

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale



Aerodinamica di uno speed skier

Analisi con strumenti di fluidodinamica
computazionale

Relatore

Domenic D'AMBROSIO

Candidato

Matteo OCCHETTI

Anno Accademico 2019/2020

Ringraziamenti

Grazie al Politecnico di Torino, per gli intensi anni vissuti insieme, con passione e per passione. Grazie al professor Domenic D'Ambrosio, che da subito ha accolto la sfida e mi ha supportato in questo lavoro, nonostante le difficoltà nel collaborare a distanza. Grazie a Samuele Capello per la sua disponibilità e il suo desiderio di puntare sempre al massimo: è un onore lavorare per un amico che rappresenta l'Italia nel mondo.

Grazie a mamma e papà, supporto incondizionato in questi anni faticosi di studio e lavoro. Grazie per avermi capito nonostante non avessi il libretto di istruzioni. Grazie per avermi aiutato a coltivare il desiderio di moltiplicare l'amore ricevuto, per avermi testimoniato che non si vive per qualcosa ma per qualcuno.

Grazie a Manuela e Cristiana, per aver camminato al mio fianco anche quando è stato difficile starmi vicino. Grazie per avermi seguito, per avermi guidato quando necessario, per non aver mai tenuto il conto. Vi voglio bene.

Grazie ai miei nonni, per avermi insegnato che il duro lavoro ripaga sempre, perché chi semina raccoglie sempre qualcosa. Grazie perché pensare a voi, così orgogliosi in questo giorno, mi ha dato ulteriore forza e motivazione nel lottare per questo traguardo.

Grazie a Roberta. Ci sono stati momenti in cui hai creduto in me più di quanto lo stessi facendo io. Se penso alla nostra casa e alla nostra futura famiglia sento che il cuore va più veloce. Ti amo.

Grazie a zio Andrea, zia Giusy, zio Davide, zia Federica e zio Marco. Vi ho sempre sentiti vicini, malgrado le distanze e i silenzi. Grazie per il vostro supporto e il vostro affetto, per essere famiglia, nonostante tutto.

Grazie a Davide, per tutta la strada camminata insieme, da sempre.

Grazie ad Andrea, Matteo, Fabio e Fabio, conoscervi è stata una boccata d'ossigeno per la mia vita. Grazie per tutto ciò che abbiamo costruito e che costruiremo ancora insieme. Far parte della famiglia Oxegen è libertà di espressione, stimolo creativo, sognare ad occhi aperti.

Grazie a Francesco e Simone, compagni d'avventura negli anni universitari. Grazie per la vostra presenza, costante e preziosa, per essere stati d'esempio e motivo di ammirazione.

Grazie agli amici e ai fratelli che da sempre condividono un pezzo della loro vita con me, ai fratelli della Comunità Educatori, alla Comunità Famiglia. Siete vita che riempie le mie giornate, un fiume di persone che da sempre mi accompagna.

Grazie ad Andrea, Gabriele, Giorgia, Martina e a tutti i ragazzi che mi sono stati affidati in questi anni. Vedervi crescere, sbagliare e gioire è un privilegio per il quale ringrazio ogni giorno. Vi porto nel mio cuore, con l'affetto di cui sono capace, umanamente imperfetto ma sicuramente sincero, profondo e trasparente.

Grazie a Don Paolo, per avermi permesso di vedere che è possibile vivere in un modo diverso, libero, senza mai smettere di puntare in alto, senza mai accontentarsi, ma ricordandosi sempre che la vita ha valore solo se spesa per qualcosa che vale.

Sommario

Lo sci di velocità è una specialità sciistica tanto antica quanto semplice: l'obiettivo di ogni atleta consiste nello scendere da un pendio in forte inclinazione per cercare di raggiungere la massima velocità possibile. Nonostante la lunga storia di questo sport (il primo record risale al 1931) lo sviluppo in termini di ricerca tecnologica è stato limitato: al contrario delle più famose discipline di sci alpino e salto con gli sci, lo sci di velocità, al netto di alcuni test svolti in galleria del vento, è stato oggetto di pochissimi studi numerici di fluidodinamica computazionale.

L'obiettivo di questo lavoro è quello di analizzare l'aerodinamica di un atleta attraverso l'utilizzo di codici di calcolo CFD e, dopo averne dimostrata la validità, procedere ad un primo tentativo di ottimizzazione e miglioramento delle prestazioni. Lo studio ha come oggetto l'atleta della nazionale italiana Samuele Capello: il modello CAD è realizzato seguendo fedelmente la corporatura del giovane sciatore.

I risultati dello studio sono positivi dal punto di vista della validazione dell'analisi: i valori ottenuti sono comparabili ai risultati disponibili in letteratura e relativi a test in galleria del vento. Inoltre, le operazioni di miglioramento e ottimizzazione permettono un notevole incremento delle prestazioni.

Questo lavoro vuole proporsi come apripista per un inserimento sempre maggiore della CFD nel mondo dello sci e in particolare nello sci di velocità: eventuali lavori futuri potranno integrare studi parametrici e problemi di ottimizzazione numerica, raffinando la precisione dell'analisi fluidodinamica.

Indice

Elenco delle tabelle	VII
Elenco delle figure	VIII
Glossario	XI
1 Speed ski: storia e regolamento	1
1.1 Introduzione	1
1.2 Competizioni ed equipaggiamento	1
1.3 Coppa del Mondo	2
1.4 Record mondiali	2
1.4.1 Maschile	2
1.4.2 Femminile	2
1.4.3 Paralimpico maschile	2
1.5 Olimpiadi	2
1.6 Regolamento FIS	3
1.6.1 Joint regulations for speed skiing	3
2 Studio dinamico preliminare	6
2.1 Introduzione	6
2.2 Modello fisico	6
2.2.1 Approssimazioni ed ipotesi	7
2.3 Procedura di calcolo	8
2.3.1 Studio parametrico	9
2.4 Codice MATLAB	9
2.5 Risultati	12
3 Modello CAD	15
3.1 Introduzione	15
3.2 MakeHuman	15
3.3 Blender	18

3.4	MeshLab	21
3.5	NetFabb	22
3.6	Solidworks	23
3.6.1	Manichino	23
3.6.2	Scarponi	24
3.6.3	Paraschiena	26
3.6.4	Casco	27
3.6.5	Spoiler	28
3.6.6	Assieme	29
3.6.7	Esportazione	29
4	Ambiente di simulazione: Star-CCM+	30
4.1	Importazione CAD	30
4.2	Generazione parti	33
4.3	Dominio di calcolo e condizioni al contorno	36
4.4	Generazione mesh	37
4.5	Mesh refinement	39
4.6	Modello fisico	43
4.6.1	Modello di turbolenza	45
4.6.2	Simulazione stazionaria	45
5	Analisi, miglioramento e ottimizzazione	46
5.1	Posizione dello sciatore	46
5.1.1	Posizione 1	48
5.1.2	Posizione 2	49
5.1.3	Posizione 3	50
5.1.4	Posizione 4	51
5.1.5	Risultati	52
5.2	Casco	56
5.2.1	Casco 1	56
5.2.2	Casco 2	56
5.2.3	Casco 3	57
5.2.4	Incidenza	59
5.2.5	Risultati	60
5.3	Spoiler	62
5.3.1	Risultati	62
6	Conclusioni e sviluppi futuri	64
6.1	Conclusioni	64
6.1.1	Anomalia su casco e braccia	66
6.2	Sviluppi futuri	69

A Regolamento FIS	71
A.1 The international ski competition rules (ICR)	71
A.1.1 200 Joint Regulations for all Competitions	71
A.1.2 201 Classification and Types of Competitions	72
A.1.3 202 FIS Calendar	73
A.1.4 203 Licence to participate in FIS Races (FIS Licence)	75
A.1.5 204 Qualification of Competitors	77
A.1.6 205 Competitors Obligations and Rights	77
A.1.7 206 Advertising and Sponsorship	78
A.1.8 207 Competition Equipment and Commercial Markings	80
A.1.9 208 Exploitation of Electronic Media Rights	82
A.1.10 209 Film Rights	86
A.1.11 210 Organisation of Competition	86
A.1.12 211 The Organisation	86
A.1.13 212 Insurance	87
A.1.14 213 Programme	88
A.1.15 214 Announcements	88
A.1.16 215 Entries	88
A.1.17 216 Team Captains' Meetings	89
A.1.18 217 Draw	89
A.1.19 218 Publication of Results	89
A.1.20 219 Prizes	91
A.1.21 220 Team Officials, Coaches, Service Personnel, Suppliers and Firms' Representatives	91
A.1.22 221 Medical Services, Examinations and Doping	92
A.1.23 222 Competition Equipment	93
A.1.24 223 Sanctions	94
A.1.25 224 Procedural Guidelines	96
A.1.26 225 Appeals Commission	98
A.1.27 226 Violation of Sanctions	99
A.2 Joint regulations for speed skiing	100
A.2.1 1230 Speed Skiing Events	100
A.2.2 1231 Organisation	101
A.2.3 1232 The Course	102
A.2.4 1233 Technical Organisation	105
A.2.5 1234 Competition Equipment	111
A.2.6 1235 Competitors' Obligations	114
A.2.7 1236 Calculation of Race Points	114
A.2.8 1237 Venue	115
A.2.9 1238 Questions not Covered by Special Rules	115

Elenco delle tabelle

2.1	Valori in input - procedura di calcolo	12
2.2	Risultati procedura di calcolo	13
4.1	Dimensioni del dominio di calcolo	35
4.2	Condizioni al contorno sulle superfici di delimitazione del dominio	37
4.3	Dimensioni del volume Near	37
4.4	Dimensioni del volume Very Near	38
4.5	Dimensioni del volume Near Wake	38
4.6	Parametri Default Controls	38
5.1	Parametri caratteristici della posizione 1	48
5.2	Parametri caratteristici della posizione 2	49
5.3	Parametri caratteristici della posizione 3	50
5.4	Parametri caratteristici della posizione 4	51
5.5	Risultati delle simulazioni sulle 4 posizioni	52
5.6	Incidenze dei 3 caschi	59
5.7	Risultati delle simulazioni con i 3 differenti caschi	60
5.8	Risultato della simulazione con gli spoiler	62
6.1	Andamento della resistenza aerodinamica diviso per componenti	64
A.1	Organizzazione di una tappa di Coppa del Mondo	104
A.2	Attribuzione dei punteggi in base alla posizione finale	110

Elenco delle figure

1.1	Logo FIS	3
2.1	Schema delle forze agenti su uno sciatore in discesa	7
2.2	Finestra di input - codice Matlab	9
2.3	Andamento distanza percorsa	13
2.4	Procedura di calcolo - andamento velocità e accelerazione	14
3.1	Logo MakeHuman	15
3.2	Schermata iniziale di MakeHuman	16
3.3	Manichino con le dimensioni di Samuele Capello	17
3.4	Finestra di esportazione da MakeHuman	17
3.5	Logo Blender	18
3.6	Finestra di importazione in Blender	19
3.7	Schermata principale di Blender	20
3.8	Posizione del manichino	20
3.9	Logo MeshLab	21
3.10	Selezione di superfici autointersecanti su MeshLab	21
3.11	Logo NetFabb	22
3.12	Riparazione mesh su NetFabb	22
3.13	Logo Solidworks	23
3.14	Manichino importato su Solidworks	23
3.15	Realizzazione guanti	24
3.16	Profili caratteristici dello scarpone	25
3.17	Scarpone completo	26
3.18	Profili caratteristici del paraschiena	26
3.19	Paraschiena completo	27
3.20	Profili caratteristici del casco	27
3.21	Casco completo	28
3.22	Spoiler	28
3.23	Assieme completo	29

4.1	Logo Star-CCM+	30
4.2	Albero delle funzioni e degli oggetti in Star-CCM+	31
4.3	CAD importato in Star-CCM+	31
4.4	Piani di riferimento su Solidworks	32
4.5	Operazione di duplicazione delle parti	32
4.6	Operazione di unione delle parti duplicate	33
4.7	Operazione di creazione della parte geometrica	34
4.8	Superfici divise per sezioni significative	34
4.9	Dominio di calcolo	35
4.10	Operazione di sottrazione	35
4.11	Operazione di sottrazione	36
4.12	Automated mesh	39
4.13	Definizione della tabella XYZ	40
4.14	Diagramma a blocchi della procedura di mesh refinement	41
4.15	Esempio di grafico della resistenza al termine di una simulazione stazionaria	45
5.1	Parametri di definizione della posizione	47
5.2	Posizione 1	48
5.3	Posizione 2	49
5.4	Posizione 3	50
5.5	Posizione 4	51
5.6	Configurazione per le simulazioni al variare della posizione	52
5.7	Posizione 1: distribuzione resistenza aerodinamica	53
5.8	Posizione 2: distribuzione resistenza aerodinamica	53
5.9	Posizione 3: distribuzione resistenza aerodinamica	54
5.10	Posizione 4: distribuzione resistenza aerodinamica	54
5.11	Casco 1	56
5.12	Simon Billy	56
5.13	Casco 2 - Simon Billy	57
5.14	Visualizzazione della distribuzione di pressioni sul piano longitudinale	57
5.15	Visualizzazione della distribuzione di pressioni sul corpo dello sciatore	58
5.16	Casco 3 indossato dallo sciatore	58
5.17	Casco 1: incidenza	59
5.18	Casco 1: ripartizione resistenza aerodinamica	60
5.19	Casco 2: ripartizione resistenza aerodinamica	61
5.20	Casco 3: ripartizione resistenza aerodinamica	61
5.21	Casco 3: zona di depressione dietro al casco	62
5.22	Sciatore con spoiler	62
5.23	Posizione 4 - casco 3 - spoiler: ripartizione resistenza aerodinamica .	63

6.1	Dispersione: andamento della resistenza aerodinamica diviso per componenti	65
6.2	Istogramma: andamento della resistenza aerodinamica diviso per componenti	66
6.3	Sezione laterale (pos4casco3): andamento del modulo della velocità	67
6.4	Sezione laterale (pos4casco3spoiler): andamento del modulo della velocità	67
6.5	Sezione frontale (0,25 m dall'origine - pos4casco3): componente verticale della velocità	68
6.6	Sezione frontale (0,25 m dall'origine - pos4casco3spoiler): componente verticale della velocità	68
6.7	Sezione frontale (0,15 m dall'origine - pos4casco3): componente verticale della velocità	69
6.8	Sezione frontale (0,15 m dall'origine - pos4casco3spoiler): componente verticale della velocità	69
A.1	Dimensioni massime delle carenature	113
A.2	Indicazioni per il display board	115

Glossario

FIS

Federazione Internazionale Sci

FISI

Federazione Italiana Sport Invernali

S1

Categoria dello sci di velocità nella quale si adottano materiali specifici

S2

Categoria dello sci di velocità nella quale si adottano materiali tipici della discesa libera

S2J

Categoria dello sci di velocità, riservata agli under 21, nella quale si adottano materiali tipici della discesa libera

KL

Sigla che indica la specialità dello sci di velocità, detto anche chilometro lanciato

WC

Coppa del Mondo

WSC

Campionati del Mondo

CAD

Computer-aided design: settore dell'informatica volto all'utilizzo di tecnologie software e in particolare della computer grafica per supportare l'attività di progettazione (design) di manufatti sia virtuali che reali

CFD

Computational fluid-dynamics: analisi dei sistemi che coinvolgono il movimento dei fluidi, scambio di calore ed i fenomeni a loro relativi, come ad esempio reazioni chimiche, attraverso l'uso di simulazioni tramite computer

Capitolo 1

Speed ski: storia e regolamento

1.1 Introduzione

Lo sci di velocità (speed skiing), noto anche come chilometro lanciato (abbreviato in KL), è una specialità sciistica che consiste nello scendere da un pendio in forte inclinazione per cercare di raggiungere la più alta velocità possibile. Questa viene rilevata nel punto più basso della pista in un tratto cronometrato di 100 m. è il secondo sport non motorizzato più veloce (il primo è lo speed skydiving) ed il primo su terreno.

1.2 Competizioni ed equipaggiamento

Le competizioni di KL si dividono in tre categorie:

- Speed One (S1), dove si adottano materiali specifici per lo sci di velocità.
- Speed Downhill (SDH o S2), dove gli atleti gareggiano con l'attrezzatura da discesa libera.
- Speed Junior (S2J), dove gli atleti sotto i 21 anni gareggiano con l'attrezzatura da discesa libera.

I materiali speciali per lo sci di velocità sono ad elevato contenuto tecnico/-tecnologico: sci da 2,38 m di lunghezza con punte basse e smorzamento delle vibrazioni, casco anatomico ed aerodinamico, tuta rivestita in polipropilene per ridurre l'attrito con l'aria, bastoncini ricurvi per adattarsi alla forma del corpo e scarponi aerodinamici inclinati in avanti dotati di spoiler posteriori.

1.3 Coppa del Mondo

Il circuito di Coppa del Mondo prevede solitamente un numero di gare attorno alla decina. Usualmente le località sede di tappa sono:

- Hundfjället/Salen (Svezia)
- Idre (Svezia)
- Pas de la Casa/Grandvalira (Andorra)
- Salla (Finlandia)
- Sun Peaks (Canada)
- Vars (Francia)
- Verbier (Svizzera)

1.4 Record mondiali

1.4.1 Maschile

Il record mondiale nel chilometro lanciato appartiene all'italiano **Ivan Origone**, che ha raggiunto la velocità di 254,958 km/h il 26 marzo 2016 sulla pista di Vars.

1.4.2 Femminile

Il record del mondo femminile appartiene dal 2016 all'italiana **Valentina Greggio**, che il 26 marzo 2016 ha raggiunto i 247,083 km/h sulla pista di Vars.

1.4.3 Paralimpico maschile

Michael Milton (Australia), 213,65 km/h, 19 aprile 2006.

1.5 Olimpiadi

Lo Sci di velocità ai XVI Giochi olimpici invernali, che si svolsero nel 1992 ad Albertville (Francia), fu presente come sport dimostrativo e fu l'unica apparizione della disciplina ai Giochi olimpici invernali. La gara maschile fu vinta dal francese Michael Prufer, quella femminile dalla finlandese Tarja Mulari; entrambi nell'occasione stabilirono anche il nuovo record del mondo. Entrambe le gare furono disputate a Les Arcs.

1.6 Regolamento FIS

Il regolamento ufficiale scritto e pubblicato dalla FIS (Federazione Internazionale Sci) è composto da due sezioni principali: la prima comune a tutte le discipline sportive regolamentate dalla FIS (The international ski competition rules), mentre la seconda è specifica per lo sci di velocità (Joint regulations for speed skiing).



Figura 1.1: Logo FIS

1.6.1 Joint regulations for speed skiing

Qui di seguito sono riportati, tradotti, gli articoli più rilevanti ai fini del presente lavoro.

1232 - Tracciato di gara

1232.2 Specificazione:

Dal punto più alto al più basso la pista comprende:

- zona di partenza
- zona di rilevamento velocità
- zona di uscita

1232.2.1 Zona di partenza

Zona superiore della pista, deve essere dotata di almeno 3 punti di partenza con un'area di attesa associata. L'area di attesa per ciascun punto di partenza deve essere recintata in modo sicuro sul lato in discesa per impedire al personale e al materiale di scivolare.

1232.2.2 Zona di rilevamento velocità

Gli ultimi 25 o 100 metri¹ del percorso di gara vengono utilizzati come zona per misurare la velocità di ciascun concorrente. La zona di temporizzazione per le tracce WC² e WSC³ deve essere lunga 100 metri. La lunghezza deve essere misurata in modo molto preciso e controllata regolarmente per garantire che le misurazioni della velocità rimangano valide.

1232.2.3 Zona di uscita

Quest'area deve essere abbastanza lunga, considerando le velocità raggiunte, per garantire la sicurezza dei concorrenti. La pendenza deve diminuire progressivamente.

1233 - Misurazioni

1233.3 Misurazione del tempo

1233.3.1 Il cronometraggio viene effettuato utilizzando un orologio collegato via cavo con una precisione di misurazione minima di 1/1000 sec per la zona di misurazione di 100 m e un minimo di 1/10.000 sec per la zona di 25 m e controllato da due celle fotoelettriche posizionate all'ingresso e all'uscita della zona di misurazione⁴. Le velocità saranno calcolate con la distanza e la differenza di tempo, con una precisione di 1/100 km/h.

1234 - Equipaggiamento

1234.1 Sci

Gli sci della categoria S1 devono avere una lunghezza compresa tra 2,20 e 2,40 m. Non devono pesare più di 15,0 kg per paio, compresi tutti gli attacchi, che devono essere adatti all'alta velocità e non devono avere appendici aerodinamiche aggiunte. Gli sci di categoria S2 e S2J devono essere sci da discesa di produzione standard, come definiti nelle attuali o precedenti specifiche dell'attrezzatura FIS, e tra 210 e 225 cm di lunghezza.

1234.3 Bastoncini

I bastoncini sono obbligatori. Devono essere lunghi almeno 1 m (misurati in linea retta tra le estremità) e un paio non deve pesare più di 2 kg. I cestini/anelli sono

¹A seconda della categoria, S1 o S2

²Coppa del Mondo

³Campionati del Mondo

⁴Vengono misurate due velocità istantanee, la più alta viene considerata valida per la gara

obbligatori, devono avere un diametro di almeno 3 cm, tra 3 e 10 cm di lunghezza e non devono essere posizionati a più di 5 cm dall'estremità inferiore del bastoncino, con il diametro maggiore nella parte più bassa. Le maniglie, poste nella parte più alta dei bastoncino e senza i laccetti, devono essere prive di parti appuntite o sporgenti, come l'intero bastoncino.

1234.3.1 Durante l'uso, l'atleta deve tenere i bastoncini al limite superiore, ovvero non devono sporgere oltre la posizione delle mani.

1234.5 Scarponi

Tutti gli scarponi devono essere modello standard. Gli scarponi non possono pesare più di 6 kg per paio. Gli scarponi possono non avere appendici aerodinamiche aggiunte ma possono essere parzialmente coperti dalle gambe della tuta da sci. Gli scarponi devono poter essere aperti a mano e senza l'uso di strumenti.

1234.6 Casco

Per i concorrenti della S1, è obbligatorio un casco (il casco interno), che copre completamente la testa dell'atleta e deve essere munito di una protezione per il viso. Deve essere fissato saldamente con un sottogola e una fibbia di sicurezza (sono vietati doppi anelli metallici). Il casco e la testa devono essere separati con uno strato di schiuma non inferiore a 0,5 cm (sotto pressione naturale). È possibile aggiungere un'ulteriore protezione per il collo e il viso (l'elmetto esterno), ma non devono presentare protuberanze pericolose e devono separarsi dall'elmetto protettivo di base in caso di caduta. Questo accoppiamento deve essere normalmente effettuato mediante l'uso di 2 o più viti di plastica frangibili o con punti di colla per tenere insieme le 2 parti. Non può superare i 40 cm in qualsiasi dimensione, compresi imbottitura e guarnizioni flessibili. Non deve pesare più di 2 kg in toto (sia interno che esterno). I concorrenti possono utilizzare caschi interni conformi alle norme CE 1077 e dotati di un sistema di fissaggio del casco esterno approvato accompagnato da un certificato del produttore. Nel caso di tali caschi, il test circolare viene aumentato a 48 cm di diametro.

1234.7 Carenature

Gli atleti possono indossare carenature posteriori con le seguenti restrizioni:

- Ogni carenatura non può superare 1 kg di peso, deve essere costruita con un materiale flessibile, non deve coprire o inibire il funzionamento dell'attacco dello sci e non deve causare lesioni con la rottura.
- La profondità massima delle carenature, misurata perpendicolarmente alla gamba, non deve mai superare i 30 cm dalla carenatura anteriore.
- Le carenature anteriori devono essere arrotondate e seguire la forma standard dello stivale.

Capitolo 2

Studio dinamico preliminare

2.1 Introduzione

Lo studio dinamico descritto in questo capitolo ha l'obiettivo di determinare l'ordine di grandezza della resistenza aerodinamica nelle condizioni del record del mondo. La geometria del piano inclinato è stata costruita sulle misure della pista francese di Vars, sulla quale sono stati registrati tutti i record del mondo e attualmente è considerata la pista più veloce nel circuito di Coppa del Mondo. Trattandosi di un calcolo preliminare le approssimazioni inserite nel modello sono numerose e verranno elencate dettagliatamente nelle sezioni successive.

2.2 Modello fisico

Il profilo del pendio discendente può essere assimilato ad un piano inclinato, dove lo sciatore rappresenta la massa in discesa. Le forze in gioco sono le seguenti:

- Peso dello sciatore, diretto verso il basso. Scomponibile in componente parallela e perpendicolare al piano inclinato.
- Resistenza d'attrito, diretta parallelamente al piano inclinato e orientata in verso opposto al moto. Proporzionale, a meno del coefficiente d'attrito, alla componente del peso perpendicolare al piano.
- Resistenza aerodinamica, diretta parallelamente al piano inclinato e orientata in verso opposto al moto.
- Portanza, diretta perpendicolarmente al piano inclinato e orientata verso l'alto. In questo studio preliminare il valore della portanza viene trascurato.

- Forza risultante, parallela al piano inclinato, ottenuta come differenza tra la componente parallela della forza peso meno forza d'attrito e resistenza aerodinamica.

Le forze appena descritte sono disposte nel modo seguente:

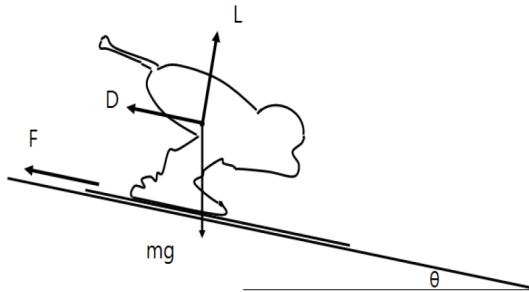


Figura 2.1: Schema delle forze agenti su uno sciatore in discesa

La geometria del profilo è descritta dai seguenti parametri geometrici:

- θ : angolo indicativo della pendenza del profilo.
- h : dislivello complessivo.
- d : proiezione sul piano orizzontale del piano inclinato.
- s_{fin} : lunghezza del piano inclinato.

2.2.1 Approssimazioni ed ipotesi

- Geometria del piano inclinato: la pista di Vars presenta un dislivello complessivo di 435 m, una pendenza massima del 98,5% ed una pendenza media del 52,5%. Il modello è stato costruito considerando solamente il dato del dislivello e quello della pendenza media: l'ipotesi è corretta dal punto di vista geometrico, poiché i punti iniziale e finale coincidono con quelli reali, ma dal punto di vista dinamico (ed aerodinamico) vengono trascurate tutte le variazioni di intensità delle forze in gioco al variare della pendenza, ed essendo esse non conservative (a parte le forze gravitazionali) c'è discrepanza tra i loro valori nei diversi punti della discesa.
- Attrito: il modello prevede di mantenere costante il coefficiente d'attrito, trascurando tutte le ipotesi di attrito Coulombiano per cui la forza d'attrito ha un andamento variabile con la velocità relativa tra le superfici in esame.

- Contributo della portanza all'equilibrio dinamico: conseguenza principale è una sovrastima dell'attrito calcolato, poiché un contributo di portanza, anche minimo, causerebbe una diminuzione in modulo della risultante delle forze normale al piano.
- Densità: calcolata come valore medio in atmosfera standard tra la quota di arrivo e di partenza, senza tenere conto quindi dell'andamento non perfettamente lineare della densità all'aumentare della quota.
- $c_D S$: il prodotto tra il coefficiente di resistenza e la superficie frontale è un dato di input nella procedura di calcolo, mentre può variare con il numero di Reynolds.

2.3 Procedura di calcolo

La procedura di calcolo ha come obiettivo il calcolo di velocità, accelerazione e resistenza aerodinamica in tutti i punti della discesa dal pendio, applicando le approssimazioni e le ipotesi descritte in precedenza:

1. Dati di input:

- m : massa dello sciatore ($W = mg$: peso dello sciatore)
- $c_D S$: prodotto tra il coefficiente di resistenza e la superficie frontale dello sciatore
- ρ : densità dell'aria
- μ : coefficiente d'attrito
- h : dislivello complessivo
- s : pendenza media

2. Calcolo della geometria del pendio (angolo di inclinazione e lunghezza):

$$\theta = \arctan(s) \quad (2.1)$$

$$s_{fin} = \frac{h}{\sin(\theta)} \quad (2.2)$$

3. Bilancio delle forze parallele al piano inclinato (escludendo la resistenza aerodinamica) diviso per la massa dello sciatore:

$$source = g \sin(\theta) - \mu g \cos(\theta) \quad (2.3)$$

4. Integrazione nel tempo:

- Definizione dell'intervallo di tempo:

$$t = [0; 30] \quad (2.4)$$

- Calcolo delle equazioni del moto:

$$a = source - \frac{1}{2} \rho V^2 \frac{c_D S}{m} \quad (2.5)$$

$$v(t) = v(0) + \int_0^t a dt \quad (2.6)$$

$$s(t) = s(0) + \int_0^t v dt \quad (2.7)$$

2.3.1 Studio parametrico

La procedura di calcolo appena descritta può essere integrata in uno script Matlab: fissando le grandezze in input è possibile ottenere l'andamento di velocità, accelerazione e resistenza lungo tutto il pendio.

