



**Politecnico  
di Torino**

# Politecnico di Torino

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

A.a. 2021/2022

Sessione di Laurea Luglio 2022

# **Tennis Ball Aerodynamics**

Relatori:

Scarsoglio Stefania

Candidati:

Spinelli Francesco

## Indice

<b>Capitolo 1. Introduzione.</b> .....	3
<b>Capitolo 2. Comportamento fluidodinamico di una pallina da tennis.</b> .....	5
2.1 Grandezze di riferimento. ....	5
2.2 Cilindro infinitamente esteso non rotante investito da una corrente uniforme. ....	6
2.3 Cilindro infinitamente esteso rotante investito da una corrente uniforme .....	6
2.4 Usura della pallina da tennis. ....	7
<b>Capitolo 3. Caratteristiche della pallina da tennis.</b> .....	8
3.1 Manifattura e varie tipologie delle palline da tennis. ....	8
3.2 Proprietà che compromettono il comportamento aerodinamico. ....	8
<b>Capitolo 4. Aerodinamica della pallina da tennis.</b> .....	10
4.1 Studio effettuato da S.R. Goodwill, S.B. Chin, S.J. Haake, apparato sperimentale. ....	10
4.2 Pallina da tennis priva di spin. ....	11
4.3 Pallina da tennis con spin. ....	12
4.4 Implicazioni dei risultati ottenuti nel gioco del Tennis e osservazioni conclusive. ....	16
<b>Capitolo 5. Influenza del feltro sull'aerodinamica.</b> .....	19
5.1 Studio effettuato da R. Mehta, F. Alam e A. Subic. Apparato sperimentale. ....	19
5.2 Risultati ottenuti. ....	20
5.3 Conclusioni e confronto con gli studi precedenti. ....	21
<b>Capitolo 6. Flusso attorno alla pallina da tennis.</b> .....	23
5.1 Apparato sperimentale usato nello studio di T. Nakajima, M. Hiratsuka, S. Ito e A. Konno. ....	23
5.2 Risultati ottenuti. ....	24
<b>Capitolo 7. Conclusioni.</b> .....	26
7.1 Risultati ottenuti. ....	26
7.2 Implicazioni dei risultati ottenuti nel gioco del Tennis. ....	26
<b>Bibliografia.</b> .....	29

## Capitolo 1. Introduzione.

Il gioco del tennis è stato inventato in Francia intorno al XII secolo. Il gioco originale era praticato a mani nude, la racchetta fu infatti introdotta all'inizio del XVI secolo. Il gioco iniziò ad essere conosciuto come tennis dopo aver incorporato la racchetta nel XVI secolo. Il tennis (chiamato anche Tennis Real o Royal) era popolare sia in Francia che in Inghilterra. Inizialmente si giocava al chiuso. Nonostante la sua popolarità, il tennis era limitato ai reali, ai nobili e ai ricchi. Il primo club di tennis del mondo fu fondato nel 1872 da Harry Gem e Augusto Perera a Leamington Spa. Un anno dopo, nel 1873, un ufficiale militare britannico, il maggiore Walter Wingfield, ideò l'attuale gioco del tennis sull'erba (International Tennis Federation 2012).

Il primo campionato di tennis nell'Impero Britannico fu giocato a Wimbledon a Londra nel 1877. Il primo torneo nazionale di tennis americano fu organizzato nel 1880 a New York. La US National Lawn Tennis Association (ora US Tennis Association) fu istituita su 21 maggio 1881 per standardizzare le regole e organizzare competizioni in tutto il paese. Il Campionato Nazionale Maschile degli Stati Uniti, ora US Open, si tenne per la prima volta nel 1881 a Newport, Rhode Island. Il Championnat de France (l'"Open di Francia") iniziò formalmente a 1891 a Parigi, Francia. Il primo campionato australiano (poi Australian Open) fu organizzato nel 1905 a Melbourne. Oggi, quattro grandi campionati nazionali di tennis: Wimbledon, US Open, French Open e Australian Open, sono considerati gli eventi più prestigiosi del tennis. Questi quattro grandi eventi di tennis sono chiamati collettivamente Majors o Grand Slam (un termine derivato dal gioco del bridge). Nel 1913, 12 associazioni nazionali di tennis formarono la International Lawn Tennis Federation a Parigi, Francia. L'attuale International Tennis Federation (ITF) fu ribattezzata nel 1977. La maggior parte delle regole e dei regolamenti emanati nel 1924 sono rimasti invariati per oltre 80 anni, ad eccezione di un'aggiunta del sistema tie-break (International Federazione Tennis 2012).

Le palline usate nei primi periodi di quello che oggi viene considerato come il gioco del tennis erano fatte di pelle imbottita con lana o peli. La palla del vero e proprio tennis, in cui si giocava sull'erba, era fatta di gomma indiana, che veniva estratta attraverso un particolare processo di vulcanizzazione. Dal 1972 le palle da tennis sono costituite da due semisfere in gomma che vengono unite e poi rivestite di feltro, tessuto che permette (grazie alla sua peluria) di creare attrito e quindi resistenza nell'aria e garantire quindi una riduzione della velocità e dell'altezza del rimbalzo. La pallina da tennis moderna è di colore giallo, in passato invece si caratterizzava dal colore bianco (o nero). Le palline da tennis devono soddisfare determinati criteri di dimensioni, peso, deformazione e proprietà di rimbalzo da approvare dall'ITF per le partite regolamentari. Come verrà successivamente analizzato nel dettaglio, oggi esistono tre tipi di palline con caratteristiche prestazionali diverse in base al loro comportamento aerodinamico e dinamico ampiamente utilizzati nei principali tornei in tutto il mondo. Ad ognuna di queste tre palline viene associato un determinato ritmo di gioco, perciò, l'utilizzo delle stesse è relativo a superfici di gioco differenti.

