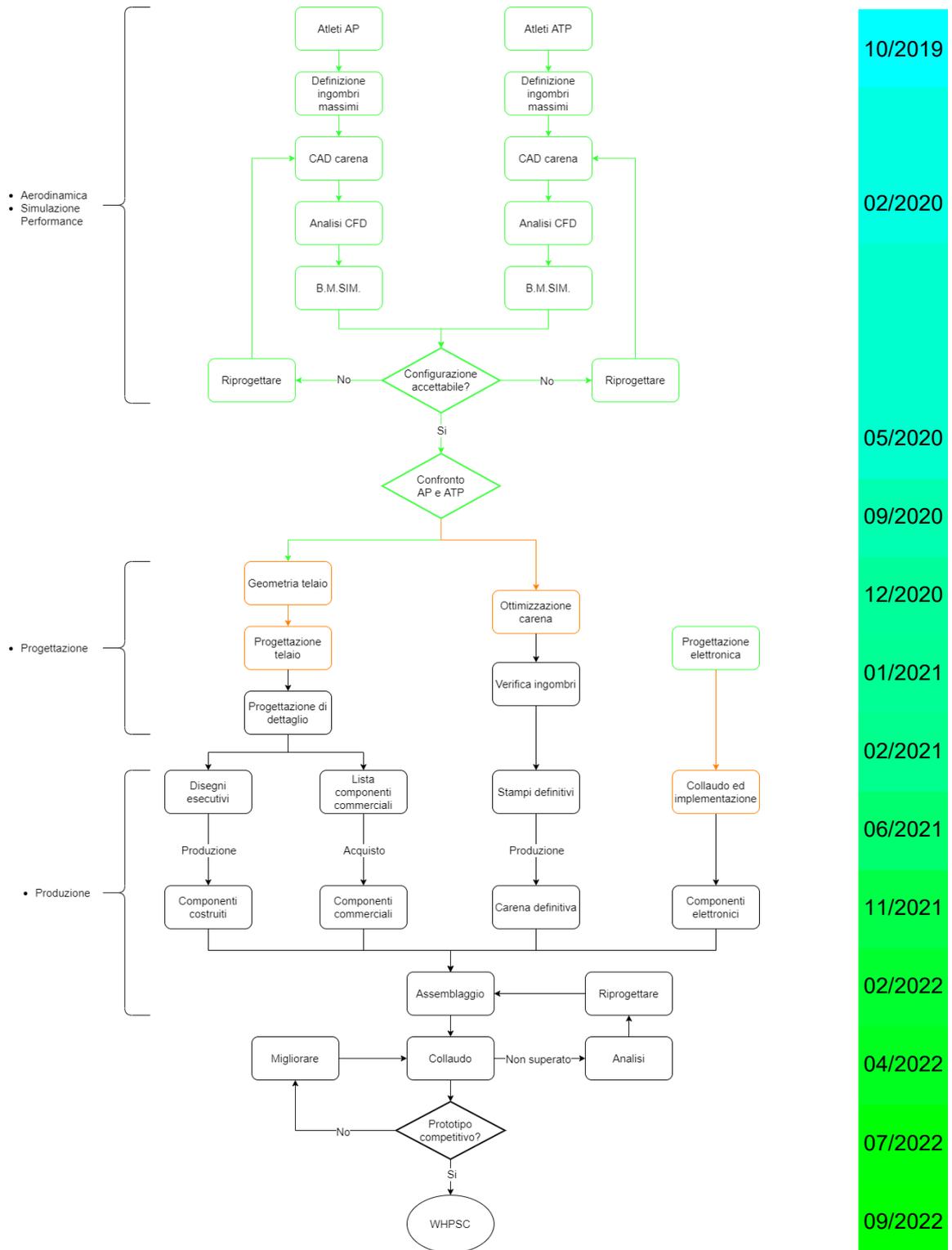


Figura 11: Flowchart del progetto; verde=completato, arancione=in corso, nero=da fare.

confort, stabilità del mezzo e percezione dell'ambiente circostante e sicurezza per la prevenzione di infortuni e incidenti. La progettazione interna parte dalla definizione della geometria del telaio, la quale è descritta dai seguenti parametri molto importanti: angolo dell'asse di sterzo, avancorsa (*trail*), avanzamento (*rake*), passo e carreggiata del mezzo, posizione verticale e orizzontale del movimento centrale, lunghezza delle pedivelle, larghezza delle impugnature, angolo dello schienale e posizione relativa tra spalle del ciclista e movimento centrale. I parametri relativi alla posizione di pedalata sono da definire secondo le necessità specifiche dell'atleta, filtrate con i dati sperimentali ricavati dagli studi scientifici analizzati nel primo capitolo. I parametri ingegneristici sono da determinare con due analisi di stabilità, una per stabilire l'inclinazione dell'asse di sterzo e l'avancorsa e una per il passo e la carreggiata.

Le funzioni richieste al telaio sono di supportare il peso dell'atleta, assicurare una sufficiente rigidità per non deformare la struttura ed inficiare la prestazione, resistere alle forze esercitate durante la pedalata, vincolare stabilmente la carena in caso di ribaltamento, ma non trasmettere vibrazioni tra telaio e carena, assicurare l'incolumità dell'atleta in caso di incidente e provvedere a fissare gli accessori necessari alla prestazione. Il processo parte con l'individuazione dei punti fondamentali di supporto, quindi serie sterzo, asse ruote posteriori e movimento centrale, successivamente si studiano il supporto per ciclista, l'ancoraggio carena e il supporto per gli accessori. Si possono esplorare diverse soluzioni come, ad esempio, una struttura composta dalla metà inferiore di carena portante e un telaio necessario per la forcella, una struttura tubolare in composito in fibra di carbonio con carena non portante oppure un telaio composto da due pannelli sandwich in fibra di carbonio e schiuma assemblati parallelamente; queste soluzioni sono già state realizzate dalla squadra sui precedenti prototipi e si conoscono vantaggi e svantaggi. Bisogna prestare particolare attenzione alla struttura della forcella in quanto essa ospita i componenti principali: sistema di propulsione, pedivelle, rinvio meccanico a scopo di moltiplicazione di rapporti, sistema di cambio marcia, sistema di frenata e sistema elettronico a supporto delle attività di visione, sensoristica e cambio marcia.

La progettazione di dettaglio è un passaggio ulteriore dove si ottimizzano le scelte progettuali concentrandosi sulla resistenza delle strutture con analisi FEM, sulla modalità di produzione efficace, sull'implementazione dell'elettronica e sulla disposizione dei singoli elementi dentro la handcycle. La fine di questo processo coincide con la produzione dei disegni esecutivi e la lista dei componenti commerciali necessari. Di pari passo viene finalizzata l'aerodinamica della carena, eseguendo un'ottimizzazione aerodinamica in ambito CFD, impostando come vincoli

gli ingombri effettivi. Questo processo porta all'ottenimento della versione ottimizzata della carena, la quale è resa definitiva dopo una verifica di ingombri su un banco prova costituito da un numero sufficiente di sezioni trasversali della carena, realizzate sagomando opportunamente pannelli di schiuma. Dopo la verifica si possono commissionare gli stampi della carena, la metodologia più comune è la creazione di un positivo in schiuma di PVC con fresatrice CNC, dal quale si realizza per laminazione di strati di fibra di carbonio e fibra di vetro con rinforzi uno stampo negativo definitivo.

Per poter procedere con l'assemblaggio la squadra deve passare dai componenti progettati a componenti reali, questo avviene tramite acquisto o produzione. Nel caso di componenti commerciali o di materie prime si ricorre al budget stanziato per sponsorizzazione da enti terzi o da parte dell'Ateneo per acquistare direttamente i componenti dai fornitori. I membri della squadra possono quindi procedere alla trasformazione delle materie prime in prodotti finiti con gli utensili e i macchinari a disposizione nei laboratori. Quando tale procedura non è perseguibile, si può richiedere che la produzione sia eseguita presso fornitori esterni, con la partecipazione o meno degli studenti; un esempio è la realizzazione di strutture in materiale composito. La squadra è parte del dipartimento Dimeas, il quale è gestito dal Politecnico di Torino, essendo quest'ultimo un ente statale, le procedure che coinvolgono fondi sono regolamentate dalla procedura d'ordine: il numero di preventivi da confrontare per ogni spesa è proporzionale all'importo secondo una classificazione a scaglioni, oltre un certo valore, però è d'obbligo instaurare un appalto pubblico.

Il processo di produzione più interessante al quale gli studenti possono partecipare quasi sempre è la realizzazione dei componenti in materiale composito. È sempre eseguito presso fornitori esterni e deve seguire regole di sicurezza sul lavoro molto severe, in quanto si trattano materiali pericolosi per la salute e per l'ambiente. La fase di assemblaggio è molto delicata, in quanto la stabilità e il funzionamento del veicolo a propulsione umana si basano su simmetrie, equilibri ed allineamenti precisi, soprattutto se richiesta una prestazione ad estreme velocità. Per assicurare la precisione necessaria si realizza una dima in profilati di alluminio accuratamente dimensionata e realizzata. La dima deve prevedere punti di controllo dove ancorare i principali componenti e verificare che il telaio sia allineato correttamente; per assicurare il movimento di componenti non allineati è opportuno lasciare alcuni gradi di libertà, quindi eseguire incollaggi e fissaggi solo quando il tutto risulta essere come progettato.

Il collaudo è il momento critico di controllo del lavoro svolto. Bisogna procedere con cautela a piccoli passi di incremento di velocità e di tempo massimo di percorrenza continua, perché

è preferibile scoprire i problemi quando si può intervenire senza generare ulteriori danni; è importante avere un protocollo di gestione dei test in pista, in quanto è coinvolta la sicurezza delle persone. Strutturare i test e il *troubleshooting* può far risparmiare tempo e risorse. I test in pista devono avere obiettivi ben precisi e stabiliti a priori, assegnando ruoli al personale e dettando una tabella di marcia, altresì importante è presentare un resoconto delle attività per tenere traccia dei miglioramenti e poter continuare a pianificare i passi successivi. Spesso in pista si verificano dei guasti, questi devono essere gestiti con l'intento di risolvere il problema il prima possibile per poter continuare con il test, ma sempre tenendo a mente la sicurezza e le risorse a disposizione, altrimenti si deve decidere di interrompere la giornata di lavoro ed effettuare le riparazioni in laboratorio. Se i test vengono superati bisogna sempre confrontarsi con gli obiettivi preposti valutando dati oggettivi e misurabili e prendere la decisione di effettuare migliorie sul prototipo oppure definire il progetto competitivo e funzionante. In questa fase finale di testing si possono produrre i componenti di riserva necessari durante la vita operativa del veicolo; la scelta dei componenti che necessitano parti di ricambio deve essere basata sull'esperienza e sull'osservazione del comportamento in pista del prototipo, questo per produrre il necessario, senza sprechi.

Una volta che il ciclo di collaudi, miglioramenti e verifiche è concluso, quindi gli obiettivi del mezzo sono stati raggiunti si è pronti per la partecipazione della competizione. Durante questa fase l'organizzazione delle persone è cruciale. Il regolamento e i protocolli imposti dagli organizzatori dell'evento assicurano che il tutto si svolga nel rispetto delle norme di sicurezza e di *fair play* tra squadre, ma questo non è sufficiente per raggiungere l'obiettivo. Una squadra strutturata, dove ognuno conosce le proprie responsabilità, mansioni e ha le capacità di agire in autonomia o in gruppo in base alle situazioni, ha molte più probabilità di raggiungere il successo. I fattori atmosferici, come temperatura, umidità e vento, giocano un ruolo cruciale sul risultato finale e, data la loro aleatorietà, non ci si può permettere di perdere nessuna occasione; portare alla competizione il prototipo funzionante e pronto da subito al meglio è un fattore strategicamente importante.

Fase preliminare

Dall'incontro tra il *Team Policumbent* e la multinazionale Eaton è emersa la volontà condivisa di progettare e realizzare un veicolo a propulsione umana carenato basato sul concetto di handcycle per atleti con disabilità. Vista la pluriennale esperienza della squadra all'evento WHPSC, è risultato naturale progettare un veicolo che potesse gareggiare nella categoria *Men, Arms only, Single rider* di questo evento. Durante l'edizione del 2018 del WHPSC aveva suscitato grande clamore il record di 83,02 km/h di Ken Talbot, perché superò di circa 10 km/h

il precedente record di Greg Westlake, stabilito nel 2011 a 73,51 km/h. Per cercare di definire le linee guida generali della progettazione risulta utile indagare le scelte progettuali dei nostri competitor, nel caso particolare, il prototipo Arion4 della University of Liverpool. L'articolo pubblicato sulla rivista *Human Power* [1] scritto da Head e Fernandez, riporta le principali caratteristiche del prototipo Arion4: 36,7 kg di massa, 2,5 m di lunghezza, 0,8 m di altezza e 0,6 m di larghezza, ruota anteriore ETRTO 584 e 2 ruote posteriori ETRTO 406 con 8° di camber e cambio elettronico Shimano Di2. L'articolo si incentra principalmente sulla progettazione e costruzione del supporto centrale in titanio (CTS) (Figura 12) realizzato tramite manifattura additiva, il quale risulta essere il componente strutturale principale, in quanto è l'interfaccia tra la struttura resistente e la forcella. Le restanti parti del telaio sono realizzate con pannelli sandwich in materiale composito in fibra di carbonio e cuore in schiuma di PVC. Il complesso corpo centrale svolge la delicata funzione di permettere alla forcella di ruotare grazie alla serie sterzo collegata ad esso mentre vengono trasmessi gli ingenti carichi del peso attraverso i cuscinetti dello sterzo e le forze scaricate sulle pedivelle tramite il movimento centrale. Il fatto che il componente centrale sia molto complesso permette di progettare la restante parte dei componenti in modo molto semplice, vengono utilizzati semplicemente dei pannelli sandwich opportunamente sagomati per realizzare tutte le interfacce: tra il CTS e la ruota anteriore sono presenti solo due strisce di pannello sandwich, tra il supporto per il movimento centrale, il rinvio della trasmissione e il CTS sono presenti due pannelli sandwich a forma di triangolo e

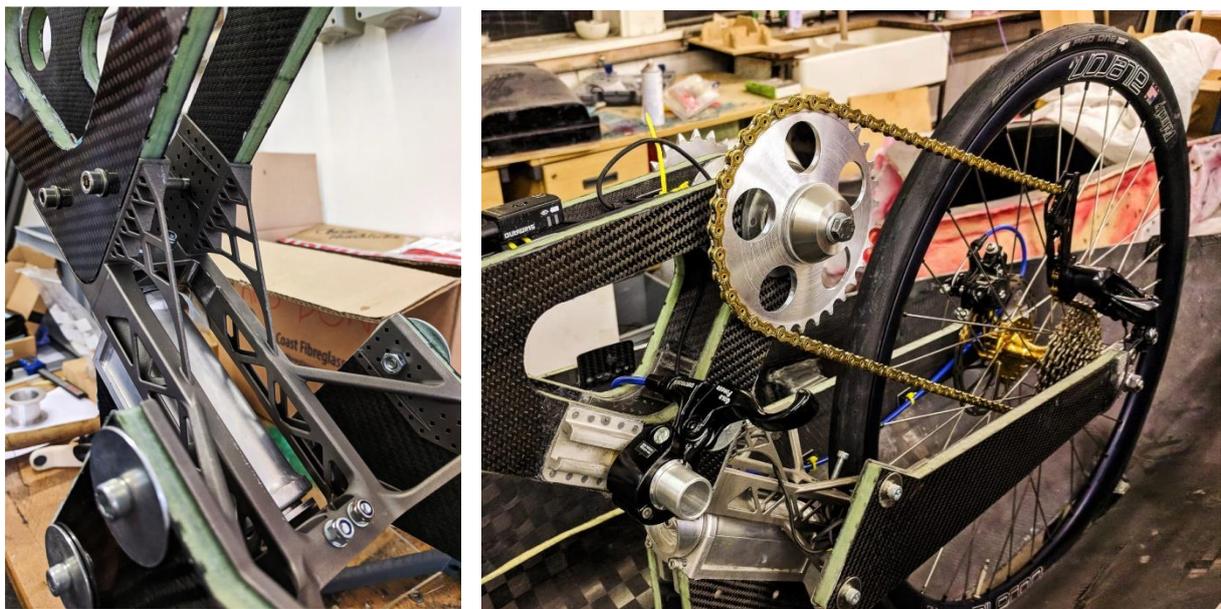


Figura 12: CTS, supporto centrale in titanio, incollaggi e collegamenti con i pannelli sandwich. Head et al. [1], ulvteam.co.uk