2.4 Codice MATLAB

L'esecuzione del codice Matlab genera una finestra chiamata *input* nella quale è necessario inserire i valori iniziali per l'esecuzione della procedura:

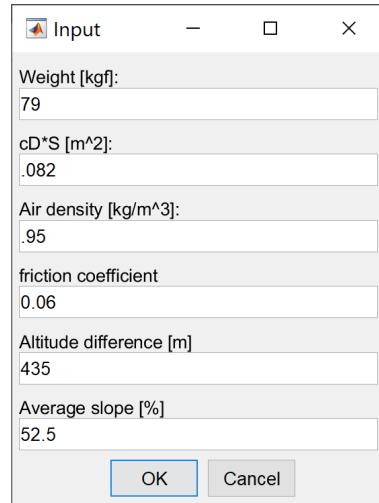


Figura 2.2: Finestra di input - codice Matlab

Il codice utilizza il solutore *ode45*, che applica un'opportuna versione del metodo di Runge-Kutta per problemi non stiff, con adattamento del passo di integrazione, per cui la dimensione delle celle temporali non sarà omogenea ma adattata ai gradienti delle grandezze calcolate.

```
clc
clear all
close all
```

VARIABILI GLOBALE

```
global h      % dislivello
global sfin   % lunghezza della pista
global source % gravità - attrito
global coef    % coefficiente per il calcolo della resistenza
```

INPUT

```
prompt = {'Weight [kgf]:' , 'cD*S [m^2]:' , 'Air density [kg/m^3]:' ,
          'friction coefficient' , 'Altitude difference [m]' ,
          'Average slope [%]'};
dlg_title = 'Input';
num_lines = 1;
defaultans = {'79' , '.082' , '.95' , '0.06' , '435' , '52.5'};
answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,defaultans,'on');
```

SALVATAGGIO INPUT

```
m = str2double(answer(1,1));                      % massa dello sciatore
cDpS= str2double(answer(2,1));                     % CD * S
rho = str2double(answer(3,1));                      % densità dell'aria
mu = str2double(answer(4,1));                      % coefficiente d'attrito
h = str2double(answer(5,1));                        % dislivello totale
slope = str2double(answer(6,1))/100.0;             % pendenza media
```

COSTANTI, GEOMETRIA, CONDIZIONI INIZIALI

```
g = 9.8065;                                     % accelerazione di gravità
theta = atand(slope);                           % angolo di inclinazione del pendio
cDpSom = cDpS/m;
coef = .5*rho*cDpSom;
source = g*sind(theta)-mu*g*cosd(theta);
```

```
sfin = h/sind(theta); % lunghezza della pista  
tspan = [0 30.]; % intervallo di tempo  
initc = [0.0 0.0];
```

INTEGRAZIONE NEL TEMPO

```
options = odeset('RelTol',1.e-12,'AbsTol',1.e-15,  
'Events',@appleEventsFcn);  
[t,y,te,ye,ie] = ode45(@motion,tspan,initc,options);
```

SALVATAGGIO RISULTATI

```
tfin = te; % tempo di fine integrazione  
smax = ye(1); % distanza percorsa  
vfin = ye(2); % velocità finale  
afin = source-0.5*coef*vfin^2; % accelerazione finale  
Dfin = .5*rho*cDpS*vfin^2; % resistenza finale  
  
time = t; % intervalli di tempo  
s = y(:,1); % distanza percorsa nel tempo  
v = y(:,2); % velocità nel tempo  
a = source-0.5*coef*y(:,2).^2; % accelerazioni nel tempo
```

PLOT

```
figure('Name',"s(t)")  
plot(time,s)  
xlabel("time [s]")  
ylabel('s [m]')  
  
figure('Name',"v(t)")  
plot(time,v)  
xlabel("time")  
ylabel('v(t)')  
  
figure('Name',"a(t)")  
plot(time,a)  
xlabel("time")  
ylabel('a(t)')
```

FUNZIONE motion

```
function dydt = motion(t,y)
global source
global coef
dydt = zeros(2,1);
dydt(1) = y(2); % velocità
dydt(2) = source-0.5*coef*y(2)^2;
% accelerazione risultante (gravità - attrito - resistenza)
end
```

FUNZIONE appleEventsFcn

```
function [value,isterminal,direction] = appleEventsFcn(t,y)
global sfin
value = y(1)-sfin; % valore da raggiungere = dislivello totale
isterminal = 1; % stop integrazione
direction = 0; % lo zero raggiunto sia da dx che da sx
end
```

2.5 Risultati

La procedura di calcolo viene lanciata inserendo i seguenti dati in ingresso:

Grandezza	Valore iniziale
m	79 kg
$c_D S$	0,082 m^2
ρ	0,95 kg/ m^3
μ	0,06
h	435 m
s	52,5%

Tabella 2.1: Valori in input - procedura di calcolo

La tabella seguente raccoglie i valori di tempo di percorrenza del piano inclinato, distanza percorsa (lunghezza del piano inclinato), velocità finale e accelerazione finale dopo aver eseguito la procedura di calcolo con i dati in input appena forniti:

Grandezza	Valore finale
t_{fin}	22,3673 s
s_{fin}	935,8182 m
v_{fin}	77,8020 m/s
a_{fin}	2,5452 m/s ²
D_{fin}	235,7705 N

Tabella 2.2: Risultati procedura di calcolo

La distanza percorsa corrisponde ovviamente alla lunghezza del piano inclinato. L'andamento è di tipo parabolico, tipico di un moto accelerato:

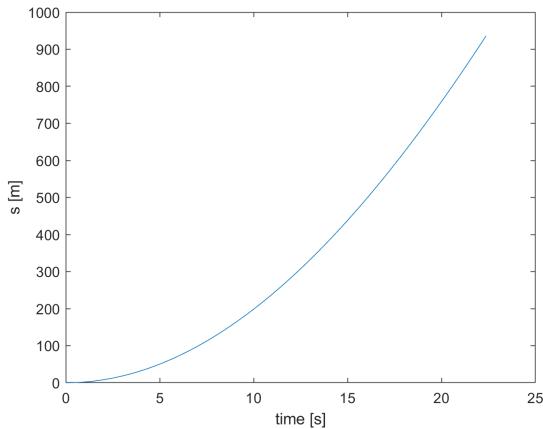


Figura 2.3: Andamento distanza percorsa

I valori e gli andamenti di velocità ed accelerazione sono strettamente legati tra loro: è facile notare come la velocità sia sempre crescente perché il valore dell'accelerazione risulta sempre positivo decrescente, per cui la pendenza del grafico $v(t)$ diminuisce sempre. L'accelerazione invece ha un andamento sempre decrescente, a causa del contributo negativo dato dalla resistenza aerodinamica, che tende a rallentare lo sciatore con un andamento che va con il quadrato della velocità, per cui la pendenza negativa del grafico dell'accelerazione aumenta sempre in modulo.

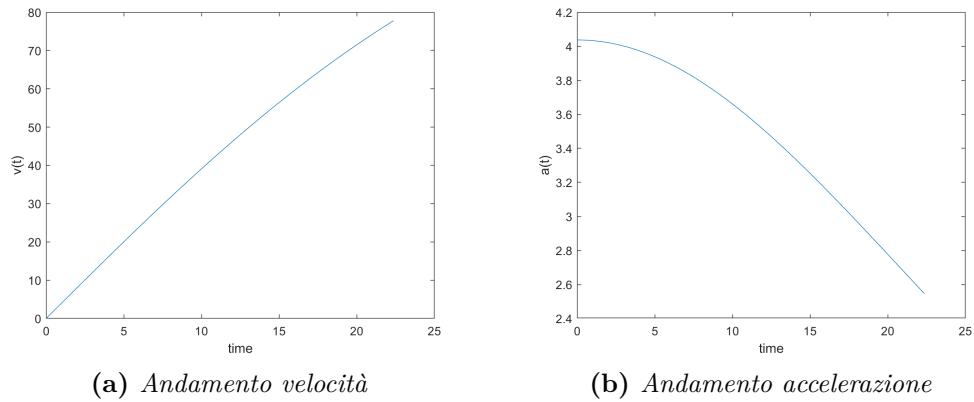


Figura 2.4: Procedura di calcolo - andamento velocità e accelerazione

La velocità risultante è superiore di circa 7 m/s rispetto al record del mondo di Ivan Origone: il nuovo record sarebbe pari a $280,0872 \text{ km/h}$, ben 26 km/h in più rispetto al record attuale. La notevole differenza tra i due risultati è imputabile alle numerose approssimazioni e ipotesi applicate al modello e alla procedura di calcolo. Lo studio preliminare appena descritto permette comunque di valutare in modo attendibile l'ordine di grandezza della resistenza aerodinamica risultante (circa 235 N), che sarà l'oggetto di studio principale nei prossimi capitoli.

Capitolo 3

Modello CAD

3.1 Introduzione

Il modello CAD è stato realizzato con l'ausilio di cinque differenti software di modellazione 3D, editing mesh e disegno CAD. Il procedimento illustrato nelle seguenti pagine è scandito dal passaggio del modello da un software all'altro. Le immagini si riferiscono al primo modello CAD realizzato, e hanno il solo scopo di illustrare il funzionamento ed il risultato ottenuto da ciascun passaggio.

3.2 MakeHuman

MakeHuman [1] è un'applicazione open source per la realizzazione di prototipi di umanoidi in computer grafica 3D. Il software è sviluppato da una comunità di programmatore, artisti, accademici, interessati alla modellazione 3D.



Figura 3.1: Logo MakeHuman

MakeHuman è sviluppato utilizzando la tecnologia di morphing: partendo da un umano base standard è possibile ottenere una gran varietà di personaggi, ottenuti

da interpolazione lineare. Ad esempio, da 4 morphing target principali (bambino, adolescente, giovane, anziano) è possibile ottenere tutte le forme intermedie. Usando questa tecnologia, con un ampio database di morphing target, sarebbe virtualmente possibile riprodurre qualsiasi personaggio. Per accedere e manipolare centinaia di morphing si utilizza una GUI molto semplice:

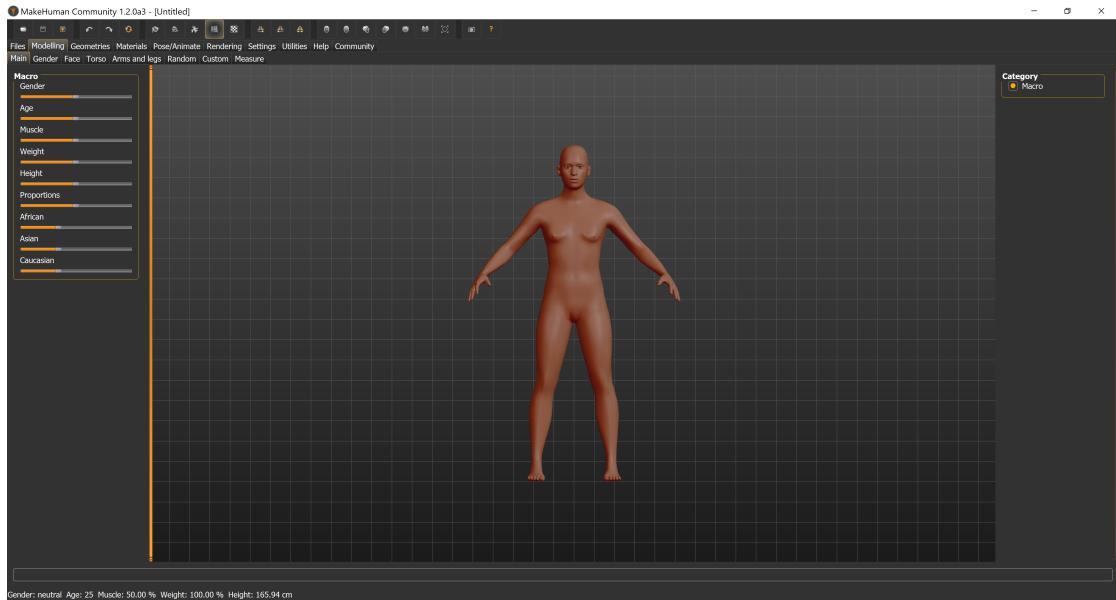


Figura 3.2: Schermata iniziale di MakeHuman

Il software utilizza parametri comuni, come altezza, peso, sesso, etnicità, tono muscolare. Il software è progettato per la modellazione di umani virtuali, con un sistema di pose semplici e complete, che include la simulazione dei movimenti muscolari. La struttura dell'interfaccia è differente da quella di altri programmi di grafica, che comprendono innumerevoli parametri, è facile da utilizzare, veloce ed intuitiva ma garantisce ugualmente la possibilità di accedere alle numerose impostazioni che occorrono per modellare la figura umana. Lo sviluppo di MakeHuman nasce da un dettagliato studio tecnico ed artistico delle caratteristiche morfologiche del corpo umano. Unendo il morphing all'interpolazione lineare di traslazione e rotazione, più un semplice calcolo di un fattore di forma e un algoritmo di mesh relaxing, si possono raggiungere risultati di qualità eccezionale. Il manichino realizzato con MakeHuman rispecchia fedelmente le misure e le forme di **Samuele Capello**, atleta della Nazionale Italiana di sci di velocità:



Figura 3.3: Manichino con le dimensioni di Samuele Capello

L'operazione di esportazione da MakeHuman, per rendere i manichini utilizzabili da altri software, è molto semplice e ricca di possibilità. La necessità, una volta realizzato il manichino dalle dimensioni desiderate, è quella di posizionarlo secondo la postura desiderata, manipolando le posizioni relative degli arti e sfruttando la rotazione di alcune articolazioni. Per ottenere questo ulteriore risultato è necessario l'utilizzo del software Blender, e per importare il manichino sul nuovo programma è necessario procedere all'esportazione in formato *.mhx2*.

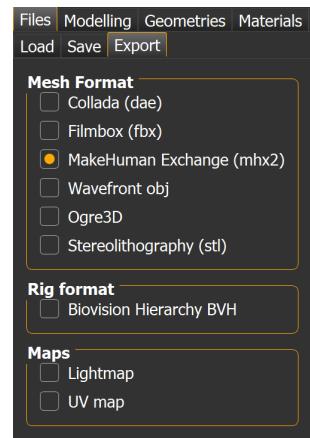


Figura 3.4: Finestra di esportazione da MakeHuman

3.3 Blender

Blender [2] è un software libero e multiplataforma di modellazione, rigging, animazione, montaggio video, composizione e rendering di immagini tridimensionali e bidimensionali.



Figura 3.5: Logo Blender

Dispone inoltre di funzionalità per mappature UV, simulazioni di fluidi, di rivestimenti, di particelle, altre simulazioni non lineari e creazione di applicazioni/giochi 3D. Sebbene sia spesso distribuito senza esempi e materiali (comunque reperibili su moltissimi siti web) il software è ricco di caratteristiche tipiche di sistemi avanzati di modellazione. Tra le sue potenzialità, possiamo ricordare:

- Supporto per una grande varietà di primitive geometriche, incluse le mesh poligonali, le curve di Bèzier, le NURBS, le metaball e i font vettoriali.
- Conversione da e verso numerosi formati per applicazione 3D, come Wings 3D, 3D Studio Max, LightWave 3D e altri.
- Strumenti per gestire le animazioni, come la cinematica inversa, le armature (scheletri) e la deformazione lattice, la gestione dei fotogrammi chiave, le animazioni non lineari, i vincoli, il calcolo pesato dei vertici e la capacità delle mesh di gestione delle particelle.
- Gestione dell'editing video non lineare.
- Caratteristiche interattive attraverso il Blender Game Engine, come la collisione degli ostacoli, il motore dinamico e la programmazione della logica, permettendo la creazione di programmi stand-alone o applicazioni real-time come la visione di elementi architettonici o la creazione di videogiochi.
- Motore di rendering interno versatile ed integrazione nativa col motore esterno YafRay (un raytracer open source).
- Motore di rendering unbiased Cycles disponibile internamente a partire da Blender 2.61.
- Scripting in python per automatizzare e/o controllare numerosi aspetti del programma e della scena.

Blender dispone inoltre di numerosi plugin open source, sviluppati dalla comunità di programmatore che sostiene la crescita del software. Tra questi, plugin *Import MakeHuman* [3] permette l'importazione di files .mhx2 all'interno di Blender.

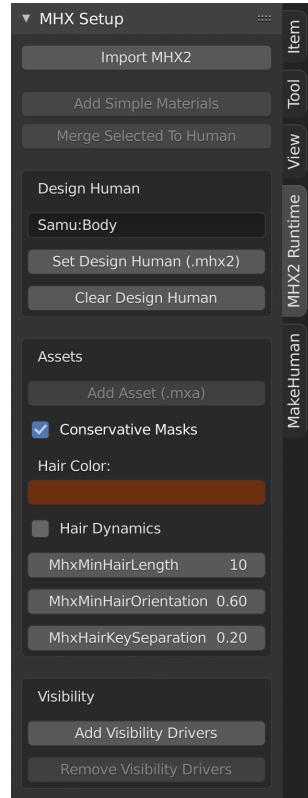


Figura 3.6: Finestra di importazione in Blender

Questo plugin fornisce operazioni di post importazione specifiche per mesh e armature MakeHuman. Le operazioni di sincronizzazione richiedono che MakeHuman sia in esecuzione, con le connessioni al server accettate. L'importazione del manichino all'interno di Blender permette di modificarne la posizione sfruttando le articolazioni naturali dell'essere umano:

Modello CAD



Figura 3.7: Schermata principale di Blender

Operando sulle articolazioni di braccia, gambe, collo e schiena è possibile far assumere al manichino l'identica postura assunta da Samuele Capello durante le gare di KL:

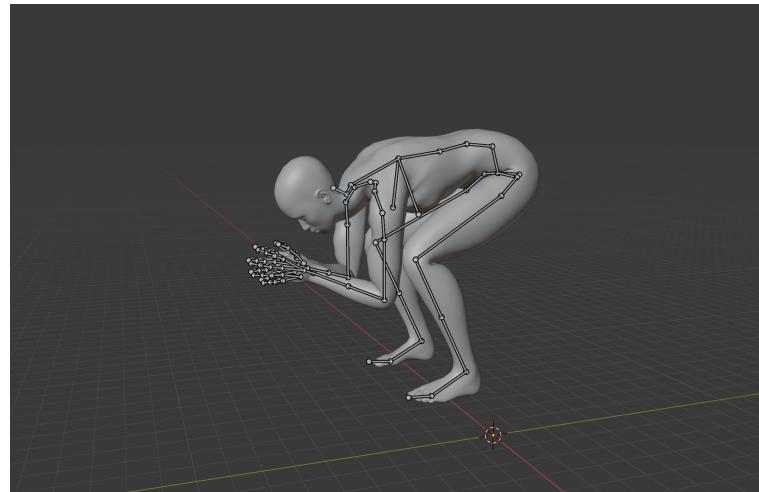


Figura 3.8: Posizione del manichino

Una volta ottenuta la posizione desiderata è necessario rendere il modello utilizzabile da un software di modellazione CAD, per poter aggiungere al manichino l'attrezzatura necessaria alla discesa (casco, scarponi, paraschiena e spoiler). L'esportazione da Blender avviene quindi in formato *.stl*, ovvero attraverso una discretizzazione mediante triangoli (mesh triangolare).

3.4 MeshLab

La mesh triangolare ottenuta dopo l'esportazione da Blender necessita un importante test di validità, per evitare la nascita di errori bloccanti durante la simulazione CFD: il solido deve essere completamente libero da superfici autointersecanti. Il software che permette di effettuare questa verifica, identificare le superfici potenzialmente dannose ed eliminarle è MeshLab [4].



Figura 3.9: Logo MeshLab

MeshLab è un programma open source, portatile ed estensibile per l'elaborazione e la modifica di meshes in 3D. Il sistema ha lo scopo di aiutare il trattamento delle tipiche forme medio-grandi di modelli derivanti dalla scansione 3D, fornendo una serie di strumenti per l'editing, la pulizia, l'ispezione, il rendering e la conversione di questo tipo di intreccio. In particolare il comando utilizzato, dopo aver importato il modello in formato *.stl*, è *Select Self Intersect*:

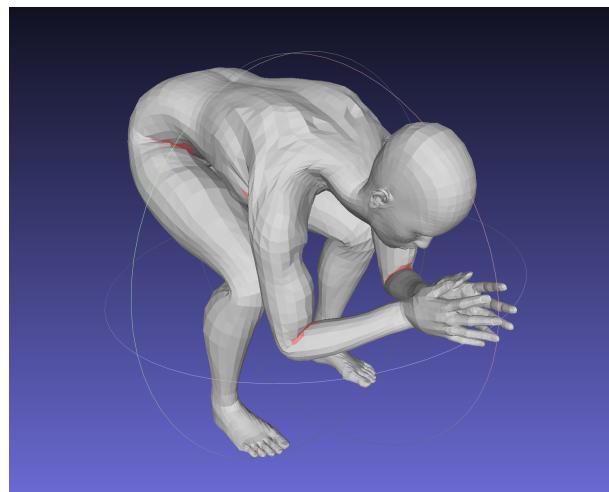


Figura 3.10: Selezione di superfici autointersecanti su MeshLab

Dopo l'esecuzione del comando è sufficiente eliminare le superfici selezionate (se presenti) e procedere alla ri-esportazione della mesh in formato *.stl*.

3.5 NetFabb

Se l'esecuzione del comando *Select Self Intersect* in MeshLab ha dato un esito positivo la mesh in formato *.stl* risulterà forata nei punti in cui sono state rilevate superfici autointersecanti. Il software NetFabb [5] permette di realizzare la chiusura dei fori attraverso il comando di riparazione mesh.



Figura 3.11: Logo NetFabb

NetFabb è un software di editing, riparazione e modellazione di mesh in formato *.stl*. La versione base è gratuita e comprende il comando repair, che permette di realizzare la chiusura dei fori presenti su una mesh:

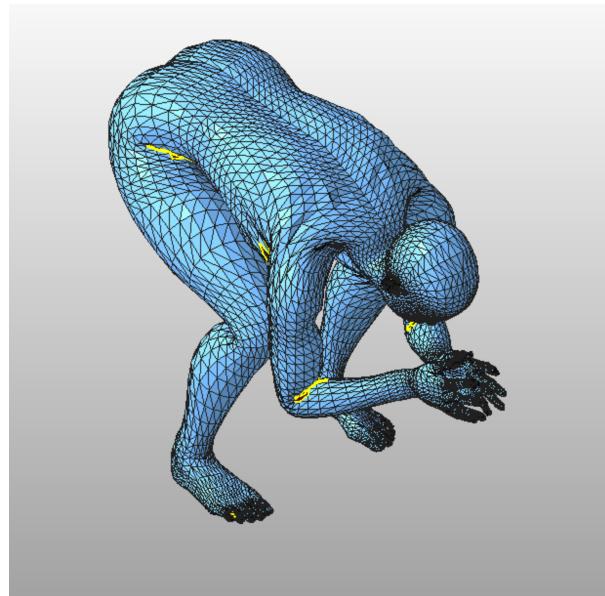


Figura 3.12: Riparazione mesh su NetFabb

Terminata l'operazione di riparazione mesh è necessario salvare nuovamente il modello in formato *.stl*.

3.6 Solidworks

SolidWorks [6] è un software di disegno e progettazione tridimensionale parametrica, prodotto e commercializzato dalla Dassault Systèmes. Nasce come software appositamente dedicato per l'ingegneria meccanica ed è quindi particolarmente utile per la progettazione di apparati meccanici, anche complessi. La scelta di questo software è il miglior compromesso per poter lavorare con parti derivate da altre lavorazioni, come ad esempio il manichino, e altre create direttamente su Solidworks. La possibilità di esportare il modello CAD completo in un formato compatibile con il software di simulazione CFD è inoltre un requisito fondamentale per poter procedere con il lavoro.



Figura 3.13: Logo Solidworks

3.6.1 Manichino

L'apertura del file in formato *.stl* permette di importare il manichino all'interno di Solidworks, restituendo un corpo solido all'interno della finestra di progettazione:

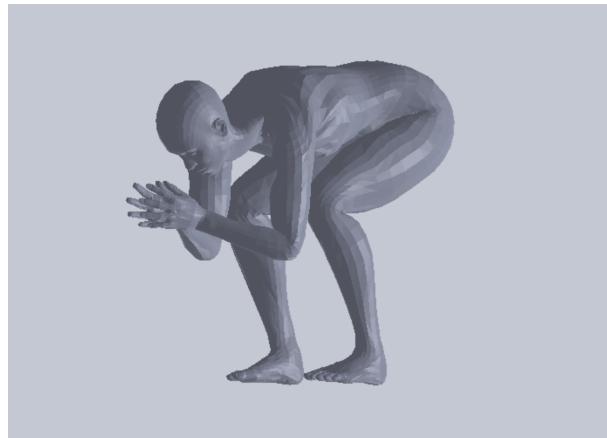


Figura 3.14: Manichino importato su Solidworks

L'unica operazione necessaria per rendere il manichino meno elaborato geometricamente consiste nell'eliminazione delle mani, attraverso il taglio con un piano parallelo al piano frontale, e nella creazione di un loft che approssima la forma dei guanti:

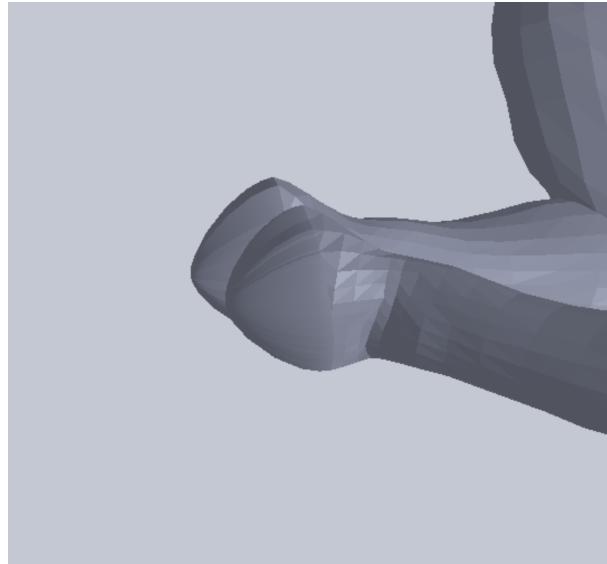


Figura 3.15: Realizzazione guanti

La semplificazione della geometria delle mani è molto importante in previsione dell'utilizzo del modello CAD su un software di simulazione CFD: l'utilizzo di un modello di calcolo ai volumi finiti prevede la creazione di una griglia (mesh) che copre tutto il dominio fisico, compreso il corpo dello sciatore. Il raffinamento della griglia, ovvero la dimensione caratteristica delle celle, influenza il calcolo in due modi diversi: una griglia molto fitta permette di ottenere dei risultati molto accurati, pagando però un alto costo computazionale, mentre una griglia più larga garantisce dei tempi di calcolo inferiori ma approssima la geometria in maniera più grossolana. L'operazione di creazione dei guanti permette di semplificare notevolmente la geometria garantendo però un grado di accuratezza accettabile per il calcolo. La zona delle mani è inoltre molto importante dal punto di vista fluidodinamico, poiché rappresenta la prima parte del corpo che entra in contatto con l'aria (ferma nel caso reale, in movimento in galleria del vento), sulla quale si formano quindi delle zone d'arresto della corrente che contribuiscono alla generazione della resistenza aerodinamica.

3.6.2 Scarponi

Gli scarponi sono corpi solidi ottenuti dall'unione di quattro differenti profili:

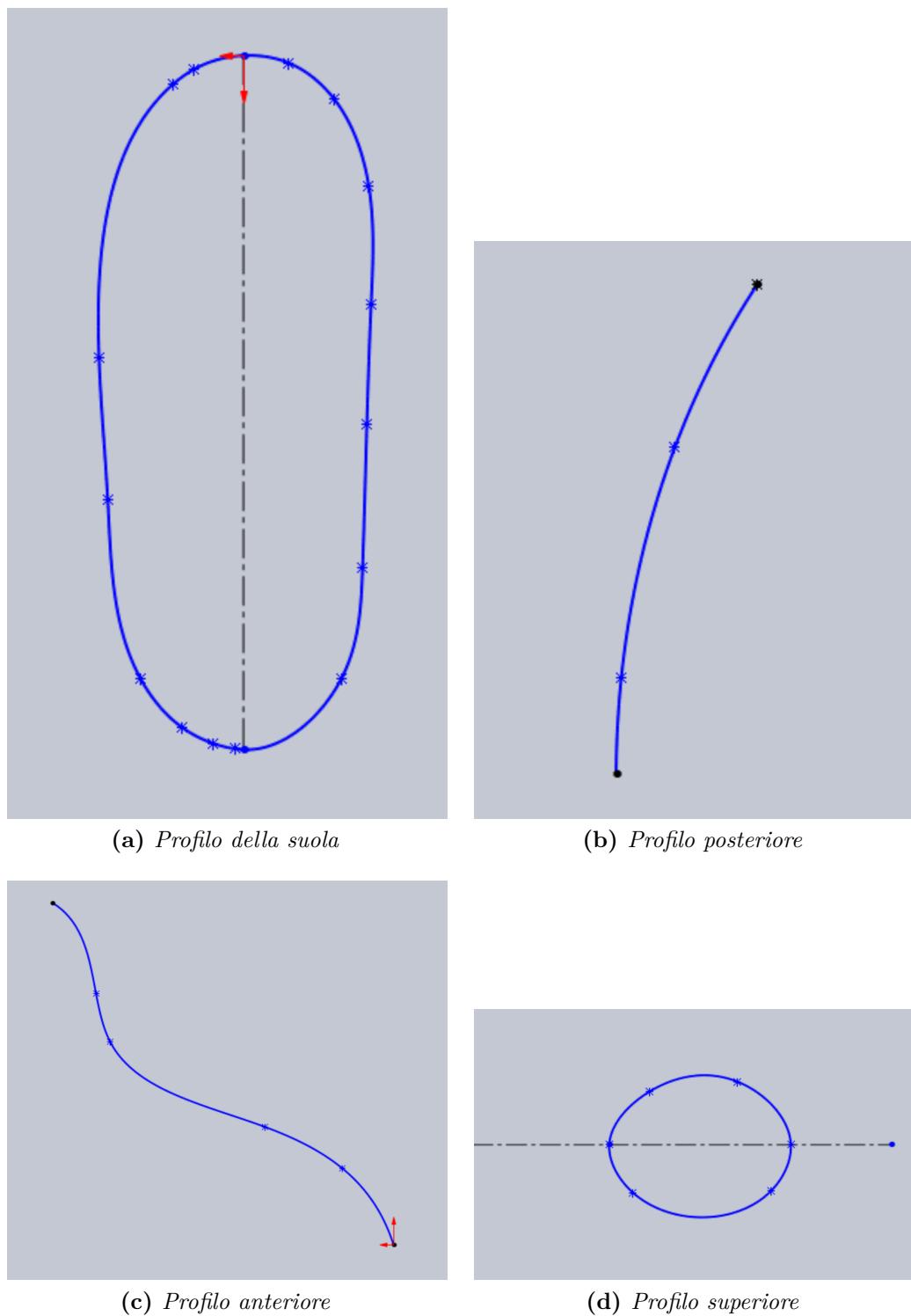


Figura 3.16: Profili caratteristici dello scarpone

L'operazione loft permette di ottenere un corpo solido partendo dai profili appena descritti:

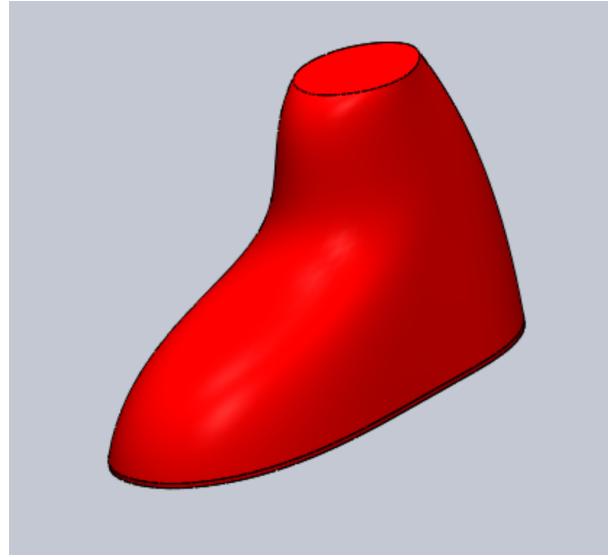
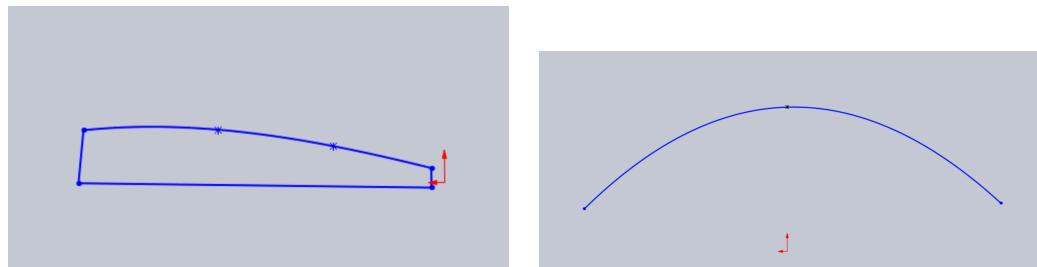


Figura 3.17: Scarpone completo

3.6.3 Paraschiena

Il paraschiena è uno dei dispositivi di sicurezza indossati dall'atleta nel corso della discesa. Ha il compito, tanto semplice quanto vitale, di proteggere la colonna vertebrale dagli eventuali urti conseguenti ad una caduta. La forma è standard per ogni atleta e contribuisce a definire la curvatura della schiena, importante per il successivo studio aerodinamico. Il corpo solido è ottenuto dall'unione di due differenti profili:



(a) Profilo laterale

(b) Profilo frontale

Figura 3.18: Profili caratteristici del paraschiena

L'operazione di estrusione con delimitazione permette di ottenere un corpo solido della forma desiderata:

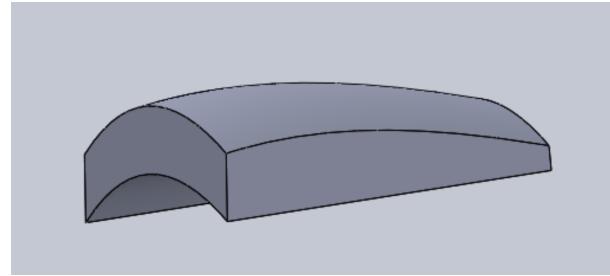
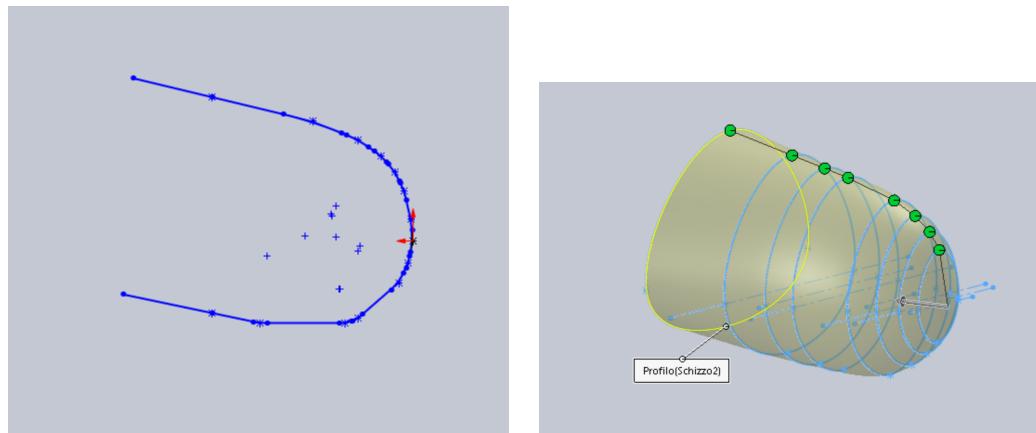


Figura 3.19: Paraschiena completo

Il paraschiena è indossato sotto la tuta, motivo per cui, all'interno dell'assieme, è stato integrato con il casco e il corpo del manichino attraverso l'operazione di cavità.