In questa tesi vengono analizzate le differenti proprietà aerodinamiche delle palline da tennis per come le conosciamo oggi, e viene anche analizzato il modo in cui queste vengono influenzate da vari fattori che entrano in gioco tipicamente durante l'utilizzo. I vari aspetti analizzati sono, inizialmente, le proprietà aerodinamiche di una generica pallina da tennis in condizioni normali, al variare della velocità del flusso incidente e al variare dello spin della pallina stessa, e, in seguito, i fattori che influenzano le proprietà aerodinamiche stesse, tra cui l'utilizzo di palline differenti, l'orientazione delle cuciture, la peluria, le dimensioni della pallina, l'usura e così via.

L'obiettivo della tesi è quello di analizzare i risultati ottenuti dai vari studi presentati, evidenziando come questi abbiano generato dei cambiamenti nel gioco del tennis. Lo studio delle proprietà aerodinamiche si è dimostrato particolarmente importante nel corso degli anni. Una prova di ciò potrebbero essere le dirette implicazioni che sono conseguite alle scoperte ottenute negli studi

presentati, che hanno svolto un ruolo fondamentale per migliorare il gioco e per renderlo più apprezzabile. Un ulteriore scopo della tesi è quello di fornire nuovi spunti per lo studio delle proprietà aerodinamiche, che emergono dal confronto tra gli esperimenti effettuati nel corso degli anni.

Inizialmente, nel Capitolo 2, si richiamano brevemente le principali forze aerodinamiche e i parametri di controllo che risultano di fondamentale importanza per la comprensione delle proprietà evidenziate e della loro variazione. Successivamente, all'interno del Capitolo 3, si introducono in maniera più dettagliata le caratteristiche della pallina da tennis e le grandezze e proprietà fisiche che la definiscono. Vengono poi analizzati nel Capitolo 4, 5 e 6 i vari esperimenti, i quali si focalizzano rispettivamente su aspetti differenti dell'aerodinamica della pallina. In principio viene studiata approfonditamente l'influenza dell'usura della pallina sulla sua aerodinamica, subito dopo si analizza l'effetto del feltro e infine ci si focalizza su come si sviluppa localmente il flusso attorno alla pallina. In conclusione, nel Capitolo 7, si analizzano complessivamente i risultati ottenuti e le implicazioni che quest'ultimi hanno avuto e potrebbero avere in futuro nel gioco del tennis.

## Capitolo 2. Comportamento fluidodinamico di una pallina da tennis.

Per spiegare il comportamento di una pallina investita da un flusso d'aria è comodo fare riferimento a grandezze caratteristiche che torneranno utili nell'interpretazione delle formule e può essere ulteriormente utile fare riferimento al comportamento di alcuni modelli semplificati.

### 2.1 Grandezze di riferimento.

Le principali grandezze da introdurre, che saranno fondamentali per la trattazione, sono coefficienti adimensionali, tra cui:

Numero di Reynolds, dove con  $V$  si intende la velocità del flusso incidente, con  $d$  una dimensione caratteristica del sistema che può essere sia inteso come un diametro che come una lunghezza (nel caso della pallina da tennis con  $d$  si intende il diametro della stessa), e con  $\nu$  è la viscosità cinematica caratteristica del fluido coinvolto,  $[\nu] = m^2/s$ . Il numero di  $Re$  è un parametro di similitudine ed è un coefficiente utile per valutare gli effetti inerziali rispetto a quelli viscosi. I numeri di Reynolds per una pallina da tennis con velocità compresa tra 20 e 60 m/s, valori tipici di velocità misurabili durante una generica partita, oscillano tra  $85,000 < Re < 250,000$ .

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad (1.1)$$

Coefficiente di portanza, inteso come la adimensionalizzazione della portanza  $L$ , che è una forza che nella futura trattazione verrà coinvolta solo nel caso di pallina rotante, sarà invece nulla nei casi in cui la pallina sarà priva di spin.  $\rho$  è la densità del fluido in questione e  $S$  è la superficie dell'oggetto che interagisce con la corrente incidente. Come si vedrà più avanti, sono stati effettuati numerosi studi sulla pallina da tennis e sono stati ottenuti numerosi risultati, un esempio di studio potrebbe essere quello di S.R. Goodwill, S.B. Chin, S.J. Haake [1], in cui si ottiene che il coefficiente di portanza per una pallina da tennis ha valori compresi tra 0,07 e 0,27.