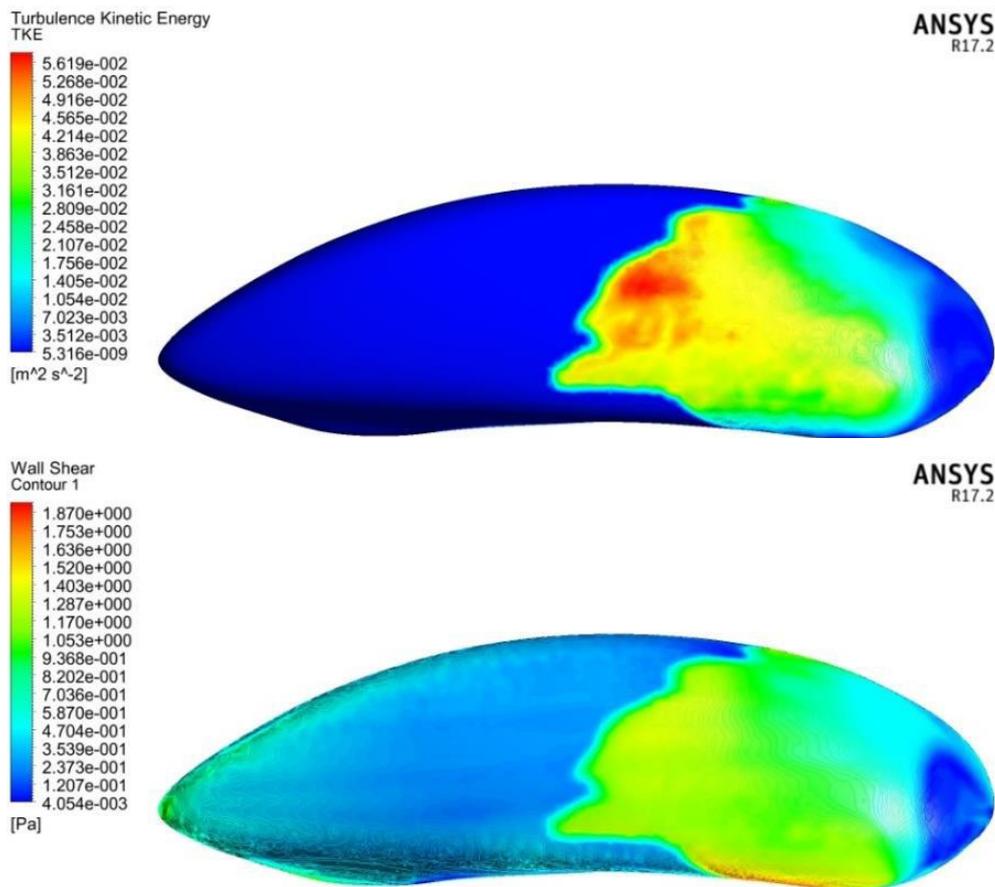


Figura 13: energia cinetica turbolenta e sollecitazione di taglio a parete del prototipo Arion4. Head et al. [1]

per vincolare la serie sterzo alla carena portante sono stati utilizzati nuovamente due pannelli sandwich incollati. La seconda parte dell'articolo tratta dell'aerodinamica fornendo il risultato di una simulazione CFD sotto forma di grafico plottando l'energia cinetica turbolenta e la sollecitazione di taglio a parete (Figura 13). Si nota dai grafici come la zona di transizione tra laminare e turbolento sia relativamente avanzata rispetto alla coda della carena, l'ideale sarebbe avere la minor percentuale possibile di zona turbolenta, questo porterebbe la resistenza aerodinamica ad essere inferiore. In fase di analisi aerodinamica, questi grafici ci permettono di confrontare le nostre carene con la carena di Arion4. Si nota come la zona bassa centrale subisca la transizione prima rispetto alla parte superiore, questo suggerisce che la zona più critica aerodinamicamente sia quella posta anteriormente ai gomiti, perché il movimento delle braccia durante la pedalata genera un ingombro che costringe ad allargare

la carena nella parte bassa. I modelli di transizione dello strato limite sui quali si basano le analisi CFD sono molto complessi e sensibili ai parametri forniti dall'utente, non essendo specificato nell'articolo quali siano i modelli e i parametri e potendo questi differire tra le analisi delle due squadre, ogni confronto tra risultati di analisi CFD deve essere considerato solo come qualitativo.

Scelta delle ruote

Il parametro più immediato da stabilire è il diametro delle ruote. Le considerazioni che ci porteranno alla scelta derivano dall'esperienza pluriennale della squadra nella costruzione di biciclette reclinate e carenate. Nel corso degli anni per i prototipi precedenti si sono utilizzate principalmente due categorie diverse di ruote: ruote con ETRTO 406 e 622. Questa limitata scelta risponde alla grande varietà di pneumatici disponibili in commercio per queste due dimensioni, quindi vengono scartate le categorie di coperture di nicchia, per le quali sono presenti pneumatici non performanti. Tra gli appassionati di ciclismo, negozi specializzati e gruppi di ricerca si possono trovare dati tecnici specifici sulla resistenza al rotolamento di varie scelte, ma è molto difficile trovare dei dati a velocità tipiche dei prototipi in questione, questo ha spinto la squadra ad investire tempo e risorse in un banco prova di pneumatici capace di raggiungere velocità dell'ordine di 150 km/h. La progettazione, costruzione, messa a punto e prove effettive hanno richiesto anni di tempo, che hanno portato a creare un database sufficientemente ampio per permettere la scelta sicura dello pneumatico più efficiente. Il banco prova pneumatici (Figura 14) è costituito da un rullo di legno del diametro di 600 mm, messo in movimento da un motore elettrico controllato da un computer, la ruota montata sul banco può essere di diametro variabile, fino al massimo di ETRTO 622, l'operatore può modificare il carico subito dalla ruota aggiungendo o togliendo pesi calibrati, nel caso specifico delle prove per il prototipo Taurus sono stati utilizzati 40 kg. I dati rilevati sono la velocità, il numero di giri, i valori di un estensimetro posto su una travetta calibrata, che subisce flessione in funzione della resistenza al rotolamento della ruota sul rullo. Essendo la travetta calibrata viene convertita la misura di deformazione in flessione e successivamente in forza generata dalla ruota al suo centro, questo poi viene riportato in forza al contatto tra pneumatico e rullo. Il grafico che si ottiene da questa misurazione mostra la potenza consumata dall'attrito della ruota in funzione della velocità. La componente di resistenza aerodinamica viene sottratta dalla potenza consumata, perché in una fase preliminare questa componente è calcolata facendo ruotare il tutto senza il contatto con il rullo. Tra le categorie ETRTO 406 e 622, la necessità di avere le migliori condizioni aerodinamiche, che si traducono direttamente in sezione frontale minima e superficie bagnata minime, indirizzano la scelta a ricadere sulle

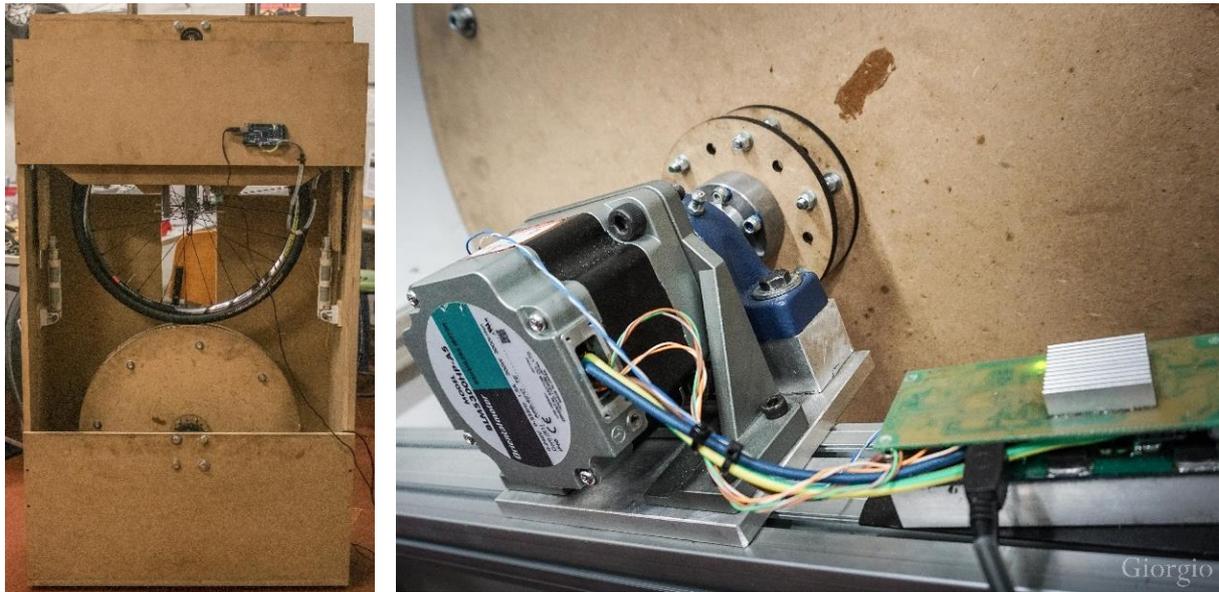


Figura 14: banco prova rotolamento a sinistra e motore elettrico con controllore a destra.

ruote ETRTO 406. Il primo prototipo a partecipare alla WHPSC nel 2014 Pulsar montava una ruota anteriore ETRTO 406 commerciale e una posteriore ETRTO 622. Dopo oltre tre anni di progettazione e miglioramenti e la partecipazione a due competizioni a Battle Mountain, si è concluso che le ruote commerciali, di qualsiasi dimensione, non rispettano i requisiti di circolarità e di concentricità che generano effetti indesiderati man mano che le velocità aumentano. Questi due difetti non si verificano per un uso ciclistico tradizionale, ma a velocità da record inducono su tutta la struttura della bicicletta vibrazioni non accettabili. Le vibrazioni forti producono due effetti deleteri per una prestazione ottimale ad alte velocità: primo una difficoltà di manovrabilità (con conseguente riduzione della sicurezza percepita e quindi della potenza erogata dall'atleta) e secondo un disturbo dello strato limite laminare, in quanto la vibrazione delle ruote viene trasferita in parte alla carena. Un terzo effetto può essere individuato: le vibrazioni si trasformano in carichi verticali variabili con il tempo ciclicamente a grandi frequenze, questo influenza gli pneumatici e genera usura precoce, aumento della temperatura e perdite dovute a deformazioni ripetute. La squadra è stata costretta per questi motivi a progettare e produrre internamente ruote ETRTO 406 imponendo requisiti di circolarità e concentricità più stringenti rispetto alla produzione destinata al commercio. Rispetto al riferimento del mozzo centrale della ruota, posizionato nello stampo con interferenza H7 e tolleranza +0 e +0,030 mm, la parete di riscontro del cerchio (di diametro $416 \pm 0,050$ mm) deve avere una tolleranza di concentricità di 0,05 mm; è richiesto che il diametro esterno dello stampo inferiore abbia un diametro di 480 mm con tollerante G7,



Figura 15: stampo in alluminio per ruota ETRTO 405, schiuma di PVC e tessuti di fibra di carbonio.

-0,083 e -0,020 mm, in modo che esso si interfacci con precisione con la parte superiore dello stampo, alla quale è assegnata la tolleranza G7, +0,020 e +0,083 mm, garantendo la concentricità tra le due metà di stampo, visto che è nuovamente richiesta la concentricità di 0,05 mm rispetto alla sede del mozzo. Allo stampo superiore sono assegnate tolleranze molto strette sui diametri di riscontro con lo stampo inferiore e in più si riporta una tolleranza E8 e F7 sui diametri 42 e 80 mm, rispettivamente, relativi alla sede dal mozzo ruota. Per il prototipo Taurus, quindi, sono state prodotte ruote a disco, le quali non generavano vibrazioni a velocità dell'ordini di 150 km/h. la tecnica utilizzata consiste nell'utilizzo di un cerchio disponibile in commercio e un mozzo progettato e realizzato appositamente per la ruota; la parte centrale è realizzata con la struttura a pannello sandwich con strati di composito in fibra di carbonio e schiuma di PVC. Nella Figura 15 è presente lo stampo in alluminio, necessario per assicurare i requisiti di circolarità e concentricità della ruota, la schiuma di PVC opportunamente lavorata con fresatrice CNC e gli strati di tessuto di fibra di carbonio. Il processo di consolidamento della ruota richiede l'applicazione di una temperatura di 80°C per la polimerizzazione della resina epossidica e l'applicazione della pressione per compattare gli strati generata da otto viti serrate lungo tutta la circonferenza dello stampo.

Aerodinamica preliminare

Secondo le regole stabilite per la competizione, la categoria *Arms Only* comprende sia la configurazione reclinata delle categorie UCI H1, H2, H3 e H4 sia la configurazione ATP (braccia e tronco) della categoria UCI H5. Inoltre, l'atleta non deve necessariamente avere disabilità (a differenza delle regole UCI), ma è richiesto che la potenza sia espressa solo attraverso le braccia, le mani ed eventualmente il tronco, specificando che la parte inferiore del corpo non deve contribuire [10]. Questo accorpamento di configurazioni pone il progettista ad effettuare il confronto tra un mezzo carenato basato su una handcycle reclinata, AP (solo braccia),

categorie UCI H1 – H4, e un veicolo carenato basato sulla configurazione ATP. Ogni configurazione ha vantaggi e svantaggi. Un atleta AP presenta un'area frontale inferiore, la quale non varia sostanzialmente durante la pedalata, il suo mezzo ha un baricentro inferiore e durante la pedalata vi è la sola massa delle braccia in movimento, ma sviluppa una potenza minore. L'atleta ATP sviluppa una potenza maggiore, grazie ai muscoli del tronco, ma presenta un baricentro più alto, la sezione frontale è maggiore e varia durante la pedalata, così come la distribuzione delle masse dovute all'effetto pendolo della parte superiore del corpo. Considerati questi vantaggi e svantaggi non si può escludere a priori una delle due configurazioni, quindi risulta necessario effettuare uno studio di confronto tra le configurazioni tenendo conto sia dell'aerodinamica, sia della potenza a disposizione per ogni atleta. Questo si traduce nella realizzazione di alcune versioni di carene per entrambe le categorie e l'esecuzione di simulazioni di prestazione sportiva, quindi considerare la differenza di potenza. Per disegnare le carene si sono prese le misure di potenziali atleti tramite scansione 3D (vedi paragrafo "Incontro con atleti e scansione 3D") in posizioni tipiche di pedalata, valutando attentamente l'ingombro per ogni configurazione e si sono stabiliti dei parametri di passo, carreggiata e ingombro massimo. Questi vincoli sono stati assegnati a due gruppi di lavoro separati (AP e ATP), ognuno con il compito di realizzare la miglior carena dal punto di vista aerodinamico. Il software in uso alla squadra è Siemens Star-CCM+, il quale è già stato utilizzato per progettare le carene da record dei prototipi Pulsar, Taurus, Taurus X e M21. Nel reparto aerodinamica il workflow consiste nella valutazione delle modifiche CAD in termini di prestazioni aerodinamiche, per tentare di massimizzare la porzione di flusso laminare, arretrare la transizione a turbolento e la separazione in coda, per fare ciò si valutano dapprima diverse forme e successivamente si migliorano dettagli localizzati. Il processo manuale è abbastanza lungo ed iterativo, ma in queste fasi iniziali è necessario in quanto non si può sfruttare l'ottimizzatore automatico Heeds. Requisiti per avere una simulazione realistica sono la rappresentazione CAD della carena completa, passaruota completi e ruote messe in rotazione; il modello è posizionato a 1/3 dall'ingresso galleria. Una simulazione è composta da 3000 *step* totali, più che necessari per ottenere una soluzione stabile, dei quali: i primi 750 vengono realizzati con un modello di turbolenza K-Omega, mentre agli ultimi 2250 viene aggiunto il modello di transizione GammaReTheta, la cui funzione di strato limite è stata implementata in modo innovativo dal reparto aerodinamica nel corso degli anni per svincolare l'analisi da alcuni parametri aleatori spesso utilizzati in letteratura. Dai primi CAD della configurazione ATP ci si è confrontati con il peggior lato negativo, l'ingombro della pedalata: questo vincolo porta la carena ad assumere sezioni frontali e superfici bagnate dall'aria molto al di sopra delle stesse valutate per la configurazione AP e la superficie nel complesso risulta

essere tendente alla forma del copro tozzo, piuttosto che al corpo affusolato, presentando, inoltre, variazioni di sezioni che inducono separazioni di flusso. Dai dati ottenuti dopo circa 60 simulazioni CFD, riportati nella Tabella 2.