3.6.4 Casco

Il casco è il componente dell'equipaggiamento più importante per l'atleta dal punto di vista della sicurezza. Dal punto di vista aerodinamico sono state sperimentate diverse forme e le ricerche svolte finora non sono riuscite a definire una forma ottimale in assoluto. Il progetto del casco infatti è un progetto altamente integrato con il fisico e la postura dello sciatore, non è possibile determinare a priori la forma più efficiente dal punto di vista aerodinamico. In questo progetto il casco è realizzato su Solidworks partendo dalla realizzazione del profilo laterale e di diverse sezioni frontali:



(a) Profilo laterale

(b) Serie di sezioni frontali

Figura 3.20: Profili caratteristici del casco

L'operazione loft permette di ottenere un corpo solido interpolando i profili disegnati:

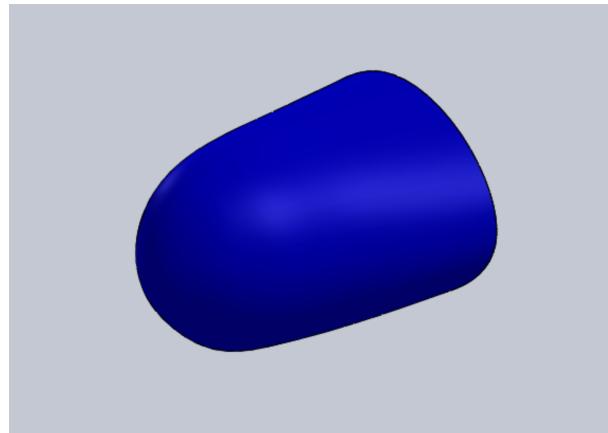


Figura 3.21: Casco completo

3.6.5 Spoiler

Gli spoiler sono realizzati attraverso l'operazione loft che unisce due profili identici distanziati di 40 cm:

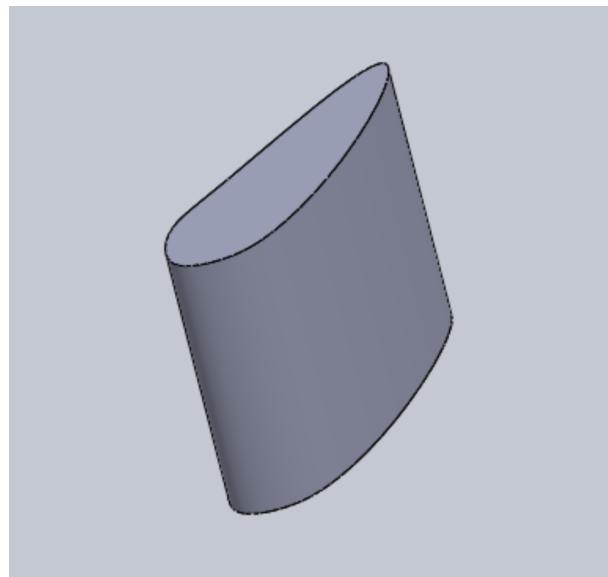


Figura 3.22: Spoiler

3.6.6 Assieme

I componenti realizzati nelle sezioni precedenti sono inseriti all'interno dell'assieme, posizionando relativamente casco, manichino, paraschiena, scarponi e spoiler:

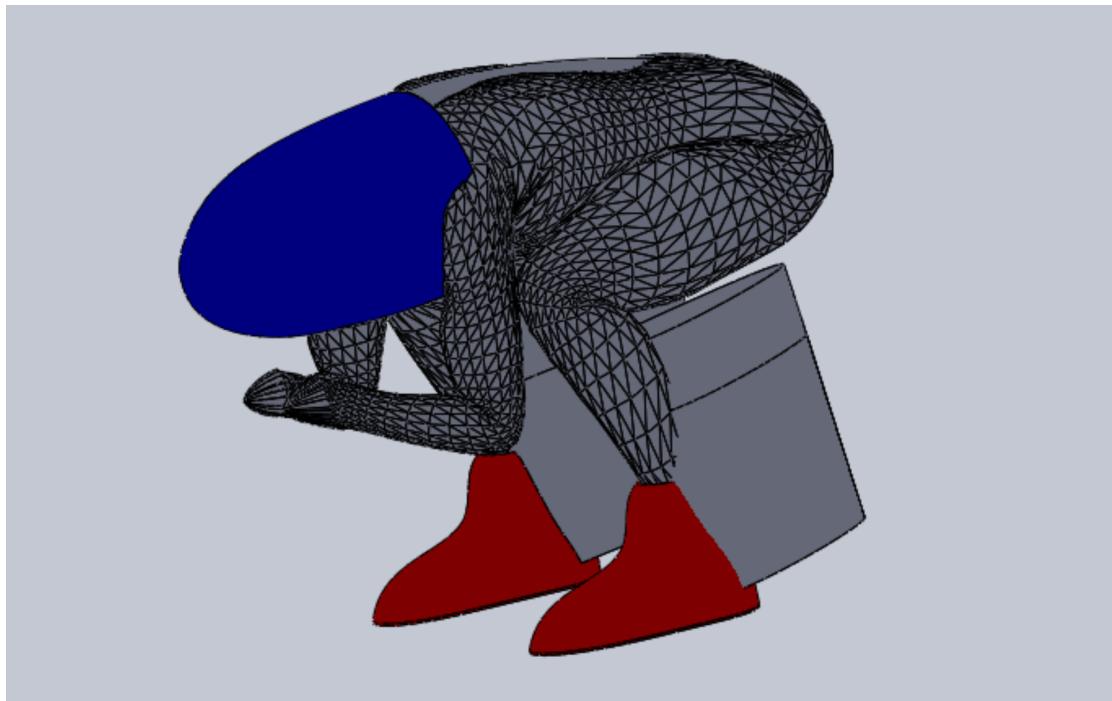


Figura 3.23: Assieme completo

Grazie alla funzione cavità è possibile eliminare le parti di solidi in sovrapposizioni, evitando di generare superfici intersecate: la funzione è stata applicata agli accoppiamenti casco-manichino, scarponi-manichino, paraschiena-manichino e casco-paraschiena, dove il primo componente indica il tool (solido utilizzato per il taglio) e il secondo il target (solido tagliato).

3.6.7 Esportazione

L'esportazione da Solidworks avviene in formato *.stp* o STEP. Vengono esportati solamente i corpi solidi e di superficie, base di partenza per l'analisi CFD.

Capitolo 4

Ambiente di simulazione: Star-CCM+

STAR-CCM+ [6] (acronimo di Simulation of Turbulent flow in Arbitrary Regions - Computational Continuum Mechanics) è un software commerciale per la fluidodinamica computazionale commercializzato da Siemens Digital Industries Software, di largo utilizzo in molti settori dell'industria e del mondo accademico, basato sul metodo ai volumi finiti (tetraedri, celle trimmate, poliedri). Il flusso di lavoro con Star-CCM+ è molto semplice e intuitivo:

- creazione e modifica di modelli CAD
- costruzione della mesh computazionale sulla geometria, utilizzando celle poliedriche o esaedriche tagliate
- creazione di uno strato limite di celle prismatiche per la cattura dello strato limite



Figura 4.1: Logo Star-CCM+

4.1 Importazione CAD

La prima operazione necessaria è l'importazione del CAD in formato *.stp*: dopo aver aperto una nuova simulazione è sufficiente espandere l'albero sotto la voce

Geometry e facendo click con il tasto destro del mouse sulla voce *3D-CAD Models* è possibile creare un nuovo modello CAD.

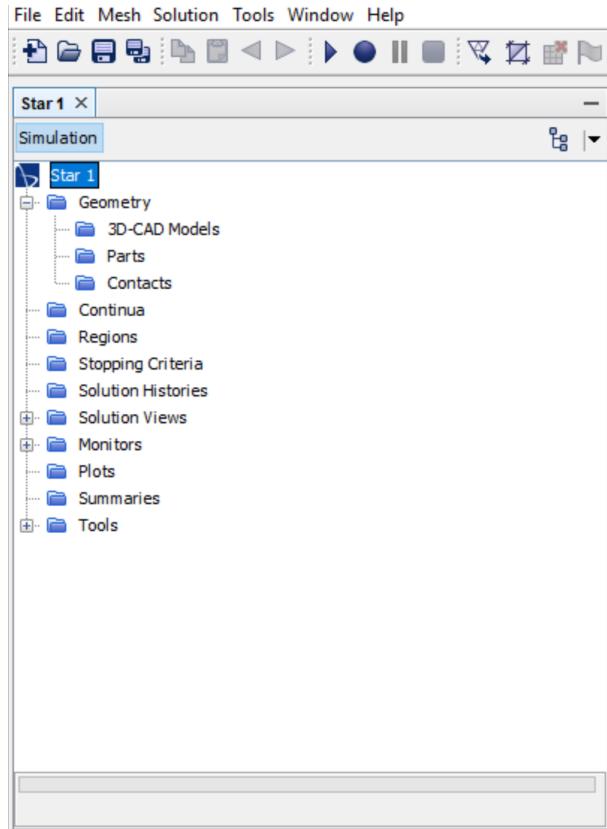


Figura 4.2: Albero delle funzioni e degli oggetti in Star-CCM+

Utilizzando nuovamente il tasto destro appare l'opzione per l'importazione del modello STEP. Il risultato finale dell'operazione di importazione è il seguente:

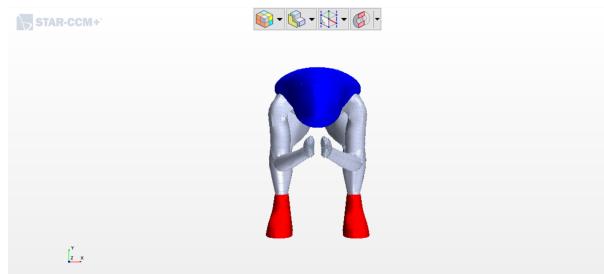


Figura 4.3: CAD importato in Star-CCM+

Il modello dello sciatore è posizionato rispetto agli assi e all'origine nel modo seguente:

- piano xy : piano frontale, passante per la punta degli scarponi.
- piano xz : piano superiore, passante per le suole degli scarponi.
- piano yz : piano laterale (destro), passante per l'asse di simmetria dello sciatore.

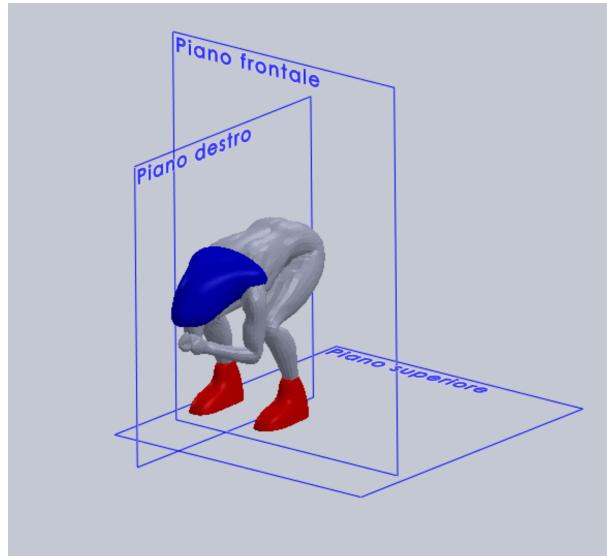


Figura 4.4: Piani di riferimento su Solidworks

Per predisporre il modello alla divisione in superfici è necessario realizzare due operazioni:

- duplicazione di ogni parte all'interno del modello CAD, con conseguente creazione di un nuovo body group.

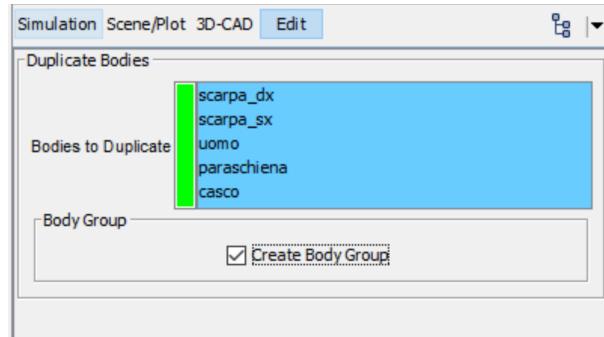


Figura 4.5: Operazione di duplicazione delle parti

- operazione booleana di unione delle parti nel nuovo body group, rinominandolo come *completo*.

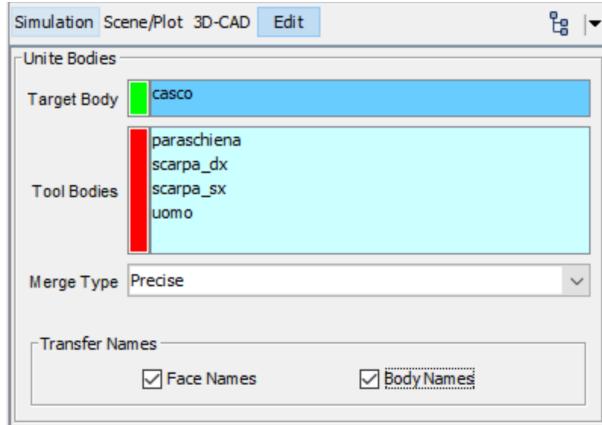


Figura 4.6: Operazione di unione delle parti duplicate

Il risultato dell’operazione di unione è un corpo solido unico per il quale è stata conservata l’origine delle singole parti. Questa informazione è fondamentale per le operazioni successive, poiché permette di studiare in maniera separata le differenti parti (casco, manichino, scarponi, paraschiena e spoiler) considerando però il corpo come un’unica entità geometrica.

4.2 Generazione parti

Una volta creato il modello CAD secondo i passaggi appena descritti è possibile passare alla creazione della parte geometrica, cliccando con il tasto destro sul modello e selezionando *New Geometry Part*, scegliendo una tassellazione *Very Fine*:

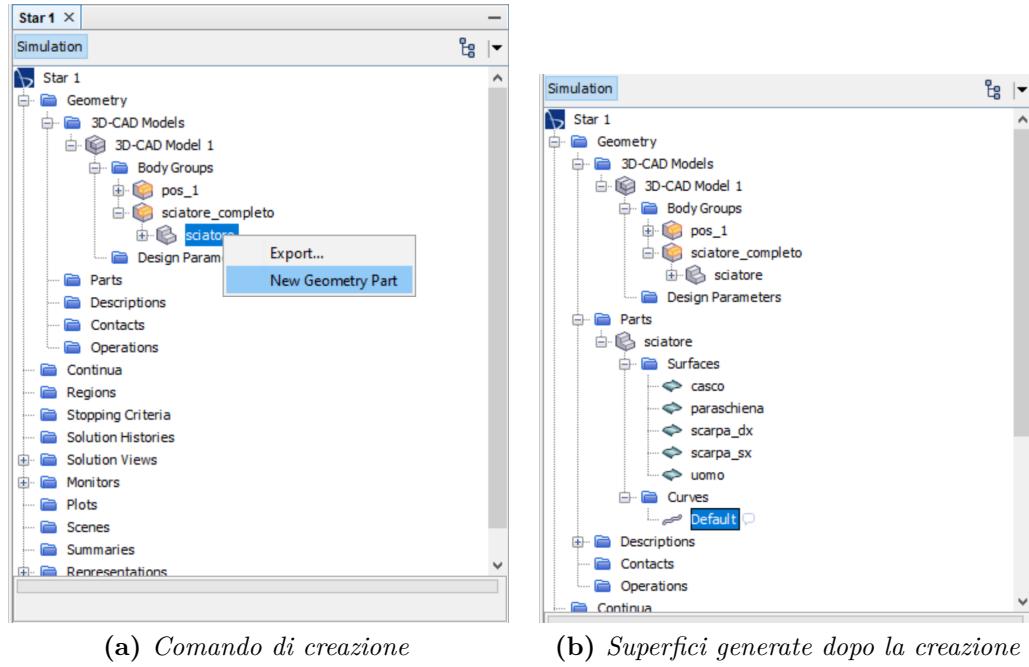


Figura 4.7: Operazione di creazione della parte geometrica

Ricordando l’obiettivo del lavoro di tesi, ovvero l’ottimizzazione della posizione assunta dallo sciatore e dell’attrezzatura utilizzata, risulta utile poter dividere le superfici in sezioni ancora più piccole e rappresentative del corpo umano, in modo da poter in seguito differenziare i diversi contributi alle forze agenti sul corpo dello sciatore. Il comando *Split By Patch* permette di effettuare questa divisione:



Figura 4.8: Superficie divise per sezioni significative

Oltre alla creazione della parte geometrica rappresentativa dello sciatore è necessario creare la parte rappresentativa del dominio di calcolo. Si procede quindi alla creazione di una nuova parte di tipo *Block*, secondo le seguenti dimensioni:

Lato	Estensione [m]
x	[-15 15]
y	[0 20]
z	[-30 30]

Tabella 4.1: Dimensioni del dominio di calcolo

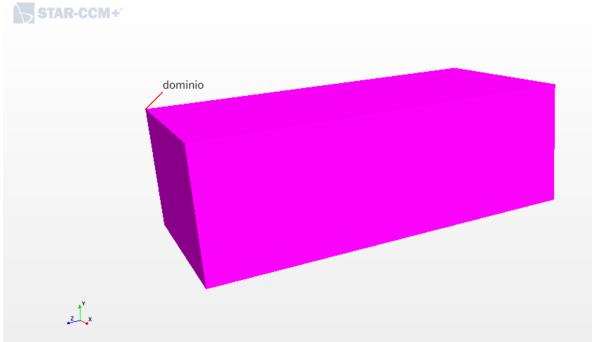


Figura 4.9: Dominio di calcolo

Questo parallelepipedo rettangolo rappresenta il volume d'aria che circonda lo sciatore nel corso della discesa. Il modello CAD dello sciatore risulta perfettamente centrato con il dominio, che a sua volta è centrato sull'origine del sistema di riferimento. Le dimensioni del dominio di calcolo, a seguito di alcune prove, sono ritenute sufficientemente estese da evitare che l'imposizione delle condizioni al contorno di freestream sulle facce possa avere influenza sulla soluzione. L'ultima operazione necessaria è la sottrazione dello sciatore dal dominio, ottenendo quindi l'effettivo volume di fluido da analizzare:

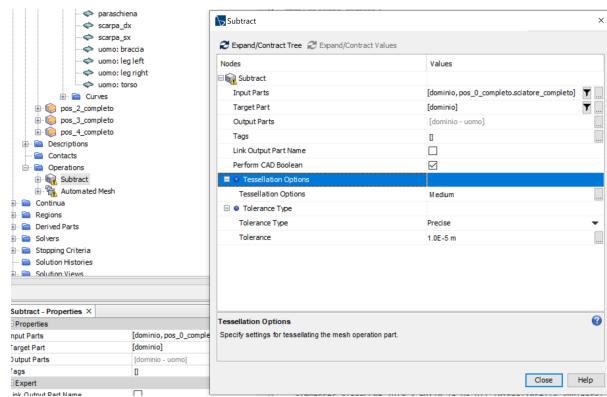


Figura 4.10: Operazione di sottrazione

La parte risultante viene rinominata *dominio - uomo*.

4.3 Dominio di calcolo e condizioni al contorno

Una volta creata la parte *dominio - uomo* è necessario procedere alla creazione della regione di calcolo *dominio - uomo*, assegnando ad ogni superficie un'appropriata condizione al contorno:

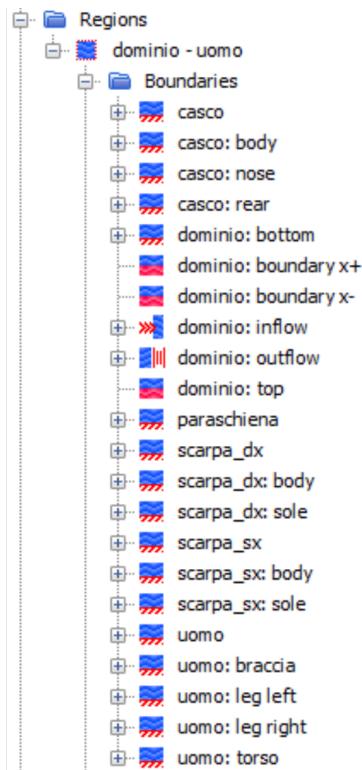


Figura 4.11: Operazione di sottrazione

Il tipo di condizione al contorno applicato ad ogni superficie (boundary) che delimita il dominio di calcolo (region) è specificato nella seguente tabella:

Boundary	Tipo
inflow	Velocity Inlet
outflow	Pressure Outlet
top	Symmetry Plane
bottom	Wall
boundary x+	Symmetry Plane
boundary x-	Symmetry Plane

Tabella 4.2: Condizioni al contorno sulle superfici di delimitazione del dominio

La velocità in ingresso (inflow) ha modulo pari a 70 m/s , in direzione z (orizzontale nel sistema di riferimento utilizzato) e con verso opposto rispetto all'asse z . Sulla superficie di uscita dal dominio (outflow) non sono presenti sovrapressioni, per cui il valore della pressione (differenziale) in uscita è pari a 0 Pa .

La parete inferiore (bottom) ha una velocità imposta pari a quella di ingresso, per evitare la formazione di una strato limite che nella realtà non esiste.

4.4 Generazione mesh

Prima di procedere alla generazione della mesh vera e propria è fondamentale indicare le zone del dominio in cui è necessario un infittimento della griglia. Per ottenere questo risultato si procede alla creazione di tre nuove parti geometriche con il comando New Shape Part di tipo Block:

- Control near

Lato	Estensione [m]
x	[-1,5 1,5]
y	[0 2]
z	[-2 1,7]

Tabella 4.3: Dimensioni del volume Near

- Control very near

Lato	Estensione [m]
x	[-0,5 0,5]
y	[0 1,1]
z	[-1 0,7]

Tabella 4.4: Dimensioni del volume Very Near

- Near Wake (scia)

Lato	Estensione [m]
x	[-0,5 0,5]
y	[0 1,1]
z	[-6 0,5]

Tabella 4.5: Dimensioni del volume Near Wake

La generazione della mesh avviene attraverso l'operazione di Automated Mesh, impostata secondo i seguenti parametri:

- Meshers
 - Surface Remesher
 - Automatic Surface Repair
 - Trimmed Cell Mesher
 - Prism Layer Mesher
- Default Controls

Grandezza	Valore
Base Size	1,28 m
Target Surface Size	Relative to base - 100
Minimum Surface Size	Relative to base - 0,08
Surface Growth Rate	1,3
Number of Prism Layers	2
Prism Layer Near Wall Thickness	0,01 m
Prism Layer Total Thickness	Absolute - 0,02 m
Maximum Cell Size	Relative to base - 10000

Tabella 4.6: Parametri Default Controls

- Custom Controls
 - Surface Control (superfici dello sciatore)
 - Volumetric control: near
 - Volumetric control: very near
 - Volumetric control: near wake

Il risultato dell'operazione di Automated Mesh è il seguente:

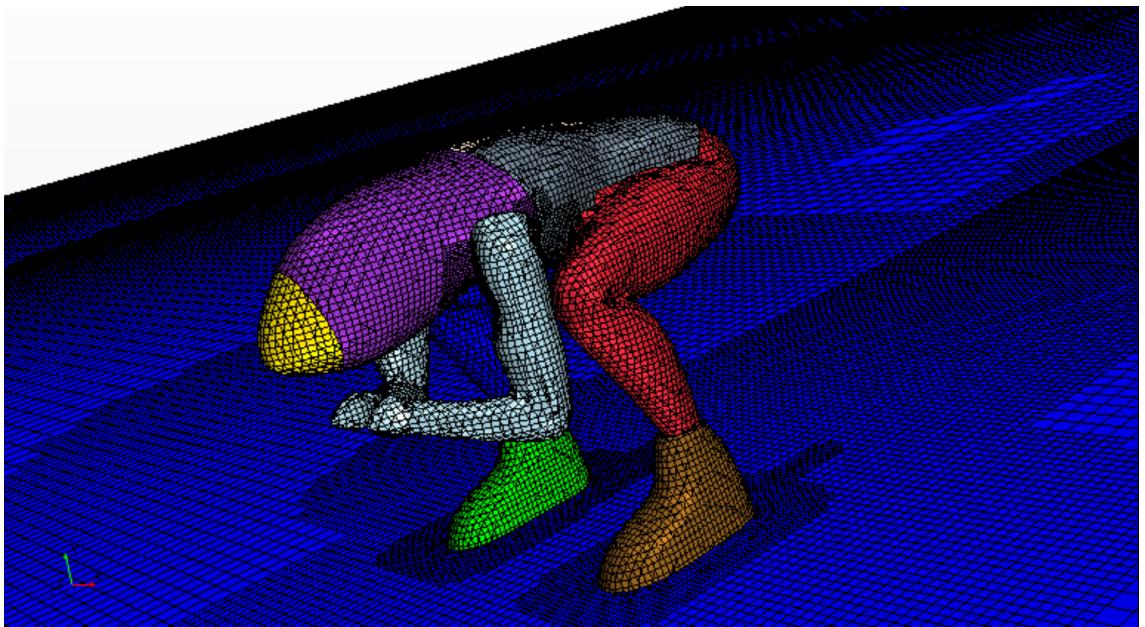


Figura 4.12: Automated mesh

4.5 Mesh refinement

L'operazione di mesh refinement ha l'obiettivo di raffinare la griglia generata con l'operazione di Automated Mesh in modo adattivo, secondo i risultati della simulazione. La procedura consiste nella definizione di una funzione *mesh refinement*, basata sul calcolo del valore assoluto del gradiente del modulo della velocità (definito genericamente $f(V)$) in ogni punto della mesh:

$$f(V) = \log_{10}(|\nabla(|V|)|) = \begin{cases} -16 & f(V) < -16 \\ f(V) & f(V) \geq -16 \end{cases} \quad (4.1)$$

La definizione del valore assoluto del gradiente del modulo della velocità viene così utilizzata nel calcolo della funzione *mesh refinement*:

$$\begin{cases} csize \min * 2^0 & f(V) > 3 \\ csize \min * 2^1 & f(V) > 2 \text{ e } f(V) < 3 \\ csize \min * 2^2 & f(V) > 1 \text{ e } f(V) < 2 \\ csize \min * 2^3 & f(V) > 0 \text{ e } f(V) < 1 \\ csize \min * 2^4 & f(V) > -1 \text{ e } f(V) < 0 \\ csize \min * 2^5 & f(V) > -2 \text{ e } f(V) < -1 \\ csize \min * 2^6 & f(V) > -3 \text{ e } f(V) < -2 \\ csize \min * 2^7 & f(V) < -3 \end{cases} \quad (4.2)$$

Dove $csize \min$ è la dimensione minima della cella nel punto del dominio in esame. La tabella XYZ salva al suo interno, dopo ogni iterazione, il risultato della funzione *mesh refinement*:

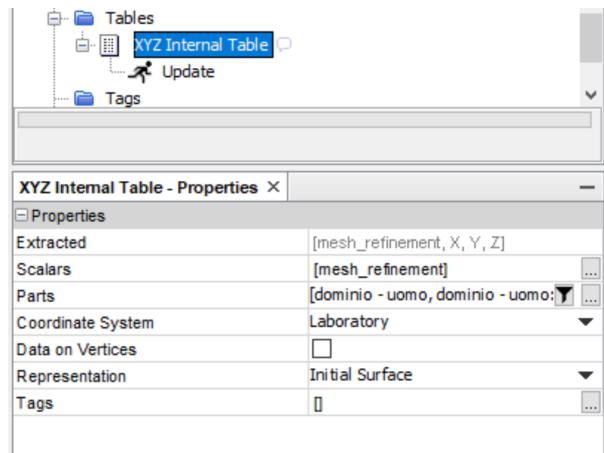


Figura 4.13: Definizione della tabella XYZ

Nella definizione della mesh automatica lo strumento *Trimmed Cell Mesher* non è inizialmente parametrizzato; dopo un certo numero di iterazioni è possibile assegnare allo strumento trimmer una tabella di punti, per aumentare l'accuratezza della griglia.