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} \quad (1.2)$$

Coefficiente di resistenza, analogamente al coefficiente adimensionale precedente, è inteso come l'adimensionalizzazione della resistenza  $D$ , forza che viene coinvolta nell'intera trattazione perché caratteristica sia dei casi con pallina rotante che con pallina priva di spin. Gli studi sul coefficiente di resistenza sono altrettanto vari, sempre facendo riferimento all'esperimento precedentemente citato, si riportano valori del  $C_D$  che oscillano tra 0,54 e 0,75.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} \quad (1.3)$$

Coefficiente di Spin, per valutare la velocità tangenziale  $V_T$  della pallina rispetto alla velocità del flusso che la investe  $V$ . Facendo ulteriormente riferimento allo studio sopra menzionato, si hanno solitamente dei valori di  $S$  compresi tra 0,05 e 0,7.

$$S = \frac{V_T}{V} \quad (1.4)$$

Introdotte queste grandezze è possibile focalizzarsi sulla trattazione di modelli semplificati per avere una più chiara interpretazione delle forze coinvolte.

## 2.2 Cilindro infinitamente esteso non rotante investito da una corrente uniforme.

Si consideri una configurazione in cui un cilindro infinitamente esteso viene investito da una corrente uniforme con velocità  $V$ ; è un tipico caso di studio e viene trattato in modo esteso [2]. Sono note sia la dimensione caratteristica del cilindro, diametro  $d$ , che le caratteristiche del fluido, quindi densità  $\rho$  e viscosità cinematica  $\nu$ .

Ciò che è utile analizzare è la variazione della corrente a valle del cilindro al variare del  $Re$ . Per  $Re \ll 1$  gli effetti viscosi sono predominanti rispetto a quelli cinematici e ciò si manifesta con delle linee di corrente che si richiudono simmetricamente a valle. Se si aumenta il  $Re$  per valori compresi tra 1 e 40 la simmetria tra monte e valle lascia il posto ad una configurazione che prevede la formazione di una scia che comprende vortici controrotanti che si estendono sempre più a valle al crescere del  $Re$ . Per  $40 < Re < 150$  i vortici controrotanti si staccano dal cilindro e vengono trascinati a valle nella scia in modo ciclico. Per  $Re > 150$  la scia ciclica di vortici controrotanti perde la sua fisionomia e si genera una scia molto ampia a valle, di natura turbolenta. I fenomeni viscosi in cui il profilo di velocità si raccorda, da un valore nullo, a quello della corrente esterna, si concentrano in una regione di spessore molto minore rispetto alle dimensioni caratteristiche del cilindro. Questa regione di fenomeni viscosi, detta strato limite, si mantiene aderente al profilo del cilindro solo fino ad un certo punto, dopo del quale si distacca andando appunto a generare la già menzionata scia turbolenta. Aumentando ulteriormente il  $Re$  fino a valori di  $Re \cong 3 \cdot 10^5$  si ha una separazione turbolenta del flusso che fa sì che il flusso rimanga attaccato alla parete del cilindro più a lungo. Questo effetto si traduce in una scia turbolenta che diventa sempre più stretta.

Ciò che si può anche valutare e che è di particolare interesse nella trattazione specifica della pallina da tennis è il comportamento del coefficiente di resistenza  $C_D$  del cilindro al variare del numero di  $Re$ . Per  $1 < Re < 10$  l'andamento del  $C_D$  è inversamente proporzionale al  $Re$ . Tuttavia, per  $10^2 < Re < 3 \cdot 10^5$  si ha una regione in cui il  $C_D$  assume un valore costante, indipendente perciò dal  $Re$ , che dipende dalla configurazione trattata. Questo caso è di particolare interesse poiché nel caso della pallina da tennis spesso si ricade in questa particolare situazione, che verrà approfonditamente affrontata più avanti. In casi in cui il  $Re > 3 \cdot 10^5$  si ha un crollo di  $C_D$  dovuto alla significativa riduzione della dimensione della scia già menzionata. Aumentando ulteriormente il  $Re$  non si osservano più variazioni qualitative nelle configurazioni della corrente. Nella figura 1 è rappresentato l'andamento del  $C_D$  al variare del  $Re$  per una sfera [3].

Nel caso specifico della pallina da tennis i numeri di  $Re$  oscillano generalmente tra  $1 \cdot 10^5$  e  $2 \cdot 10^5$  nella fase di servizio. L'introduzione del comportamento del cilindro investito da una corrente uniforme è perciò utile per comprendere la configurazione del flusso a valle della pallina da tennis.

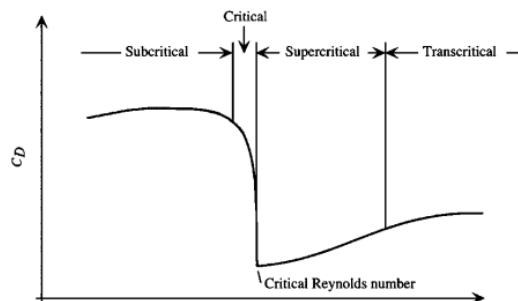


Figura 1: Effetto del numero di Reynolds sul coefficiente di resistenza di una sfera investita da corrente uniforme. [3]

## 2.3 Cilindro infinitamente esteso rotante investito da una corrente uniforme

Il comportamento del cilindro già precedentemente introdotto, con l'aggiunta dell'ipotesi relativa alla rotazione del cilindro stesso, ipotizzata antioraria, è di fondamentale importanza per la comprensione

del modo in cui viene generata la portanza; questa configurazione che coinvolge la rotazione è stata profondamente analizzata [4]. Un'ulteriore semplificazione rispetto al caso precedentemente spiegato è quella di non considerare la viscosità; si sta perciò considerando un caso puramente ideale ma necessario per poter successivamente comprendere i casi che coinvolgono la viscosità.