, si è passato all'analisi delle prestazioni sulle migliori carene ottenute.

Capitolo 2: Materiali e metodi

Tabella 2: elenco dei principali dati ottenuti dalle analisi CFD preliminari.

ID		v	Speed [m/s]	FA [m2]	Shear Drag [N]	Pressure Drag [N]	% Shear	Drag [N]	Cd	Cd*A	Potenza
CB	0.1	1	27.78	0.264	5.460	3.762	59.21%	9.221	0.08889	0.02350	256.15
LF	0.1	1	27.78	0.3190	2.988	1.539	66.00%	4.527	0.03616	0.01154	125.75
GN	0.2	1	27.78	0.2969	3.424	1.241	81.39%	6.665	0.05720	0.01698	185.13
GN	0.2	1	27.78	0.2969	3.875	1.011	79.32%	4.886	0.04193	0.01245	135.72
GN	0.2	1	27.78	0.2969	2.914	0.771	79.08%	3.685	0.03163	0.00939	102.36
GN	0.2	1	27.78	0.2969	1.910	0.515	78.75%	2.425	0.02081	0.00618	67.36
GN	0.2	1	27.78	0.2969	1.084	0.311	77.73%	1.395	0.01197	0.00355	38.75
GN	0.2	1	27.78	0.2969	1.091	0.308	77.96%	1.399	0.01201	0.00357	38.87
FS	0.1	1	27.78	0.2913	2.133	1.886	53.07%	4.018	0.03516	0.01024	111.62
DM	0.1		27.78	0.3437	3.927	19.168	17.00%	23.095	0.17124	0.05885	641.52
DM	0.2		27.78	0.3619	4.126	11.243	26.85%	15.369	0.10820	0.03916	426.95
DM	0.3		27.78	0.3634	3.486	10.418	25.07%	13.904	0.09748	0.03542	386.24
CB	0.2	1	27.78	0.2848	3.138	3.257	49.07%	6.395	0.05721	0.01629	177.65
CB	0.2	2	27.78	0.3452	4.080	7.100	36.49%	11.180	0.08251	0.02848	310.58
DC	0.2		27.78	0.3879	5.143	1.959	72.42%	7.102	0.04665	0.01809	197.29
LF	0.1	2	27.78	0.2836	2.909	1.752	62.42%	4.661	0.04187	0.01187	129.48
AM	0.2	1	27.78	0.4237	5.158	4.242	54.88%	9.400	0.05653	0.02395	261.14
DM	0.5		27.78	0.3622	4.519	2.225	67.00%	6.744	0.04744	0.01718	187.35
LS	1.0		27.78	0.2922	2.714	2.895	48.39%	5.608	0.04890	0.01429	155.80
LS	1.1		27.78	0.2848	4.458	3.671	54.84%	8.129	0.07272	0.02071	225.82
CB	0.3	1	27.78	0.2913	2.797	2.518	52.62%	5.315	0.04649	0.01354	147.65
LS	1.2		27.78	0.2904	2.638	2.342	52.97%	4.979	0.04368	0.01269	138.32
IB	0.2	1	27.78	0.2966	2.846	2.513	53.11%	5.359	0.04604	0.01365	
DC	1		27.28	0.2603	2.836	1.683	62.77%	4.519	0.04586	0.01194	123.27
DM	0.1		27.78	0.2899	4.461	5.847	43.28%	10.308	0.09059	0.02626	286.36
LF	4		27.78	0.3334	3.175	12.055	20.85%	15.231	0.11637	0.03880	423.10
CB	1	0	27.78	0.2888	2.911	2.931	49.83%	5.842	0.05154	0.01488	162.29

Capitolo 2: Materiali e metodi

ID		v	Speed [m/s]	FA [m2]	Shear Drag [N]	Pressure Drag [N]	% Shear	Drag [N]	Cd	Cd*A	Potenza
LF	4	1	27.78	0.3103	3.640	8.402	30.23%	12.042	0.09886	0.03068	334.53
LF	4	2	27.78	0.3129	3.098	10.416	22.92%	13.514	0.11003	0.03443	375.42
LF	6		27.78	0.3456	3.015	6.432	31.92%	9.447	0.06965	0.02407	262.44
CB	2	0	27.78	0.3204	4.359	2.835	60.59%	7.194	0.05720	0.01833	199.85
LF	6	1	27.78	0.3451	2.983	5.500	35.16%	8.483	0.06262	0.02161	235.67
DM	0.2		27.78	0.2973	4.321	5.293	44.94%	9.614	0.08239	0.02449	267.08
DM	0.3		27.78	0.2919	4.109	8.091	33.68%	12.200	0.10648	0.03108	338.92
GNH	0.1		27.78	0.2905	4.745	12.412	27.66%	17.158	0.15049	0.04371	476.64
CB	1	1	27.78	0.2895	2.937	3.536	45.37%	6.473	0.05696	0.01649	179.82
CB	1	2	27.78	0.2893	2.886	3.412	45.82%	6.298	0.05546	0.01605	174.96
CB	1	3	27.78	0.3000	2.869	3.692	43.73%	6.561	0.05572	0.01672	182.26
LF	7	0	27.78	0.3090	2.858	5.266	35.18%	8.124	0.06698	0.02070	225.68
LF	7	1	27.78	0.3090	2.922	5.312	35.48%	8.233	0.06788	0.02098	228.72
LF	7	2	27.78	0.3090	2.893	5.056	36.40%	7.949	0.06554	0.02025	220.83
DM	0.4		27.78	0.2935	3.489	5.231	40.01%	8.719	0.07569	0.02221	242.22
DM	0.4	5	27.78	0.2962	5.138	3.164	61.89%	8.302	0.07141	0.02115	230.63
DC	4		27.78	0.3146	4.352	3.621	54.59%	7.973	0.06457	0.02031	221.48
DC	5		27.78	0.3116	4.628	3.659	55.84%	8.287	0.06775	0.02111	230.21
DM	0.4	7	27.78	0.2962	4.335	2.262	65.71%	6.597	0.05674	0.01681	183.25
DM	0.4	9	27.78	0.2973	4.167	2.277	64.66%	6.444	0.05522	0.01642	179.01
DM	0.4	15	27.78	0.2970	4.219	2.178	65.95%	6.396	0.05487	0.01630	177.69
DM	0.4	26	27.78	0.2977	4.190	2.173	65.85%	6.363	0.05445	0.01621	176.75
DM	0.4	23	27.78	0.2973	4.273	1.987	68.26%	6.260	0.05365	0.01595	173.90
DM	0.4	28	27.78	0.2977	4.243	1.990	68.07%	6.232	0.05333	0.01588	173.14
CB	1	4	27.78	0.3049	3.003	4.175	41.84%	7.178	0.05998	0.01829	199.40
CB	1	5	27.78	0.3039	2.741	7.122	27.79%	9.863	0.08269	0.02513	273.99
CB	1	0	27.78	0.2914	2.830	3.456	45.02%	6.286	0.05496	0.01602	174.63
CB	1	0	27.78	0.2947	3.622	3.724	49.31%	7.346	0.06351	0.01872	204.07

Analisi performance

Come accennato precedentemente, le simulazioni CFD non sono sufficienti per scegliere la configurazione migliore tra AP e ATP perché gli svantaggi aerodinamici di una configurazione possono essere recuperati dai vantaggi in maggior potenza disponibile all'atleta. È risultato necessario simulare le carenze ottenute con un metodo numerico basato sulla legge della conservazione dell'energia, sviluppato appositamente per le condizioni al contorno della competizione. Il simulatore *Battle Mountain Simulator* (B.M.SIM.) è stato sviluppato interamente dal reparto Analisi dati della squadra durante i vari anni di competizione per capire come i vari parametri in gioco influenzano la prestazione finale. Alcuni di questi sono massa, inerzie rotazionali, coefficiente di attrito volvente, coefficienti aerodinamici, potenza, gestione della potenza, umidità, temperatura, pressione. Il programma è abbastanza versatile e può stimare diversi parametri in base a quelli conosciuti. Il metodo numerico di simulazione è basato sulla legge di conservazione dell'energia discretizzato su intervalli di tempo:

$$E_c(t_1) + E_r(t_1) = E_c(t_0) + E_r(t_0) + \eta \int_{t_0}^{t_1} W dt + \int_{\Delta h(I_j)} F_g dl - \int_{I_j} F_r dl - \int_{I_j} F_d dl \quad (1)$$

Nell'equazione (1) il bilancio è eseguito due istanti di tempo: all'istante 1, quindi istante finale, è riportata l'energia cinetica ed energia cinetica rotazionale e all'istante 0, quindi l'istante iniziale, è riportata l'energia disponibile dall'istante precedente alla quale si somma algebricamente l'energia immessa dal ciclista, l'energia guadagnata dalla pendenza del tracciato, l'energia dissipata per rotolamento e l'energia dissipata per aerodinamica. Nel caso specifico del progetto Handcycle viene fornita una potenza stimata, ricavata da dati su strada forniti dagli atleti, scalata su un profilo tipico da competizione per la prestazione fisica richiesta. Il profilo di potenza risulta essere costante a tratti con la seguente distribuzione:

- Da 0 m a 1500 m: potenza = 260 W
- Da 1500 m a 7200 m: potenza = 280 W
- Da 7200 m a fine gara: potenza = 300 W

I dati al contorno sono ripresi da rilevazioni sul campo durante la competizione (vedi pagina 19) (temperatura, pressione, altitudine, umidità) o da prove di laboratorio (coefficiente di attrito volvente, efficienza trasmissione).

Definizione della geometria dello sterzo

Non sono stati trovati precedenti studi sulla stabilità delle handcycle o dei tricicli con due ruote posteriori, ma solamente studi pregressi sulla stabilità di mezzi a quattro e due ruote. È risultato necessario quindi indagare il fenomeno dal punto di vista delle forze agenti e del principio fisico sui quali si basano le manovre necessarie per mantenere la stabilità. I parametri

più importanti di una handcycle, o di una bicicletta in generale, sono legati alla geometria del telaio e della forcella, tale scelta progettuale definisce il comportamento statico e dinamico del mezzo in tutte le fasi di utilizzo. La manovrabilità è legata intrinsecamente ai parametri angolo dell'asse di sterzo, avancorsa e avanzamento. Nella Figura 16 sono riportati i tre parametri principali della geometria dello sterzo in una configurazione casuale, rappresentati sul modello parametrico realizzato con SolidWorks, l'immagine ha il solo scopo illustrativo. Sfruttando la schematizzazione si ricordano le definizioni di tali parametri: *trail*, avancorsa, è la distanza tra il punto di intersezione dell'asse di sterzo e il terreno e il punto di contatto a terra della ruota, è definito positivo se il punto di intersezione tra asse di sterzo e terreno giace anteriormente al punto di contatto tra ruota e terreno, il *rake, off set*, avanzamento è la distanza tra l'asse di sterzo e il centro della ruota, definito positivo quando il centro ruota giace anteriormente all'asse di sterzo, l'angolo dell'asse di sterzo è l'angolo formato da quest'ultimo con l'orizzontale. Solo a scopo illustrativo nella Figura 16 l'angolo dell'asse di sterzo è di 25° , l'avanzamento è di 150mm e l'avancorsa è di 149,03 mm. Per stabilire la miglior combinazione di questi parametri bisogna fare un'analisi di equilibrio dei momenti agenti sulla forcella intorno all'asse di sterzo. Le forze considerate sono: la componente normale all'asse di sterzo della forza di reazione vincolare alla forza peso (N_y) nel punto di contatto tra ruota e terreno proiettata su un piano perpendicolare all'asse di sterzo e la forza di attrito generata tra lo pneumatico e il terreno (F_s), della quale si considera solo la sua proiezione sul piano perpendicolare all'asse di sterzo della componente centripeta. La F_s è funzione della velocità del veicolo in quanto è una forza centripeta e per definizione si calcola come la massa per l'accelerazione centripeta, quindi massa per velocità tangenziale al quadrato diviso raggio della traiettoria; questo è il contributo principale sulla fisica della sterzata, in quanto ad alte velocità predomina su tutte le altre forze. La componente di forza peso che si scarica sulla ruota anteriore generata dall'insieme ciclista e handcycle è considerata nel punto di intersezione tra telaio e forcella, quindi nella serie sterzo, per cui non genera momento sterzante, così come la forza centripeta di reazione all'attrito a terra. La forza d'attrito tra pneumatico e terreno ha anche una componente tangente alla traiettoria curvilinea di una sterzata, ma è stata calcolata essere di due ordini di grandezza inferiore rispetto alle due forze considerate. Nella Figura 17 è riportata la vista perpendicolare all'asse di sterzo, questo per agevolare il calcolo dei momenti agenti sullo sterzo, riducendo il problema da tre dimensioni a due; qui si può notare una configurazione illustrativa dove la forza N_y tende a far ruotare in senso antiorario, accentuando l'azione sterzante, mentre la forza F_s tende a riportare lo sterzo centralmente, quindi a ridurre la sterzata. Il polo rispetto al quale vengono calcolati i momenti è il punto azzurro nella Figura 17 e rappresenta l'asse di sterzo. SolidWorks fornisce

direttamente tutte le dimensioni necessarie al problema, anche il modulo delle forze. Questi dati sono guidati dalla *design table* impostata in Excel (Figura 18), dove l'utente fornisce i dati della prima riga, quindi carreggiata posteriore, diametro ruota, angolo dell'asse di sterzo, avanzamento e lunghezza telaio e SolidWorks popola le restanti colonne contenenti i valori di raggio di traiettoria curvilinea, modulo delle forze N_y e F_s , bracci e proiezioni delle forze e due dimensioni per calcolare il avanzcorsa. Essendo che SolidWorks fornisce solo dimensioni positive, quindi avendo richiesto l'entità delle forze si ottiene il modulo di queste, è l'utente che deve prendersi carico di come trattare questi valori, in particolare bisogna distinguere tra due casi: il primo è relativo all'avancorsa positivo, quindi quando la forza peso tende ad aumentare l'azione sterzante e la forza centripeta a ridurla e il secondo è il caso con avancorsa negativo, dove il comportamento è opposto; questo è importante per calcolare le coppie in maniera corretta. Per valutare il comportamento lungo tutto il campo di utilizzo si è discretizzato l'intervallo di velocità tra 10 e 120 km/h ogni 10 km/h e il campo di sterzata tra 0 e 7° con un infittimento tra 0 e 1° (0,05 - 0,2 - 0,4 - 0,6 - 0,8 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7°). L'andamento del grafico angolo di sterzo/coppia squilibrante di Figura 19 apparentemente ha un andamento lineare, ma questo è dovuto solo al fatto che abbiamo ridotto l'intervallo di valutazione dell'angolo di sterzo, infatti valutando questo grafico tra 0 e 90° si osserva un andamento quadratico dove viene raggiunto un minimo e una successiva intersezione con l'asse delle ascisse; questo è dovuto al fatto che man mano che aumenta l'angolo di sterzo cambia la posizione relativa tra l'asse di sterzo e il punto di contatto tra lo pneumatico e il terreno, quindi l'avancorsa diminuisce e dopo l'angolo di sterzo dell'intersezione delle curve del grafico con le ascisse l'avancorsa inverte il suo segno. L'analisi in questione ha lo scopo di identificare l'influenza dei parametri della geometria del telaio sull'andamento delle curve del grafico angolo sterzo/coppia squilibrante. È desiderato che sullo sterzo sia presente una coppia equilibrante, quindi di valore negativo sul grafico, da una velocità più bassa possibile e per angoli di sterzo anche piccoli. Nell'esempio illustrativo precedente si nota che alla velocità di 20 km/h si ha sempre una coppia nulla sullo sterzo a qualsiasi angolo, quindi per velocità superiori lo sterzo tende a riportarsi autonomamente verso l'angolo di sterzata nullo, cioè a riequilibrare il mezzo. Tutte le curve partono dalla coppia 0 Nmm, in quanto ad angolo di sterzata nullo non vi sono coppie presenti sullo sterzo, essendo tutte le forze allineate sul piano di mezzeria del veicolo.