Il numero di iterazioni dopo il quale procedere all'aggiornamento dello strumento *Trimmed Cell Mesher* è valutato sulla base dei residui: si nota come dopo 500 iterazioni i residui di calcolo tendono ad un valore asintotico, per cui è possibile procedere con l'aggiornamento della tabella XYZ, la nuova generazione della griglia e così via. Questo procedimento è ripetuto per 5 volte, al fine di ottenere una griglia il più possibile adattata alla forma del corpo. Questa semplice procedura è realizzata attraverso una macro scritta in linguaggio *Java*, della quale si riporta il diagramma a blocchi e il codice:

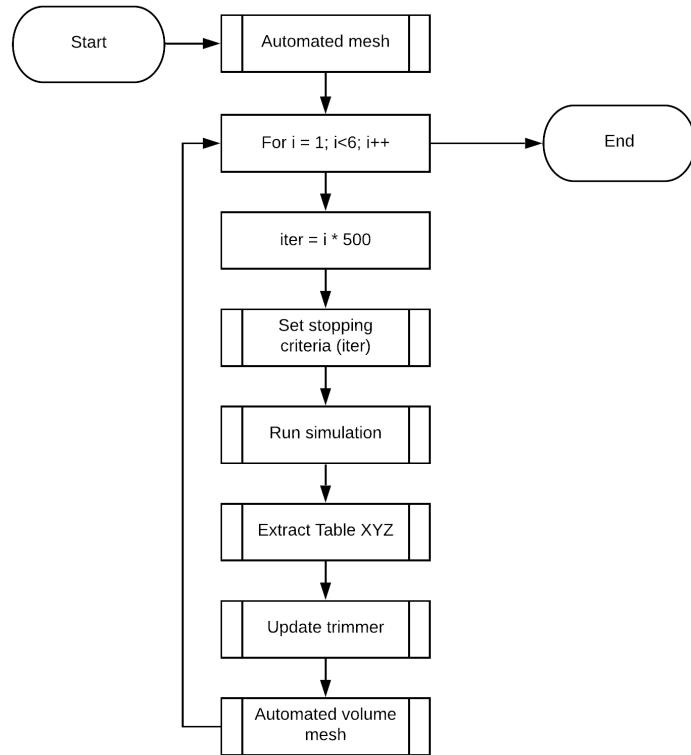


Figura 4.14: Diagramma a blocchi della procedura di mesh refinement

```

// STAR-CCM+ macro: mesh_refinement_seq.java
// Written by STAR-CCM+ 14.06.012
package macro;

import java.util.*;

import star.common.*;
import star.base.neo.*;
import star.trimmer.*;
import star.meshing.*;

public class mesh_refinement extends StarMacro {

    public void execute() {
        execute0();
    }
}
  
```

```
private void execute0() {

    Simulation simulation_0 =
        getActiveSimulation();

    StepStoppingCriterion stepStoppingCriterion_0 =
        ((StepStoppingCriterion)
    simulation_0.getSolverStoppingCriterionManager()._\\\
        getSolverStoppingCriterion("Maximum Steps"));

    AutoMeshOperation autoMeshOperation_0 =
        ((AutoMeshOperation)
    simulation_0.get(MeshOperationManager.class).getObject("Automated
    Mesh"));

    TrimmerAutoMesher trimmerAutoMesher_0 =
        ((TrimmerAutoMesher)
    autoMeshOperation_0.getMeshers().getObject("Trimmed Cell Mesher"));

    XyzInternalTable xyzInternalTable_0 =
        ((XyzInternalTable) simulation_0.getTableManager().getTable("XYZ
    Internal Table"));

    MeshPipelineController meshPipelineController_0 =
        simulation_0.get(MeshPipelineController.class);

    int iter;
    for (int i=1; i <= 6; i++) {
        iter = 0 + 500*i;

        stepStoppingCriterion_0.setMaximumNumberSteps(iter);

        simulation_0.getSimulationIterator().run();

        simulation_0.saveState("D:\\skier.sim");

        xyzInternalTable_0.extract();

        trimmerAutoMesher_0.setMeshSizeTable(xyzInternalTable_0);

        meshPipelineController_0.generateVolumeMesh();
    }
    stepStoppingCriterion_0.setMaximumNumberSteps(4000);
```

```

simulation_0.getSimulationIterator().run();

simulation_0.saveState("D:\\skier.sim");

}
}
}

```

4.6 Modello fisico

Il comportamento di un fluido reale è descritto dalle equazioni di Navier-Stokes, un sistema di tre equazioni differenziali alle derivate parziali non lineari. Le equazioni di Navier-Stokes sono in grado di descrivere completamente qualsiasi flusso fluido, anche turbolento. In particolare per un flusso turbolento, dove cioè le traiettorie delle particelle di flusso non sono più costanti nel tempo, un approccio numerico di calcolo è chiamato generalmente simulazione numerica diretta (DNS). A causa del fatto che le risorse di calcolo necessarie alla loro risoluzione crescono con il numero di Reynolds (quasi con Re^3) e che tale numero può avere valori dell'ordine di 10^6 - 10^9 , tale approccio resta tecnicamente impossibile. In alternativa alla simulazione numerica diretta è possibile adottare sistemi meno onerosi quali la formulazione LES (Large Eddy Simulation) o le equazioni mediate alla Reynolds.

Il modello matematico che permette l'analisi della dinamica dei continui deformabili si basa sulle seguenti caratteristiche:

- fluido continuo: viene trascurata la natura discontinua della materia, in questo modo è possibile far tendere a zero un volume di fluido, senza che questo possa restare privo di materia. Un parametro fondamentale che caratterizza il mezzo dal punto di vista della continuità è il numero di Knudsen, definito come il rapporto tra il cammino libero medio di una particella costituente il fluido e una lunghezza caratteristica del flusso:

$$Kn = \frac{l}{L} \quad (4.3)$$

Se il numero di Knudsen è molto minore di uno, allora è possibile considerare il fluido continuo. Altrimenti è necessario studiare il comportamento del gas unicamente su base statistica, mediante la teoria cinetica dei gas.

- fluido chimicamente omogeneo e non reagente
- fluido privo di cariche elettriche

Le equazioni di Navier-Stokes sono la formalizzazione matematica di tre principi fisici ai quali i fluidi rispondono, imposta la condizione di continuo deformabile:

- principio di conservazione della massa (equazione di continuità)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_j] = 0 \quad (4.4)$$

- secondo principio della dinamica (bilancio della quantità di moto)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_i u_j + p \delta_{ij} - \tau_{ji}] = 0, \quad i = 1, 2, 3 \quad (4.5)$$

- primo principio della termodinamica (conservazione dell'energia)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho e_0) + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_j e_0 + u_j p + q_j - u_i \tau_{ij}] = 0 \quad (4.6)$$

Al sistema di equazioni di Navier-Stokes è applicata l'ipotesi di incompressibilità, ovvero di densità costante nel tempo. Il valore fissato è:

$$\rho = 1,18415 \text{ kg/m}^3 \quad (4.7)$$

Allo stesso modo viene fissato il valore della viscosità dinamica:

$$\mu = 1,85508 * 10^{-5} \text{ Pa*s} \quad (4.8)$$

Il metodo numerico scelto per il calcolo delle equazioni di Navier-Stokes è il modello RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes). L'approccio RANS analizza le equazioni di Navier-Stokes in cui si siano mediati i termini fluttuanti della turbolenza, in altre parole si sostituiscono le quantità medie delle variabili e si effettua una media temporale dell'equazione così ottenuta in un certo periodo di tempo, sufficientemente piccolo rispetto ai fenomeni che si vogliono seguire, sufficientemente grande rispetto ai disturbi della turbolenza. Per molte applicazioni pratiche, compresa quella in oggetto, la sola conoscenza delle grandezze medie può essere sufficiente per la soluzione del problema. Questo approccio consente una notevole riduzione dei tempi di calcolo, poiché le scale del moto medio sono molto più grandi di quelle delle fluttuazioni turbolente. In effetti un moto turbolento può essere considerato come la sovrapposizione di un moto medio e di un moto fluttuante nel tempo.

4.6.1 Modello di turbolenza

Il modello utilizzato per chiudere le equazioni di Navier-Stokes mediante alla Reynolds (RANS) è il modello $\kappa - \omega$. Questa classe di modelli di turbolenza a due equazioni si propone di valutare la lunghezza di miscelazione e la viscosità turbolenta a partire da due parametri: l'energia cinetica turbolenta (κ) e il tasso di dissipazione specifico dell'energia cinetica turbolenta (ω).

Questo modello garantisce una maggior velocità di calcolo rispetto a modelli DNS o LES, per i quali sarebbe necessaria una griglia molto più fitta e costosa a livello computazionale, ed è allo stesso tempo in grado di fornire risultati sufficientemente attendibili per flussi caratterizzati da scie come quelli qui studiati. Vengono imposte le seguenti condizioni iniziali:

- turbulent intensity = 0,01 (costante)
- turbulent velocity scale = 1,0 m/s (costante)
- turbulent viscosity ratio = 200 (costante)

4.6.2 Simulazione stazionaria

La simulazione realizzata con Star-CCM+ è una simulazione stazionaria, in cui il software tenta, con una serie di iterazioni di raggiungere un risultato a convergenza. La natura turbolenta, e quindi non stazionaria, del problema non permette di raggiungere un risultato puntuale, ma si ottengono valori lievemente oscillanti, non eccessivamente lontani da quelli che si otterrebbero con una più costosa simulazione time-dependent, ma che consentono comunque di valutare le tendenze al variare della geometria. I grafici ottenuti sono quindi il risultato di una serie di iterazioni e non l'andamento temporale delle grandezze. I valori finali, intesi come risultato della simulazione, sono ottenuti mediando i risultati delle ultime 500 iterazioni.

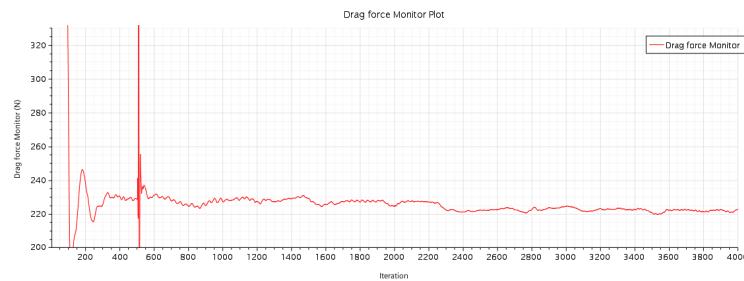


Figura 4.15: Esempio di grafico della resistenza al termine di una simulazione stazionaria

Capitolo 5

Analisi, miglioramento e ottimizzazione

Le operazioni di analisi aerodinamica, miglioramento (in termini di prestazioni) e ottimizzazione consistono nello studio di differenti configurazioni al fine di stabilire la postura ottimale e le più efficienti forme per casco e carenature. Le prestazioni sono valutate misurando le seguenti grandezze e coefficienti:

- D : resistenza aerodinamica
- c_D : coefficiente di resistenza aerodinamica
- S : superficie frontale
- L : portanza
- F_l : forza laterale

5.1 Posizione dello sciatore

La posizione dello sciatore è parametrizzata secondo 4 valori principali:

- La distanza tra le gambe d , misurata come distanza interna tra i piedi senza scarponi indossati
- L'angolo α rappresentativo dell'inclinazione tra omero e avambraccio
- L'angolo β rappresentativo dell'inclinazione tra femore e tibia
- L'angolo δ rappresentativo dell'inclinazione tra torso e omero

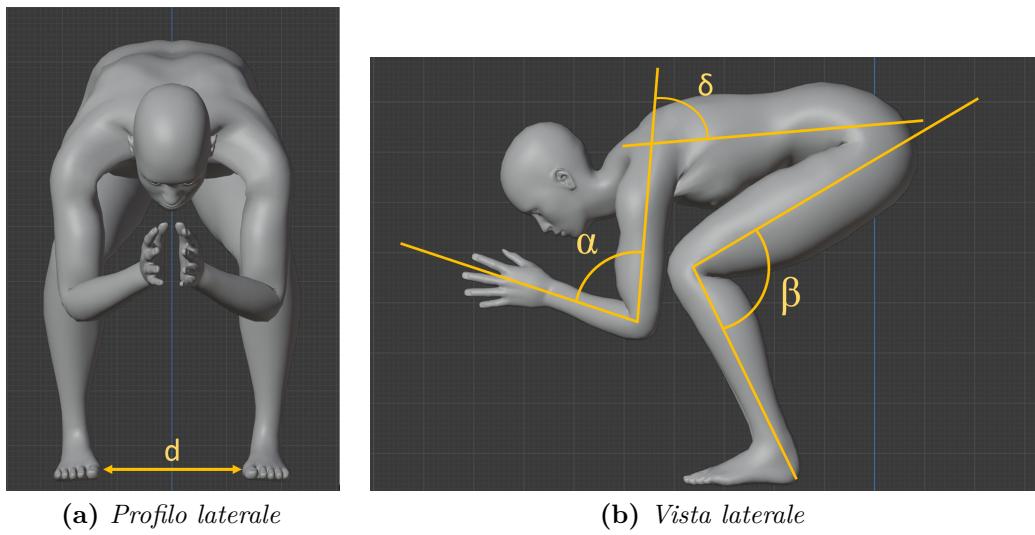


Figura 5.1: Parametri di definizione della posizione

Di seguito vengono presentate e analizzate 4 possibili posizioni differenti, a partire dalla posizione più naturale assunta dall’atleta Samuele Capello, studiando come la variazione delle grandezze d , α , β , e δ influisce sulle prestazioni dello sciatore. Le differenti configurazioni garantiscono inoltre un livello di fatica accettabile da parte dell’atleta, risultando sostenibili, dal punto di vista fisico, per tutta la durata della discesa.

5.1.1 Posizione 1

La posizione 1 è caratteristica di Samuele Capello, sciatore della nazionale italiana di sci di velocità. Le misure d , α , β e δ ricalcano fedelmente la postura assunta dall'atleta nel corso delle gare di Coppa del Mondo:

Misura	Valore
d	0,255 m
α	76,0°
β	91,5°
δ	99,9°

Tabella 5.1: Parametri caratteristici della posizione 1

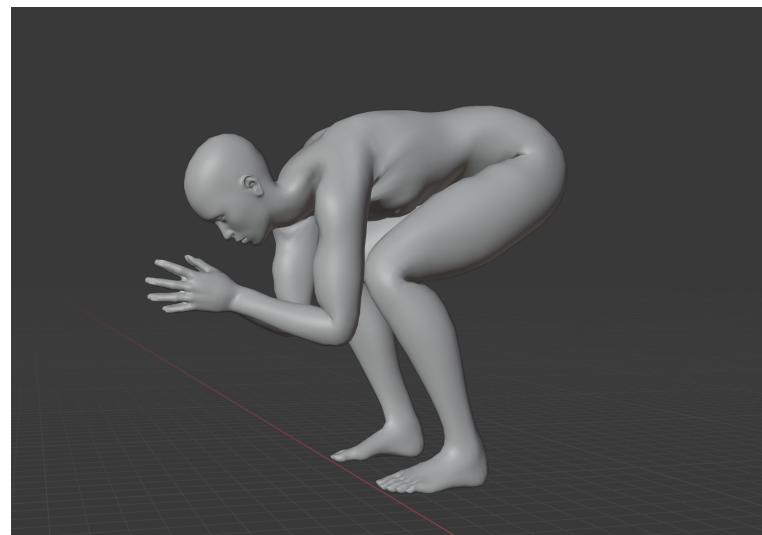


Figura 5.2: Posizione 1

5.1.2 Posizione 2

La posizione 2, suggerita dagli allenatori della nazionale italiana di sci di velocità, ha come obiettivo la riduzione della resistenza aerodinamica nella zona delle braccia, poiché poste a 90° rispetto al flusso d'aria nella posizione 1. Questo risultato può essere ottenuto aumentando gli angoli α e δ , ovvero procedendo alla distensione in avanti delle braccia. Questa modifica può essere vantaggiosa anche dal punto di vista dell'equilibrio dello sciatore, poiché tende a spostare il baricentro in avanti.

Misura	Valore
d	0,255 m
α	$112,6^\circ$
β	$91,5^\circ$
δ	$132,6^\circ$

Tabella 5.2: Parametri caratteristici della posizione 2

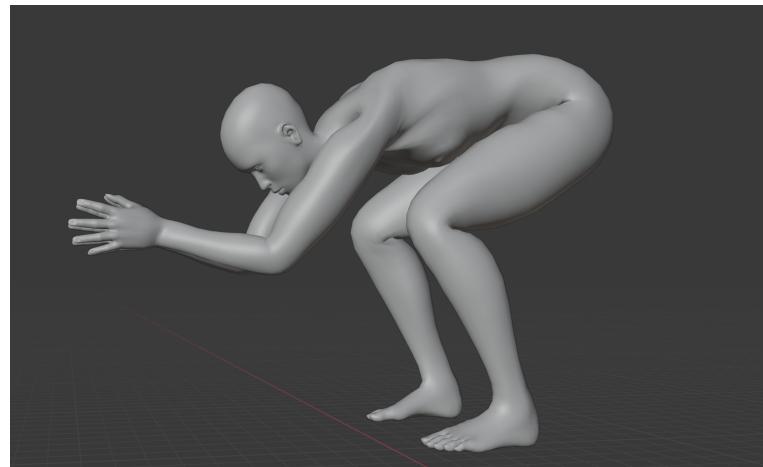


Figura 5.3: Posizione 2

5.1.3 Posizione 3

La posizione 3 ha come obiettivo quello di ridurre la superficie frontale dello sciatore, riducendo l'ampiezza dell'angolo β . Questa posizione richiede uno sforzo fisico superiore, poiché sollecita maggiormente i quadricipiti e tende a spostare il baricentro all'indietro, affaticando ulteriormente muscoli degli arti inferiori. L'inclinazione degli angoli α e δ è la stessa della posizione 1 mentre diminuisce di conseguenza l'angolo tra il torso e le cosce.

Misura	Valore
d	0,255 m
α	76,0°
β	91,5°
δ	72,1°

Tabella 5.3: Parametri caratteristici della posizione 3

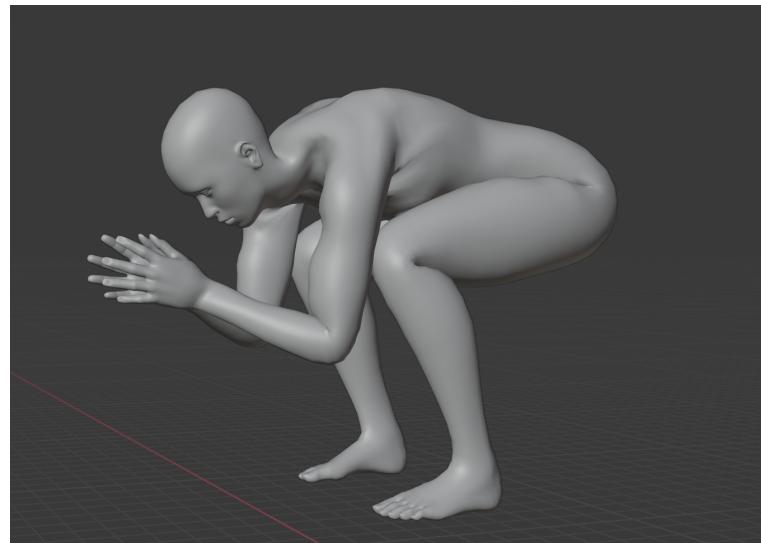


Figura 5.4: Posizione 3

5.1.4 Posizione 4

La posizione 4 è vista come evoluzione della posizione 3 perché, partendo dagli stessi angoli α , β e δ cerca di diminuire ulteriormente la superficie frontale aumentando la distanza d , nascondendo quindi dietro le braccia una porzione più grande di gambe. La riduzione della superficie frontale sulle gambe ha come obiettivo la diminuzione complessiva delle zone in cui si hanno punti d'arresto della corrente, e di conseguenza una riduzione della resistenza complessiva.

Misura	Valore
d	0,335 m
α	76,0°
β	91,5°
δ	72,1°

Tabella 5.4: Parametri caratteristici della posizione 4



Figura 5.5: Posizione 4

5.1.5 Risultati

I risultati riportati nella tabella seguente si riferiscono al sistema sciatore (nelle diverse posizioni) con casco, scarponi e paraschiena, ma privo di spoiler:

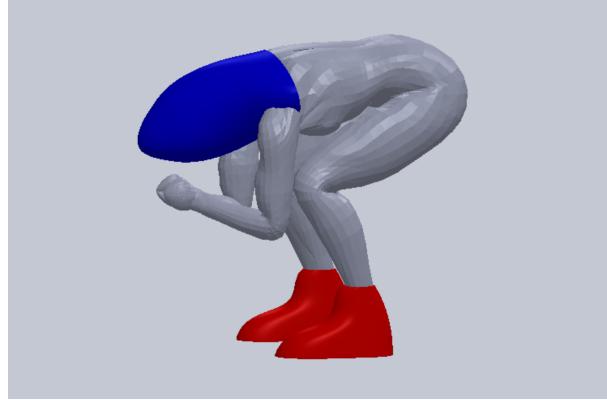


Figura 5.6: Configurazione per le simulazioni al variare della posizione

Posizione	$D[N]$	c_D	$S[m^2]$	$c_D S[m^2]$	$L[N]$	$F_l[N]$
1	319,3022	0,4626	0,237	0,1096	74,461	-18,1574
2	325,4796	0,4826	0,2338	0,1128	-22,273	-35,6948
3	301,9858	0,4725	0,2201	0,104	160,8871	1,6961
4	253,4706	0,3998	0,219	0,0876	104,0410	-19,4343

Tabella 5.5: Risultati delle simulazioni sulle 4 posizioni

I risultati ottenuti evidenziano come la posizione 4 sia nettamente migliore dal punto di vista prestazionale rispetto alle altre 3 configurazioni. La resistenza aerodinamica nella posizione 4 è inferiore di circa il 22% rispetto alla posizione 2 (caso peggiore), dove la distensione delle braccia non ha portato effetti significativi. Si vedono ora nel dettaglio i contributi alla resistenza aerodinamica di ogni parte del corpo e dell'equipaggiamento.

La posizione 1 presenta le braccia (escludendo gli avambracci) posti perpendicolarmente rispetto alla corrente. Per questo motivo il contributo di questa parte del corpo è superiore rispetto a tutti gli altri, nonostante si tratti di una porzione di superficie relativamente piccola rispetto al resto del corpo.

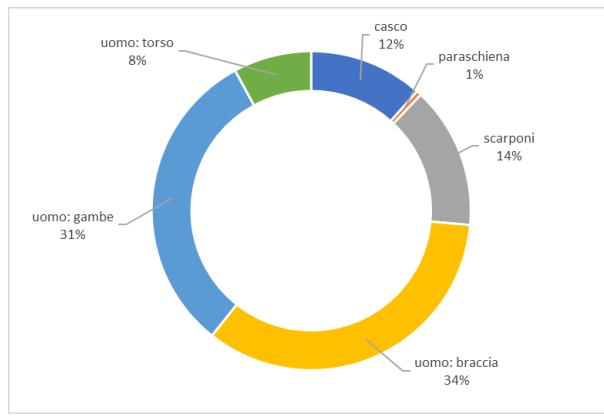


Figura 5.7: Posizione 1: distribuzione resistenza aerodinamica

La distensione in avanti delle braccia attuata nella posizione 2 ha ottenuto l'effetto desiderato, ovvero una diminuzione di circa il 10% del contributo di resistenza dovuto agli arti superiori, ma ha aumentato in valore assoluto la resistenza aerodinamica complessiva. Distendere le braccia ha inoltre come conseguenza una maggior esposizione delle gambe al flusso d'aria, che ora contribuiscono per il 40% alla resistenza. È interessante notare come questo sia l'unico caso in cui la portanza generata è negativa: il corpo è quindi leggermente schiacciato verso il basso, provocando quindi un aumento della forza d'attrito, effetto ulteriormente negativo.

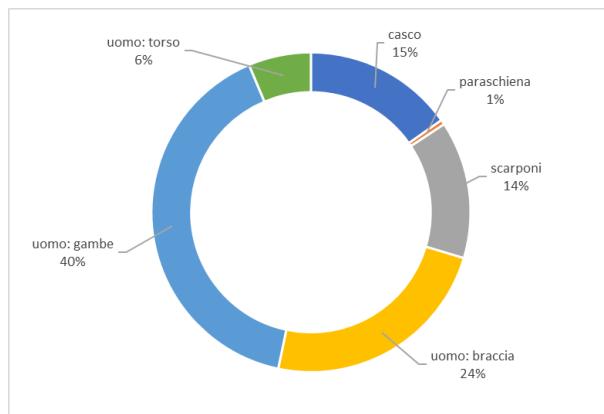


Figura 5.8: Posizione 2: distribuzione resistenza aerodinamica

I risultati relativi alla posizione 3 rivelano come l'abbassamento della parte alta del corpo (angolo β) permetta alle braccia di coprire una superficie superiore delle gambe, bilanciando di fatto il contributo complessivo, che si assesta sempre intorno al 65%. La sensibile diminuzione della superficie frontale rispetto alle

prime due configurazioni è la principale responsabile della diminuzione di resistenza aerodinamica, poiché il coefficiente c_D è invece superiore rispetto al caso 1.

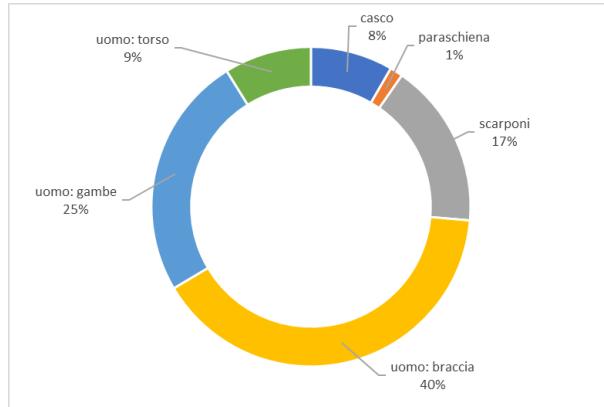


Figura 5.9: Posizione 3: distribuzione resistenza aerodinamica

La posizione 4, pur discostandosi di poco dalla posizione 3, presenta un notevole miglioramento in termini assoluti di resistenza e coefficiente di resistenza aerodinamica. La maggior copertura offerta dalle braccia nei confronti delle gambe è visibile nel grafico sopra riportato e influisce leggermente anche sugli altri componenti, scaricando il dorso dello sciatore (il paraschiena dà un contributo trascurabile) e caricando leggermente il casco. Il valore della portanza (inferiore al caso 3) concentrato principalmente sul torso e sul casco può aiutare l'atleta nel mantenimento della posizione.

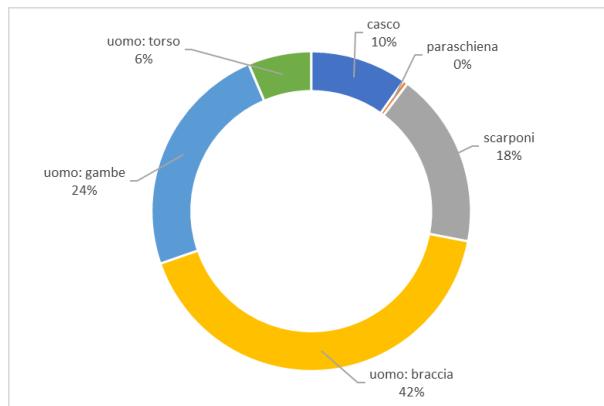


Figura 5.10: Posizione 4: distribuzione resistenza aerodinamica

Confrontando i risultati ottenuti con quelli già presenti in letteratura si ottengono

informazioni molto incoraggianti, che validano questa prima parte di analisi e permettono di proseguire con azioni di miglioramento e ottimizzazione. In particolare il valore $c_D S$ è molto significativo, poiché permette di confrontare i risultati appena ottenuti con quelli rilevati in galleria del vento, dove è facile misurare la resistenza aerodinamica complessiva ma è molto difficile ottenerne il valore della superficie frontale. È il caso del test svolto dal Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale del Politecnico di Milano [7], al termine del quale si ottiene un $c_D S$ intorno a $0,08 \text{ m}^2$. Il libro *Sport Aerodynamics* [8] tratta invece due casi sulle piste di Kulm (Austria) e Velocity Peak (Colorado), e assume il valore $c_D S$ pari a $0,13 \text{ m}^2$. Il confronto con lo studio presentato nel 1997 all'ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting [9] necessita invece di considerazioni più approfondite: il valore di superficie frontale è dello stesso ordine di grandezza di quello misurato nell'analisi appena presentata, ma i valori di resistenza complessiva e c_D si discostano molto da quelli appena ottenuti. Si parte infatti, nel caso migliore, da una resistenza di circa 20 lbf , ovvero meno di 90 N , e da un c_D pari a $0,15$. Questa differenza di circa il 300% può essere dovuta a tre motivi concorrenti:

- la velocità utilizzata nel test [9] è inferiore di circa 10 m/s rispetto a quella utilizzata nella simulazione su Star-CCM+ [10]. Ricordando la formula per il calcolo della resistenza $D = \frac{1}{2} \rho V^2 S c_D$ è immediato notare come una diminuzione del 15% della velocità possa, a parità degli altri parametri, indurre una diminuzione di circa il 40% della resistenza aerodinamica.
- la forma del casco utilizzato per le simulazioni su Star-CCM+ non è ottimizzata e influenza il risultato finale, incrementando la resistenza complessiva
- non è presente alcuna carenatura, o spoiler, nella parte posteriore delle gambe. L'assenza di questo componente comporta un ulteriore aumento di resistenza aerodinamica

5.2 Casco

5.2.1 Casco 1

Il casco 1 è quello utilizzato per le simulazioni al variare della posizione, sono quindi già stati ricavati i risultati relativi a questa specifica forma.