Nel caso in cui il cilindro abbia una rotazione nulla si ricade nell'esempio precedente, in cui però sono totalmente assenti gli effetti viscosi, si ottiene infatti una configurazione con linee di corrente simmetriche attorno al cilindro, con un valore nullo di resistenza. Andando a considerare il cilindro come rotante (con una rotazione intorno al proprio asse di simmetria, perpendicolare rispetto al piano su cui giace la corrente uniforme), si osservano delle linee di corrente simmetriche tra la parte di destra e di sinistra del cilindro, poiché per l'ipotesi di assenza di effetti viscosi, si ha una resistenza nulla. Tuttavia, le linee di corrente non risultano simmetriche sulla parte superiore e inferiore del cilindro. Questa configurazione fa sì che la distribuzione di pressioni sul cilindro non sia simmetrica; è proprio questa asimmetria della distribuzione di pressioni a generare una forza non nulla verso l'alto, nel caso di rotazione antioraria, perpendicolare alla direzione del flusso di incidenza ma giacente sullo stesso piano. Questa forza è quella che viene definita come portanza e questo effetto prende il nome di *Effetto Magnus*.

Questo esempio, pur essendo ideale, è strettamente correlato con i casi reali. Nel caso della pallina da tennis in cui non avrebbe senso andare a trascurare gli effetti viscosi, si ha una asimmetria tra sopra e sotto che genera la portanza, ma, come la logica suggerisce, questa asimmetria di pressioni è estesa anche a valle del flusso poiché in un caso reale la resistenza ha un valore diverso da 0. Nel mondo del tennis lo spin della pallina, che genera appunto portanza, viene utilizzato spesso nella fase di servizio poiché ha una rilevante influenza non solo sulla traiettoria della pallina ma anche sul rimbalzo della pallina sulla superficie di gioco e perciò risulta fondamentale nelle strategie di gioco.

## 2.4 Usura della pallina da tennis.

È necessario introdurre il fenomeno dell'usura della pallina da tennis in quanto è un effetto con una rilevante influenza sull'aerodinamica della pallina stessa; necessita perciò di essere studiato in quanto è di fondamentale importanza valutare il momento in cui, a causa dell'usura, la pallina perde quelle proprietà aerodinamiche che erano state previste nella fase di realizzazione della stessa; per la trattazione di questo fenomeno si fa riferimento a ciò che è stato ottenuto dai vari esperimenti condotti negli anni [5]. La federazione internazionale del tennis (ITF) prevede ovviamente dei processi per valutare le caratteristiche aerodinamiche e fisiche della pallina, in riferimento a dei valori standardizzati, e sono previsti anche dei test di valutazione dell'usura della pallina.

Le proprietà della pallina che vengono compromesse sono diverse. Quando la pallina viene sottoposta ad un numero sempre più elevato di impatti (sia con la superficie di gioco che con la racchetta) la pallina perde rigidità a causa di una riduzione della pressione interna. Questa perdita di rigidità influenza l'altezza raggiunta dalla pallina quando viene fatta rimbalzare che risulta essere più elevata, a parità di forza a cui la pallina è sottoposta. In aggiunta a questi effetti si può osservare una riduzione della massa, dovuta ad una perdita della peluria esterna, che si consuma con le frequenti interazioni con la superficie. Quest'ultimo effetto è quello che, come si vedrà più avanti, ha una rilevanza significativa sul comportamento aerodinamico della pallina dato che una perdita di peluria può anche essere vista come una riduzione del diametro, grandezza che, come già menzionato, è direttamente legata ai coefficienti adimensionalizzati precedentemente introdotti.

## Capitolo 3. Caratteristiche della pallina da tennis.

### 3.1 Manifattura e varie tipologie delle palline da tennis.

Sono varie le caratteristiche della pallina ad influire sull'aerodinamica della stessa; prima di addentrarsi nello studio di come la pallina si comporti in diverse situazioni è necessario introdurre queste caratteristiche.

Come già accennato nel capitolo 1, Secondo l'ITF, esistono tre tipi di palline con caratteristiche prestazionali diverse in base al loro comportamento aerodinamico e dinamico ampiamente utilizzati nei principali tornei in tutto il mondo. La dimensione classica ha il diametro compreso tra cm 6,54 e cm 6,86 e un peso tra i 56 e i 59,4 grammi. Le palline da tennis sono state classificate dalla federazione internazionale in 3 categorie, più una quarta categoria (high altitude) riservata alle competizioni che si svolgono in altura, in località situate a oltre 1219 metri sul livello del mare. Ogni tipologia di palla ha delle caratteristiche differenti per peso, misura, rimbalzo, deformazione. Le palline di tipo 1 sono classificate come quelle ad alta velocità e vengono utilizzate su superfici di gioco lente, quelle di tipo 2, di media velocità, vengono utilizzate su superfici di gioco medio/lenta, medio o medio/veloce, quelle di tipo 3, palle a bassa velocità, sono utilizzate su superfici di gioco veloce.