Per stabilire i parametri di carreggiata e passo è stata effettuata un'analisi di stabilità al ribaltamento laterale. L'analisi è stata condotta pensando al caso limite dove tutto il peso del complesso viene bilanciato sull'asse di rotazione al ribaltamento, la linea rossa nella Figura 20,

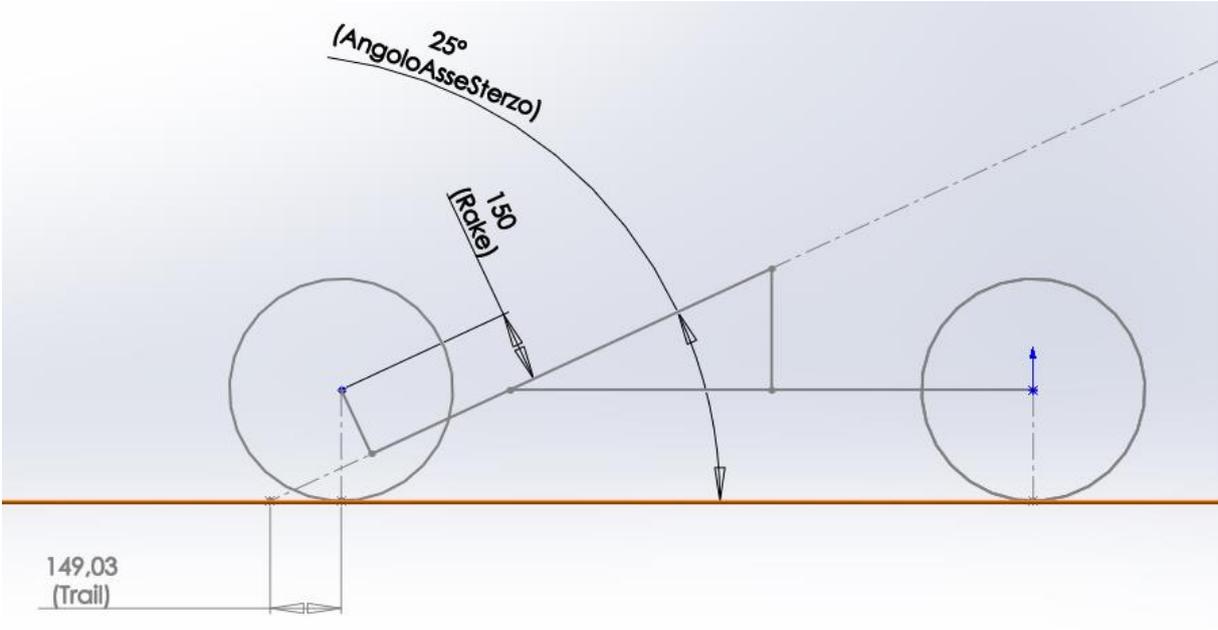


Figura 16: schematizzazione del telaio con i 3 parametri principali.

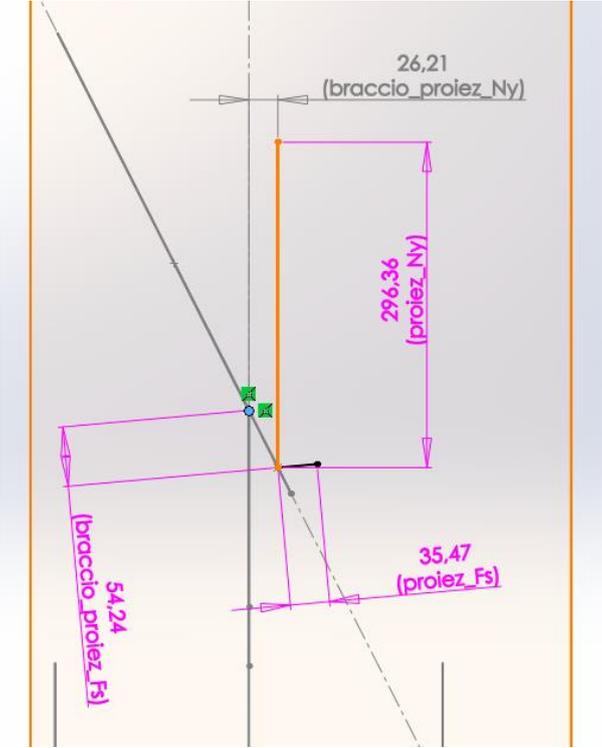


Figura 17: piano normale all'asse di sterzo e dimensioni di forze e bracci.

Capitolo 2: Materiali e metodi

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Design Table for: Telaio																
2		InterasseRuote@Carraggiata	DimetroRuote@Ruota:ax	beta_sterzata@3DSketch1				R_curvatura@RaggioCurvatura	Ny@Ny	Fs@Fs	proiez_Ny@proiezioni	proiez_Fs@proiezioni	braccio_proiez_Ny@proiezioni	braccio_proiez_Fs@proiezioni	dist_O_Asse@Avancorsa	dist_O_Ruota@Avancorsa	trail
3	Default	350	470	12	30	150	1200	7121,579465	327	36,11581495	296,3626464	35,46884499	26,20811746	54,24447976	1603,959126	1480,659628	
4	Trail	350	470	0	30	150	1200	7121,579465	327	36,11581495	296,3626464	21,40386206	0	62,98232995	1603,959126	1454,930237	149,03
5	v010-beta0,05	350	470	0,1	30	150	1200	859437,8578	327	0,299267299	296,3626464	0,299267205	0,130051828	62,98215826	1603,959126	1454,930747	
6	v010-beta0,2	350	470	0,2	30	150	1200	416809,9927	327	0,617071689	296,3626464	1,496280326	0,52018261	62,97958302	1603,959126	1454,938391	
7	v010-beta0,4	350	470	0,4	30	150	1200	208409,7692	327	1,234115114	296,3626464	2,094692874	1,040207157	62,97134349	1603,959126	1454,962847	
8	v010-beta0,6	350	470	0,6	30	150	1200	138945,1481	327	1,851102033	296,3626464	2,543411863	1,559915701	62,95761513	1603,959126	1455,003595	
9	v010-beta0,8	350	470	0,8	30	150	1200	104214,4263	327	2,468004241	296,3626464	2,543322768	2,079150551	62,9384042	1603,959126	1455,060614	
10	v010-beta01	350	470	1	30	150	1200	83377,26275	327	3,084793595	296,3626464	2,991897196	2,597754386	62,91371949	1603,959126	1455,138771	
11	v010-beta02	350	470	2	30	150	1200	41712,41704	327	6,166069107	296,3626464	5,979121837	5,175843499	62,70866895	1603,959126	1455,742361	
12	v010-beta03	350	470	3	30	150	1200	27834,56293	327	9,24036949	296,3626464	8,957033796	7,714983707	62,3694919	1603,959126	1456,748468	
13	v010-beta04	350	470	4	30	150	1200	20903,29919	327	12,30435654	296,3626464	11,92105682	10,19663577	61,89994978	1603,959126	1458,140441	
14	v010-beta05	350	470	5	30	150	1200	16750,50136	327	15,35486255	296,3626464	14,86670807	12,60333153	61,30511712	1603,959126	1459,902388	
15	v010-beta06	350	470	6	30	150	1200	13986,76254	327	18,38893349	296,3626464	17,78962492	14,91895043	60,59120598	1603,959126	1462,014795	
16	v010-beta07	350	470	7	30	150	1200	12016,59987	327	21,40386206	296,3626464	20,68558845	17,12893613	59,76536098	1603,959126	1464,455137	
17	v020-beta0,05	350	470	0,1	30	150	1200	859437,8578	327	1,197069195	296,3626464	1,19706882	0,130051828	62,98215826	1603,959126	1454,930747	
18	v020-beta0,2	350	470	0,2	30	150	1200	416809,9927	327	2,468286755	296,3626464	5,985121303	0,52018261	62,97958302	1603,959126	1454,938391	
19	v020-beta0,4	350	470	0,4	30	150	1200	208409,7692	327	4,936460457	296,3626464	8,378771495	1,040207157	62,97134349	1603,959126	1454,962847	

Figura 18: Design Table guida del modello SolidWorks.

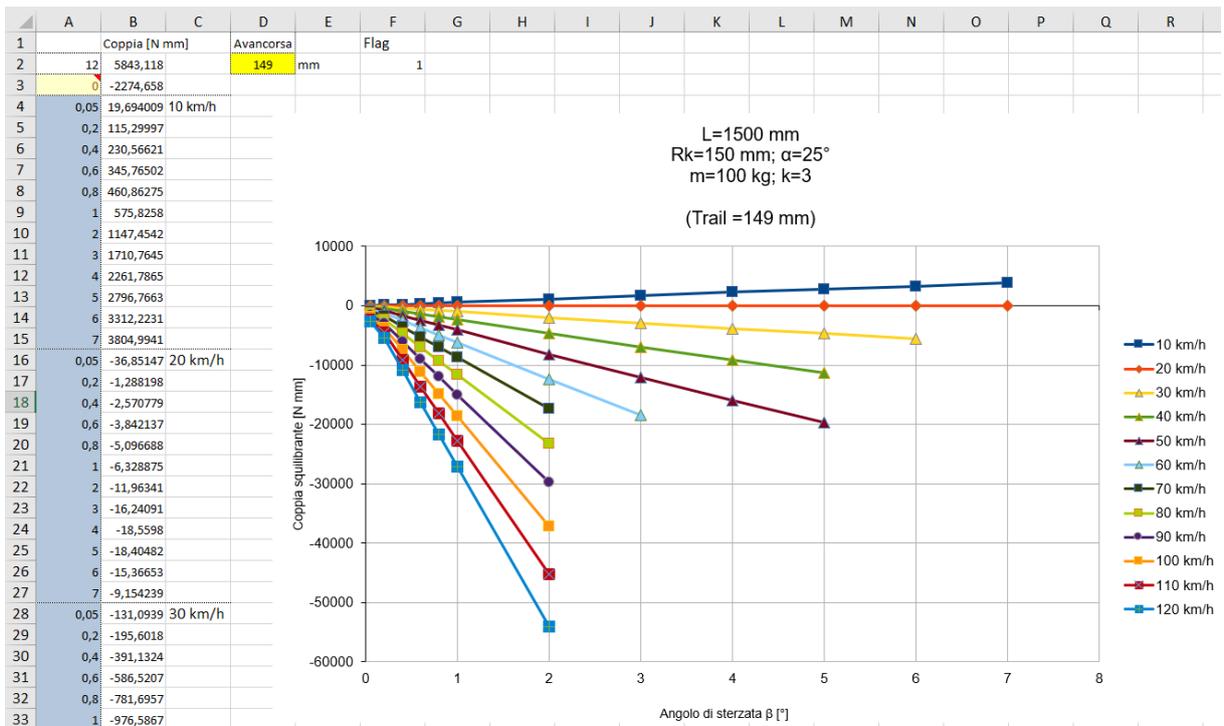


Figura 19: foglio Excel delle coppie agenti sullo sterzo e grafico angolo sterzo/coppia squilibrante in funzione delle velocità.

la distanza di tale asse al baricentro varia con la dimensione della carreggiata, il passo del veicolo e la posizione percentuale del baricentro rispetto alla lunghezza totale del passo. Nel caso limite di ribaltamento la coppia generata dalla forza centrifuga viene bilanciata da quella della forza peso; $\text{forza centrifuga} \times \text{altezza baricentro} = \text{forza peso} \times \text{braccio}$. Il parametro che sicuramente influenza quest'analisi è la carreggiata, quindi la distanza tra le ruote posteriori, e l'eventuale campanatura, *camber*, negativa sulle ruote posteriori, quindi l'inclinazione delle ruote posteriori verso il centro della handcycle; a parità di carreggiata la campanatura permette di aumentare la carreggiata a terra, quindi la distanza tra i punti di contatto con il terreno. Una carreggiata maggiore conferisce più stabilità al ribaltamento laterale, perché aumenta il braccio della forza peso. Il secondo parametro da definire con quest'analisi è la lunghezza del passo, distanza tra la proiezione dei punti di contatto delle ruote posteriori sul piano medio e il punto di contatto a terra della ruota anteriore. Il passo ha un'influenza limitata sulla stabilità al ribaltamento. Il parametro che influisce maggiormente è la posizione del baricentro del complesso handcycle-ciclista, perché cambia la distanza, quindi il braccio, della forza peso rispetto alla linea di ribaltamento. Un baricentro più arretrato verso le ruote posteriori conferisce più stabilità. L'altezza del baricentro influisce in quanto varia direttamente il braccio della forza centrifuga. In Figura 20 è riportato il foglio Excel dei calcoli e la schematizzazione del telaio: la linea rossa rappresenta l'asse di rotazione del complesso al ribaltamento e passa per i punti di contatto di una ruota posteriore e l'anteriore, in verde alcune misure caratteristiche e alla distanza X_G dal punto di contatto della ruota anteriore con il terreno è posta la forza peso con il braccio B rispetto all'asse di ribaltamento. Per valutare la velocità limite di ribaltamento nel caso peggiore possibile si sono impostati i seguenti parametri: $k = 2$, indica che il baricentro è supposto essere al 50% della lunghezza del passo, la massa è supposta a 100 kg, la campanatura (*camber*) è impostata a 0° , è stato considerato il passo minore possibile (300 mm), il quale genera un braccio minore tra forza peso e asse di ribaltamento, il passo minore possibile è di 1100 mm, l'altezza del baricentro è supposta essere a 400 mm dal suolo. L'interesse di questa analisi è cercare di capire se la handcycle riesca a percorrere i tracciati di collaudo a disposizione della squadra, per i quali è stato rilevato che la curva più stretta ha un raggio di 145 m.

Calcolo dei rapporti di trasmissione

Per raggiungere le velocità prefissate bisogna modificare una trasmissione commerciale per handcycle in modo da avere una cadenza di pedalata adeguata. Considerando che un ciclista di alto livello riesce a raggiungere velocità di 40 km/h circa con una cadenza di 100 pedalate al minuto è logico pensare che una trasmissione classica non possa raggiungere la velocità di

Capitolo 2: Materiali e metodi

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	B [mm]	Passo [mm]	LP [mm]	β [°]	XG [mm]	k		
2	74,3	1100	300	7,77	550	2	P=peso [N]	
3	76,7	1100	310	8,02	550		LP=carreggiata [mm]	
4	79,2	1100	320	8,28	550		XG=posizione del baricentro	
5	81,6	1100	330	8,53	550		B=braccio forza peso	
6	84,0	1100	340	8,79	550		h=altezza baricentro	
7	86,4	1100	350	9,04	550		R=raggio curva	
8	88,8	1100	360	9,29	550		α =angolo di sterzo	
9	91,2	1100	370	9,55	550			
10	93,6	1100	380	9,80	550			
11								
12	camber [°]	0		massa [kg]	100			
13								
14	α [°]	B [mm]	h [m]	R [mm]	R [m]	a_max [m/s ²]	vmax [m/s]	vmax [km/h]
15	0,5	74,3	0,4	126052	126	1,823	15,2	54,565
16	1			63029	63		10,7	38,584
17	2			31519	32		7,6	27,285
18	3			21018	21		6,2	22,281
19	4			15769	16		5,4	19,299
20	5			12621	13		4,8	17,266
21	6			10523	11		4,4	15,766
22	7			9026	9		4,1	14,601
23								
24								
25								
26								
27								
28								
29								
30								
31								
32								
33								
34								
35								
36								
37								
38								
39								
40								
41								
42								

Figura 20: analisi di stabilità al ribaltamento.