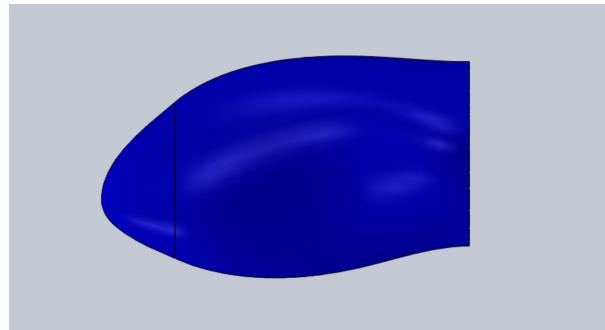


Figura 5.11: Casco 1

5.2.2 Casco 2

Il casco 2 riproduce fedelmente il profilo del casco dell'atleta *Simon Billy*, molto attivo nelle ultime stagioni in termini di ricerca e sviluppo.



Figura 5.12: Simon Billy

Il profilo del casco è stato ottenuto ricalcando l'immagine appena riportata all'interno di uno schizzo su Solidworks:

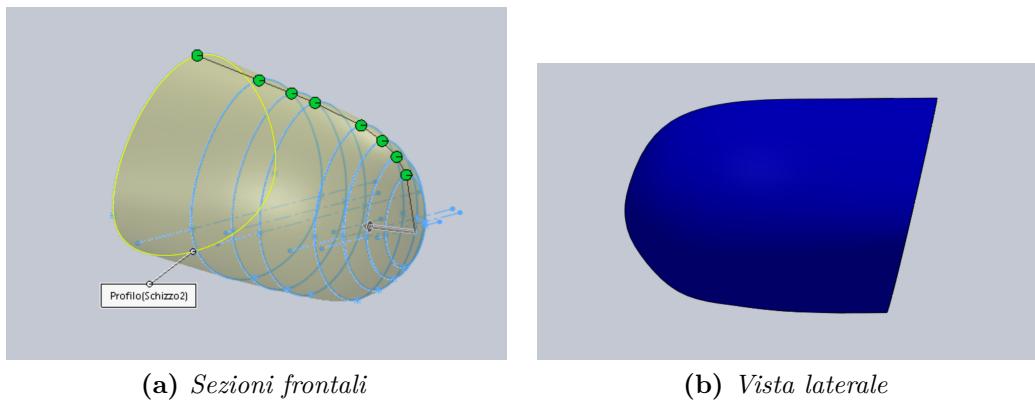


Figura 5.13: Casco 2 - Simon Billy

5.2.3 Casco 3

La forma del casco 3 deriva da tre considerazioni elaborate osservando la distribuzione delle pressioni sul corpo investito dal flusso d'aria:

- nella vista frontale il casco fuoriesce dalla superficie frontale del corpo. Per minimizzare la superficie frontale si cerca di ridurre al minimo la sezione frontale del casco, in modo da contenerla nella sezione del corpo dello sciatore
- guardando lateralmente le distribuzioni di pressione e velocità è immediato notare come nella transizione tra casco e petto dello sciatore si formi un punto d'arresto della corrente, che causa un aumento di resistenza aerodinamica. Per eliminare la formazione di questo punto di arresto si profila il casco in modo da guidare il flusso il più parallelamente possibile al petto e alla pancia dello sciatore

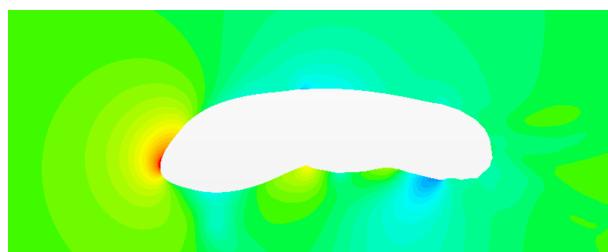


Figura 5.14: Visualizzazione della distribuzione di pressioni sul piano longitudinale

- le parti del corpo che danno il contributo più alto alla resistenza aerodinamica sono le braccia. Per abbassare questo contributo si allarga la sezione frontale del casco, rispettando il limite imposto dalla prima considerazione, in modo

da coprire la più grande porzione di braccia e guidare il flusso esternamente agli arti superiori.

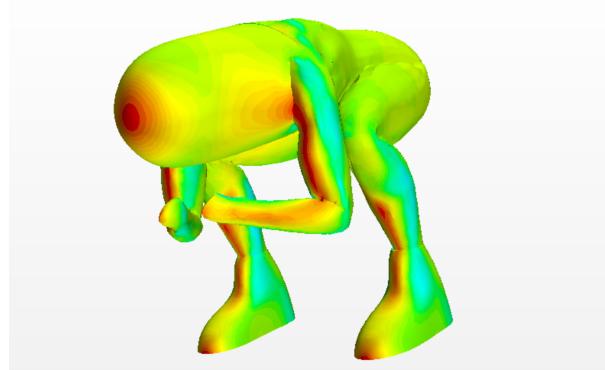
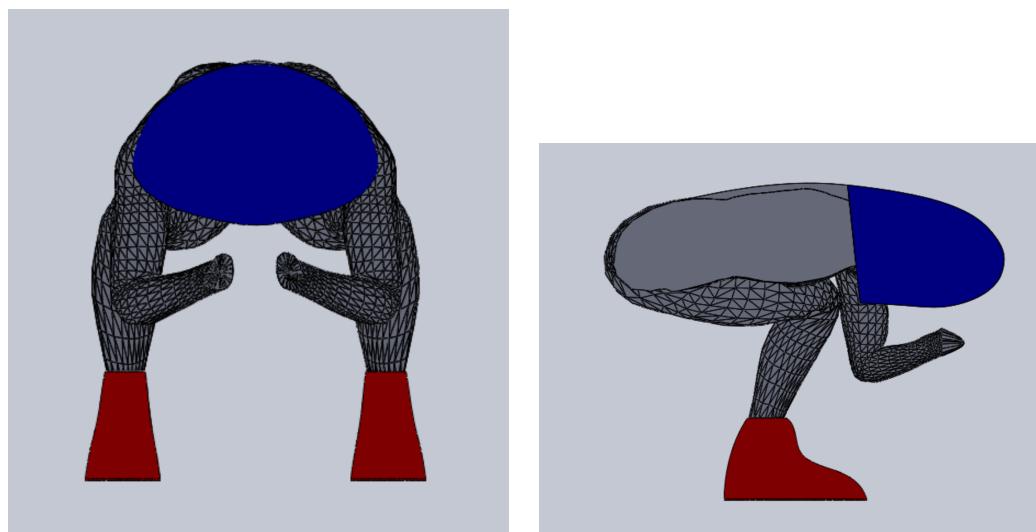


Figura 5.15: Visualizzazione della distribuzione di pressioni sul corpo dello sciatore

Il casco 3 ha quindi l'obiettivo di superare i limiti delle forme precedenti, riducendo la resistenza aerodinamica complessiva del sistema sciatore + equipaggiamento guidando il flusso in maniera più efficiente:



(a) *Vista frontale*

(b) *Vista laterale*

Figura 5.16: Casco 3 indossato dallo sciatore

5.2.4 Incidenza

Prima di procedere con l'analisi sui tre differenti caschi è necessario identificare l'angolo θ , ovvero l'angolo formato tra la normale alla base del casco e l'orizzontale, di fatto rappresentando l'incidenza del casco. Le prestazioni sono fortemente influenzate da questo parametro, poiché uno scorretto posizionamento del casco può indurre grandi variazioni prestazionali.

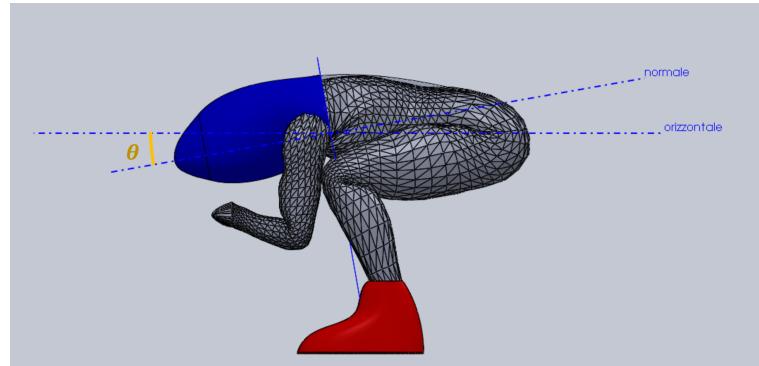


Figura 5.17: Casco 1: incidenza

Per ogni casco viene misurato l'angolo di incidenza in condizioni nominali e indicato nella tabella seguente:

Casco	θ
1	-10,0°
2	7,5°
3	6°

Tabella 5.6: Incidenze dei 3 caschi

5.2.5 Risultati

Casco	$D[N]$	c_D	$S[m^2]$	$c_D S[m^2]$	$L[N]$	$F_l[N]$
1	253,4706	0,3998	0,219	0,0876	104,0410	-19,4343
2	243,2223	0,3869	0,2161	0,0836	143,1268	-27,1063
3	235,5861	0,3745	0,2167	0,0811	127,7412	-8,074

Tabella 5.7: Risultati delle simulazioni con i 3 differenti caschi

Il casco 3 è il miglior casco dal punto di vista prestazionale: resistenza aerodinamica più bassa.

La distribuzione di pressioni per il casco 1 è la stessa già commentata per la posizione 4:

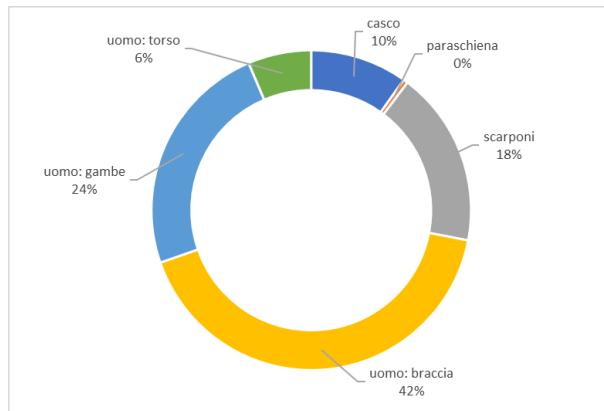


Figura 5.18: Casco 1: ripartizione resistenza aerodinamica

L'inserimento del casco 2 vede raddoppiare la quota percentuale di resistenza attribuita proprio al casco, ma una complessiva diminuzione di resistenza. Questo risultato modifica il problema di progettazione del casco: l'elemento di protezione della testa deve essere realizzato in un progetto integrato con la corporatura dello sciatore e con la postura assunta. Il casco 1 isolato dal corpo è aerodinamicamente più efficiente del casco 2 (i risultati numerici verranno commentati in seguito) ma il casco 2 permette di schermare e migliorare le prestazioni delle altre parti del copro, in particolare delle braccia. In questo senso vengono apportate le modifiche al casco 2 che permettono di ottenere il casco 3.

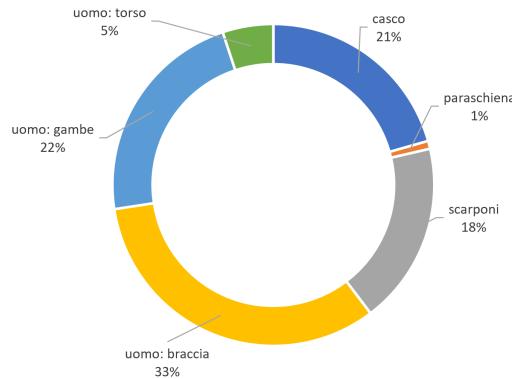


Figura 5.19: Casco 2: ripartizione resistenza aerodinamica

L'obiettivo di proteggere le braccia dal flusso e diminuire il contributo alla resistenza è raggiunto, anche se in misura ridotta, poiché a livello percentuale si attesta intorno al 2%. Stesso beneficio ottenuto per la zona inferiore del torso, nella quale però si forma una zona di depressione relativamente molto grande e che può essere ridotta in dimensioni da una geometria più precisa, diminuendo il contributo alla resistenza del casco, che risulta molto più alto rispetto ai casi precedenti, circa il 21%, ma che in termini assoluti permette un notevole abbassamento della resistenza aerodinamica.

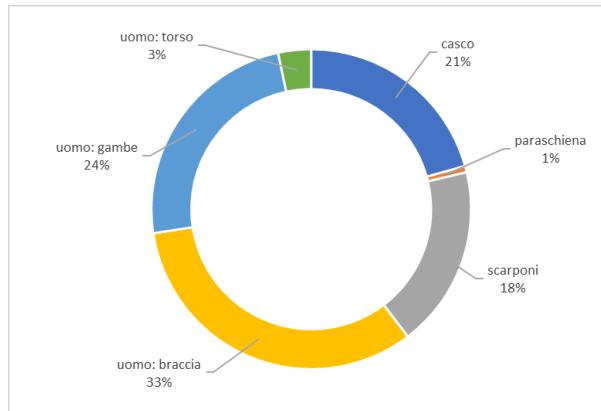


Figura 5.20: Casco 3: ripartizione resistenza aerodinamica

La sezione longitudinale dell'atleta permette di apprezzare una criticità nella progettazione del casco 3: nella zona di salto tra casco e petto/collo si genera una forte depressione, poco significativa in termini assoluti poiché la regione è di dimensioni limitate, ma una progettazione più accurata può evitare il distacco del flusso o quantomeno ridurre ulteriormente le dimensioni della regione di depressione,

cercando di recuperare N di resistenza poco significativi in termini assoluti ma molto importanti quando si tratta di record del mondo sul filo dei km/h .

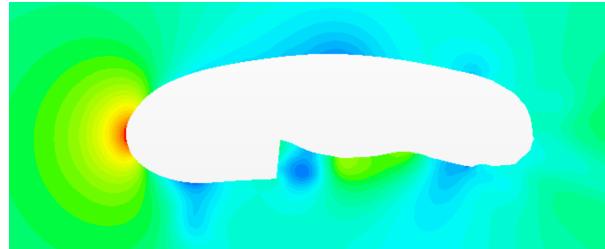


Figura 5.21: Casco 3: zona di depressione dietro al casco

5.3 Spoiler

L'inserimento degli spoiler viene eseguito sulla configurazione migliore: posizione 4 e casco 3.

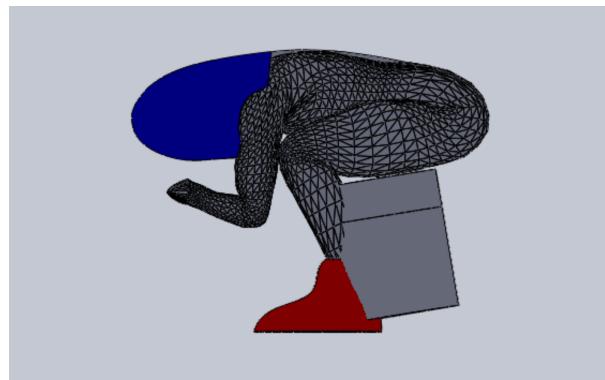


Figura 5.22: Sciatore con spoiler

5.3.1 Risultati

spoiler	$D[N]$	c_D	$S[m^2]$	$c_D S[m^2]$	$L[N]$	$F_l[N]$
no	235,5861	0,3745	0,2167	0,0811	127,7412	-8,074
si	222,915	0,3391	0,227	0,0768	160,9222	-102,9192

Tabella 5.8: Risultato della simulazione con gli spoiler

L'inserimento degli spoiler provoca un'ulteriore diminuzione della resistenza aerodinamica, dettata non tanto da una diminuzione di superficie frontale, che invece

aumenta leggermente, ma da una forte riduzione del c_D , da cui consegue una diminuzione del c_{DS} . La stabilità dello sciatore subisce alcune variazioni, poiché sia la portanza che la forza laterale sono in forte aumento. Il risultato sulla superficie laterale è però da considerarsi parziale, poiché nella simulazione steady-state è possibile avere forti oscillazioni di questo risultato a fronte di un contributo netto pari a zero. Una simulazione time-dependent potrebbe offrire un risultato più attendibile in termini di comfort.

L'inserimento degli spoiler, come prevedibile, riduce il contributo percentuale di gambe e scarponi.

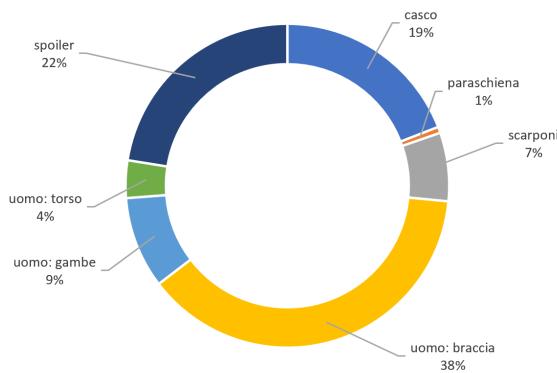


Figura 5.23: Posizione 4 - casco 3 - spoiler: ripartizione resistenza aerodinamica

Capitolo 6

Conclusioni e sviluppi futuri

6.1 Conclusioni

	pos1casco1	pos2casco1	pos3casco1	pos4casco1	pos4casco2	pos4casco3	pos4casco3spoiler
casco	37,0914	50,3468	25,1855	24,9507	49,9281	48,6193	42,55111
paraschiena	-1,6046	-1,5909	3,9416	1,1909	1,929	1,4878	1,3613
scarponi	46,2468	45,9906	50,4546	45,0611	44,3738	43,3115	15,2612
uomo: braccia	110,0366	78,2039	120,9906	105,8356	79,8195	77,4991	84,8961
uomo: gambe	100,8857	133,3864	74,4644	60,7198	54,0947	56,6605	20,3961
uomo: torso	25,4316	20,9676	26,7077	16,2835	12,3635	7,8586	8,3576
spoiler	0	0	0	0	0	0	50,0956
totale	318,0875	327,3044	301,7444	254,0416	242,5086	235,4368	222,91901

Tabella 6.1: Andamento della resistenza aerodinamica diviso per componenti

La tabella 6.1 raccoglie i risultati di tutte le simulazioni svolte e permette di visualizzare in maniera completa tutti i valori numerici raccolti nei capitoli precedenti. Il dato più importante è naturalmente la resistenza aerodinamica, per la quale viene visualizzato il contributo di ciascuna sezione significativa dello sciatore:

- casco
- paraschiena
- scarponi
- braccia (uomo: braccia)
- gambe (uomo: gambe)
- torso (uomo: torso)
- spoiler

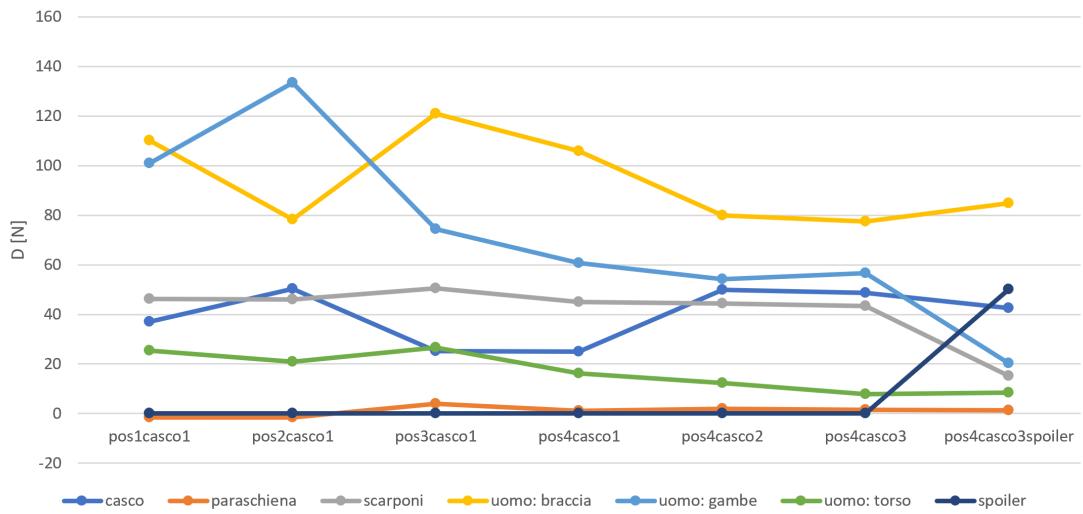


Figura 6.1: Dispersione: andamento della resistenza aerodinamica diviso per componenti

Il grafico a dispersione sopra riportato permette di apprezzare le modifiche effettuate sulle posizioni e sui componenti e l'effetto conseguente sul resto del sistema:

- passaggio da pos1 a pos2: la distensione in avanti delle braccia provoca una diminuzione della resistenza sulla specifica parte del corpo ma peggiora notevolmente le prestazioni di casco e gambe. L'effetto finale è infatti un incremento della resistenza aerodinamica.
- passaggio da pos2 a pos3: la resistenza imputata alle braccia è tornata al livello della pos1 ma il maggior abbassamento del torso permette di migliorare le prestazioni di gambe, che risultano più schermate dalle braccia, e casco.
- passaggio da pos3 a pos4: l'aumento della distanza tra le gambe permette a quest'ultime di essere maggiormente schermate dalle braccia.
- passaggio da casco1 a casco2: la forma più tozza del casco 2 è la causa dell'aumento di resistenza generata dal casco. Il risultato sarebbe negativo se preso isolato, ma nel sistema sciatore + equipaggiamento il casco 2 ha un effetto benefico su braccia, gambe e torso.
- passaggio da casco2 a casco3: il casco 3 è un'evoluzione del casco 2, che si propone di schermare maggiormente le braccia e assumere una forma più ergonomica e integrata con il torso. Il risultato è infatti un miglioramento nelle prestazioni di queste due componenti, nonostante un leggero incremento di resistenza sulle gambe.

- inserimento degli spoiler: l'inserimento degli spoiler riduce notevolmente il contributo alla resistenza di gambe e scarponi. Dalla tabella 6.1 è facile notare come la diminuzione totale sia di circa 64 N , mentre il contributo degli spoiler si ferma a 50 N . Un effetto non previsto è l'aumento di resistenza sulle braccia, bilanciato da una diminuzione sul casco. Questo fenomeno apparentemente sorprendente e inspiegabile è approfondito nel seguito di questo paragrafo.

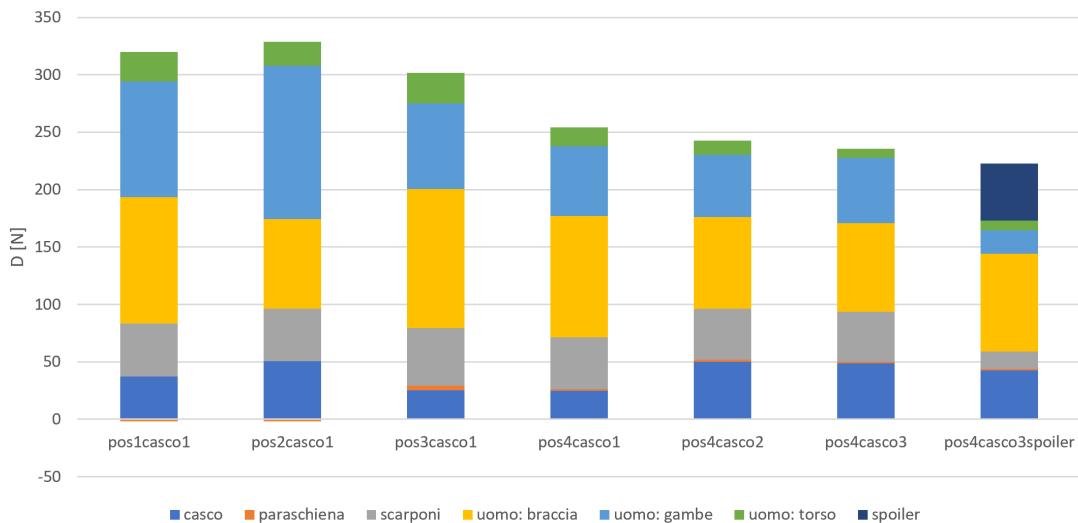


Figura 6.2: Istogramma: andamento della resistenza aerodinamica diviso per componenti

L'istogramma permette di visualizzare il contributo assoluto che ogni componente realizza rispetto al totale. La progressiva riduzione dell'altezza totale delle colonne è indice del fatto che le modifiche apportate nel corso del presente studio hanno avuto molteplici effetti positivi. La sezione rappresentativa del contributo degli spoiler (blu scuro - circa 50 N) suggerisce la possibilità di migliorare ulteriormente le prestazioni agendo dal punto di vista progettuale su un componente relativamente piccolo e semplice da realizzare, ma con un potenziale migliorativo molto alto.

6.1.1 Anomalia su casco e braccia

L'anomalia nell'andamento della resistenza di braccia e casco dopo l'inserimento degli spoiler, verificata e segnalata nel paragrafo precedente viene ora approfondita e analizzata con più precisione.

Le immagini seguenti rappresentano la sezione laterale del sistema sciatore + equipaggiamento e l'andamento del modulo della velocità:

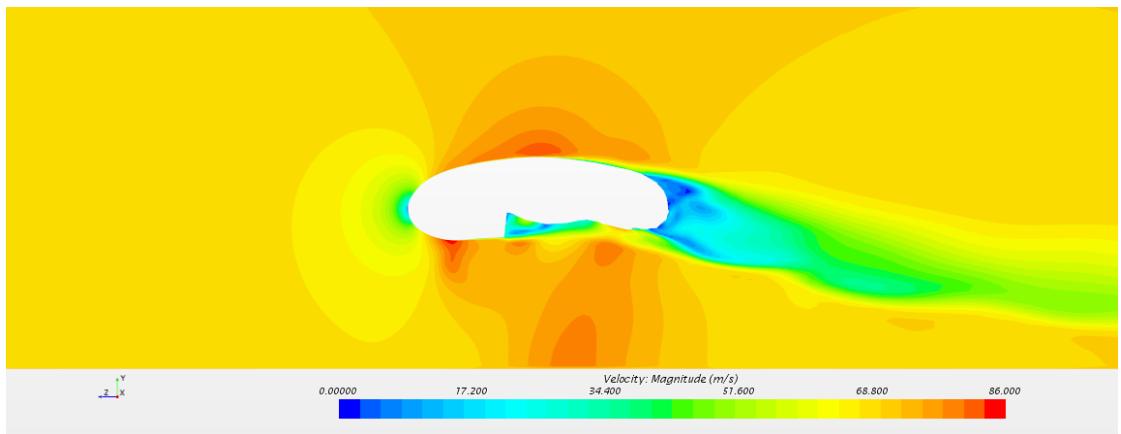


Figura 6.3: Sezione laterale (pos4casco3): andamento del modulo della velocità

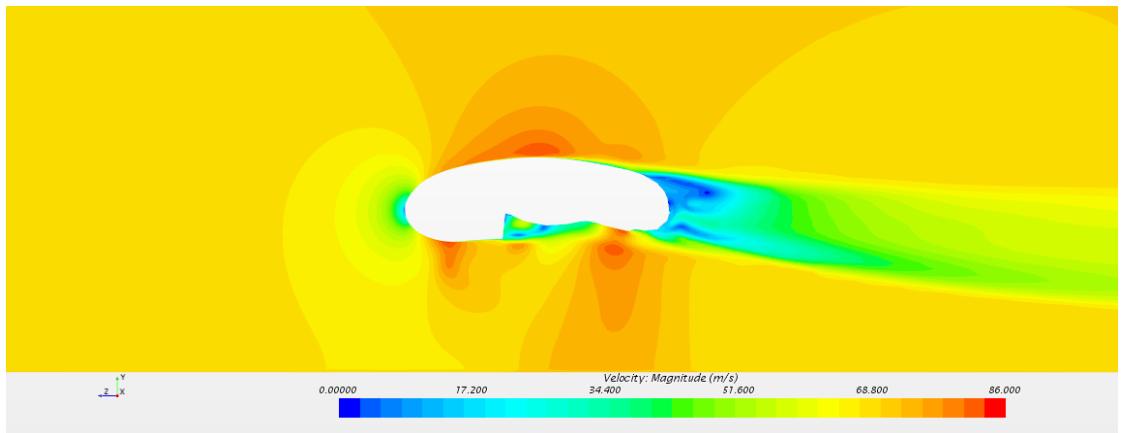


Figura 6.4: Sezione laterale (pos4casco3spoiler): andamento del modulo della velocità

Dalle immagini appena riportate è facile notare come l'inserimento degli spoiler sia responsabile di un aumento di portata d'aria nella zona inferiore del corpo dello sciatore, in particolare tra le gambe. Infatti si nota come la scia sia spostata verso più verso l'alto nel caso di spoiler indossati. Il canale formato dagli spoiler sembra responsabile di un risucchio d'aria che aumenta quindi la portata in transito tra gli arti inferiori. Un aumento della componente verticale della velocità (verso il basso) spiegherebbe quindi la riduzione di resistenza sul casco, che si trova nella parte superiore, e l'aumento sulle braccia, che sarebbero investite da una corrente a velocità più alta nella direzione negativa dell'asse y. Per confermare questa tesi viene visualizzato frontalmente l'andamento della componente j della velocità.