Le palline da tennis iniziano a perdere il loro rimbalzo con l'usura dopo essere state estratte dalla lattina. Tuttavia, ogni pallina deve superare il test di rimbalzo dell'ITF o delle sue agenzie approvate affinché sia accettata per l'uso nei principali tornei. Il rimbalzo di una pallina da tennis viene generalmente testato facendo cadere la pallina da un'altezza di 2.540 mm su una superficie di cemento; un rimbalzo compreso tra 1.350 e 1.470 mm è accettabile al livello del mare e una temperatura ambiente di 20 gradi Celsius con un'umidità relativa del 60 per cento [6]. Le moderne palline da tennis a regolazione vengono generalmente mantenute sotto pressione (circa due atmosfere) fino al primo utilizzo. Ogni anno vengono prodotte oltre 300 milioni di nuove palline da tennis, principalmente nei paesi del sud-est e del nord asiatico, creando circa 20.000 tonnellate di gomma non facilmente biodegradabile.

### 3.2 Proprietà che compromettono il comportamento aerodinamico.

#### *Effetto della peluria.*

La peluria è quella caratteristica che distingue la pallina da tennis da una pallina completamente liscia, insieme alla presenza dei solchi della cucitura, ottenuti appunto dalle modalità attraverso cui la pallina viene prodotta e assemblata. La presenza o l'assenza della peluria ha degli effetti rilevanti sulla resistenza aerodinamica [7]. In prima approssimazione è possibile dire che il  $C_D$  aumenta nei casi in cui la peluria della pallina risulta tesa, e subisce una notevole riduzione nei casi in cui la peluria viene rasata totalmente.

#### *Effetto della cucitura.*

Nonostante l'effetto della cucitura abbia una notevole influenza in palline utilizzate in altri sport, come il cricket o il baseball, nel caso della pallina da tennis è stato provato che né la cucitura in sé, né la sua orientazione rispetto alla direzione di incidenza del flusso d'aria, influiscono sulla sua aerodinamica. Sono pochi i casi in cui l'orientazione della cucitura ha influito in maniera non trascurabile sul comportamento della pallina, per esempio per bassi  $Re$ , velocità della pallina che si aggirano intorno agli 80 km/h, è stata misurata una variazione dell'8% del coefficiente di resistenza. Tuttavia, nonostante questo particolare caso di studio, è possibile assumere l'orientazione della cucitura come un effetto trascurabile sul comportamento aerodinamico della pallina.



### *Effetto della grandezza della pallina.*

La grandezza della pallina, ossia il diametro, è una grandezza che rientra direttamente in quei parametri adimensionali introdotti all'inizio del capitolo 2. Perciò la sua variazione ha delle dirette conseguenze su tutte le altre grandezze coinvolte nell'aerodinamica. Nel tennis moderno esistono diverse palline di diverse grandezze di diverso peso, in funzione del campo di gioco su cui si deve svolgere la competizione. La necessità di utilizzare palline di differente misura deriva dal fatto che nel corso del tempo il servizio è diventato uno dei fattori determinanti sull'esito finale dei vari incontri; i giocatori sono diventati capaci di effettuare servizi sempre più veloci e perciò sempre più efficaci contro i propri avversari. Da ciò, negli anni 90' sono stati effettuati degli studi per rallentare il gioco e renderlo più apprezzabile, ed è stata di conseguenza approvata dall'ITF una pallina sovradimensionata.

La conseguenza principale dell'utilizzare palline con un diametro maggiore è relativa ad un aumento della resistenza aerodinamica, come diretta conseguenza dell'aumento della superficie di interazione tra la pallina e il flusso d'aria. Questa piccola variazione di diametro non ha però un'elevata influenza sul coefficiente di resistenza. Le palline sovradimensionate riportano valori di coefficienti di resistenza confrontabili con quelli delle palline con dimensioni standard.

### *Effetto dell'usura.*

Nel capitolo precedente è già stato introdotto il fenomeno dell'usura e sono state indicate le caratteristiche fisiche che vengono compromesse nel corso della vita della pallina. Nonostante i fenomeni sono esattamente quelli già menzionati, studi differenti trovano comportamenti discordanti riguardo al comportamento delle palline usurate in confronto a quelle nuove. Per esempio, si ottiene che le palline usurate hanno un coefficiente di resistenza aerodinamica inferiore rispetto alle palline nuove, viaggiano perciò più velocemente in aria [1]; questo comportamento viene giustificato dal fatto che l'usura ha consumato la peluria esterna della pallina rendendola meno ruvida e quindi meno resistente dal punto di vista aerodinamico. Tuttavia, è stato misurato un aumento del coefficiente di resistenza per le palline usurate [8]. Per quanto riguarda il coefficiente di portanza, gli studi sono analogamente discordanti; i motivi di questi risultati verranno approfonditi nei paragrafi successivi.