100km/h con una cadenza umanamente sostenibile. È necessario in questo senso prevedere due rami differenti di trasmissione, entrambi moltiplicanti (ingranaggio conduttore più lento dell'ingranaggio condotto), come illustrato in Figura 21. Il ramo primario della trasmissione trasferisce il moto dalle pedivelle attraverso la corona fino al pacco pignoni, quest'ultimo è accoppiato alla corona del ramo secondario la quale muove il pignone calettato sull'asse della ruota, questo pignone è dotato di ruota libera che permette alla ruota della handcycle di girare liberamente se la trasmissione possiede una velocità di rotazione inferiore. Le scelte progettuali per questa configurazione particolare derivano da miglioramenti progettuali dalle precedenti versioni di trasmissione già costruite e testate dalla squadra su altri prototipi. Rispetto alle precedenti la principale variazione è stata l'inversione destra sinistra dei due rami di trasmissione, quindi precedentemente il primario era a destra e il secondario a sinistra; questo obbligava a montare una ruota libera sinistrorsa sull'asse della ruota, tale ruota libera

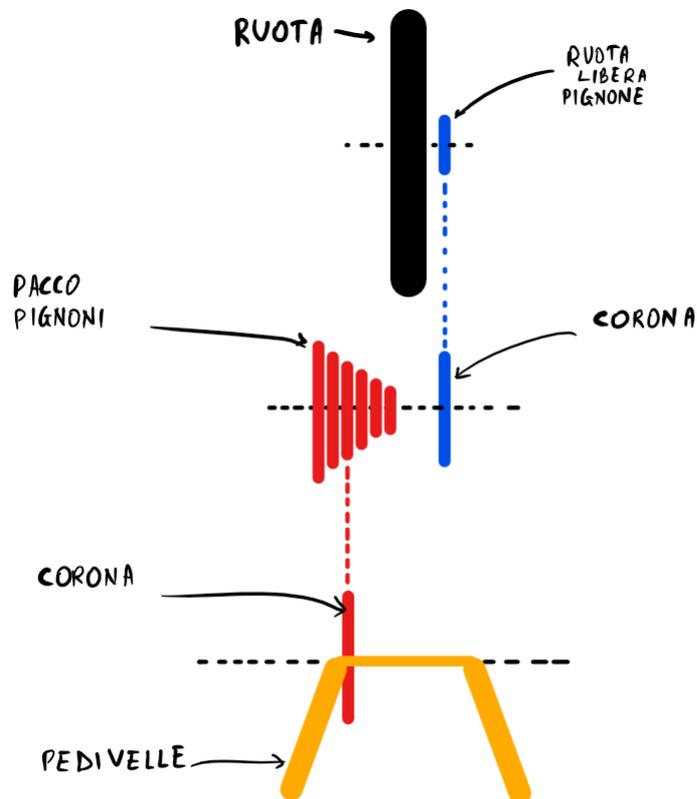


Figura 21: schematizzazione trasmissione.

sinistrorsa non è comune nell'ambito ciclistico, quindi molto difficile da trovare, anche sul mercato mondiale e i pochi esemplari disponibili non sono di qualità. Invertendo i rami ci può adoperare una ruota libera commerciale facilmente reperibile, ma nascono altri inconvenienti. Il pacco pignoni se montato sul lato sinistro della handcycle con il pignone più grande verso il piano mediano della bicicletta ruota in direzione opposta a quella consueta per una bici tradizionale e si verificano problemi relativi al cambio marcia: i pignoni del pacco pignoni presentano delle scanalature che aiutano la catena a passare da un pignone all'altro in modo agevole, come evidenziato nella Figura 22. Per questa ragione il pacco pignoni viene calettato sull'asse con il pignone più grande verso l'esterno. Il secondo inconveniente dell'aver il ramo primario a sinistra è il posizionamento del misuratore di potenza. Di norma il misuratore di potenza è calettato sull'asse del movimento centrale a destra oppure vincolato con viti alla pedivella destra e rileva la potenza espressa del ciclista attraverso gli estensimetri interni all'apparecchio perché tutta la forza viene trasmessa alla corona attraverso questo



Figura 22: scanalature per agevolare il cambio marcia.

componente, la corona è fissata con 4 o 5 viti ai relativi fori predisposti sulle estremità del misuratore. Nello spostare la corona a sinistra sarebbe necessario montare il misuratore di potenza in modo che la sua rotazione sia opposta al normale moto che avrebbe se fosse posizionato a destra, quindi risulterebbe in una lettura di potenza negativa e potenzialmente potrebbe subire dei danni o fornire misure non corrette facendo deformare gli estensimetri in maniera opposta alla quale sono stati progettati. Per risolvere anche questo problema bisogna utilizzare un misuratore di potenza calettabile sull'asse del movimento centrale e non uno da fissare con viti alla pedivella, montarlo nella stessa direzione in cui andrebbe montato su un ramo di trasmissione a destra, quindi vincolare la corona e il misuratore accoppiandoli dal lato opposto rispetto al normale. In Figura 23 è presente uno schema: 1) SRM montato alla sinistra del movimento centrale, pedivella alla sinistra e corona alla destra, vengono lette potenze negative quando si pedala in avanti, 2) montaggio classico, SRM alla destra del movimento centrale, pedivella a destra e corona a sinistra, vengono lette potenze positive pedalando in avanti, 3) montaggio adattato per il nostro caso, SRM alla sinistra del movimento

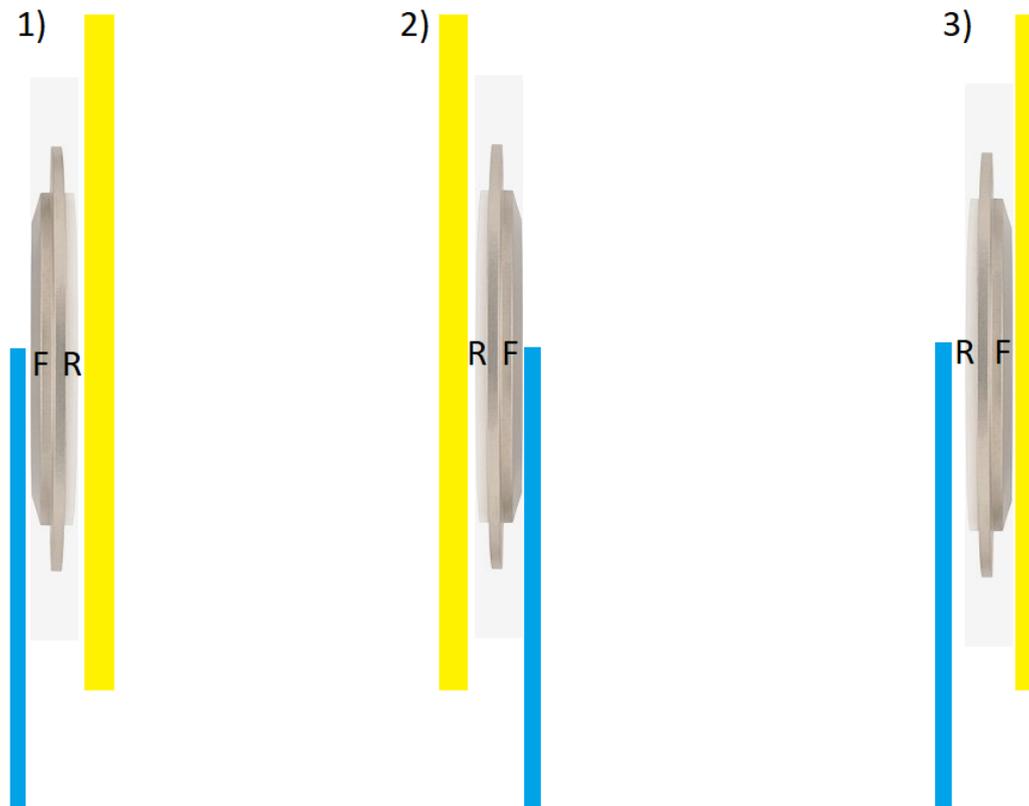


Figura 23: schematizzazione utilizzo SRM (giallo=corona, blu=pedivella, F=fronte SRM, R= retro SRM).

centrale, pedivella a sinistra e corona a destra, vengono lette potenze positive pedalando in avanti. L'equazione (2) fornisce la velocità raggiungibile dal mezzo in base ai seguenti parametri: C = circonferenza della ruota in millimetri, RPM = cadenza di pedalata in giri al minuto, i_m = rapporto di trasmissione del ramo primario (3), i_2 = rapporto di trasmissione del ramo secondario (4) e le due costanti necessarie per le trasformazioni di unità di misura.

$$v = \frac{C \cdot RPM}{i_2 \cdot i_m} \cdot \frac{1}{1000} \cdot \frac{1}{60} \quad (2)$$

$$i_m(\text{marcia}) = \frac{\text{denti Pignone}(\text{marcia})}{\text{denti Corona}} \quad (3)$$

$$i_2 = \frac{\text{denti Pignone}}{\text{denti Corona}} \quad (4)$$

Il parametro i_m è in funzione della marcia selezionata sul cambio, quindi la catena verrà spostata sul pignone desiderato dal ciclista in base alle necessità. Per tutti i pignoni selezionati il rapporto di trasmissione risulta essere minore di 1, quindi si tratta di un moltiplicante. Sul ramo secondario è presente solo una corona e un pignone, quindi il parametro i_2 è costante, anche questo minore di 1. Il dimensionamento del numero di denti dei vari componenti deve essere fatto in funzione della cadenza alla quale il ciclista è abituare ad esprimere la massima potenza. Ci sono alcuni vincoli sul dimensionamento. La dimensione della ruota è definita. I numeri di denti del pignone con ruota libera sull'asse della ruota è un parametro libero con alcune limitazioni: numero basso di denti tende ad abbassare l'efficienza del ramo di trasmissione, in quanto la catena deve far ruotare i perni delle maglie di angoli sempre più grandi quanto è piccolo il pignone, generando più attrito rispetto ad un pignone con più denti, mentre il limite superiore è dettato da disponibilità commerciale, quindi generalmente fino a 24 denti. La corona del secondo ramo è nuovamente un parametro libero, le limitazioni sono di ingombro e di disponibilità in commercio; si può spaziare tra 32 e 56 denti solitamente. Il ramo primario di trasmissione è composto dal pacco pignoni e dalla corona. Per la corona valgono le stesse considerazioni del secondo ramo, possibile accortezza potrebbe essere la scelta dello stesso componente per entrambi i rami in modo da ottimizzare i pezzi di ricambio. Il pacco pignoni è un parametro libero, ma ha il vincolo di ingombro più stringente, in quanto il sistema di cambio marcia a disposizione della squadra ha la particolarità di traslare l'intero pacco pignoni invece di spostare la catena, quindi il pignone più grande potrebbe interferire con la carena. Questo requisito è da verificare al momento della creazione di un CAD dettagliato. Il pignone più piccolo, nuovamente, non deve avere una dimensione troppo ridotta per non diminuire l'efficienza del ramo di trasmissione, in più, ad alte velocità è indicato scegliere gli ultimi 4 pignoni con il minor salto di denti, questo per non far diminuire la cadenza di pedalata in modo drastico e quindi rendere l'espressione della potenza inefficiente; l'ideale è far variare il numero di denti degli ultimi 4 pignoni di 1 dente. Il numero di pignoni per il pacco pignoni è da stabilire in base agli ingombri disponibili in carena ed in base alle escursioni massime del meccanismo di cambio marcia. Queste considerazioni sono fatte sulla base dell'esperienza acquisita con i precedenti prototipi durante le competizioni.

Incontro con atleti e scansione 3D

Gli studenti del Team Policumbent hanno avuto diverse occasioni per confrontarsi direttamente con gli atleti e, come ripetuto più volte nel capitolo 1, indagare sulle necessità specifiche di ogni atleta candidato a pilota per la sezione Handcycle. Il primo incontro conoscitivo con Vittorio Podestà è avvenuto il 12 dicembre 2019 nei laboratori del Politecnico

di Torino, dove Vittorio ha portato la sua handcycle da competizione della categoria H3, nella quale lui gareggia, in modo che cominciassimo a familiarizzare con le diverse scelte progettuali che bisogna adottare tra una bicicletta tradizionale, una reclinata come quelle già sviluppate e una handcycle. Vittorio ha nel suo palmares 8 ori, 2 argenti e 2 bronzi nelle competizioni mondiali e 2 ori, 2 argenti e 2 bronzi ai giochi Paralimpici; bisogna ricordare anche che lui non è solo un atleta, ma è anche progettista delle sue biciclette, in quanto è laureato in ingegneria. Conoscerlo ha portato una mole sostanziale di nozioni tecniche ed ingegneristiche alla squadra, in quanto lui progetta seguendo con rigore il metodo ingegneristico/scientifico, quindi ha sempre basato le sue scelte tecniche sulla ricerca e sulle prove di laboratorio. Inizialmente si era mostrato interessato a partecipare come pilota, ma ha cambiato idea in un secondo momento quando si è ritirato definitivamente dalle competizioni. Nella Figura 24 è riportata una scansione 3D di Vittorio dalla quale sono stati estratti i principali dati di ingombro per il disegno delle carene della fase preliminare. Il secondo ciclista che la squadra ha conosciuto tra gli atleti italiani più forti è Diego Colombari, ha vinto 3 campionati italiani crono, 2 campionati italiani in linea, è diventato campione europeo nel 2014 e ha ottenuto la maglia rosa al Giro d'Italia Handbike in diverse occasioni. Lui ha espresso la volontà di candidarsi a pilota per la sezione handcycle e siamo ancora in contatto con lui. La categoria nella quale gareggia Diego è la UCI H5, infatti, le sue caratteristiche sono state oggetto di studio nella fase preliminare per la configurazione ATP. Nella Figura 25 sono riportate alcune misure di massima e il manichino scalato e adattato ad una posizione da competizione; secondo gli ingombri rilevati dalla pedalata è stata disegnata la carena (in foto non è riportata la carena migliore). Il terzo atleta candidato a diventare pilota è Simone Chiarolla (Figura 26), su suggerimento di Vittorio, il quale lo ha inquadrato come un buon candidato secondo le sue valutazioni. Simone ama gareggiare principalmente ai triathlon e nel febbraio del 2019 si è piazzato al 297° posto alla Ironman di Dubai su 2000 partecipanti, tutti senza disabilità, terminando la gara di 2 km a nuoto, 90 km in handcycle e 21 km di corsa sotto le 5 ore. L'incontro con gli atleti non ha portato solamente alle scansioni 3D, per quanto queste siano essenziali per definire gli ingombri utili al disegno delle carene, ma ha anche portato a definire piccoli dettagli che una persona che non pratica questo sport non definirebbe. Le gambe degli atleti H1-H4 sono solitamente distese lungo il telaio nella maggior parte dei casi, invece Vittorio ci ha riportato che un angolo di flessione delle ginocchia con conseguente inclinazione verso l'alto delle cosce è sempre suggerito a preferenza della distensione completa, bisogna far attenzione a come, però, cambia l'appoggio della parte bassa della schiena sul sedile e modellare la seduta adeguatamente. Indicazioni di carattere



Figura 24: scansione 3D di Vittorio Podestà sulla sua handcycle da competizione.