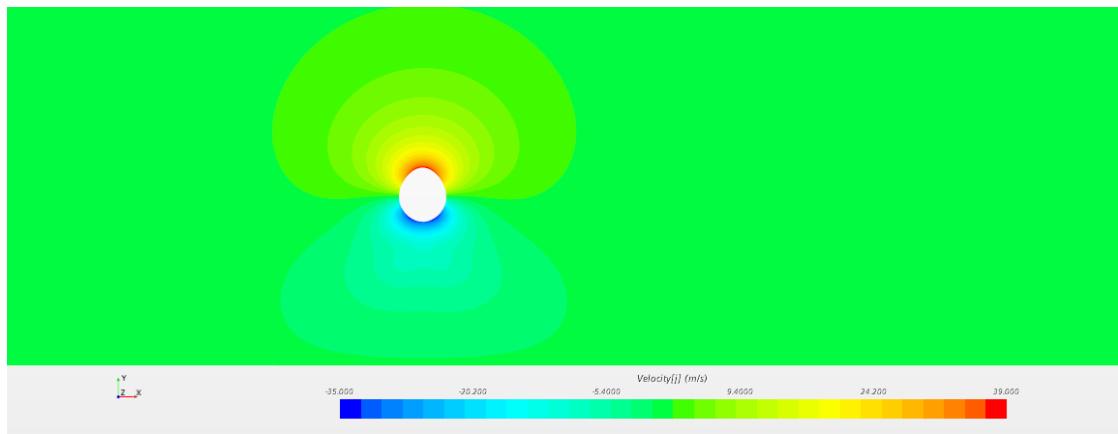


Figura 6.5: Sezione frontale (0,25 m dall'origine - pos4casco3): componente verticale della velocità

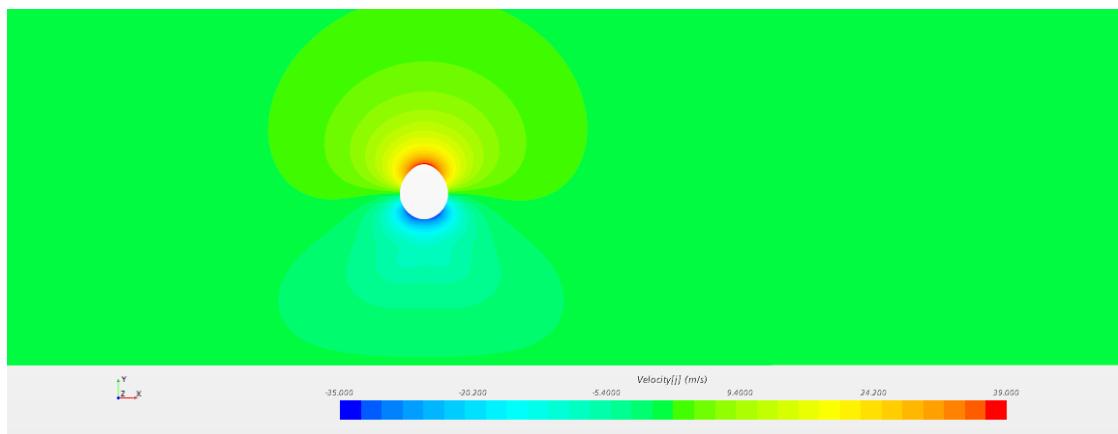


Figura 6.6: Sezione frontale (0,25 m dall'origine - pos4casco3spoiler): componente verticale della velocità

Il piano frontale posto a 0,25 m dall'origine evidenzia, seppur con colori poco distinguibili, una diminuzione della componente verticale, risultato in accordo con la tesi di partenza, poiché indice del fatto che la velocità verso il basso è più alta nel caso di spoiler indossati.

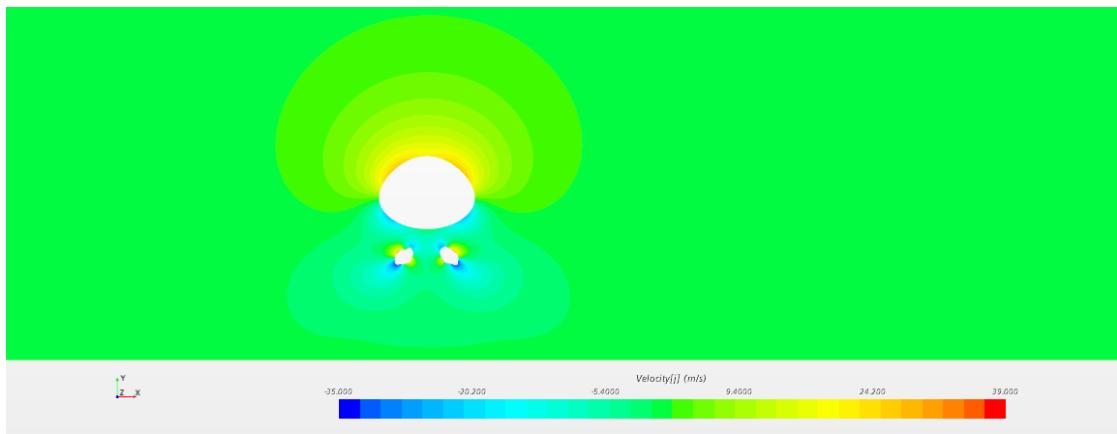


Figura 6.7: Sezione frontale (0,15 m dall’origine - pos4casco3): componente verticale della velocità

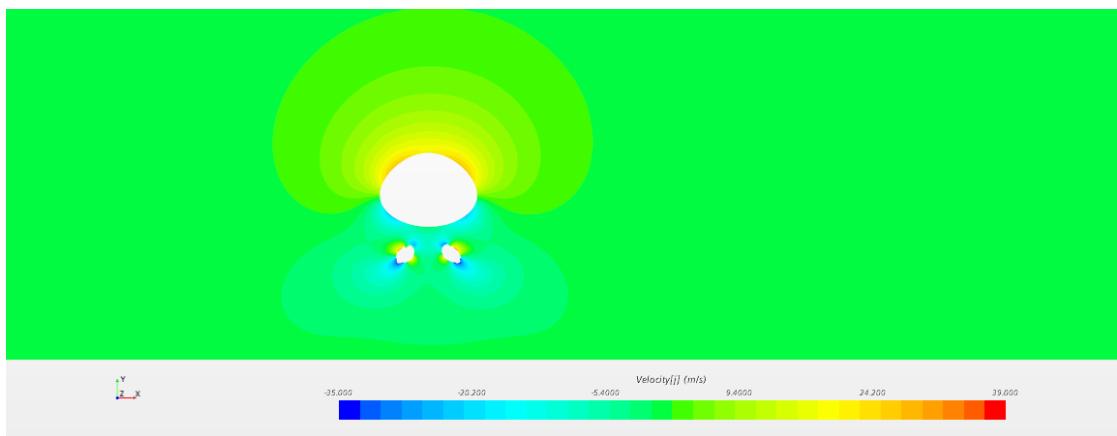


Figura 6.8: Sezione frontale (0,15 m dall’origine - pos4casco3spoiler): componente verticale della velocità

Spostando il piano frontale a 0,15 m dall’origine, la differenza appena individuata in termini di colori non è più apprezzabile, ma l’area verde scura (componente verticale negativa) è più estesa nel caso di spoiler indossati, risultato a conferma ulteriore della tesi che spiegava le impreviste variazioni di resistenza dovute a braccia e casco dopo l’inserimento degli spoiler.

6.2 Sviluppi futuri

Sulla base dei risultati ottenuti emergono due importanti considerazioni per proseguire nel lavoro di progettazione dell’equipaggiamento:

- Casco: la distribuzione di pressioni ottenuta con il casco 3 è la migliore tra quelle ottenute nelle diverse configurazioni. La zona di depressione che si forma all'altezza del collo (identificata nel capitolo precedente) può essere però ridotta in dimensioni procedendo ad un disegno più preciso del componente, migliorando ulteriormente l'ergonomia del casco e recuperando una piccola percentuale di forza di pressione. La forma del casco può essere quindi ulteriormente migliorata per incidere sulle prestazioni dell'atleta.
- Spoiler: dall'ultimo grafico a ciambella, rappresentativo della distribuzione percentuale della resistenza, è possibile notare come gli spoiler incidano per circa un quinto della resistenza totale. In termini assoluti si tratta di circa 50 N. Il design degli spoiler è quindi molto influente sulla resistenza totale: la sperimentazione su nuove forme e dimensioni può garantire una riduzione di questo contributo, migliorando ulteriormente le prestazioni dello sciatore.

Dal punto di vista computazionale l'evoluzione da un calcolo stazionario ad un calcolo *time dependent* permetterebbe di valutare in maniera più accurata la distribuzione delle pressioni nel tempo e di conseguenza l'oscillazione delle forze in gioco. Il passaggio ad un calcolo time dependent è più costoso dal punto di vista computazionale ma permetterebbe inoltre di valutare il transitorio nel caso di partenza da fermo, evidenziando quindi le zone dell'atleta più sollecitate in fase di accelerazione.

Questo lavoro vuole proporsi come apripista per un inserimento sempre maggiore della CFD nel mondo dello sci e in particolare nello sci di velocità: una collaborazione tra Politecnico di Torino e FISI (Federazione Italiana Sport Invernali) garantirebbe i fondi e le competenze necessarie per consolidare il primato italiano nello sci di velocità e percorrere nuove strade nel tentativo di migliorare ulteriormente il record del mondo, perseguiendo l'obiettivo di permettere all'uomo di raggiungere le più alte velocità possibili grazie alla sola forza di gravità.

Appendice A

Regolamento FIS

A.1 The international ski competition rules (ICR)

A.1.1 200 Joint Regulations for all Competitions

200.1 All events in the FIS Calendar must be held under the applicable FIS Rules.

200.2 Organisation and Conduct

Rules and instructions for the organisation and conduct of the various competitions are to be found in their respective rules.

200.3 Participation

Competitions listed in the FIS Calendar are only open to all properly licensed competitors entered by their National Ski Associations in accordance with current quotas.

200.4 Special Regulations

The FIS Council can authorise a National Ski Association to adopt rules and regulations to organise national or international competitions with different grounds for qualification but only provided that they do not go beyond the limits laid down in the present rules.

200.5 Control

All competitions listed in the FIS Calendar must be supervised by a Technical Delegate of the FIS.

200.6 Every legal sanction imposed and published in respect of a competitor, official or trainer will be recognised by the FIS and the National Ski Associations respectively.

A.1.2 201 Classification and Types of Competitions

201.1 Competitions with Special Rules and/or Limited Participation

National Ski Associations affiliated with the FIS - or clubs belonging to these National Ski Associations with the approval of their association - may invite neighbouring National Ski Associations or their clubs to their own competitions. But these competitions must not be promulgated or announced as international competitions, and the limitation must be made clear in the announcement.

201.1.1 Competitions with special rules and/or limited participation or including non-members may be held under special competition rules as approved by the FIS Council. Any such rules must be published in the announcement.

201.2 Competitions with Non-Members of the FIS

The FIS Council can authorise one of its member National Ski Associations to invite a non-member organisation (military etc.) to competitions, or accept invitations from such an organisation.

201.3 Classification of Competitions

201.3.1 Olympic Winter Games, FIS World Ski Championships and FIS World Junior Ski Championships

201.3.2 FIS World Cups

201.3.3 FIS Continental Cups

201.3.4 International FIS Competitions (FIS Races)

201.3.5 Competitions with Special Participation and/or Qualifications

201.3.6 Competitions with Non-Members of the FIS

201.4 FIS Disciplines

A discipline is a branch of a sport and may comprise one or several events. For example Cross-Country Skiing is a FIS Discipline, whereas the Cross-Country Sprint is an Event.

201.4.1 Recognition of Disciplines in the International Ski Federation

New disciplines, comprising one or several events, widely practised in at least twenty-five countries and on three continents may be included as part of the programme of the International Ski Federation.

201.4.2 Exclusion of Disciplines from the International Ski Federation

If a discipline is no longer practised in at least twelve National Ski Associations on at least two continents the FIS Congress may decide to exclude the discipline from the programme of the International Ski Federation.

201.5 FIS Events

An event is a competition in a sport or in one of its disciplines. It results in a ranking and gives rise to the award of medals and/or diplomas.

201.6 Types of Competitions

International competitions consist of:

201.6.1 Nordic Events

Cross-Country, Roller Skiing, Ski-Jumping, Ski-Flying, Nordic Combined, Team Competitions in Nordic Combined, Nordic Combined with Roller Skiing or In-line, Team Ski-Jumping, Ski-Jumping on plastic jumping hills, Popular Cross-Country races

201.6.2 Alpine Events

Downhill, Slalom, Giant Slalom, Super-G, Parallel Competitions, Combined, KO, Team Competitions

201.6.3 Freestyle Ski Events

Moguls, Dual Moguls, Aerials, Ski Cross, Halfpipe, Slopestyle, Big Air, Team Competitions

201.6.4 Snowboard Events

Slalom, Parallel Slalom, Giant Slalom, Parallel Giant Slalom, Super-G, Halfpipe, Snowboard Cross, Big Air, Slopestyle, Team Competitions

201.6.5 Telemark Events

201.6.6 Firngleiten

201.6.7 Speed Skiing Events

Speed 1 (S1), Speed 2 (S2), Speed 2 Junior (S2J)

201.6.8 Grass Ski Events

201.6.9 Combined Events with other Sports

201.6.10 Youth, Masters, Para Snow Events, etc.

201.7 FIS World Championship Programme

201.7.1 To be included in the programme of the FIS World Championships, events must have a recognised international standing both numerically and geographically, and have been included for at least two seasons in the World Cup before a decision about their admission can be considered.

201.7.2 Events are admitted no later than three years before specific FIS World Championships.

201.7.3 A single event cannot simultaneously give rise to both an individual and a team ranking.

201.7.4 Medals may only be awarded at the FIS World Championships and FIS Junior World Championships in all disciplines (Alpine, Nordic, Snowboard, Freestyle Ski, Grass Skiing, Rollerski, Telemark, Speed Skiing) when there are a minimum of 8 nations participating in team competitions and 8 nations represented in an individual event.

A.1.3 202 FIS Calendar

202.1 Candidature and Announcement

202.1.1 Each National Ski Association is entitled to present its candidature for the organising of the FIS World Ski Championships in accordance with the published

"Rules for the Organisation of World Championships".

202.1.2 For all other competitions, the registrations for inclusion in the International Ski Calendar have to be made to FIS by the National Ski Association according to the Rules for the FIS Calendar Conference published by the FIS.

202.1.2.1 The applications of the National Ski Associations (NSA) are entered by using the FIS Calendar program in the members section of the FIS website: www.fis-ski.com by 31st August (31st May for the Southern Hemisphere).

202.1.2.2 Allocation of competitions

Allocation of the competitions to the National Ski Associations is made through the electronic communication process between FIS and the National Ski Associations. In the case of FIS World Cup competitions, the calendars are subject to the approval of the Council, on proposal of the respective Technical Committee.

202.1.2.3 Homologations

Competitions that appear in the FIS Calendar may only take place on competition courses or jumping hills homologated by the FIS. The homologation certificate number must be indicated when applying for the inclusion of competition in the FIS Calendar.

202.1.2.4 Publication of the FIS Calendar

The FIS calendar is published by FIS on the FIS website www.fis-ski.com. It will be updated to reflect cancellations, postponements and other changes continuously by FIS.

202.1.2.5 Postponements

In case of the postponement of a competition listed in the FIS Calendar, the FIS has to be informed immediately and a new invitation must be sent to the National Ski Associations, otherwise the competition cannot be considered for FIS points.

202.1.2.6 Calendar Fees

In addition to the annual subscription, a calendar fee is set by the FIS Congress and is due for each year and for each event listed in the FIS Calendar. For additional events, a 50% surcharge will be made in addition to the regular calendar fee for applications submitted 30 days before the date of the competition. The calendar fee for a competition that has to be rescheduled remains the responsibility for payment in full of the original organising National Ski Association. At the beginning of the season, each NSA will receive an invoice for 70% of its total invoice from the previous season. This amount will be debited from its FIS account. At the end of the season each NSA will receive a detailed invoice for all registered competitions during the season. The balance will be subsequently be debited or credited to the NSA account at FIS.

202.1.3 Appointment of Race Organiser

In the event that the National Ski Association appoints a race organiser, such as an affiliated ski club, it shall do so using the form "Registration Form National Ski

"Association and Organiser" or by means of a similar written agreement. An application by a National Ski Association for inclusion of an event on the International Ski Calendar shall mean that the necessary agreement to organise the event has been established.

202.2 Organisation of Races in other Countries

Competitions which are organised by other National Ski Associations may only be included in the FIS Calendar when the National Ski Association of the country concerned where the competitions will be organised gives its approval.

A.1.4 203 Licence to participate in FIS Races (FIS Licence)

A licence to participate in FIS races is issued by a National Ski Association to competitors who fulfil the criteria for participation through registering the competitor with FIS in the respective discipline(s).

203.1 The FIS licence year begins on July 1st and finishes on June 30th of the following year.

203.2 To be eligible for participation in FIS events, a competitor must have a licence issued by their National Ski Association. Such a licence shall be valid in the Northern and Southern hemispheres for the licence year only. The validity of a licence can be limited to participation in one specific country or in one or more specific events.

203.2.1 The National Ski Association must guarantee that all competitors registered with a FIS License to participate in FIS races accept the Rules of the International Ski Federation, in particular the provision which foresees the exclusive competence of the Court of Arbitration for Sport as the court of appeal in doping cases.

203.3 A National Ski Association may only issue a FIS licence to participate in FIS races when the competitor has proven their nationality and therefore eligibility by submitting a copy of their passport and signed the Athletes Declaration in the form approved by the FIS Council and returned it to their National Ski Association. All forms from under-age applicants must be counter signed by their legal guardians. Both the copy of the passport and signed Athletes Declaration must be made available to FIS on request.

203.4 During the FIS licence year, a competitor may only participate in International FIS competitions with a FIS licence to participate in FIS races issued by one National Ski Association.

203.5 All applications to change licence registration from one member National Ski Association to another are subject to consideration by the FIS Council at its Meetings in the spring. In principle an application to change licence registration will not be granted unless the competitor demonstrates their personal association with

the new nation. Prior to submitting an application to change licence registration a competitor must possess the citizenship and passport of the country for which they wish to compete. In addition, the competitor must have had their principal legal and effective place of residence in the new country for a minimum of two (2) years immediately prior to the date of the request to change registration to the new country/National Ski Association. An exception to the two year residency rule may be waived if the competitor was born in the territory of the new country, or whose mother or father is a national of the new country. Applications will not be accepted if a parent has obtained a passport for the new country, but is not resident, and/or there is no family ancestry. Furthermore the competitor is required to submit a detailed explanation with the application about their personal circumstances and the reason for requesting a change of licence registration.

203.5.1 If a competitor has already participated in FIS calendar events for a National Ski Association, they must have the written agreement to be released from the former National Ski Association in addition to the citizenship, passport and residency requirements in art. 203.5 before the new National Ski Association may submit a request to FIS for a change of registration. If such a written agreement is not given, the competitor may not participate in any FIS calendar events for a period of twelve months from the end of the last season in which they competed for their present National Ski Association, nor may they be issued with a licence to participate in FIS races by the new National Ski Association. These rules are also valid when a competitor has more than one nationality and would like to change National Ski Association licence registration.

203.5.2 The FIS Council reserves the right in its absolute discretion, to grant or to decline to grant, a change of licence notwithstanding the fulfilment of the aforementioned conditions where it deems it is contrary to the spirit of the rule and in the best interests of the International Ski Federation to do so (e.g. to decline to grant a change of licence if a member National Ski Association tries to "import" a competitor).

203.5.3 In the event that a competitor does not fulfil all the criteria required to apply for a change of National Ski Association licence registration, the onus shall be on the competitor to demonstrate in writing to the satisfaction of the FIS Council that exceptional circumstances exist and it is in the best interests of the International Ski Federation to grant the change.

203.5.4 A competitor will retain their FIS points if they change their National Ski Association under the condition that the former National Ski Association granted the release of the competitor.

203.5.5 In the event that any of the documents for an application to change licence registration submitted by the National Ski Association (letter of release from the former National Ski Association, passport, residency papers) are found to be false, the FIS Council will sanction the competitor and the new National Ski Association.

A.1.5 204 Qualification of Competitors

204.1 A National Ski Association shall not support or recognise within its structure, nor shall it issue a licence to participate in FIS or national races to any competitor who:

204.1.1 has conducted himself in an improper or unsportsmanlike manner or has not respected the FIS medical code or anti-doping rules,

204.1.2 accepts or has accepted, directly or indirectly, any money-payments for the participation at competitions,

204.1.3 accepts or has accepted a prize of a higher value than fixed by article 219,

204.1.4 permits or has permitted their name, title or individual picture to be used for advertising, except when the National Ski Association concerned, or its pool for this purpose, is party to the contract for sponsorship, equipment or advertisements.

204.1.5 knowingly competes or has competed against any skier not eligible according to the FIS Rules, except if:

204.1.5.1 the competition is approved by the FIS Council, is directly controlled by the FIS or by a National Ski Association, and the competition is announced "open",

204.1.6 has not signed the Athletes Declaration,

204.1.7 is under suspension.

204.2 With the issuance of a licence to participate in FIS competitions and entry the National Ski Association confirms, that valid and sufficient accident insurance for training and competition is in place for the competitor and assumes full responsibility.

A.1.6 205 Competitors Obligations and Rights

Competitors whatever their age, gender, race, religion or belief, sexual orientation, ability or disability have the right to participate in snow sports in a secure environment and protected from abuse. FIS encourages all member nations to develop policies to safeguard and promote the welfare of children and young persons.

205.1 The competitors are obliged to make themselves familiar with the appropriate FIS Rules and must comply with the additional instructions of the Jury. Competitors must also follow the FIS rules regulations.

205.2 Competitors are not permitted to use doping. (see FIS Anti-Doping Rules and Procedural Guidelines).

205.3 As stated in the Athletes Declaration, competitors have the right to inform the Jury of safety concerns they may have regarding the training and competition

courses. More details are given in the corresponding discipline rules.

205.4 Competitors who do not attend the prize-giving ceremonies without excuse lose their claim to any prize including prize money. In exceptional circumstances, the competitor may be represented by another member of their team, but this person has no right to take their place on the podium.

205.5 Competitors must behave in a correct and sportsmanlike manner towards members of the Organising Committee, volunteers, officials and the public.

205.6 Support for the Competitors

205.6.1 A competitor is registered with FIS by their National Ski Association to participate in FIS races may accept:

205.6.2 full compensation for travel cost to training and competition,

205.6.3 full reimbursement for accommodation during training and competitions,

205.6.4 pocket money,

205.6.5 compensation for loss of income according to decisions of their National Ski Association,

205.6.6 social security including insurance for training and competition,

205.6.7 scholarships.

205.7 A National Ski Association may reserve funds to secure a competitor's education and future career after retiring from active competitive skiing. The competitor has no claim to these funds which shall be dispensed only according to the judgement of their National Ski Association.

205.8 Gambling on Competitions

Competitors, trainers, team officials and technical officials are prohibited from betting on the outcome of competitions in which they are involved. Reference is made to the FIS Rules on the Prevention of the Manipulation of Competitions.

A.1.7 206 Advertising and Sponsorship

In the context of this rule advertising is considered as the presentation, of signage or other visibility at the venue informing the public of the name of a product or service to achieve awareness of a company or an organisation and its brand name, activities, products or service. On the other hand Sponsorship provides a company with the opportunity to have a direct association with the competition or series of events.

206.1 Olympic Winter Games and FIS World Championships

All Advertising and Sponsorship rights to the Olympic Winter Games and FIS World Championships belong to the IOC and to the FIS respectively and are subject to separate contractual arrangements.

206.2 FIS Events

For all FIS Events the FIS Advertising Rules define the advertising opportunities

in the competition area and are subject to the approval of the FIS Council. For the FIS World Cup Events the FIS Advertising Rules form an integral part of the FIS Organisers Agreement with the National Ski Associations and Organisers.

206.3 Member National Ski Associations

Each FIS affiliated National Ski Association that organises events in its country which are included in the FIS calendars, has the authority as the owner of the event advertising rights to enter into contracts for their sale. In the case of FIS World Cup competitions these rights shall be defined in the Organiser Agreement upon approval of the FIS Council and considering the National Ski Associations responsibilities. In cases where a National Ski Association organises events outside its own country these FIS Advertising rules also apply.

206.4 Title and Presenting Sponsorship Rights

In the case of FIS series approved by the FIS Council, FIS markets the rights of the title/presenting sponsor (alternative naming possible) package. For the FIS World Cup series these are marketed to appropriate sponsors that promote the image and values of the discipline concerned. The revenue generated from the sale of the title/presenting sponsor rights is invested by FIS to provide a professional organisation.

206.5 Use of Markings and supports

All Advertising and commercial markings and supports used shall comply with the technical specifications set forth in the applicable FIS Advertising Rules.

206.6 Advertising Packages

Location, number, size and form of the advertising are specified in the FIS Advertising Rules for each discipline. Detailed information including graphical illustrations is laid out in the discipline-specific Marketing Guides which are published on the FIS Website. The Marketing Guides are reviewed and updated as necessary by the Committee for Advertising Matters and approved by the FIS Council prior to their publication.

206.7 Sponsorships by commercial betting companies

206.7.1 FIS will not allocate Title / Presenting Sponsor rights to commercial betting companies

206.7.2 Sponsorships of events by commercial betting companies is permitted subject to 206.7.3 below.

206.7.3 Advertising of commercial betting companies or other betting activities on or with the athletes, e.g. head sponsors, competition suits, starting bibs, testimonials are strictly prohibited with the exception of lotteries and companies operating non-sports betting only.

206.8 A National Ski Association or its pool may enter into contracts with a commercial firm or organisation for financial sponsorship and or the supply of goods or equipment if the specific company or organisation is acknowledged as an Official Supplier or Sponsor by the National Ski Association. Advertising using

photographs, likeness or names of FIS competitors with any sportsman not eligible according to either the FIS eligibility rules or the eligibility rules of the IOC, is forbidden. Advertising with or on competitors with tobacco or alcohol products or drugs (narcotics) is forbidden.

206.9 All compensation under such contracts must be made to the National Ski Association or its ski pool which shall receive the compensation subject to the regulations of each National Ski Association. Competitors may not directly receive any part of such compensation except as stated in art. 205.6. The FIS may at any time call for a copy of the contract.

206.10 Equipment goods supplied to and used by the national team must, with reference to markings and trademarks, conform with the specifications stated in art. 207.

A.1.8 207 Competition Equipment and Commercial Markings

Technical Specifications about the size, the form and the number of commercial markings are decided by the FIS Council each spring for the following competition season and published by the FIS.

207.1 Competition Equipment at FIS Events

Only the competition equipment, according to the FIS rules on advertising, provided by the National Ski Association, complete with the commercial markings approved by the National Ski Association, may be worn in FIS World Cup and FIS World Ski Championship competitions. Obscene names and/or symbols on clothing and equipment are forbidden.

207.1.1 At FIS World Ski Championships, FIS World Cups and all events of the FIS Calendar, a competitor is not allowed to take equipment (skis/board, poles, ski boots, helmet, glasses) to the official ceremonies involving anthems and/or flag raising. Holding/carrying equipment on the victory podium after conclusion of the whole ceremony (handing over trophies and medals, national anthems) for press photos, pictures, etc. is however permitted.

207.1.2 Winners presentation / Equipment on the podium

At FIS World Ski Championships and all events of the FIS Calendar, a competitor is allowed to take the following equipment on the podium:

- Skis / Snowboards
- Footwear: The athletes may wear their boots on their feet, but are not allowed to wear them anywhere else (such as around their neck). Other shoes cannot be taken on the podium during presentation except if they are worn on the feet.
- Poles: not on/around skis, normally in the other hand
- Goggles: either worn or around the neck

- Helmet: if worn only on the head and not on another piece of equipment, e.g. skis or poles
- Ski straps: maximum of two with name of the producer of skis; eventually one can be used for a wax company
- Nordic Combined and Cross-Country Ski Poles Clips. A clip can be used to hold the two poles together. The clip can be the width of the two poles, though not wider than 4 cm. The length (height) can be 10 cm. The long side of the clip is to be parallel to the poles. The commercial marking of the pole manufacturer can cover the entire surface of the clip.
- All other accessories are prohibited: waist bags with belt, phones on neckbands, bottles, rucksack/backpack, etc.

207.1.3 An unofficial presentation (flower ceremony) of the winner, and the winners ceremony immediately after the event in the event area with the national anthem even before the protest time has expired, is allowed at the organiser's own risk. Visible wearing of the starting bibs is mandatory.

207.1.4 Visible wearing of the starting bib of the event or other outerwear of the NSA is mandatory in the restricted corridor (including the leader board and TV interview locations).

207.2 Commercial Markings

Specifications about the size, the form and the number of commercial markings on equipment and clothing as well as the by-laws for commercial markings and for advertising are to be reviewed by the Committee for Advertising Matters and approved by the FIS Council each spring for the following competition season and published by the FIS.

207.2.1 The rules governing commercial markings and advertising on equipment and clothing as well as the relevant by-laws published in the Specifications for Competition Equipment/Commercial Markings must be followed.

207.2.2 Any competitor who breaches the advertising rules is subject to sanction, as provided for in art. 223.1.1. An offence for which a sanction may apply and a penalty be imposed is defined as conduct that is in violation or non-observance of competition rules.

207.2.3 If a National Ski Association fails to enforce these rules with its own competitor(s) or for any reason prefers to refer the case to the FIS, the FIS may take immediate steps to suspend a competitor's licence. The competitor concerned and/or their National Ski Association have the right to make an appeal before a final decision is taken.

207.2.4 If an advertiser uses the name, title or individual picture of a competitor in connection with any advertisement, recommendation or sale of goods without the approval or knowledge of the competitor, the competitor may give a "power of attorney" to their National Ski Association or to the FIS to enable them, if necessary, to take legal action against the company in question. If the competitor

concerned fails to do so, the FIS shall judge the situation as if the competitor had given permission to the company.

207.2.5 The FIS Council shall be informed of infractions or breaches of these rules that have taken place with regard to the qualification of competitors, sponsorship and advertising and support for the competitors, and shall review what measures to take to deal with cases.

207.6 In all competitions of the FIS Calendar (especially for the FIS World Cups) the "FIS Advertising Guidelines" must be observed in regard to advertising possibilities in the competition area, respectively in the TV area.

These "FIS Advertising Guidelines", approved by the FIS Council, are an integral part of the FIS contracts with cup organisers.

A.1.9 208 Exploitation of Electronic Media Rights

208.1 General Principles

208.1.1 Olympic Winter Games and FIS World Championships

All Media rights to the Olympic Winter Games and FIS World Championships belong to the IOC and to the FIS respectively, and are subject to separate contractual arrangements.

208.1.2 Rights owned by the member National Ski Associations

Each FIS affiliated National Ski Association that organises events in its country which are included in the annual FIS calendars, has the authority as the owner of the electronic media rights to enter into contracts for the sale of the electronic media rights on those events. In cases where a National Ski Association organises events outside its own country, these rules also apply, subject to bi-lateral agreement with the National Ski Association of the country where the event takes place.

208.1.3 Promotion

Contracts shall be prepared in consultation with the FIS with the intention of giving the widest promotion and exposure to the sports of skiing and snowboarding and considering the best interests of the National Ski Associations.

208.1.4 Access to events

For all competitions, admission of personnel and their equipment to the media areas will be limited to those having the necessary accreditation and access passes. Priority access will be given to rights holders and the system of accreditation and access control must avoid possible abuse by non-rights holders.

208.1.5 Control by the FIS Council

The FIS Council exercises control over the adherence to the principles of this Rule by National Ski Associations and all organisers. Should a contract or individual clauses thereof, create a major conflict of interest for the FIS, a member National Ski Association or its organiser, then this will be evaluated by the FIS Council. Full information will be provided so that the appropriate solution can be found.

208.2 Definitions

In the context of this rule the following definitions will apply: "Electronic Media Rights" means the rights for Television, Radio, Internet and Mobile devices. "Television rights" means the distribution of television images, both analogue and digital, comprising video and sound, by means of terrestrial transmitters, satellite, cable, fibre or wire for public and private viewing on television screens. Pay-per-view, subscription, interactive TV, video on demand services, IPTV or similar technologies, are also included in this definition. "Radio rights" means the distribution and reception of radio programmes, both analogue and digital, over the air, by wire or via cable to devices, both fixed and portable. "Internet" means access to images and sound through interconnected computer networks. "Mobile and portable devices" means the provision of images and sound through a telephone operator and receivable on mobile telephone or other non-fixed devices, such as Personal Digital Assistants.