Figura 3: confronto tra una pallina di dimensioni standard (a sinistra) e una di dimensioni standard (a destra). [3]

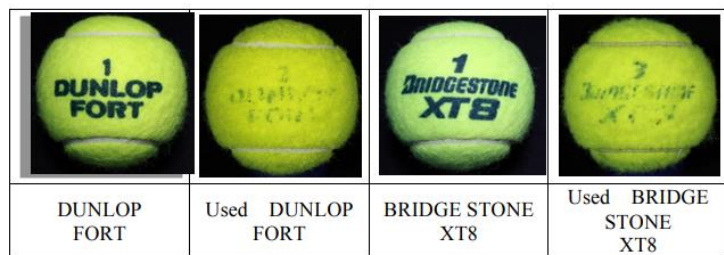


Figura 2: confronto tra palline nuove e palline usurate. [16]

## Capitolo 4. Aerodinamica della pallina da tennis.

### 4.1 Studio effettuato da S.R. Goodwill, S.B. Chin, S.J. Haake, apparato sperimentale.

Questo è uno dei primi studi effettuati allo scopo di definire dei valori caratteristici di quelle grandezze definite nel capitolo precedente e per spiegare i comportamenti della pallina da tennis al variare delle varie condizioni operative. La prima cosa da introdurre per avere un'idea del modo in cui viene effettuato lo studio è l'apparato sperimentale utilizzato, mostrato nella figura 4.

La pallina, all'interno di una galleria del vento, è posizionata su uno strumento che ne permette la rotazione e che consente di misurare le forze a cui la pallina stessa è sottoposta. La palla viene mantenuta da due piccoli supporti cilindrici. Con questo tipo di apparato sperimentale l'unica accortezza da adottare è quella di cercare di ridurre al minimo l'interferenza che questi supporti possono indurre nel flusso attorno alla pallina stessa. Per questo motivo i supporti hanno una forma scanalata, che non solo riduce l'interferenza ma ne massimizza la resistenza e minimizza le vibrazioni a cui la pallina potrebbe essere sottoposta. Attraverso questo apparato è possibile conferire alla pallina una rotazione costante e ciò permette di misurare contemporaneamente il coefficiente di resistenza che di portanza. Il calcolo delle forze che la pallina subisce viene effettuato mediante dei sensori che forniscono un'uscita digitale ad alta sensibilità; l'incertezza nel calcolo delle forze è dell'ordine di  $10^{-4}N$ , decisamente accettabile per il calcolo della resistenza e della portanza. La misura del diametro viene effettuata attraverso dei diametri a corsoio con una incertezza di  $\pm 0,2\text{ mm}$ . Per il calcolo della temperatura e della pressione vengono utilizzati trasduttori ad alta precisione; avendo i valori di temperatura e pressione è possibile calcolare precisamente la velocità del flusso d'aria attraverso la pressione differenziale misurata da due differenti prese di pressione, con un'incertezza massima di  $\pm 0,1\text{ m/s}$ .

Quando la velocità del flusso all'interno della galleria del vento ha raggiunto un valore costante, tutte le grandezze vengono misurate 10 volte al secondo per 10 secondi, facendo la media di tutti questi valori viene minimizzata la propagazione di errori nelle misurazioni e massimizzata l'affidabilità dei dati.

Allo scopo di verificare l'accuratezza delle misure effettuate sono stati fatti ulteriori test su una pallina liscia realizzata in resina epossidica e i risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli che erano stati precedentemente riportati da Achenbach [8]. Achenbach aveva ottenuto un valore di  $C_D = 0,51 \pm 0,01$  per una pallina liscia, tuttavia, le misure effettuate con l'apparato sperimentale sopra descritto riportavano dei valori di  $C_D = 0,54 \pm 0,01$  che risulta più alto del 5%. Si pensava che questa discordanza tra i due risultati fosse legata all'interferenza che i supporti della pallina generavano sul

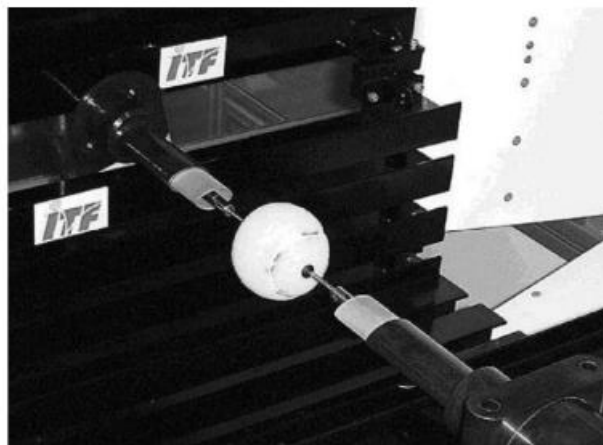


Figura 4: apparato sperimentale all'interno della galleria del vento [1].

flusso, e questa ipotesi è stata provata utilizzando un altro apparato sperimentale che prevedeva che i supporti fossero posizionati nella parte posteriore della pallina. Così facendo le misure riportavano gli stessi valori riportati nello studio di Achenbach. Questi errori di misurazione sono stati considerati come intrinseci dell'apparato sperimentale stesso, che viene comunque ritenuto come ottimale rispetto ad altre configurazioni. Essendo l'errore sistematico e quindi caratteristico di ogni misurazione, dato che lo scopo dello studio è confrontare i vari risultati ottenuti, l'apparato è stato, in conclusione, reputato valido.

#### 4.2 Pallina da tennis priva di spin.

Lo scopo dello studio è, inizialmente, quello di avere un'idea numerica delle grandezze aerodinamiche fondamentali per una pallina da tennis, e quello di analizzare come il comportamento delle diverse palline varia con l'usura. Per semplicità il primo caso ad essere trattato è quello della pallina investita dal flusso d'aria e priva di qualsiasi tipo di rotazione.