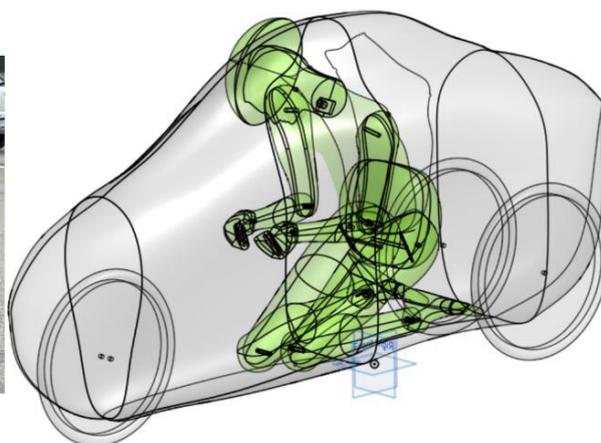


Figura 25: Diego Colombari sulla sua handcycle categoria H5 e manichino scalato e posizionato in una carena.

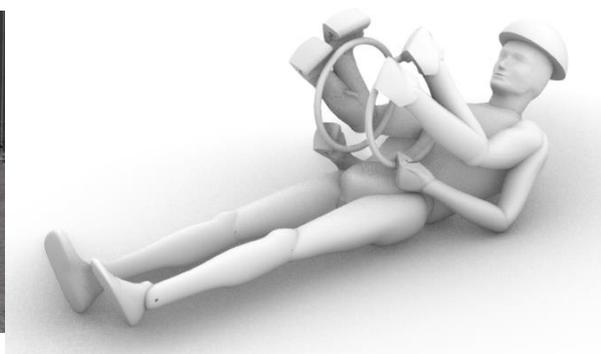


Figura 26: scansione 3D e manichino di Simone Chiarolla.

meccanico, come l'utilizzo delle leve del freno e del cambio e relativi cablaggi sono importanti per non imbattersi in errori di progettazione che manifestano i loro effetti solo dopo aver costruito: i comandi sono solitamente posti sulle pedivelle, le quali ruotano insieme alle mani, questa azione ripetuta alla frequenza di pedalata porta alla rottura delle guaine e dei cavi per fatica; di conseguenza è stato fatto il necessario avvertimento nel progettare soluzioni alternative come il cambio elettronico, per non incorrere in guasti. Una soluzione tecnica abbastanza nascosta sulle handcycle è il blocco di gomma posto tra telaio e forcella, questo componente serve a tenere lo sterzo in posizione centrale a basse velocità o quando il ciclista non è sul mezzo, in quanto la sola forza peso agente sulla forcella tende ad accentuare l'azione sterzante; per far sì che lo sterzo si porti automaticamente nella posizione ad angolo nullo bisogna portare il veicolo ad una velocità minima, stabilita in fase di progetto. Contrariamente ai dati riportati negli articoli [7, 12, 17], nei quali sono indicate le lunghezze ottimali delle pedivelle per una prestazione a potenza massima o efficienza massima (165mm Litzenberger [17], 190mm Krämer [12] e 180mm Goosey-Tolfrey [7]) Vittorio Podestà ha indicato come nel corso degli anni e con le nuove soluzioni tecnologiche, nonché con studi specifici su posizioni e competizioni specifiche, abbiamo portato lui ad optare per le pedivelle da 157,5 mm.

Ottimizzazione carena

Fino al progetto maschile 2021, l'ottimizzazione aerodinamica delle carene avveniva tramite processo manuale iterativo. Questa metodologia consiste nel disegnare la carena con un software CAD rispettando dei vincoli di ingombro precedentemente stabiliti, effettuare un'analisi CFD per ricavare i parametri aerodinamicamente prestazionali, quindi resistenza aerodinamica, potenza dissipata, $C_D A$ e altri, valutare tali parametri con i precedenti e modificare il CAD della carena per effettuare una nuova simulazione CFD. Una volta che si comprendono le correlazioni tra parametri di disegno della carena e parametri aerodinamici si riesce a modificare il CAD in maniera più mirata ed efficiente fino ad arrivare ad un risultato soddisfacente. Questo procedimento è molto lungo e laborioso e non sempre si riesce ad indentificare il risultato migliore, perché il campo di variabilità della moltitudine di parametri richiederebbe troppo tempo. La progettazione della carena del prototipo maschile 2021 ha coinvolto il software Heeds per la gestione automatica dell'ottimizzazione. Requisito fondamentale per questo procedimento è la creazione di un CAD parametrico in ingresso, dove l'utente identifica quali parametri ritiene opportuno modificare e quali invece utilizzare come vincoli, per i parametri variabili è necessario impostare un intervallo di variazione: i parametri possono essere punti appartenenti ad una linea di costruzione di superficie, parametro numerico di un'interpolazione, curvatura, coordinate di un punto fisico, angoli o

altri. Perché il processo arrivi all'ottimo l'utente deve individuare una o più funzioni obiettivo, nel caso della carena può essere la resistenza aerodinamica. Dopo ogni ciclo di analisi i dati obiettivo vengono salvati in correlazione con i parametri modificati durante il ciclo e confrontando i risultati dei diversi cicli si ricerca una logica di correlazione tra modifica del parametro e avvicinamento all'obiettivo. Heeds incorpora diversi algoritmi di ricerca dell'ottimo, SHERPA, Pareto-front, algoritmi neurali, i dettagli si possono trovare nel manuale del programma stesso. Nel caso dell'ottimizzazione della carena Heeds controlla i parametri impostati su un CAD nei programmi Siemens NX o altri per esportare un file input al programma Star-CCM+, il quale è impostato con i modelli di analisi opportunamente scelti. Una volta ottenuti i risultati dell'analisi CFD il processo riparte con la modifica dei parametri di CAD e con il lancio di una successiva analisi CFD. Il vantaggio dell'utilizzo di un processo automatizzato consiste nel minor tempo di esecuzione e nel minor tempo uomo impiegato, ma anche e soprattutto nella possibilità di arrivare all'ottimo grazie ad algoritmi molto complessi, che un utente non potrebbe seguire manualmente. Nel caso della carena del progetto maschile del 2021 la riduzione della resistenza aerodinamica, dopo una serie di cicli di ottimizzazione manuale, è stata da 6,3 N a 6,0 N con soli 150 cicli di Heeds. Alcuni dati e nozioni sono stati ripresi dalla tesi di L. Durando [5] del 2019 sull'utilizzo congiunto di Star-CCM+ e Heeds.

Progettazione telaio

Una volta stabiliti i parametri geometrici del telaio e della forcella bisogna passare alla fase di progettazione e disegno CAD del telaio. Ricordando il paragrafo Ergonomia del capitolo 1 e quindi gli articoli inerenti alla posizione reciproca tra movimento centrale e spalle del ciclista [2, 17, 21], nonché le esigenze specifiche di ogni atleta e le indicazioni di Vittorio Podestà, è necessario prima di tutto stabilire la posizione del ciclista e di conseguenza la posizione reciproca tra movimento centrale e spalle del ciclista, secondo la definizione standard discussa a pagina 6, lunghezza delle pedivelle [7, 12, 17], l'inclinazione del sedile, distanza tra le impugnature [12], inclinazione delle impugnature [18] e posizione delle gambe. Dagli articoli citati si nota come le indicazioni di messa in posizione del ciclista siano definite in base a percentuali di dimensioni corporee, questo è un vantaggio, in quanto svincola la configurazione ottimale dalla dipendenza delle prove da particolari scelte sul gruppo di studio, quando, invece, sono indicate delle dimensioni standard bisogna indagare se sono applicabili all'atleta in questione. Considerando il commento dei risultati dell'articolo di Litzenberger [17], bisogna stabilire con l'atleta candidato se sia opportuno modificare la sua posizione abitudinaria con una indicata come più efficiente da studi scientifici o se mantenerla tale.

Questo dipende dal tipo di allenamento che l'atleta vuole seguire nel periodo precedente alla competizione da record, perché il tempo di adattamento dei muscoli non è ben definito e varia da persona a persona. Nonostante queste incertezze iniziali, principalmente dovute al fatto che non è stato ancora scelto un ciclista, il telaio può essere progettato mantenendo un certo grado di regolabilità, anzi questa è auspicabile in vista della possibilità di utilizzo da parte di diversi ciclisti della stessa handcycle. Le regolazioni necessarie sono in termini di altezza e profondità del movimento centrale, lunghezza delle pedivelle ed inclinazione del sedile. La fase iniziale di progettazione, quindi, consiste nella definizione di alcuni punti fissi dove la struttura deve necessariamente passare e la definizione a posteriori dello sviluppo nello spazio in modo tale da sostenere i carichi applicati. Le sollecitazioni sono da prevedere inizialmente con l'esperienza e successivamente con un'analisi FEM. Da una prima bozza di telaio si può passare ad un'analisi statica della resistenza e rigidità del telaio ipotizzando diversi materiali all'interno del programma Ansa per l'analisi strutturale. Una volta individuato il materiale più adatto e la forma abbozzata è necessario effettuare una serie di cicli di ottimizzazione strutturale in ambito FEM. Per questo tipo di strutture la scelta del materiale delle fibre, il numero di strati e la loro orientazione risulta essere essenziale per un componente che soddisfi i requisiti, per questo negli ultimi quattro anni ci si è affidati all'analisi FEM in prima battuta e successivamente all'ottimizzazione topometrica dell'angolo di orientazione delle fibre e del numero di strati con l'obiettivo di una resistenza massima e una massa minima. L'analisi FEM, l'ottimizzazione topologica e l'ottimizzazione topometrica hanno portato alla riduzione di massa da 38 kg a 30 kg circa per il prototipo Taurus tra il 2017 e il 2018, primi anni di introduzione dei programmi di Beta Cae Systems. Le parti del telaio più critiche dal punto di vista dell'utilizzo dei materiali compositi per via delle imprevedibili direzioni delle forze sono i collegamenti tra componenti, ad esempio, serie sterzo, forcellini per le ruote, fissaggio di componenti meccanici e la trasmissione e punti di attacco cinture. Le zone critiche infatti vengono realizzate, sia per i nostri prototipi, sia per applicazioni in altri ambiti, in materiale metallico. Essendo il metallo un materiale isotropo supporta le sollecitazioni in maniera uguale in tutte le direzioni, quindi è più sicuro affidarsi ai metalli quando non si conoscono nel dettaglio le forze sollecitanti.

Tecnologie costruttive

Il paragrafo di "tecnologie costruttive" è direttamente collegato al paragrafo "progettazione telaio" e alla costruzione della carena. Dopo circa dodici anni di esperienza con i veicoli a propulsione umana è stato appurato che l'utilizzo dei materiali compositi per le strutture e l'utilizzo dei metalli per i componenti meccanici risultasse il miglior compromesso tra

resistenza, leggerezza e resistenza all'usura. Ci sono state, per i progetti precedenti, eccezioni a questa linea guida generale, ma sempre riguardante componenti con particolari applicazioni oppure derivanti dalla collaborazione con sponsor per l'utilizzo di materiali innovativi. Il processo di progettazione si trova ancora in una fase prematura per la scelta di una tecnologia costruttiva, quindi vengono presentate alcune scelte vincenti effettuate negli anni precedenti, che non devono essere intese come uniche possibili, in quanto la ricerca di soluzioni innovative è preferibile dal punto di vista didattico del progetto. La realizzazione delle strutture in materiale composito fino ad ora è stata effettuata tramite la tecnica della laminazione manuale su stampo e l'applicazione del vuoto con il sacco del vuoto e pompa del vuoto. Quando si tratta di componenti in metallo la lavorazione richiede macchinari precisi, talvolta di grandi dimensioni e dal costo ingente, infatti, dopo la progettazione di tali componenti gli studenti non ne seguono la produzione, che viene affidata ad officine esterne. Il processo produttivo più vicino agli studenti è la manifattura additiva, spesso di tipologia FMD (*fused deposition modeling* – modellazione a deposizione fusa) e materiale plastico per il suo carattere innovativo, facilità di utilizzo e accessibilità; nell'ambito della produzione di prototipi questa tecnologia trova grande impiego, ma non sempre è adatta dal punto di vista delle resistenze meccaniche, termiche o tolleranze costruttive. La produzione è stata utilizzata nei precedenti progetti della squadra con grandi successi, soprattutto se consideriamo la produzione di componenti in plastica con rinforzo in fibra continua di carbonio; servizio offerto dallo sponsor 3D Company. La caratteristica innovativa di questa tecnica è la possibilità di realizzare un componente molto leggero e, conoscendo a fondo la natura e direzione delle forze sollecitanti, depositare la fibra di carbonio secondo le direzioni di sollecitazione, in questo modo si può ottenere un componente con il vantaggio della resistenza dei metalli e con la leggerezza dei compositi.

Elettronica

L'elettronica risulta essere fondamentale per la particolare applicazione della handcycle da record, o più in generale per i veicoli da record reclinati e carenati a propulsione umana. Questo è dovuto al fatto che le soluzioni ingegneristiche ad oggi disponibili ed accessibili non garantiscono di avere una struttura trasparente integrata con la carena e con la stessa forma, senza discontinuità tra una superficie e l'altra. Nel corso degli anni e dall'esperienza riportata da diversi competitor, la termoformatura del polimetilmetacrilato (più comunemente Plexiglass) non porta all'ottenimento di una superficie sufficientemente stabile e con spessore e densità costanti da permettere la visione diretta del ciclista della strada davanti a sé, neanche con processi produttivi professionali. Questa difficoltà emerge principalmente

perché la superficie della carena è quasi tangente alla linea di visione necessaria al ciclista. Il secondo problema è l'aerodinamica: la superficie della carena è molto sensibile a cambi di curvatura o a discontinuità superficiali, questi difetti sono molto difficili, se non impossibili da annullare con l'utilizzo del Plexiglass. La soluzione generalmente più adottata è l'utilizzo di telecamere e schermi con una carena costituita completamente o per la maggior parte da materiale composito non trasparente. Andando nel dettaglio si trovano comunemente due soluzioni: un supporto esterno alla carena, come una pinna aerodinamica, per contenere e posizionare le camere oppure l'utilizzo di un Plexiglass di dimensioni molto ridotte, generato da fresatura CNC ed incollato in un foro relativamente stretto nella carena in posizione frontale. Per i prototipi Taurus, Taurus X e prototipo maschile 2021 è stata adottata la soluzione con Plexiglass di dimensioni ridotte e camere interne alla carena, principalmente per non influenzare negativamente l'aerodinamica del veicolo, al costo di una più complicata soluzione ingegneristica. La seconda funzione sopperita dall'apparecchiatura elettronica è la gestione dei sensori e di un eventuale cambio elettronico. Nel caso specifico del Team Policumbent la soluzione adottata per il cambio di rapporti è il cambio con pacco pignoni flottante (Figura 27), questo meccanismo brevettato permette di cambiare pignone mantenendo la catena sempre in linea con la corona fissa, quindi non vengono introdotti attriti ulteriori generati dall'utilizzo della catena che lavora tra corona e pignone non allineati; la gestione è assegnata ad un controllore Arduino. Il meccanismo della selezione del pignone si basa su una piattina fissa che permette a due servomotori elettrici di spostare l'intero pacco pignoni facendolo traslare su un perno centrale scanalato; il controllo della posizione dei servomotori è garantito dalla lettura di due potenziometri e tramite software viene effettuato un controllo ad anello chiuso in continuo, così viene garantita la posizione della marcia anche in caso di deformazioni dovute alla pedalata. I sensori utilizzati sulla handcycle sono: sensore hall per rilevare il numero di giri della ruota e quindi la velocità e la distanza percorsa e sensore ANT+ per la lettura dei battiti cardiaci dalla fascia cardio e per la potenza e la cadenza forniti dal potenziometro SRM. Questi dati sono utili al ciclista per la gestione delle forze in fase di competizione e hanno un ruolo fondamentale nell'analisi dei dati per rilevare una moltitudine di parametri, come ad esempio definire la strategia di gestione della potenza lungo il tracciato da record, il calcolo di dati aerodinamici o di coefficienti di rotolamento o di efficienza. Sono presenti altri sensori che aumentano la precisione dei precedenti dati, come il GPS per una corretta rilevazione della pendenza del tracciato e il sensore accelerometro. Il sensore di temperatura, pressione e umidità è fondamentale per la determinazione del confort del ciclista, quindi per la gestione del ricambio d'aria all'interno della carena. Ultima ma non meno importante è la funzione di comunicazione con l'esterno: trasmettere brevi messaggi audio

tra pilota e auto a seguito può essere fondamentale per cercare di evitare incidenti e gestire al meglio le situazioni di emergenza, come la catena bloccata o per segnalare pericoli. La comunicazione non si ferma solo ai messaggi audio in quanto il sistema è dotato di connettività 4G che permette una connessione in tempo reale con un server fisso al quale si può accedere per monitorare i dati della telemetria con qualsiasi dispositivo connesso ad internet. L'applicazione web permette quindi di vedere la traccia GPS in tempo reale, così come i dati di velocità, cadenza, distanza, potenza, battiti e marcia in base ai livelli di autorizzazione di ogni utente connesso. Il sistema di visione (Figura 28) è basato su due telecamere, una analogica e una digitale, due schermi, due Raspberry Pi, due sistemi di cablaggio separati e due pacchi di batterie al litio separate. È stata enfatizzata la ridondanza completa ed indipendente del sistema di visione per una questione di sicurezza, infatti perdere il sistema di visione in gara potrebbe risultare deleterio. Il sistema principale è gestito dal Raspberry Pi e prende il segnale video dalla camera digitale arricchendolo dei dati di telemetria e lo mostra sul display principale, mentre il sistema secondario sfrutta una camera analogica il quale segnale viene trasmesso direttamente allo schermo secondario con un'affidabilità maggiore.