208.3 Television

208.3.1 Standard of production and promotion of competitions

In the agreements concerning production with a TV organisation or agency acting as host broadcaster, the quality of TV transmissions for ski and snowboard events published in the FIS Calendar - especially for FIS World Cup competitions - must be considered. Of particular importance, while taking into consideration applicable national laws and rules affecting broadcasting, are:

- Top quality and optimal production of a TV signal (for live or deferred transmission depending on the event) in which sport is the centrepiece;
- Adequate consideration and appearance of venue advertising and event sponsors;
- A standard of production in conformity with the FIS TV Production Guidelines and appropriate to current market conditions for the discipline and to the level of the FIS competition series. This means live coverage of the entire event including the winner presentation for live transmission (unless circumstances determine that a live production is not provided). This coverage shall be produced in a neutral way, shall not concentrate on any athlete or nation and shall show all competitors
- The live international signal of the host broadcaster must include appropriate graphics in English, particularly the official FIS logo, timing and data information and results, and international sound.
- Where it is appropriate to the individual TV market, there should be live TV transmission in the country where the event takes place and in other countries with a high interest.

208.3.2 Production and Technical costs

Except when otherwise agreed between the National Ski Association and the agency/company managing the rights, the cost of producing the television signal for the exploitation of the different rights will be borne by the broadcaster having acquired the rights in the country where the competition takes place or a production company mandated to produce the signal by the company owning the rights. In certain cases, the organiser or the National Ski Association may assume these costs. For each of the different rights granted under this rule the technical expenses that are to be paid for by those organisations that have acquired the rights and which are seeking to access the television signal (original picture and sound without commentary), have to be agreed between the producing company or the agency/company managing the rights, as applicable. This also applies to any other production costs that may be requested.

208.3.3 Short extracts

Short extracts granting news access for non-rights holders are to be provided to television companies according to the following rules. It is noted that in a number of countries national legislation governs the showing of short extracts in news programmes. These extracts may only be used in regularly scheduled news programmes and cannot be kept for archive purposes:

- In those countries where legislation exists regarding news access to sporting events then this legislation will always hold precedence for reporting on FIS events.
- In those countries where no legislation exists regarding news access by competing networks and provided that agreements between the company managing the rights and the primary rights holder take precedence then short extracts of a maximum of 90 seconds news access will be granted to competing networks by the agency/company managing the rights for transmission four hours after the rights holding network has shown the competition. The use of this material will cease 48 hours after the end of the competition. If the rights holding network delays its transmissions by more than 72 hours from the end of the competition, then competing networks can show extracts of a maximum of 45 seconds commencing 48 hours after and ending 72 hours after the event itself. Any request to exploit short extracts shall be addressed to the agency/company managing the rights which shall grant to the broadcasters access to the short extracts subject to agreement regarding the technical costs incurred to receive the material.
- In those countries where no transmission rights have been purchased by a television company, all television organisations will be able to transmit short

extracts of 45 seconds as soon as the material is available, subject to agreement with the agency/company managing the rights regarding the technical costs to be incurred to receive the material. Permission for the use of this material will expire after 48 hours.

- Short extracts will be produced by the host broadcaster or the agency/company managing the rights and distributed by that agency/company, taking into consideration 208.3.2 above.

208.4 Radio

The promotion of FIS events through radio programmes will be encouraged by making available accreditation to the principle radio station(s) in each interested country. Access to the venue will be granted solely to those radio organisations that have obtained the necessary contractual authorisation from the rights holder, and will be only for the production of radio (audio) programmes. If accepted by national practice and the authorisation is granted, these programmes can also be distributed on the internet site of the radio station.

208.5 Internet

Unless the contract for the sale of the Electronic Media Rights on FIS events states otherwise, each television rights holder that also acquires the internet rights, will ensure that video streams from its website other than short extracts are geoblocked against access from outside its own territory. Regularly scheduled news bulletins containing material of FIS events may be streamed on the rights holding broadcaster's website, provided no changes are made to the bulletin as transmitted in the original programme. Video and audio material produced in public areas where accreditation, tickets or other permissions are not required to gain access must not contain race footage. It is recognised that new technology provides members of the public with the possibility to produce unauthorised video recordings that may be posted on websites. Appropriate information advising that the unauthorised production and use of video material is prohibited and that legal proceedings could be taken, will be shown at all entrances and printed on entrance tickets. All National Ski Associations and the rights holders/agencies will give permission for short extracts to be placed on the FIS website for non-commercial use subject to the following conditions:

- When short extracts have not been acquired for Internet distribution the maximum duration of the news material from FIS competitions will be 30 seconds per discipline/per session and will be accessible on the FIS website until 48 hours after the end of the competition. The financial conditions relating to the provision of this material will be agreed between the FIS and the rights owner.

- The material will be provided by the rights owner or host broadcaster as soon as possible, but at the latest six hours after the end of the competition.

208.6 Mobile and portable devices

In the cases where the rights for distribution by mobile and portable devices have been awarded, the rights purchaser/operator will be free to produce from the television signal the content it considers best meets the needs of its customers. Any live streaming of television programmes on a national basis using these devices shall not be altered from that available through other distribution channels. In countries where no mobile distribution rights have been sold, short extracts or clips of a maximum duration of 20 seconds will be offered to operators when the material has been produced and for a period of 48 hours on the condition that the operators pay all related technical costs to the agency/company managing the rights.

208.7 Future developments

The principles contained in this Rule 208 shall be the basis for the exploitation of Electronic Media Rights to FIS events in the future. The FIS Council, on the recommendation of the National Ski Associations, the relevant commissions and experts, will establish the conditions considered appropriate to each new development.

A.1.10 209 Film Rights

All agreements regarding film productions of FIS competitions will be between the film producer and the National Ski Association or the company managing the related rights. All contractual arrangements regarding the exploitation of other media rights will be respected.

A.1.11 210 Organisation of Competition

A.1.12 211 The Organisation

211.1 The Organiser

211.1.1 The Organiser of a FIS competition is the person or group of persons who make the necessary preparations and directly carry out the running of the competition in the resort.

211.1.2 If the National Ski Association itself is not the competition organiser, it may appoint an affiliated club to be the organiser.

211.1.3 The organiser must ensure that accredited persons accept the regulations regarding the competition rules and Jury decisions, and in World Cup races the organiser is obliged to obtain the signature of all persons who do not have a valid FIS season accreditation to this effect.

211.2 The Organising Committee

The Organising Committee consists of those members (physical or legal) who are delegated by the organiser and by the FIS. It carries the rights, duties and obligations of the organiser.

211.3 Organisers which hold competitions involving competitors not qualified under art. 203 - 204 have violated the International Competition Rules and measures are to be taken against them by the FIS Council.

A.1.13 212 Insurance

212.1 The organiser must take out liability insurance for all members of the Organising Committee. The FIS shall provide its employees and appointed officials, who are not members of the Organising Committee (e.g. equipment controller, medical supervisor, etc.), with liability insurance when they are acting on behalf of the FIS.

212.2 Before the first training day or competition, the organiser must be in possession of a binder or cover notes issued by a recognised insurance company and present it to the Technical Delegate. The Organising Committee requires liability insurance with coverage of at least CHF 1 million; whereby it is recommended that this sum is at least CHF 3 million; this sum can be increased according to decisions of the FIS Council (World Cup etc). Additionally, the policy must explicitly include liability insurance claims by any accredited participant, including competitors, against any other participant including but not limited to officials, course workers, coaches, etc

212.3 The Organiser respectively its' National Ski Association may request the FIS insurance broker to arrange cover for the competition (at the cost of the Organiser) if the organiser does not have the necessary insurance cover in place.

212.4 All competitors participating in FIS events must carry accident insurance, in sufficient amounts to cover accident, transport and rescue costs including race risks, as well as an appropriate third party liability insurance. The National Associations are responsible for adequate insurance coverage of all their competitors sent and inscribed by them. The National Ski Association or their competitors must be able to show proof of the respective insurance coverage at any time on request of the FIS, one of its representatives or the organising committee.

212.5 All trainers and officials inscribed and sent to FIS events by a National Association must carry accident and third party liability insurance, in sufficient amounts to cover accident, transport and rescue costs from damages caused. The National Ski Association or their trainers and officials must be able to show proof of the respective insurance coverage at any time on request of the FIS, one of its representatives or the organising committee.

A.1.14 213 Programme

A programme must be published by the organisers for each competition listed in the FIS Calendar which must contain the following:

- 213.1 name, date and place of the competitions, together with information on the competition sites and the best ways of reaching them,
- 213.2 technical data on the individual competitions and conditions for participation,
- 213.3 names of principal officials,
- 213.4 time and place for the first team captains' meeting and the draw,
- 213.5 timetable for the beginning of the official training and the start times,
- 213.6 location of the official notice board,
- 213.7 time and place for the prize-giving,
- 213.8 final date of entry and address for entries, including telephone, telefax and e-mail address.

A.1.15 214 Announcements

214.1 The Organising Committee must publish an announcement for the event. It must contain the information required by art. 213.

214.2 Organisers are bound by the rules and decisions of the FIS in limiting the number of entries. A further reduction in entries is possible under art.

201.1 provided it is made clear in the announcement.

214.3 Postponements or cancellations of competitions and programme alterations must be communicated immediately by telephone, e-mail or telefax to the FIS, all invited or entered National Ski Associations and the appointed TD. Competitions moved to an earlier date must be approved by the FIS.

A.1.16 215 Entries

215.1 All entries must be sent so that the Organising Committee receives them before the final date of entry. The organisers must have a final and complete list not later than 24 hours before the first draw.

215.2 National Ski Associations are not permitted to enter and draw the same competitors in more than one competition on the same date.

215.3 Only National Ski Associations are entitled to make entries for international competitions. Every entry should include:

215.3.1 code number, name, first name, year of birth, National Ski Association;

215.3.2 an exact definition of the event for which the entry is made.

215.4 Entries for FIS World Championships (see Rules for the Organisation of FIS World Championships).

215.5 The entry of a competitor by the National Ski Association for a race shall

constitute a contract solely between the competitor and the organiser and shall be governed by the Athletes Declaration.

A.1.17 216 Team Captains' Meetings

216.1 The time and location of the first team captains' meeting and of the draw must be shown in the programme. The invitations for all other meetings have to be announced to the team captains at their first meeting. Emergency meetings must be announced in good time.

216.2 Representation by a substitute from another nation during discussions at team captains' meetings is not allowed.

216.3 The team captains and trainers must be accredited by the organisers according to quota.

216.4 Team captains and trainers must obey the ICR and the decisions of the Jury and must behave in a proper and sportsmanlike manner.

A.1.18 217 Draw

217.1 Competitors' starting order for each event and each discipline is decided according to a specific formula by draw and/or point order.

217.2 The competitors entered by a National Ski Association will only be drawn if provided written entries have been received by the organiser before the closing date.

217.3 If a competitor is not represented at the draw by a team captain or trainer, they will only be drawn if it is confirmed by telephone, telegram, e-mail or telefax by the beginning of the meeting that the competitors who are entered will participate.

217.4 Competitors who have been drawn and are not present during the competition must be named by the TD in their report, indicating if possible the reasons for absence.

217.5 Representatives of all the nations taking part must be invited to the draw.

217.6 If a competition has to be postponed by at least one day, the draw must be done again.

A.1.19 218 Publication of Results

218.1 The unofficial and official results will be published in accordance with the rules for the specific event.

218.1.1 Transmission of Results

For all international competitions, there must be direct communication between the Start and the Finish. In Olympic Winter Games the communications must be assured by fixed wiring. In the data service area, access to the internet (at least ADSL speed) is required for World Cup, World Championships and Olympic Winter Games competitions.

218.2 The data and timing generated from all FIS competitions is at the disposal of FIS, the organiser, the National Ski Association and participants for use in their own publications, including websites. Use of data and timing on websites is subject to the conditions laid down in the FIS Internet Policies.

218.3 FIS Internet Policies and Exchange of Data relating to the FIS Competitions

218.3.1 General

As part of the ongoing promotion of skiing and snowboard, the International Ski Federation encourages and appreciates the efforts made by the National Ski Associations to provide messages and information to their members and fans. An increasingly important medium for this provision of information is through the Internet. The following policy has been established in order to assist National Ski Associations through the provision of data from FIS competitions, and to clarify certain conditions that relate to the use and presentation of the data from FIS competitions.

218.3.2 FIS Calendar data

The online FIS Calendar programme has been developed for the free use of National Ski Associations and is available in the members section of the FIS website.

218.3.3 Results and Standings

National Ski Associations can obtain official results, after they have been approved by the FIS Points verification procedure at the FIS Office. This data will be available on request to the FIS IT Manager who will provide the necessary instructions and/or routines on a case-by-case basis. The FIS World Cup results will include a credit to the results service providers. Standings from the various Cup series will also be available after receipt from the results service providers in the case of the FIS World Cup, or they have been input manually for other Cup series.

1. The results and data from FIS competitions may only be used on the National Ski Associations', Organisers' and participants' websites and may not be passed on for commercial use to third parties or organisations. The National Ski Association may download the data into its' own software for evaluating performances, etc.

2. National Ski Associations who wish to display results on their website, but do not have a database structure to upload the raw data can create a link to the relevant page of the FIS website. The exact addresses can be obtained from the FIS IT Manager.

3. A link will be established from the FIS Website to all National Ski Associations with their own website, as well as the ski industry and relevant media websites on requests. A reciprocal link to the FIS website should also be created.

218.3.4 Organisers access to results

Organisers of FIS World Cup races can obtain official results from their races after they have been approved by the FIS Points verification procedure in the results database. The upload is a computer-automated procedure for World Cup races and takes place immediately after the end of the race. The pdf file containing the results and standings can be downloaded from www.fis-ski.com followed by the discipline code and the name of the site: AL (Alpine), CC (Cross-Country), JP (Ski Jumping), NK (Nordic Combined); SB (Snowboarding), FS (Freestyle Skiing) etc. The individual competition can be identified by the competition codex as published on the detailed page of the calendar on www.fis-ski.com.

A.1.20 219 Prizes

219.1 The detailed rules concerning the awarding of prizes will be published by the FIS. Prizes shall consist of mementos, diplomas, cheques or cash. Prizes for records are forbidden. The FIS Council decides in the autumn on the minimum respectively maximum values of the prize money approximately one and a half years before the competition season. The organisers have to inform the FIS by October 15th of the amount.

219.2 If two or more competitors finish with the same time or receive the same points, they shall be given the same placing. They will be awarded the same prizes, titles or diplomas. The allocation of titles or prizes by drawing lots or by another competition is not allowed.

219.3 All prizes are to be awarded no later than the final day of a competition or event series.

A.1.21 220 Team Officials, Coaches, Service Personnel, Suppliers and Firms' Representatives

In principle these regulations apply to all disciplines, taking into consideration the special rules.

220.1 The Organising Committee of an event must provide the Technical Delegate with a list of persons accredited to the competition.

220.2 It is forbidden for suppliers and for persons in their service to advertise inside the restricted area or to wear clearly visible commercial markings on their clothing

or equipment which do not conform with art. 207.

220.3 Team officials accredited service personnel and suppliers receive from the FIS an official FIS accreditation and must perform their specified function. The individual organisers are free to accredit additional company representatives or other important persons.

220.4 Only persons who have the official FIS accreditation or a special accreditation from the organiser for course or jumping-hill have access to the courses and jumping-hills (according to special rules of the discipline).

220.5 The Different Types of Accreditation

220.5.1 Technical Delegates, the Jury, and the persons mentioned in art. 220 with clearly visible accreditation have access to the courses and jumping-hills.

220.5.2 Servicemen attached to teams are permitted entry to start area and service area at the finish. They are not allowed entry to the courses or jumping-hills.

220.5.3 Company representatives accredited at the discretion of the organisers who do not have FIS accreditation are not permitted entry to the courses and restricted service areas.

A.1.22 221 Medical Services, Examinations and Doping

221.1 National Ski Associations are responsible for the fitness of their competitors to race. All competitors, male and female are required to undergo a thorough evaluation of their medical health. This evaluation is to be conducted within the competitor's own nation.

221.2 If requested by the FIS Medical Committee or its representative, competitors must undergo a medical examination before or after the competition.

221.3 Doping is forbidden. Any offence under these FIS Anti Doping Rules will be punished under the provisions of the FIS Anti-Doping Rules.

221.4 Doping controls may be carried out at any FIS competition (as well as out-of competition). Rules and procedures are published in the FIS Anti-Doping Rules and FIS Procedural Guidelines.

221.5 Gender of the Competitor

If any question or protest arises as to the gender of the competitor, FIS shall assume responsibility for taking the necessary steps to determine the gender of the competitor.

221.6 Medical Services Required from Event Organisers

The health and safety of all those involved in a FIS competition is a primary concern of all event Organisers. This includes the competitors as well as volunteers, course workers and spectators. The specific composition of the medical support system is dependent on several variables:

- The size, level, type of the event being held (World Championships, World Cup, Continental Cup, FIS-level, etc.) together with the local medical standards of care and geographic locations and circumstances.
- The estimated number of competitors, support staff and spectators
- The scope of responsibility for the Event Medical Organisation (competitors, support staff, spectators) should also be determined.

The Organiser / The Chief of Medical and Rescue Services must confirm with the race director or technical delegate that the required rescue facilities are in place before starting the official training or competition. In the event of an incident, or issue that prevents the primary medical plan from being utilized, the back-up plan must be in place before recommencing the official training or competition. The specific requirements concerning facilities, resources, personnel and team physicians are contained in the respective discipline rules and the FIS Medical Guide.

A.1.23 222 Competition Equipment

222.1 A competitor may only take part in a FIS competition with equipment which conforms to the FIS Regulations. A competitor is responsible for the equipment that they use (skis, snowboard, bindings, ski boots, suit, etc). It is their duty to check that the equipment they use conforms to the FIS specifications and general safety requirements and is in working order.

222.2 The term competition equipment encompasses all items of equipment which the competitor uses in competitions. This includes clothing as well as apparatus with technical functions. The entire competition equipment forms a functional unit.

222.3 All new developments in the field of competition equipment must be approved in principle by the FIS. The FIS does not take any responsibility for the approval of new technical developments, which at the time of introduction may contain unknown risk to the health or cause an increase in the risk of accidents.

222.4 New developments must be submitted by May 1st (Grass Ski August 1st), at the latest, for the following season. The first year new developments can only be approved provisionally for the following season and must be finally confirmed prior to the subsequent competition season.

222.5 The Committee for Competition Equipment publishes equipment by-laws after approval by the FIS Council (definitions or descriptions of the equipment items which are allowed). In principle unnatural or artificial aids which modify the performance of the competitors and/or constitute a technical correction of the individual's physical predisposition to a defective performance, as well as competition equipment which impact the health of the competitors or increase the risk of

accidents are to be excluded.

222.6 Controls

Before and during the competition season or on submission of protests to the Technical Delegate at the competition concerned, various controls can be carried out by members of the Committee for Competition Equipment or official FIS Equipment Controllers. Should there be a well-founded suspicion that regulations were violated, the equipment items must be confiscated immediately by the controllers or Technical Delegates in the presence of witnesses and be forwarded sealed to the FIS, which will submit the items to a final control by an officially recognised institution. In cases of protest against items of the competition equipment, the losing party will bear the investigation costs. No testing of equipment or material in independent laboratories may be requested at races where a FIS Technical Expert has performed the controls, unless it can be demonstrated that the controls have not been carried out according to the rules.

222.6.1 At all FIS events where official FIS measurement experts using the official FIS measurement tools are appointed, the result of measurements carried out at the time are valid and final, irrespective of previous measurements.

A.1.24 223 Sanctions

223.1 General Conditions

223.1.1 An offence for which a sanction may apply and a penalty be imposed is defined as conduct that:

- is in violation or non-observance of competition rules, or
- constitutes non-compliance with directives of the jury or individual members of the jury in accordance with 224.2 or
- constitutes unsportsmanlike behaviour

223.1.2 The following conduct shall also be considered an offence:

- attempting to commit an offence
- causing or facilitating others to commit an offence
- counselling others to commit an offence

223.1.3 In determining whether conduct constitutes an offence consideration should be given to:

- whether the conduct was intentional or unintentional,

- whether the conduct arose from circumstances of an emergency

223.1.4 All FIS affiliated associations, including their members registered for accreditation, shall accept and acknowledge these rules and sanctions imposed, subject only to the right to appeal pursuant to the FIS Statutes and ICR

223.2 Applicability

223.2.1 Persons

These sanctions apply to:

- all persons who are registered with or accredited by the FIS or the organiser of an event published in the FIS calendar (an event) both within and outwith the confines of the competition area and any location connected with the competition, and
- all persons who are not accredited, within the confines of the competition area

223.3 Penalties

223.3.1 The commission of an offence may subject a person to the following penalties:

- Reprimand - written or verbal
- Withdrawal of accreditation
- Denial of accreditation
- Monetary fine not more than CHF 100'000.
- A time penalty

223.3.1.1 FIS-affiliated associations are liable to the FIS for the payment of any fines and incurred administrative expenses imposed on persons whose registration or accreditation they arranged.

223.3.1.2 Persons not subject 223.3.1.1 also are liable to the FIS for fines and incurred administrative expenses. If such persons do not pay these fines, they shall be subject to a withdrawal of any permission to apply for accreditation to FIS events for a period of one year.

223.3.1.3 Payment of fines is due within 8 (eight) days following their imposition.

223.3.2 All competing competitors may be subject to the following additional penalties:

- Disqualification
- Impairment of their starting position
- Forfeiture of prizes and benefits in favour of the organiser
- Suspension from FIS events

223.3.3 A competitor shall only be disqualified if their mistake would result in an advantage for them with regard to the end result, unless the Rules state otherwise in an individual case.

223.4 A jury may impose the penalties provided in 223.3.1 and 223.3.2, however they may not impose a monetary fine of more than CHF 5'000.– or suspend a

competitor beyond the FIS event at which the offence occurred.

223.5 The following Penalty decisions may be given verbally:

- reprimands
- the withdrawal of accreditation for the current event from persons who had not been registered with the organiser through their National Associations
- the withdrawal of the accreditation for the current event from FIS-accredited persons
- the denial of accreditation to the current event from persons who are within the confines of the competition area or any other location connected with the competition.

223.6 The following Penalty decisions shall be in writing:

- monetary fines
- disqualification
- impaired starting position
- competition suspensions
- withdrawal of accreditation from persons who had been registered through their National Association
- withdrawal of accreditation of FIS accredited persons

223.7 Written Penalty decisions must be sent to the offender (if it is not a competitor), the offender's National Association and the Secretary General of FIS.

223.8 Any disqualification shall be recorded in the Referee's and/or the TD's Report.

223.9 All penalties shall be recorded in the TD's Report.

A.1.25 224 Procedural Guidelines

224.1 Competence of Jury

The Jury at the event has the right to impose sanctions according to the above rules by majority vote. In the case of a tie, the Chair of the Jury has the deciding vote.

224.2 Within the location, especially during the training and the competition period, each voting Jury member is authorised to issue oral reprimands and withdraw the accreditation which is issued for the current event.

224.3 Collective Offences

If several persons commit the same offence at the same time and under the same circumstances, the Jury's decision as to one offender may be considered binding upon all offenders. The written decision shall include the names of all offenders concerned, and the scope of the penalty to be assessed upon each of them. The decision will be delivered to each offender.

224.4 Limitation

A person shall not be sanctioned if proceedings to invoke such sanction have not

been commenced against that person within 72 hours following the offence.

224.5 Each person who is a witness to an alleged offence is required to testify at any hearing called by the Jury, and the Jury is required to consider all relevant evidence.

224.6 The Jury may confiscate objects that are suspected of being used in violation of equipment guidelines.

224.7 Prior to the imposition of a penalty (except in cases of reprimands and withdrawal of accreditation according to 223.5 and 224.2), the person accused of an offence shall be given the opportunity to present a defence at a hearing, orally or in writing.

224.8 All Jury decisions shall be recorded in writing and shall include:

224.8.1 The offence alleged to have been committed

224.8.2 The evidence of the offence

224.8.3 The rule (s) or Jury directives that have been violated

224.8.4 The penalty imposed.

224.9 The penalty shall be appropriate to the offence. The scope of any penalty imposed by the Jury must consider any mitigating and aggravating circumstances.

224.10 Remedies

224.10.1 Except as provided for in 224.11, a penalty decision of the Jury may be appealed in accordance with the provisions in the ICR.

224.10.2 If an appeal is not filed within the deadline established in the ICR, the penalty decision of the Jury becomes final.

224.11 The following decisions of the Jury are not subject to appeal:

224.11.1 Oral penalties imposed under 223.5 and 224.2

224.11.2 Monetary fines less than CHF 1'000.– (One Thousand Swiss Francs) for single offence and a further CHF 2'500.– for repeated offences by the same person.

224.12 In all remaining cases, appeals are to be directed to the Appeals Commission, as per the ICR.

224.13 The Jury shall have the right to submit to the Appeals Commission recommendations for penalties in excess of monetary fines of CHF 5'000.- and suspensions beyond the event in which the offence occurred (223.4).

224.14 FIS Council shall have the right to submit to the Appeals Commission comments with respect to any written penalty decisions by the Jury.

224.15 Costs of Proceedings

Fees and cash expenses, including travel expenses (costs of the proceedings) are to be calculated comparable to costs paid to TD's and are to be paid by the offender. In the case of a reversal of Jury decisions, in whole or in part, the FIS covers all costs.

224.16 Enforcement of Monetary Fines

224.16.1 The FIS oversees the enforcement of monetary fines and the costs of proceedings. Enforcement costs are considered costs of the proceedings.

224.16.2 Any outstanding monetary fines imposed on an offender is considered a debt of the National Association to which the offender is a member.

224.17 Benefit Fund

All monetary fines are paid into the FIS Youth Promotion Fund.

224.18 These rules are not applicable to any violation of FIS Doping rules.

A.1.26 225 Appeals Commission

225.1 Appointments

225.1.1 The FIS Council shall appoint from the Discipline Sub-committee for Rules (or Discipline Committee if there is no Rules Sub-Committee) a Chair and a Vice Chair of the Appeals Commission. The Vice Chair shall preside when the Chair is either unavailable or is disqualified for bias and prejudice.

225.1.2 The Chair shall appoint 3 members, which may include himself, to the Appeals Commission from the Discipline Rules Sub-Committee or Discipline Committee for each case appealed or submitted to be heard, whose decisions shall be by majority vote.

225.1.3 To avoid either actual bias and prejudice or the appearance of bias and prejudice, members appointed to an Appeals Commission shall not be members of the same National Association as the offender whose case is under appeal. In addition, members appointed to an Appeals Commission must report voluntarily to the Chair any bias and prejudice they may hold for or against the offender. Persons who are biased and prejudiced shall be disqualified from serving on the Appeals Commission by the Chair or, in the event the Chair is disqualified, by the Vice Chair.

225.2 Responsibility

225.2.1 The Appeals Commission shall only hold hearings with respect to appeals by offenders or by the FIS Council from decisions of competition juries, or matters referred to it by competition juries recommending penalties in excess of those provided for in the Sanction rules.

225.3 Procedures

225.3.1 The Appeal must be decided within 72 hours of receipt of the Appeal by the Chair, unless all parties involved in the Appeal agree in writing to an extension of time for the hearing.

225.3.2 All appeals and responses must be submitted in writing, including any evidence the parties intend to offer in support of or in response to the Appeal.

225.3.3 The Appeals Commission shall decide on the location and format for the Appeal (phone conference, in person, e-mail exchanges). The Appeals Commission members are required to respect the confidentiality of the appeal until the decision is made public and to consult only with the other members of the panel during

the deliberations. The Chair of the Appeals Commission may request additional evidence from any of the parties involved, providing this does not require disproportionate means.

225.3.4 The Appeals Commission shall allocate costs of the appeal pursuant to 224.15.

225.3.5 Decisions of the Appeals Commission may be announced orally at the conclusion of the deliberations or hearing should one take place. The decision, together with its reasoning, shall be submitted in writing to the FIS, which shall deliver them to the parties involved, their National Associations and all members of the Jury whose decision was appealed. In addition, the written decision shall be available at the FIS Office.

225.4 Further Appeals

225.4.1 Decisions of the Appeals Commission may be appealed to the FIS Court in accordance with Article 52; 52.1 and 52.2 of the Statutes.

225.4.2 Appeals to the FIS Court shall be in writing and submitted to the FIS Secretary-General in accordance with the time limits prescribed in Article 52; 52.1 and 52.2 of the Statutes from the date of the publication of the Appeals Commission decision.

225.4.3 An Appeal to the Appeals Commission or to the FIS Court will not delay the implementation of any penalty decision of the Competition Jury, Appeals Commission or Council.

A.1.27 226 Violation of Sanctions

Where there is a violation of a sanction that has been imposed (according to ICR 223 or the FIS Anti-Doping Rules, the Council may impose such further and other sanctions that it considers appropriate.

In such cases, some or all of the following sanctions may apply:

226.1 Sanctions against individuals involved:

- a written reprimand;
- and/or
- a monetary fine not to exceed the sum of CHF 100'000.
- and/or
- competition suspension at the next level of sanction - for example if a three month suspension for a doping offence was imposed, a violation of the suspension will cause a two year suspension; if a two year suspension for a doping offence was imposed, a violation of the suspension will cause a lifetime suspension;
- and/or
- withdrawal of accreditation from individuals involved.

226.2 Sanctions against a National Ski Association:

- withdrawal of FIS funding to the National Ski Association;
and/or
- cancellation of future FIS events in the country involved;
and/or
- withdrawal of some or all FIS membership rights, including participation in all FIS calendar competitions, voting rights at the FIS Congress, membership of FIS Committees.

A.2 Joint regulations for speed skiing

Speed Skiing Competitions

These rules must be read in connection with the more general rules relating to all Ski Competitions (Art series 200 et seq. - FIS Licence, eligibility, prizes etc), to Alpine Events (Art 600 et seq. dealing with duties of Juries, Calculations etc), and to Snowboarding (Art. 2000 et. seq.) The following regulations are intended to clarify specific queries relating to the conduct of Speed Skiing competitions.