Per rendere le palle usurate in modo realistico, analogo perciò a come avviene effettivamente durante il gioco è stato utilizzato lo stesso metodo utilizzato dall'ITF: la pallina viene sparata alla velocità di 30 m/s su una superficie acrilica con una traiettoria angolata di  $16^\circ$  rispetto all'orizzontale, per replicare in modo affidabile una tipica risposta di gioco. Questo processo è stato ripetuto per il numero voluto di impatti, che è stato scelto arbitrariamente.

Come menzionato già precedentemente, quando la pallina interagisce con la superficie di gioco le fibre che caratterizzano la peluria di cui è ricoperta si consumano ed è perciò lecito pensare che questo fenomeno comporti una riduzione del diametro della pallina stessa; tuttavia, è stato verificato che la riduzione del diametro è praticamente trascurabile in quanto inferiore alla sensibilità degli strumenti di misurazione. Nello studio sono state sottoposte alle misure diverse palline da tennis prodotte da vari brand, tuttavia, i comportamenti sono quasi completamente analoghi tra palline di marche diverse.

##### *Comportamento del $C_D$ al variare del $Re$ .*

Il primo comportamento da analizzare è quello del  $C_D$  al variare del  $Re$ , osservabile nella figura 5. Le palline testate sono state immerse in un flusso d'aria con una velocità tale da far ottenere dei valori di  $Re$  compresi tra  $8 \cdot 10^3$  e  $250 \cdot 10^3$ . Per i valori più bassi di  $Re$  sono stati misurati  $C_D = 0,66$  circa, mentre per valori più alti di  $Re$  si ottengono  $C_D = 0,62$ . Si assiste perciò ad una riduzione del coefficiente di resistenza pari a 0,04. Il motivo per cui si osserva questo comportamento è relativo al fatto che quando la velocità del flusso d'aria aumenta, la peluria esterna della pallina tende a schiacciarsi sulla superficie rigida della pallina. In modo totalmente equivalente si osserverebbe la stessa riduzione del  $C_D$  se il diametro della pallina diminuisse di 2 mm; se si osserva attentamente il modo in cui la peluria si schiaccia sulla superficie rigida si può effettivamente verificare che l'effetto coinvolge proprio spessori di dimensioni confrontabili a 2 mm.

Un'altra spiegazione che può essere conferita a questo comportamento è quella che viene fornita da Achenbach: essendo la pallina in regime trans-critico, ossia quel range di  $Re$  in cui il  $C_D$  risulta approssimativamente costante, indipendente dal  $Re$ , come già spiegato nel capitolo 2, l'unico effetto che può influenzare il valore del  $C_D$  è la rugosità e quindi la sua variazione. Se al comportamento della peluria, che si compatta verso la superficie rigida, può essere associato una riduzione della rugosità, di conseguenza si ottiene una riduzione del  $C_D$ .

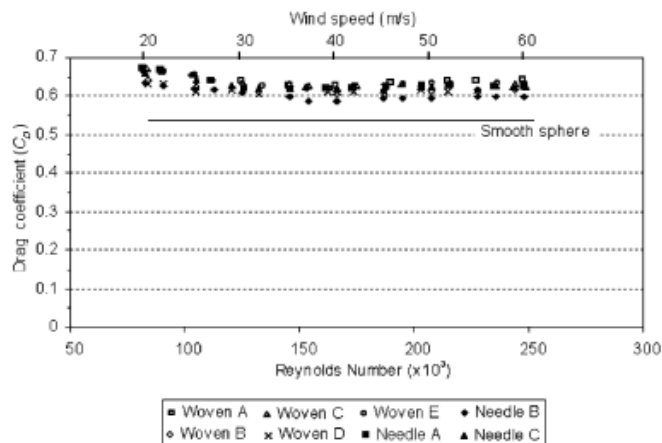


Figura 5: Coefficiente di resistenza al variare del numero di Reynolds [1].

#### Comportamento del $C_D$ al variare dell'usura della pallina.

Le curve ottenute in questo caso sono sempre curve di  $C_D$  al variare del  $Re$ , indicate in figura 6, analoghe a quelle precedenti, ma sono parametrizzate rispetto all'usura delle palline, che sono sottoposte ad un numero definito di impatti tra cui 60, 500, 1000 e 1500. Ciò che si osserva è che il  $C_D$  ha un comportamento complessivamente indipendente dal  $Re$ . Il coefficiente di resistenza rimane approssimativamente costante per palline nuove per quelle soggette ad un numero di impatti pari a 60 e 500.

Aumentando ulteriormente il numero di impatti si osserva una riduzione massima del  $C_D$  pari a 0,04 corrispondente al numero massimo di impatti, pari a 1500.