Figura 27: trasmissione a pacco pignoni flottante su prototipo Taurus. Brevettato.



Figura 28: sistema di visione, (alto-sinistra) fotogramma 200 m all'arrivo, (basso-sinistra) carena e plexiglass, (destra) schermi all'arrivo con telemetria.

Capitolo 3: Risultati

Introduzione

I risultati riportati in questo capitolo possono risultare parziali o non definitivi, in quanto la tesi in questione ha l'obiettivo di impostare il lavoro della squadra per il triennio di sviluppo del prototipo, ma copre solo il periodo fino alla data di pubblicazione dell'elaborato, circa due anni prima della competizione.

Fase preliminare

L'analisi dell'articolo pubblicato da Head e Fernandez [1] ha portato alla stima di alcuni parametri, come il peso e le dimensioni della carena. È stata stimata una massa di 35 kg per il prototipo H22, una lunghezza massima di 3 metri, larghezza massima di 60 cm ed altezza massima di 80 cm.

Ruote

Con le considerazioni riportate nel capitolo 2 si giustifica la scelta di utilizzare ruote ETRTO 406 sia all'anteriore, sia al posteriore. Per la scelta degli pneumatici si riporta il grafico ottenuto dalle prove al banco di rotolamento in Figura 29. La velocità plausibilmente raggiungibile durante la competizione è di circa 110 km/h, quindi considerando tutto il campo di utilizzo sul grafico, gli pneumatici più performanti sono i Michelin Blue 35 (MB35), dove il parametro 35 indica la dimensione trasversale massima a pressione nominale, quindi 35 mm. I MB35 sono stati costruiti appositamente per la Shell Eco-marathon, una competizione mondiale di bassi consumi di carburante, quindi il requisito principale per queste coperture è il basso coefficiente di rotolamento; nonostante tale competizione venga svolta a velocità tipiche di 35 km/h, il banco prova ha dimostrato che il coefficiente di attrito non aumenta considerevolmente oltre i 35 km/h e che lo pneumatico è capace di resistere a velocità di 150 km/h senza esplodere. Essendo questi pneumatici fuori produzione e molto rari sul mercato mondiale, occorre scegliere validi sostituti: dal grafico risultano essere migliori a basse velocità ma peggiori ad alte velocità i Michelin Blue 44, però questi, come i precedenti, soffrono della stessa mancanza di unità sul mercato mondiale, quindi non sono dei buoni candidati. La scelta più adatta per pezzi di ricambio sono gli Schorcher 40, i quali hanno una curva del tutto simile ai MB35, ma leggermente spostata verso consumi maggiori. In fase di progettazione dell'apertura nella carena per lo spazio destinato alle ruote è necessario tener conto della possibilità di utilizzare pneumatici di sezione trasversale massima diversa.

Capitolo 3: Risultati

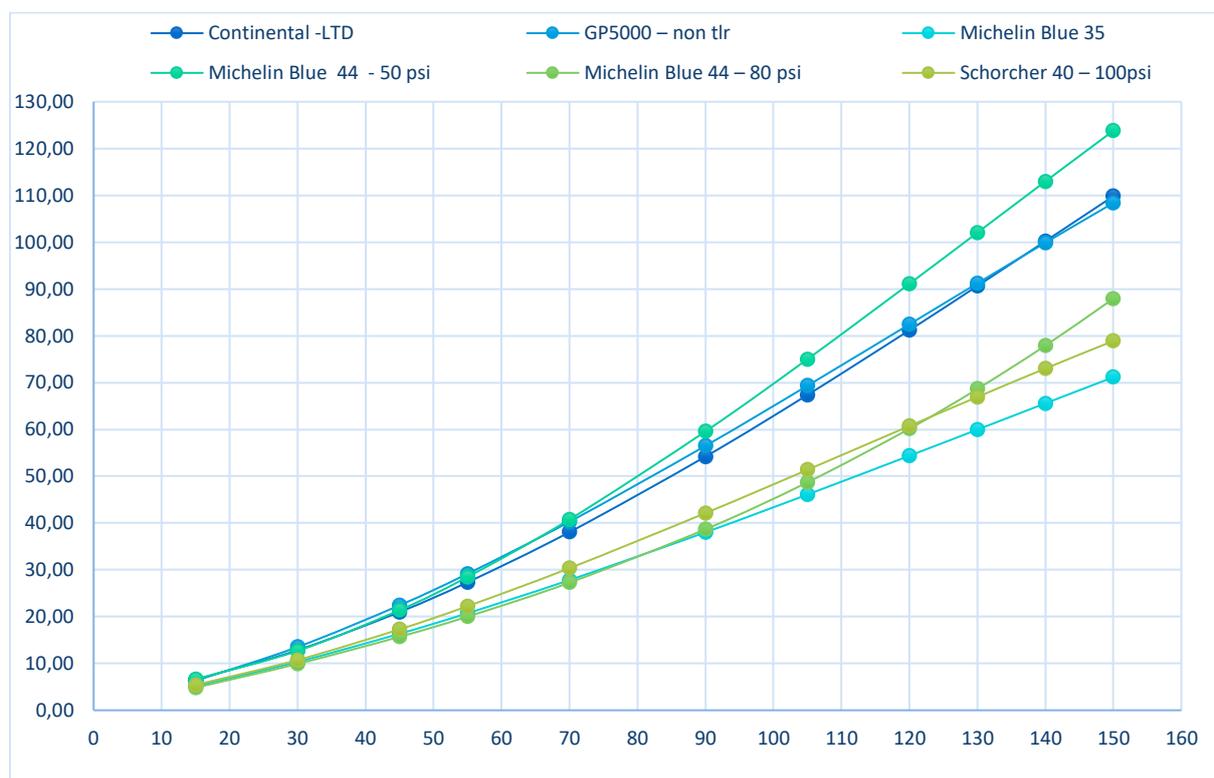


Figura 29: grafico potenza/velocità per gli pneumatici ETRTO 406.

Analisi performance

Le simulazioni preliminari eseguite con B.M.SIM. utilizzate come base per la scelta della configurazione ottimale hanno riportato valori molto simili di velocità finale.

AP: LS1.2 104,79 km/h LF0.1 106,70 km/h

ATP: DM0.5 98.52 km/h

Dopo la definizione della configurazione migliore (vedi paragrafo successivo), il processo manuale di miglioramento aerodinamico è continuato, portando a carene sempre più performanti. Una simulazione successiva alla fase preliminare ha portato la carena DM0.4V23 a raggiungere la velocità di 114,23 km/h.

Scelta tra le configurazioni AP e ATP

I dati derivanti dalle analisi CFD e di performance non hanno identificato una configurazione nettamente vantaggiosa. Considerando le semplificazioni e le approssimazioni dell'intero processo che ha portato ai dati riportati nel precedente paragrafo, non si può basare la scelta su minime differenze di velocità, quindi la decisione deve essere sostenuta da considerazioni di tipo ingegneristico. Le minime differenze di velocità devono essere sostenute dall'analisi

dei vantaggi e svantaggi di ogni configurazione, basandosi sull'esperienza della squadra con i precedenti prototipi. La configurazione ATP presenta un baricentro più alto della configurazione AP perché il ciclista deve assumere una posizione inginocchiata sulla handcycle con le gambe completamente flesse sotto il sedile, mentre il ciclista AP pedala da una posizione reclinata. L'atleta ATP muove una grande massa (braccia, testa e busto) con effetto pendolo alla frequenza di pedalata mentre il ciclista AP pedala sfruttando solo il movimento circolare delle braccia. Il centro di pressione laterale della carena è più alto nella configurazione ATP, il che porta ad influenze maggiori del vento sulla stabilità laterale. Tutti i mezzi costruiti dalla squadra negli anni precedenti e i mezzi degli altri partecipanti presentano dimensioni (sezione frontale e area bagnata) il più piccole possibili, infatti normalmente le carene risultano essere così strette da comprimere leggermente il copro degli atleti; questo aspetto non è compatibile con la configurazione ATP perché la necessità di muovere il busto ripetutamente avanti e indietro porterebbe a grosse perdite di attrito tra corpo e carena oppure alla realizzazione di una carena con sezione frontale maggiorata. La progettazione di un mezzo su misura per un atleta AP non è così stringente, perché la posizione reclinata è facilmente adattabile ad atleti con diverse stature e disabilità, infatti un mezzo reclinato può essere guidato anche da un atleta della categoria UCI H5. Dopo queste considerazioni si è optato per continuare la progettazione di un mezzo AP reclinato.

Rapporti di trasmissione

La configurazione scelta per il prototipo prevede due rami di trasmissione, il primo ramo tra corona fissata al misuratore di potenza SRM e pacco pignoni traslante e secondo ramo tra corona secondaria e pignone di ruota libera calettato sull'asse della ruota. Le due corone sono da 60 denti. Il pacco pignoni deve essere costituito da pignoni commerciali, quindi si procede all'acquisto di due set completi per poi fare le dovute sostituzioni, in quanto la soluzione desiderata non è disponibile commercialmente. Pacco pignoni commerciale da 11-13-15-17-19-21-24-28-32-37-42 e da 11-12-13-14-15-16-17-19-21-23-25. L'obiettivo è avere un pignone sufficientemente grande da poter partire con una cadenza non troppo ridotta e avere il minor numero di salti possibili nella cadenza sui piccoli pignoni, senza però sfruttare un numero di denti troppo ridotto, che peggiorerebbe l'efficienza. Configurazione finale (variabile in fase di collaudo) 14-15-16-17-19-21-24-28-32-37-42. Il pignone della ruota libera è da 18 denti. Nella Figura 30 si osservano le grandezze caratteristiche del calcolo. Velocità iniziale stimata a 15 km/h dopo la partenza con la spinta del lanciatore, cadenza di partenza sostenibile 35 RPM, RPM massimi al cambio rapporto successivo. Velocità raggiungibile massima 121 km/h.

Capitolo 3: Risultati

	CORONA	N. DENTI	i	Vmin		RPM min	V max		RPM max	
				m/s	km/h		m/s	km/h		
				PRIMO RAMO	PACCO PIGNONI	P1	42	0,70	4,17	15
P2	37	0,62	11,24			40,48	84,57	12,76	45,95	96
P3	32	0,53	12,76			45,95	83,03	14,76	53,13	96
P4	28	0,47	14,76			53,13	84,00	16,87	60,72	96
P5	24	0,40	16,87			60,72	82,29	19,68	70,84	96
P6	21	0,35	19,68			70,84	84,00	22,49	80,96	96
P7	19	0,32	22,49			80,96	86,86	24,86	89,48	96
P8	17	0,28	24,86			89,48	85,89	27,78	100,01	96
P9	16	0,27	27,78			100,01	90,35	29,52	106,26	96
P10	15	0,25	29,52			106,26	90,00	31,48	113,34	96
P11	14	0,23	31,48			113,34	89,60	33,73	121,44	96
SECONDO RAMO	CORONA		60							
	PIGNONE		18	0,30						

Figura 30: definizione rapporti di trasmissione, RPM e velocità.

Stabilità

Il grafico della Figura 31 e gli altri analoghi non riportati hanno permesso la definizione dell'angolo dell'asse di sterzo a 35°; l'avanzamento e di conseguenza l'avancorsa non sono stati ancora definiti, perché la loro scelta influisce sia sul modulo delle coppie sullo sterzo, sia sugli ingombri in carena. La scelta di questi due parametri è rinviata al controllo ingombri, con una revisione dei grafici di stabilità; spesso la scelta è il compromesso. L'angolo di 35° è stato scelto in quanto all'aumentare di quest'ultimo diminuisce la velocità minima dopo la quale lo sterzo viene equilibrato automaticamente, quindi il valore di 35° porta tale velocità ad essere 17 km/h, velocità molto prossima a quella di lancio alla partenza.

A pagina 42 erano stati indicati i parametri limite per carreggiata e passo del veicolo, nella Figura 32 è riportata una configurazione compromesso tra stabilità al ribaltamento e ingombro trasversale della carreggiata. Il valore di carreggiata è stato fissato a 350 mm mentre il passo può essere definito con la verifica ingombri in quando influisce in maniera infinitesimale sulla velocità limite di ribaltamento. Da notare l'influenza del passo sull'angolo di sterzata necessario ad effettuare una traiettoria di raggio 145 metri, importante in fase di definizione della sensibilità dello sterzo; nella Figura 32 il parametro variabile è il passo (evidenziato in giallo) e le due risposte sono l'angolo di sterzo e la velocità limite di ribaltamento (evidenziate in verde).