A.2.1 1230 Speed Skiing Events

Speed Skiing is practiced in three distinct event styles:

- S1 (WSC, WC and FIS competition)
- S2 (FIS competition)
- S2J (WSC and FIS competition)

Note that there is no separate Junior category for the S1 event. The S2 category is a development and feeder category for the S1 category. No competitor may participate in a S1 competition unless they have either Speedski points or a maximum of 50 FIS Alpine Downhill or Super-G points or have already completed at least one season in the S2 or S2J category (either Pro or FIS). S1, S2 and S2J events are normally run concurrently, but only S1 counts towards WC points, based on the overall fastest competitor. S2 competitors compete in equipment approved for Alpine DH races. Junior competitors U18 and U21 may compete in the S2 category if they have completed a season as a S2J competitor, i.e. for a U18 or U21 competitor to race as a S2 competitor during any point of the season they must have FIS points on the 1st FIS points list of the season. These competitors may change the category entered during the season but not during an event.

1230.1.1 Age Limits

1230.1.2 The FIS competition year is July 1st - June 30th of the following year. In

order to compete in international competitions a competitor must be no younger than age group U18.

1230.1.3 International junior competitions are restricted to U18 and U21 age group (exception National Junior Championships).

1230.1.4 Classification at International Competitions

Admitted years of birth for juniors: FIS Competition Year 2017/2018 2018/2019
U18 2001 2002 2000 2001 U21 1999 2000 1998 1999 1997 1998 1230.2 FIS Speed
Ski World Championships

The official FIS medals can only be distributed to the competitors on the podium of the following categories (S1, and S2J women and men) with a minimum of 3 participants per category and a total of 8 nations across the categories. The winners of S1 junior aged women and men (integrated in the S1 category) can be rewarded by the Organiser, but will not obtain the official title of the World Champion.

1230.3 FIS and FIS World Cup Competitions

Before an organiser may host a FIS Speedski World Cup, the organiser must have hosted a FIS Speedski competition.

A.2.2 1231 Organisation

1231.1 Race Committee

The Organising Committee, is composed of the following:

- Chief of Race/Technical Director
- Chief of Course (esp. responsible for safety)
- Chief of Timing and Calculation
- Race Secretary

The above are the minimum for a Organising Committee, and others may be included (e.g. Race Doctor, Equipment Expert, Chief of Protocol) as required. The role of the Organising Committee is to create the environment within which the competition may be held. Team Captains' meetings are open to Team Captains and up to 3 competitors' representatives for those competitors not in a designated team. Team Captains and Competitors' representatives are responsible for passing all information from these meetings to all participating competitors.

1231.2 The Jury

The Jury is tasked with the correct running of the competitions. It is composed of the following:

- Technical Delegate (appointed by FIS) (Chair of the Jury)
- Chief of Race/Technical Director
- Chief of Course
- Referee (appointed by Race Committee)
- Assistant Referee (appointed by Team Captains/competitors)

1231.2.1 A competitor cannot be member of the Jury. The referee and assistant referee may not be from the same nation as the host nation of the event.

1231.2.2 The Jury is responsible for ensuring that competitions are run safely and in accordance with the rules. During the competition itself, they are to remain in touch with each other by radio. Jury decisions, when necessary, will be on a simple majority, with a casting vote from the Technical Delegate if required. If security standards are not met (e.g. weather or track conditions), the Jury must insist on the suspension or cancellation of an event.

1231.3 The FIS Technical Delegate

An appropriately qualified FIS TD will be appointed by the FIS to each calendar event. For World Cup and World Championship events, the FIS TD will be appointed by the Committee for Speed Skiing. For FIS races, TD's are approved by the Committee for Speed Skiing on the proposal of the organising National Ski Association. The duties of the FIS TD are defined in the ICR Alpine Art 600 series (e.g. 601.4.9 and 602). Travel expenses, up to a limit of the cheapest means of travel (including highway taxes and parking fees), should be agreed, prior to the assignment, between the Organising Committee and the TD.

A.2.3 1232 The Course

1232.1 Homologation

Each Speed Skiing course must be homologated by the FIS as defined in ICR Alpine Art 650 "Rules about the homologation of courses". The FIS TD must ensure that each race is run wholly within the limits of the piste as homologated - i.e. the useable piste may not be extended outside the boundaries of the homologated area. The Race Committee appoints the course setters for all FIS sanctioned events.

1232.2 Specification

From top to bottom, the track comprises 3 parts:

- the launching area.
- the timing zone.
- the run-out area

1232.2.1 The launching area

This is the upper length of the track, and must be provided with at least 3 starting points with an associated waiting area. The difference in theoretical maximum speeds between subsequent starts should not exceed 15kph. The waiting area for each start point must be securely fenced on the downhill side to stop personnel and material from slipping downhill.

1232.2.2 The timing zone

The last 25 or 100 meters of the competition track will be used as the basis for measuring the speed of each competitor. The timing zone for WC and WSC tracks

must be 100 meters. The length has to be measured very precisely, and frequently controlled to ensure that speed measurements remain valid. The OC is responsible for certifying the accuracy of the measurement to the TD.

1232.2.3 The run-out area. This area must be long enough, considering the speeds reached, to ensure the competitors' security. The slope must decrease progressively.

1232.3 Track Dimensions

The competition track must be attentively prepared, with particular care to ensure that the surface is as regular (smooth) as possible. The track must have a minimum width of 30m from 100m preceding the timing zone to the end of the run-out area. The width of the launching area above this point may get progressively narrower towards the top of the course. The top of the competition track must have a minimum width of 5m.

1232.4 Security Margin

A security margin, appropriately closed and free from all obstacles, must be prepared on both sides of the competition track. The margins at the timing zone, and for the 100m preceding and following the timing zone, shall be at least 20m wide for courses under 180 kph, and at least 25m wide for courses above this speed. The width of these margins may get progressively narrower towards the top of the competition track, but may never be less than 3m.

1232.4.1 With the exception of track markings and timing equipment (see below), all other provisions, areas reserved for Jury, officials, coaches, TV equipment etc must be located outside the security margins.

1232.5 Track markings

The track will be marked along its sides with dye, pennons (small flags) or small twigs, and also across its width to indicate the end of the timing zone, and the limit of a 'no-turning' limit. The markings should be positioned as follows:

1232.5.1 Launching area: blue border markings. To increase the visual effect of speed, the markings need to be intermittent.

1232.5.2 Timing zone: red pennons every meter. In addition, the end of the zone must be extended by red marking on both side and marked across its entire width by a red coloured line on the snow. This line must be at least 50 cm broad, and clearly visible from the competition track.

1232.5.3 Run-out area: green border markings for the first 100m, the end of which will be marked across its entire width by a green or blue coloured line in the snow. This line must also be at least 30 cm broad and clearly visible from the track; competitors are not permitted to brake or turn before this line. Further markings may then be used to indicate the run-out line, but spaced at 3m intervals.

1232.6 Duration of the Competition

The competition program has to be proposed to the Speed Skiing technical committee for approval. If a competition is to be cancelled, organisers should endeavour to give maximum notice and, preferably, at least 10 days warning. If the race is

deferred, an alternative date must be given at the time of deferment.

1232.6.1 Duration of the World Championships

A special WSC program including reserve days has to be proposed to the Speed Skiing committee for approval. In cases of cancellation of a scheduled World Cup race the OC and the jury may decide to host an additional World Cup race applying rule 1232.7.

1232.7.1 Double and triple World Cup events

2 or 3 World Cup races may be held at one resort, and on the same piste in a period of 3 and 4 racing days respectively, provided that the first race is limited to no more than 180kph, and that only those who have trained and raced the first event may enter the second. If 2 or 3 races are to be held, the timetable is to be as follows:

Day 0	Voluntary Training Day
Day 1	Mandatory Training Day Free Training Run 1 Run 2
Day 2	Run 3 Semi-Final Race 1 Final Race 1 (<180 kph)
Day 3	Run 6 Semi-Final Race 2 Final Race 2
Day 4	Run 8 Semi-Final Race 3 Final Race 3

Tabella A.1: Organizzazione di una tappa di Coppa del Mondo

In cases of cancellation of a scheduled World Cup race the OC and the jury may decide to use Day 1 for the Semi-final and the Final of a replacement World Cup race.

1232.7.2 In exceptional cases (e.g. weather conditions) the jury may decide to host the finals of 2 World Cup races on the same day.

A.2.4 1233 Technical Organisation

1233.1 Windspeed Measurement

Windsocks, clearly visible from the start, and an anemometer for measuring wind-speed must be positioned at the outer margin of the course, level with the top of the timing zone. A second anemometer may be provided if requested by the Jury, and this should be positioned at the margin of the course at any place where, in the opinion of the Jury, there is a likelihood of strong winds. Should wind be sufficiently strong at either measuring position to cause competitors to deviate from their course (15 kph or more), or to distort the results, the jury must stop the current run, note the registered windspeed and publish it in the official bulletin for the day. Should the wind drop below 15kph, the race may then be restarted. At all times, security of the competitors must be a paramount consideration.

1233.2 Communications

For security reasons, the Jury and the Starter must all remain in constant radio contact during the complete period of the race.

1233.3 Timekeeping

1233.3.1 Timekeeping is effected by using a cable-linked printing clock with a minimum measuring precision of 1/1000 sec for a 100m timing zone and minimum of 1/10.000 sec for a 25m timing zone, and controlled by photo-electric cells placed at the top and bottom of the timing zone. Speeds will be calculated from the distance and time difference, to a precision of 1/100 kph.

1233.3.2 Photoelectric cells. The position of the photoelectric cells must be accurately defined and installed by an expert survey, agreed by the Jury. Each photoelectric installation consists of:

- a transmitter and receiving set.
- a reflecting transmitter-receiver
- a totally independent duplicate system, whose reflector must be fixed on the same vertical stand, and less than 10cm below the primary system; the reference time is provided by the upper cells.

1233.3.3 The entirety of all photo-electric installations must be placed a minimum of 1m outside the timing zone (i.e. it may be within the safety margin area). The whole of the photoelectric cells (and any support) must be protected by a graded 'embankment' of packed snow to protect any skiers who may hit the installation. The overall height of the timing including such protection should be as low as possible, and must not exceed 50 cm in height and must be a minimum of 2 metres long. As an added safety measure, all supports should be weakened at snow level in order to break away in the event of a collision from a competitor.

1233.3.4 Timing equipment must be fully operational and used during training as well as competitive runs. A qualified person, such as an official timer from a national association, timing company or the FIS, should operate it.

1233.4 Starting Positions

1233.4.1 Starting positions are determined by the Jury and are indicated with a pole, a fence or a banner. The approach from the public piste to a point level with the current start area must be securely protected to stop competitors and/or equipment from slipping on the downhill side; this security fence is known as the CAT line.

1233.4.2 Starting positions for men and women in all three categories (S1, S2 and S2J) may be different.

1233.4.3 For the first training run and the first race run, the starting positions must not facilitate a speed of more than 180kph for S1 competitors, and 150 kph for S2 and S2J competitors. For mixed category events, each run must start at the lowest position required by the categories present.

1233.4.4 The last starting position on any day will normally be used as the first one for the next day. The Jury can decide to set lower or higher start points according to weather and track conditions.

1233.4.5 At any stage in the competition, the Jury may lower a start position if security conditions (wind, visibility, damaged track etc) so indicate.

1233.4.6 The last start position for a FIS race must be set so that the maximum speed on the run does not exceed 200 kph. Any subsequent runs in the competition will then start from the same start position. When placing the start position the TD must pay attention to the 200 kph maximum speed limit. FIS Council may authorise S1 events run to the full potential of a specific track (ie faster than 200 kph) following application by the FIS Speedski Committee.

1233.4.7 The final start position for S2J competitors must be set such that their maximum speed does not exceed 180 kph (Note also the provisions of Rule 1233.5.2 with regard to S2 and S2J category starting positions).

1233.5 Starting Order

1233.5.1 Competitions will run under FIS Point regulations. The starting order of competitors for their training runs is determined according to their current FIS points, with the best 15 competitors present being drawn.

1233.5.2 Men and women (S1, S2 and S2J) will run in different categories, and as separate groups. The Jury will decide the order of departure of each group at the Team Captains' Meeting according to anticipated piste conditions. No S2J competitor may start from a higher position than the equivalent S2 competitor, and no S2 competitor may start at a higher point than that used for the equivalent S1 competitor.

1233.5.3 Race numbers will be allocated to each competitor at the start of the competition, and these numbers will be retained for the duration of the competition. All training runs will be run in race number order, as will the first race run. Thereafter, the starting order for each group (by style and gender) will be determined by the speed reached by each competitor in that group during the

previous run of the race (i.e. excluding training runs), with competitors starting in increasing order of speed.

1233.5.4 At the Race Committee meeting, the Jury will advise the number of competitors in each category for each of the runs to be held the next day. After each run, the Jury must eliminate competitors who do not demonstrate sufficient technical skills to participate in the next run.

1233.6 Forerunners

1233.6.1 Forerunners are to be provided by the organiser. They must fully comply with the FIS rules for Speed Skiing. In cases where this is not possible, for training and the first official run, the Jury will draw two (male) competitors from the last 10 ranked competitors to act as forerunners. The speeds of these forerunners are retained as their official results for that run.

1233.6.2 For the second and subsequent runs, all competitors will run in their categories (S1, S2 etc) in full BIBO order of their last times (ie the slowest first, followed by the 2nd slowest, with the fastest competitor last). The first two male competitors, and the first female competitor to start in each run will also undertake forerunner duties, and are required to report to the Jury on the completion of their run; as competitors, their times will be recorded in the results. In addition, organizers may invite additional, non-competing forerunners who have demonstrated their ability to participate safely.

1233.6.3 Starting Order in Extraordinary Conditions (Snow Seed)

In extraordinary conditions, the Jury may change the starting order. A group of at least 6 competitors, nominated in advance, start before start number one. These 6 competitors are drawn from among the last 25% of the start list. They will start in reverse order of their start numbers.

1233.7 Number of runs

All runs must be timed, and all non-training times count towards the final results. The Jury will decide the number of runs on any particular day and per competitor (excluding foreruns). If a world speed record is broken during a run, the competition must be stopped for that category (male or female) after the run is over.

1233.8 Starting Procedures

1233.8.1 A competitor may only start at the start position currently in use. However, all competitors must remain above the start line until the Starter has announced "Go", at which time the competitor should descend to the start position and start the run within the following 60 seconds.

1233.8.2 The starter may only give the start signal after receiving the "Course Clear" signal from the Chief of Race or Chief of Course. Any competitor who does not show up after their number is called will not be allowed to continue the race, except if their absence was as a result of force major (e.g. breakdown of uplift facilities) and only then by permission of the Jury. In such a case, the Starter may allow the competitor to make a provisional start (see also ICR Art 613.6) pending

a final Jury decision. Any competitor who is excluded will have their best speed during the competition prior to that stage registered in the results list.

1233.9 Classification

1233.9.1 The speeds and times achieved by each competitor are announced and printed on a board at the bottom of the race piste as competitors complete their runs. At the end of each day, a Female and a Male ranking are drawn up, based on the best speeds achieved to date. Speeds realised during training runs or foreruns are excluded from the official results, with the special exception of forerun times by snowseed forerunners on the first day (see Art 1233.6.1 above).

1233.9.1.1 During the final run of each competition day, the leading 3 competitors are required to stay in the enclosed area at the finish area until the competition for that day has finished and equipment checks have taken place.

1233.9.2 The final ranking (both general and by category) of a race is established only with the results of the finale of the qualified competitors (see Art 1233.5.4 above). All other competitors are then classified in descending best speed order working back from the final qualified racer group. Speed skiing competition categories are:

- S1 Male and Female
- S2 Male and Female
- S2J Male and Female

1233.9.3 Awards must be presented to the top 3 men and top 3 women of the S1 category, and to the winners of other categories represented; prizes may be presented to a greater number of top men (to a limit of the top 10 men). If prize money is to be awarded, then its distribution is to be published in the official programme prior to the start of the event (Art. 213).

1233.10 Results

1233.10.1 The final official results will be issued to all officials, team captains and competitors who participated in the competition. In addition, 3 complete sets of documentation are to be sent to the FIS Headquarters: a copy will then be sent by the FIS to the Chair and the Secretary of the Speed Skiing Committee.

1233.10.2 Nations Cup

During the course of the season, FIS will publish running Speed Ski World Cup (SSWC) points lists based on the official results as they are issued. On the basis of this, and the results of the final event, the World Cup champions will be presented with their trophies at the World Cup final. The medals and trophies provided by FIS will only be distributed to the winner of the S1 category. The Organising committee of the WC Final has to organise the medals for the winner of S2 and S2J categories.

1233.10.2.1 All SSWC races and FIS races hosted on the same track on the same day count for a national ranking, the Nations Cup, which will include all nations present and be based on the three best speeds achieved by that nation by three

different competitors:

- the three competitors must include a Junior (S2J) and a woman and a man
- The speeds of these three competitors are accumulated and ranked accordingly.
- These three competitors may be from different categories
- Any nation unable to represent one of the above categories will have 100kph added per missing category to their classification.
- All nations in a competition will be classified, including those with only 1 or 2 competitors.

Ranking points will be based on the number of nations ranked in that competition

- eg if there are 7 nations, points will run 70 (for 1st place), 60, 50, 40, 30, 20 and 10 (for last place). If there are 4 nations, points will be 40 (for 1st), 30, 20 and 10 (for last).

1233.10.3 SSWC points will only be allocated to the S1 category (males and females) if there are ranked a minimum of 3 competitors at each World Cup competition as follows:

Place	Points
1	100
2	80
3	60
4	50
5	45
6	40
7	36
8	32
9	29
10	26
11	24
12	22
13	20
14	18
15	16
16	15
17	14
18	13
19	12
20	11
21	10
22	9
23	8
24	7
25	6
26	5
27	4
28	3
29	2
30	1

Tabella A.2: Attribuzione dei punteggi in base alla posizione finale

1233.10.4 At the end of the season, the FIS will publish the following list, separated into male and female categories:

- The final SSWC ranking list for S1 competitors.
- The classification according to best speed achieved during the year.
- The classification according to FIS point order, calculated in accordance with Art 1236 below. In addition, FIS will publish a national ranking, based on the system

defined as in Rule 1233.10.2.1

1233.10.5 FIS Points

Each main category (S1, S2 and S2J women and men) has its own FIS points list. There are total 6 independent FIS points lists.

- A competitor can compete in one category per race only
- A competitor can compete changing their category at each race
- In a one competitor category, the competitor will get FIS points from the first place
- If the final run is slower than the semi-final then the first non-qualified competitor for the final will get their FIS points and a penalty equal to the gap between them and the last qualified competitor for the final.

A.2.5 1234 Competition Equipment

Equipment rules are most important, both for ensuring fairness in events, and for competitor safety. Consequently, equipment of 2 competitors drawn by the Jury is checked after each run at the bottom of the braking area. Any person refusing a control will be excluded from the competition and from the official results, as will any competitors or forerunners found to have non-conforming equipment. Any competitor may claim that another competitor's equipment does not conform to these rules, by lodging a claim with the Chief of Race accompanied by a deposit of CHF 100,00. Should the claim be correct, this deposit will be returned; otherwise the deposit will be held by the FIS for Speed Skiing development (e.g. TD courses).

1234.1 Skis

S1 category skis must be between 2.20 and 2.40 m in length. They must not weigh more than 15.0 kg for a pair, including all bindings and attachments, must be constructed for high speed running, and must not have any added aerodynamic appendages. S2 and S2J category skis must be standard production downhill skis, as defined in current or former FIS Equipment Specifications, and between 210 and 225 cm in length.

1234.2 Bindings

Speed Ski bindings must be equipped with functioning ski-brakes; straps are prohibited. Nothing at all must modify their function, and they must not be covered with any streamlining or additional aerodynamic forms. Neither must they be raised more than 2.5 cm above the normal top surface of the ski.

1234.3 Ski poles

Ski poles are compulsory for speed skiers. They must be at least 1m long (as measured in a straight line between the extreme ends), and a pair of poles must not weigh more than 2 kg. Baskets or 'rings' are obligatory, must be at least 3cm in diameter, between 3 and 10 cm long, and must be placed no more than 5cm from the lower end of the pole with the largest diameter at the lowest part. The

handles, placed at the very upper part of the poles and without handstraps ('sword knots') must be free of sharp or prominent parts, as must the entire pole.

1234.3.1 In use, the athlete must hold the poles at their upper limit - i.e. they must not protrude forward of the hands.

1234.3.2 In use, the competitor may not extend their arm or arms when exiting the timing zone in any manner which may result in a time advantage.

1234.4 Ski suit

For the S1 category, clothing should be a plastified ski suit suitable for Speed Skiing (the plastified suit must be covered by effective slip-resistant clothing until the athlete has reached the waiting area). For the S2 and S2J categories, clothing as well as all elements of the equipment must fulfill FIS rules for Alpine Downhill as defined in FIS Equipment Specifications, especially as regards air permeability ('Plombing'). For all categories, it is compulsory to wear underclothing covering the body and at least 3/4 of the arms and legs under the suit. In order to avoid severe burning, dorsal protection worn under the suit is mandatory (see Art 1234.9). No protective elements can be more than 4.5 cm thick. Competitors must wear gloves to protect their hand, for S2 and S2J, these may not be plasticized.

1234.5 Skiboots

All elements of Skiboots must be from the same standard model(s). Skiboots cannot weigh more than 6kg per pair. Boots may not have any added aerodynamic appendages or streamlining, but may be partly covered by the legs of the ski suit. Boots must be capable of being opened by hand and without the use of any tools.

1234.6 Helmet

For S1 competitors, a crash helmet (the inner helmet), fully covering the athlete's head is obligatory and must be fitted with a face protector. It must be fastened solidly with a chinstrap and safety-buckle (double metallic rings are forbidden). The crash helmet and the head must be separated with foam no less than 0.5 cm thick (under natural pressure). Additional neck and face protection may be added (the outer helmet), but must not have any dangerous protuberances, and must separate from the basic protective helmet in the event of a fall. This will normally be effected by use of 2 or more frangible plastic screws or with points of glue to hold the 2 parts together. It may not exceed 40 cm in any dimension (the 'circle test'), including padding and flexible seals. It must not weigh more than 2kg in toto (both inner and outer). Competitors may use inner helmets conforming to CE 1077 standards and fitted with an approved outer-helmet fixation system accompanied by a maker's certificate. In the case of such helmets, the "circle test" is increased to 48 cm in diameter.

1234.6.1 S2 and S2J competitors and forerunners must wear a crash helmet for official training as well as for the competition that meets the FIS Equipment Specifications (Alpine DH).

1234.7 Fairings

Speed skiers may wear rear fairings under the skisuit with the following restrictions:

- Each fairing may not exceed 1 kg in weight, must be constructed from a pliable material, must not cover or inhibit the working of the ski binding, and must be non wounding when breaking.
- The maximum depth of the fairings, measured perpendicular to the leg, must not exceed 30 cm from the front fairing and/or buckle to the back of the spoiler at any point.
- front fairings must be rounded and follow the standard shape of the boot.

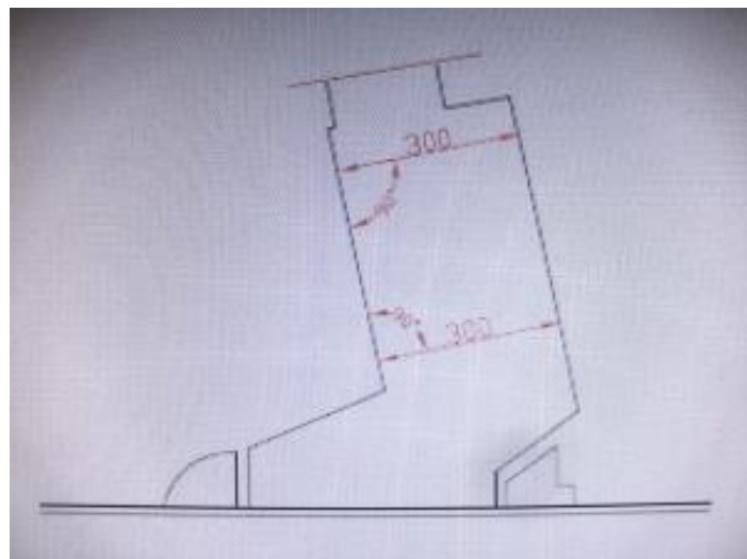


Figura A.1: Dimensioni massime delle carenature

1234.8 Starting numbers

Starting numbers must be attached on the outer helmet, a supplementary number may be used on the skis. The shape, size and style of lettering must not be altered, on penalty of disqualification. The start numbers must be at least 6 cm high, and clearly legible. The start number can carry a sponsor's name as long as every number has the same marking, and the individual letters are smaller than the start number(s).

1234.9 Back Protection

A back protector is obligatory to protect against both frictional burning and mechanical injury, and must conform to FIS Competition Specifications, and be available from general commercial sources. The dorsal protection must not incorporate additional aerodynamic elements or any metal or sharp components. The dorsal protection cannot be less than 0.3 cm thick (under natural pressure).

1234.10 Accessories

All accessories (metallic bracelets, watches, chain bracelets, large ear-rings etc.) are prohibited for safety reasons. Spectacles with glass lenses or metal frames are also prohibited, and other types should be selected with regard to the safety risk they may pose.

A.2.6 1235 Competitors' Obligations

All competitors are required to abide by general FIS regulations on nationality, medical and doping testing, eligibility, attendance at prizegivings etc as outlined in the 200 series of FIS articles.

A.2.7 1236 Calculation of Race Points

1236.1 Race points in any event shall be calculated using the following formula:

$$P = \left(\frac{S_x}{S_o - 1} \right) F$$

Or

$$P = \left(\frac{T_o}{T_x - 1} \right) F$$

Where:

- P = Race Points
- S_x = Speed of the winner in kph to 2 decimals without rounding
- S_o = Speed of the competitor in kph to 2 decimals without rounding
- T_o = Time of the competitor to 1/100th of a second
- T_x = Time of the winner to 1/100th of a second
- F = 1500 (the 'F' factor)

1236.2 For World Cup, World Championships and FIS races, based on winning S1 competitors, there will be no Race Penalty to add. Where S2 and S2J competitors do not have any S1 competitors as a basis for race points, FIS will publish an appropriate Race Penalty; where S2J competitors have neither S1 nor S2 competition, FIS will advise the S2J specific penalty. Validity of points on any listing is in accordance with FIS practice as defined in the points listing of the FIS Classification Committee. (Current race penalties are: S1 0 (zero) pts, S2 100 pts, and S2J 180 points).

A.2.8 1237 Venue

1237.1 Leader board/ interview backdrop

The leader board measures; width minimum 200 cm x height 240 cm. It is positioned behind the exit gate in order to film the leading competitor during the race. The OC's duty is to provide enough space at the finish area to set up the leader board. This must be close to the equipment control tent to enable the race leader to be followed by TV coverage at all times. The space behind the exit gate should be large enough to set up the leader board without obstructing the view for the television crews and the press, who will be positioned at the finish area. The position of the leader board must be such that athletes standing in front have a clear view of the track and the result display board.

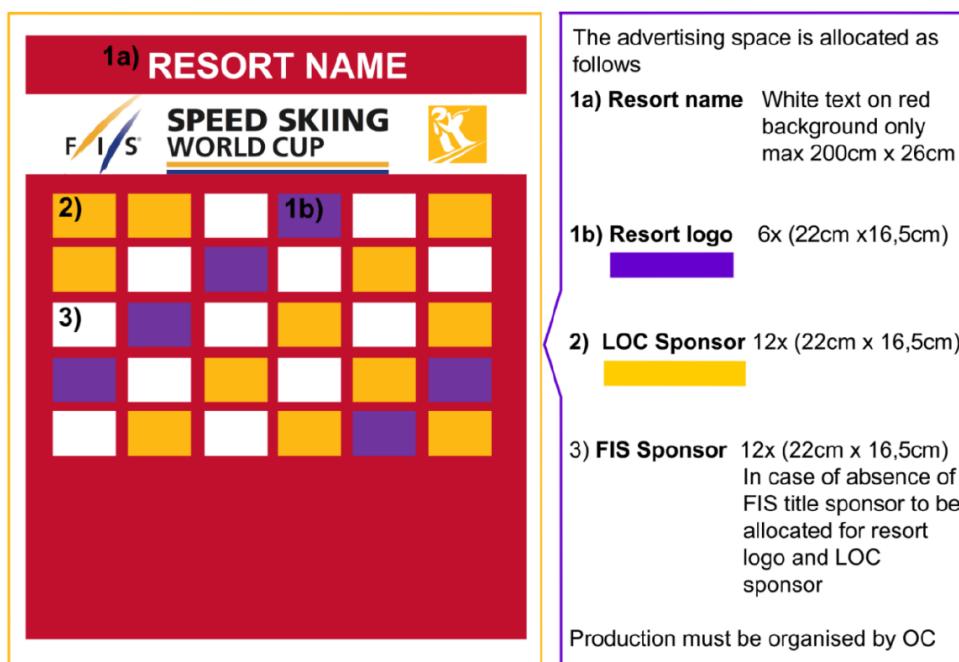


Figura A.2: Indicazioni per il display board

A.2.9 1238 Questions not Covered by Special Rules

The guidance given elsewhere in the FIS International Competition Rules (ICR) should be applied for any questions not covered in the special rules elaborated above. In the event of ambiguity, problems should be referred back to the FIS Office and to the FIS Speed Skiing Committee.

Bibliografia

- [1] The MakeHuman team. *MakeHuman*. Ver. 1.2.0. URL: <http://www.makehumancommunity.org/> (cit. a p. 15).
- [2] Blender Foundation. *Blender*. Ver. 2.82. URL: <https://www.blender.org/> (cit. a p. 18).
- [3] The MakeHuman team. *Blender MH Plugin*. Ver. 1.2.0. URL: <https://github.com/makehumancommunity/makehuman-plugin-for-blender> (cit. a p. 19).
- [4] CNR - Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione "A. Faedo". *MeshLab*. Ver. 2020.03. URL: <https://www.meshlab.net/> (cit. a p. 21).
- [5] Autodesk. *NetFabb*. Ver. 7.4.0 - free. URL: <https://github.com/3DprintFIT/netfabb-basic-download/releases> (cit. a p. 22).
- [6] Dassault Systèmes. *Solidworks*. Ver. 2019. URL: <https://www.solidworks.com/it> (cit. a p. 23).
- [7] D. Spreatfico D. Trovato G. Gibertini D. Grassi N. Scarpellini. «Wind Tunnel Tests of Speed-Skier». In: *IFMBE* 31 (2010) (cit. a p. 55).
- [8] Helge Nørstrud. «Sport Aerodynamics». In: (2009), pp. 137–138 (cit. a p. 55).
- [9] W.A. Friess K.N. Knapp II B.E. Thompson M. Skakel. «Aerodynamic efficiency of speed skier configurations». In: *ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting FEDSM97-3138* (1996) (cit. a p. 55).
- [10] CD-Adapco/Siemens Digital Industries Software. *Star-CCM+*. Ver. 2019.3 (Build 14.06.012 - R8). URL: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/it/products/simcenter/STAR-CCM.html> (cit. a p. 55).