Capitolo 3: Risultati

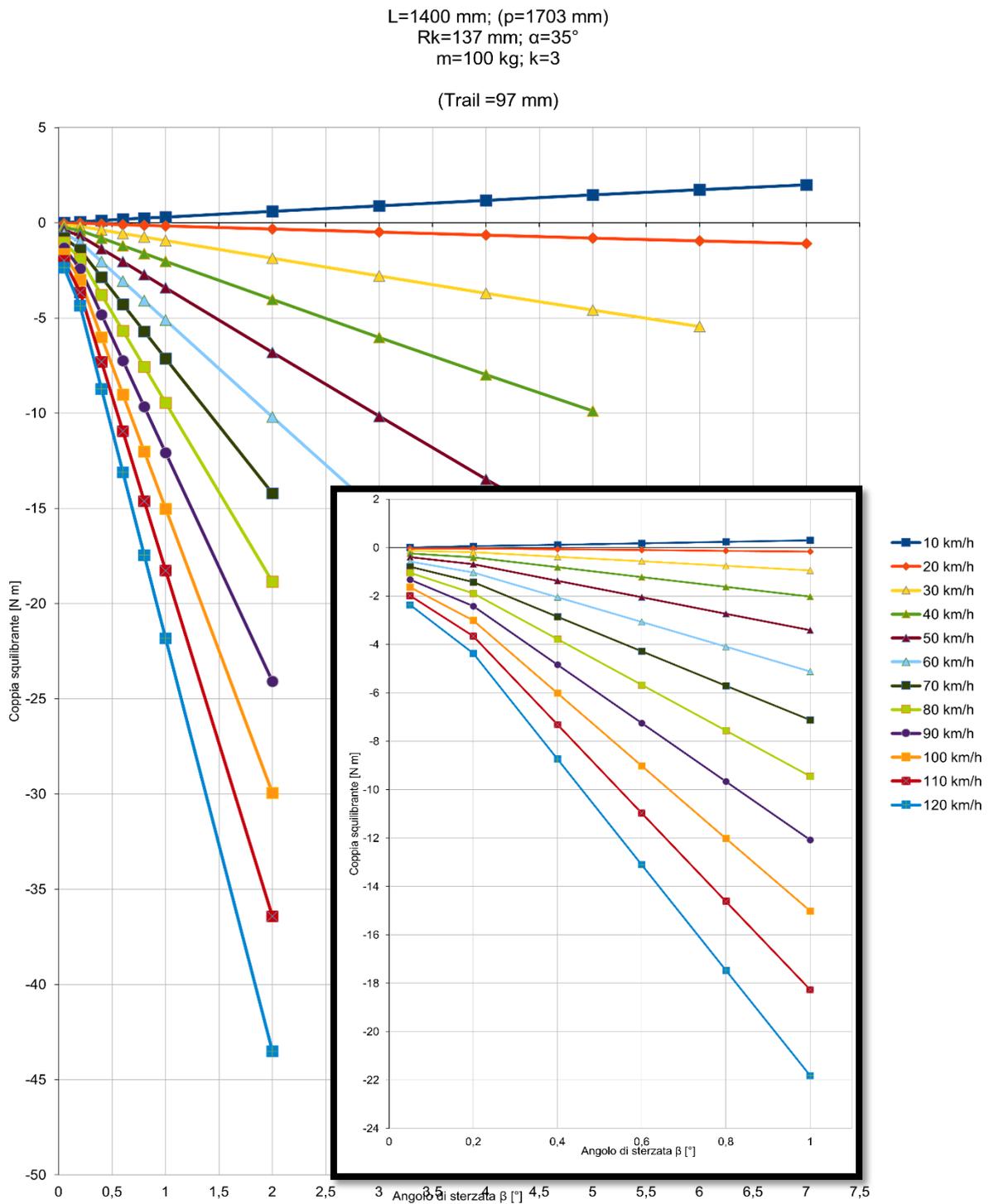


Figura 31: grafico angolo di sterzo/coppia squilibrante per la configurazione angolo dell'asse di sterzo=35°, avancorsa=97mm, avanzamento=137mm. Ingrandimento della zona 0 – 1° di sterzo.

Capitolo 3: Risultati

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	B [mm]	Passo [mm]	LP [mm]	β [°]	XG [mm]	k		
2	86,4	1100	350	9,04	550	2	P=peso [N]	
3	86,6	1200	350	8,30	600		LP=carreggiata [mm]	
4	86,7	1300	350	7,67	650		XG=posizione del baricentro	
5	86,8	1400	350	7,13	700		B=braccio forza peso	
6	86,9	1500	350	6,65	750		h=altezza baricentro	
7	87,0	1600	350	6,24	800		R=raggio curva	
8	87,0	1700	350	5,88	850		α =angolo di sterzo	
9	87,1	1800	350	5,55	900			
10	87,1	1900	350	5,26	950			
11								
12	camber [°]	0		massa [kg]	100			
13								
14	α [°]	B [mm]	h [m]	R [mm]	R [m]	a_max [m/s ²]	vmax [m/s]	vmax [km/h]
15	0,43466	86,4	0,4	145000	145	2,119	17,5	63,108
16	0,47418	86,6	0,4	145000	145	2,123	17,5	63,170
17	0,51369	86,7	0,4	145000	145	2,127	17,6	63,219
18	0,55321	86,8	0,4	145000	145	2,129	17,6	63,257
19	0,59273	86,9	0,4	145000	145	2,131	17,6	63,289
20	0,63224	87,0	0,4	145000	145	2,133	17,6	63,315
21	0,67176	87,0	0,4	145000	145	2,135	17,6	63,336
22	0,71128	87,1	0,4	145000	145	2,136	17,6	63,354
23	0,75079	87,1	0,4	145000	145	2,137	17,6	63,369

Figura 32: carreggiata fissa a 350 mm, passo variabile, risultati per traiettoria di raggio 145 metri evidenziati in verde.

Progettazione telaio

Come anticipato nel capitolo 2 il progetto non è in una fase sufficientemente avanzata per definire nel dettaglio i parametri, la forma e la tecnologia costruttiva. Le indicazioni alle quali si è giunti sono: la lunghezza del passo della handcycle influisce sull'angolo di sterzo necessario a percorrere una traiettoria circolare ed influenza la distanza tra ruota anteriore e movimento centrale, intendendo il ciclista il più possibile indietreggiato in carena (per ridurre gli ingombri e per migliorare la stabilità con un baricentro arretrato). Avendo stabilito che la distanza tra le spalle del ciclista e il movimento centrale ha un valore ben preciso quando si sceglie il ciclista, il passo della handcycle deve essere definito in modo da non avere una forcella e un supporto del movimento centrale troppo lunghi e per stabilire la sensibilità dello sterzo. I parametri di avancorsa e avanzamento devono essere stabiliti a loro volta con una verifica di ingombri, in quanto la ruota anteriore sterza intorno all'asse di sterzo, questo vuol dire che i due parametri influenzano l'ingombro interno alla carena e il foro nella carena che permette alla ruota di toccare il terreno. Le indicazioni sono che il foro della carena per la ruota deve essere il più piccolo possibile, il più arretrato possibile e in una zona prevalentemente tangenziale al flusso. Con la posizione dentro la carena del ciclista si stabilisce l'altezza del

baricentro del complesso handcycle-atleta, parametro importante per la stabilità laterale. Per avere un comportamento più stabile il baricentro deve essere il più basso possibile, senza compromettere l'aerodinamica: la posizione bassa del ciclista costringe ad avere una zona inferiore della carena molto piatta, condizione sfavorevole al mantenimento della laminarità del flusso, in fase di analisi aerodinamica di dettaglio e ci verifica degli ingombri in carena questo parametro dovrà essere stabilito con un compromesso tra aerodinamica e stabilità, prediligendo l'aerodinamica in quanto molto influente sul risultato finale.

Conclusione

Con il primo capitolo si sono presentate diverse soluzioni tecniche per lo sport dedicato alle persone disabili, soprattutto nel campo dell'handcycling da competizione, identificando le categorie, ATP e AP (*arm trunk power* e *arm power*), come possibili candidate ad un record di velocità su veicolo a propulsione umana carenato e basato sulla configurazione dell'handcycle. Dall'analisi degli articoli scientifici sull'argomento si sono identificati i principali parametri influenti sulla produzione di potenza, sull'efficienza e sull'ergonomia e il loro valore identificato come ottimale dalle prove di laboratorio. Il progetto Handcycle è tutt'ora in fase di avanzamento, mancando circa due anni alla competizione ci si reputa in fase iniziale. Secondo la tabella di marcia il progetto si considera in tempo. È stata effettuata la scelta tra ATP e AP con preferenza per la configurazione AP in quanto più aerodinamica, versatile e stabile rispetto alla ATP. La simulazione di performance sportiva con la potenza stimata e con i dati preliminari di aerodinamica ha consentito di affermare la competitività del progetto con l'attuale detentore del record. Le velocità massime calcolate ricadono nell'intervallo 105 - 115 km/h contro gli 82,03 km/h del record attuale. Le fasi del progetto non sono ancora arrivate all'ottimizzazione automatizzata della carena con il software Heeds, ma sono state disegnate ed analizzate circa 135 soluzioni finora. Alcuni parametri geometrici sono stati stabiliti dalle analisi di stabilità, ma altri sono stati lasciati liberi per facilitare la progettazione interna della carena in una seconda fase. La dimensione delle tre ruote è stata fissata con la scelta di cerchi ETRTO 406 e copertoncini Michelin Blue 35 mm. L'angolo dell'asse di sterzo è stato fissato a 35° secondo l'analisi di stabilità longitudinale e la carreggiata identificata dall'analisi della stabilità al ribaltamento è di 350 mm. Per permettere di raggiungere le velocità stimate è stato progettato il sistema di trasmissione a doppio ramo di catena con le due corone a 60 denti, il pacco pignoni misto con pignoni da 14-15-16-17-19-21-24-28-32-37-42 denti e la ruota libera da 18 denti.

Ringraziamenti

Un grande ringraziamento da parte di tutto il Team Policumbent nei confronti di Eaton Corporation Plc, il progetto Handcycle 2022 è stato realizzato grazie alla collaborazione con la sede italiana a Torino, il loro contributo è stato fondamentale per l'avvio del progetto, l'incontro con gli atleti e il budget messo a disposizione. Senza la partecipazione attiva di tutti gli studenti del Team Policumbent questo progetto non sarebbe stato così ricco e ben fondato, un mio personale ringraziamento e abbraccio a tutti i miei colleghi. Grazie a tutti. Con questo elaborato si conclude una parte della mia vita, ma si aprono tante opportunità che il Politecnico di Torino elargisce a tutti gli studenti, grazie a tutti i professori e al personale che rende questo possibile, sono felice della scelta fatta e porterò sempre con me questi anni formativi fantastici. Dietro ad uno studente che cresce c'è sempre una grande famiglia che sostiene in tutte le occasioni con il massimo amore possibile, grazie mamma, papà, sorella e tutti quelli che mi sono stati vicini, fisicamente e con il cuore. Quasi tutto il percorso universitario sono stato accompagnato dalla mia fidanzata e la ringrazio per essere al mio fianco con amore e affetto. Ultimo ma non meno importante un grazie a tutti i colleghi di corso, amici e ciclisti con cui ho passato tanti momenti felici. Grazie a tutti!

Team Policumbent

Responsabile accademico	Cristiana Delprete
Responsabile tecnico	Paolo Baldissera
Team leader	Lucrezia Pasi
Project manager Handcycle	Nicola Dan Maries
Project manager Maschile	Anatolii Zahar
Project manager Femminile	Davide Gavatorta
Rider	Andrea Gallo Vittoria Spada
Aerodinamica	Lucas Fernandes (responsabile) Andrea Manavella Cristiano Bicchieri Davide Caudera Davide Monni Domenico Edoardo Sfasciamuro Federica Spoto Francesco Lopez Rachele Massetti Tiziano Guglielmini Vincenzo Cavalieri
Analisi Dati	Felix Ackermann (responsabile) Marco Fioretti Michele Morani Simone Mollah Stefano Gorla Vincenzo Maria Vitale
Comunicazione	Stefano Rizzi (responsabile) Eleonora Colella
Elettronica	Stefano Loscalzo (responsabile) Alessandro Casalegno Davide Gavatorta Gabriele Belluardo Lorenzo Montalto Salvatore Arena

FEM	Riccardo Grossi (responsabile) Nicola Dan Maries (responsabile) Luigi Tresca Francesco Pietrangelo Saulius Pakstys Matteo Moscufo Alessia Dellaria Edoardo Besenval
Gestione	Alberto Congedi (responsabile) Andrea Casto (responsabile) Pierfrancesco Bianca (responsabile) Fabio Spina (responsabile) Carlo Mantovani
Progettazione meccanica	Andrea Gallo (responsabile) Anatolii Zahar (responsabile) Alberto Larocca Alessandro Di Gesù Antonio Patuelli Carlo Agosto Claudia Barattini Dario Torresan Erica Di Meglio Lucrezia Pasi Matteo Ferranti Matteo Stabbio Niccolò Rovano Nicola Dan Maries Nicolò Gallo Paolo Bigliani

Citazioni

1. Arion4: design and build of a four record-breaking arm-powered HPV, M. Head, N. Fernandez, Human Power number 61, March 2019, ISSN 0898-6908, International Human Powered Vehicle Association.
2. Arnet U, van Drongelen S, Schlussek M, Lay V, van der Woude LHV, Veeger HEJ. The effect of crank position and backrest inclination on shoulder load and mechanical efficiency during handcycling. Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports. 2014;24(2):386-394. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2012.01524.x>
3. Christian Krämer , Gabriel Schneider , Harald Böhm , Isabella Klöpfer-Krämer & Veit Senner (2009) Effect of different handgrip angles on work distribution during hand cycling at submaximal power levels, Ergonomics, 52:10, 1276-1286, DOI: 10.1080/00140130902971916
4. Churton, E., Keogh, J.W. Constraints influencing sports wheelchair propulsion performance and injury risk. BMC Sports Sci Med Rehabil 5, 3 (2013). <https://doi.org/10.1186/2052-1847-5-3>
5. Durante, Leonardo, and Baldissera, Paolo. CFD Streamlined Bodies Simulation and Optimization for Natural Laminar Flow Provided by STAR-CCM and HEEDS Softwares (2019). Politecnico di Torino - Thesis
6. Elisabeth Schültke (2001) Ludwig Guttmann: Emerging Concept of Rehabilitation after Spinal Cord Injury, Journal of the History of the Neurosciences: Basic and Clinical Perspectives, 10:3, 300-307
7. Goosey-Tolfrey VL, Alfano H, Fowler N (2008) The influence of crank length and cadence on mechanical efficiency in hand cycling. Eur J Appl Physiol 102:189–194. doi:10.1007/s00421-007-0576-7
8. Gross, Albert C., Chester R. Kyle, and Douglas J. Malewicki. "The Aerodynamics of Human-powered Land Vehicles." Scientific American 249, no. 6 (1983): 142-53. Accessed October 24, 2020. <http://www.jstor.org/stable/24969056>.
9. International Human Powered Vehicle Association - <http://www.ihpva.org/hpvarech.htm>
10. International Human Powered Vehicle Association - <http://www.ihpva.org/rules.htm>
11. Kees van Breukelen. M.D.: Arm-Power versus Arm-Trunk-Power - An Ergonomic Classification of Handbikes

12. Krämer, C., Hilker, L. & Böhm, H. Influence of crank length and crank width on maximal hand cycling power and cadence. *Eur J Appl Physiol* 106, 749–757 (2009). <https://doi.org/10.1007/s00421-009-1062-1>
13. Marco Belloli, Federico Cheli, Ilmas Bayati, Stefano Giappino, Fabio Robustelli, *Handbike Aerodynamics: Wind Tunnel Versus Track Tests*, Procedia Engineering, Volume 72, 2014, Pages 750-755, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.127>.
14. Martin JC, Spirduso WW. Determinants of maximal cycling power: crank length, pedaling rate and pedal speed. *Eur J Appl Physiol*. 2001 May;84(5):413-8. doi: 10.1007/s004210100400. PMID: 11417428.
15. Paul Mannion, Yasin Toparlar, Bert Blocken, Eoghan Clifford, Thomas Andrienne, Magdalena Hajdukiewicz, Analysis of crosswind aerodynamics for competitive hand-cycling, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 180, 2018, Pages 182-190, ISSN 0167-6105, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.08.002>.
16. Quittmann, O.J., Meskemper, J., Abel, T. et al. Kinematics and kinetics of handcycling propulsion at increasing workloads in able-bodied subjects. *Sports Eng* 21, 283–294 (2018). <https://doi.org/10.1007/s12283-018-0269-y>
17. Stefan Litzenberger, Franziska Mally, Anton Sabo, Influence of Different Seating and Crank Positions on Muscular Activity in Elite Handcycling - A Case Study, *Procedia Engineering*, Volume 112, 2015, Pages 355-360, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.262>.
18. van der Woude LH, Bosmans I, Bervoets B, Veeger HE. Handcycling: different modes and gear ratios. *J Med Eng Technol*. 2000 Nov-Dec;24(6):242-9. doi: 10.1080/030919000300037168. PMID: 11315650.
19. van der Woude LHV, Dallmeijer AJ, Janssen TWJ, et al: Alternative modes of manual wheelchair ambulation: An overview. *Am J Phys Med Rehabil* 2001;80:765–777
20. van der Woude, Lucas HV, et al. Mechanical advantage in wheelchair lever propulsion: effect on physical strain and efficiency. *Journal of rehabilitation research and development*, 1997, 34: 286-294.
21. Vegter RJK, Mason BS, Sporrel B, Stone B, van der Woude LHV, Goosey-Tolfrey VL (2019) Crank fore-aft position alters the distribution of work over the push and pull phase during synchronous recumbent handcycling of able-bodied participants. *PLoS ONE* 14(8): e0220943. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220943>