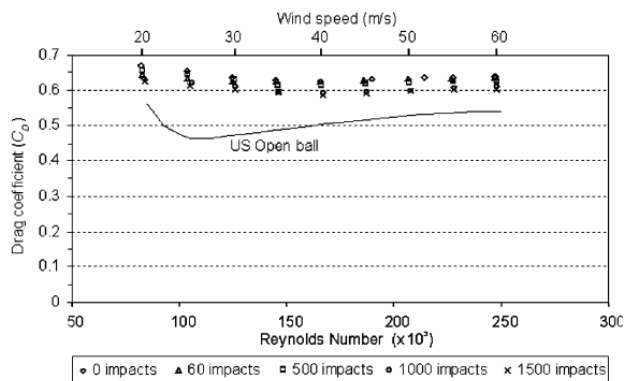


Figura 6: coefficiente di resistenza al variare del Reynolds per palline con diversa usura. [1]

#### 4.3 Pallina da tennis con spin.

Lo studio qui effettuato si propone di calcolare i coefficienti di resistenza e di portanza al variare del coefficiente di spin  $S$ , già introdotto nel capitolo 2, a due valori fissati di  $Re$  e quindi di velocità del flusso d'aria incidente, che sono rispettivamente  $Re = 105 \cdot 10^3$  a cui corrisponde una velocità del flusso di  $V = 25 \text{ m/s}$  e  $Re = 210 \cdot 10^3$  a cui corrisponde una  $V = 50 \text{ m/s}$ . Lo spin conferito alle palline testate va da un valore nullo ad uno massimo pari a 2750 rpm, discretizzato tramite incrementi di 250 rpm.

A causa del fatto che il flusso attorno alla pallina non è più stazionario, data la rotazione, le misure effettuate nello studio sono caratterizzate da una affidabilità inferiore, quindi, da un errore di

misurazione maggiore; se nel caso di pallina priva di spin si aveva un'incertezza della misurazione di  $\pm 0,015$  adesso l'errore di misurazione risulta essere  $\pm 0,025$ .

Anche in questo particolare studio sono state testate palline appartenenti a diverse marche, tuttavia, come nel caso precedente, la differenza relativa ai vari coefficienti ottenuta è dello stesso ordine di grandezza della sensibilità degli strumenti analizzati, si può perciò affermare nuovamente che non ci sono differenze apprezzabili nell'utilizzo di palline di diversa fattura.

#### Comportamento del $C_D$ al variare dello spin e del $Re$ .

La prima proprietà che si può sicuramente evidenziare è quella già esposta nel paragrafo precedente, relativa al fatto che, a parità di spin, andando a confrontare i valori del  $C_D$  per i due valori di  $Re$  imposti, il coefficiente di resistenza diminuisce leggermente all'aumentare del  $Re$ , come già menzionato. L'andamento può essere osservato nelle figure 7 e 8.

Andando a focalizzarsi su come il coefficiente di spin influenzi i valori del  $C_D$ , si può notare come quest'ultimo aumenti con l'aumentare di  $S$ . Ponendosi nel caso di  $V = 25 \text{ m/s}$ , si passa da un valore di  $C_D = 0,65$  corrispondente ad un valore di spin nullo, ad un valore di  $C_D = 0,69$  corrispondente ad un coefficiente di spin pari a 0,35 che è quasi il massimo nel test effettuato.

Il motivo per cui il coefficiente di resistenza aumenti con lo spin della pallina è strettamente collegato alla superficie esterna della pallina stessa, la quale non risulta essere rigida, ma caratterizzata dalla peluria. La peluria, a causa della rotazione, e perciò della forza centrifuga, tende a estendersi verso

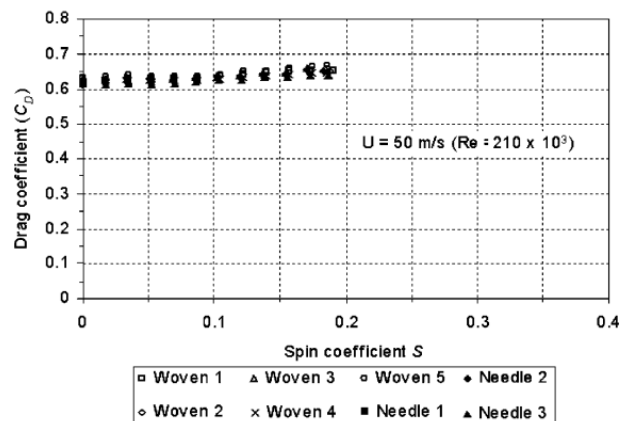
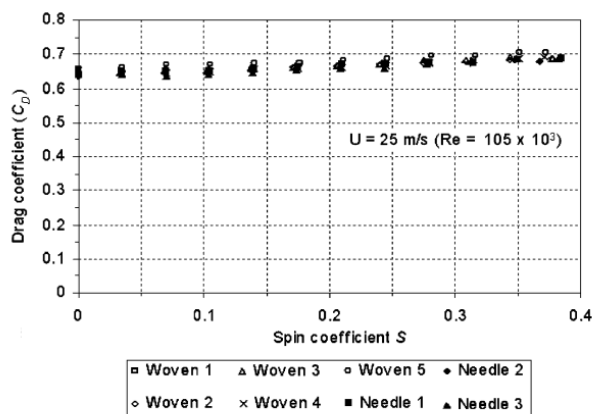


Figura 8: coefficiente di resistenza al variare del coefficiente di spin, ad un valore fissato della velocità del flusso  $V=25 \text{ m/s}$ . [1]

Figura 7: coefficiente di resistenza al variare del coefficiente di spin, ad un valore fissato della velocità del flusso  $V=50 \text{ m/s}$ . [1]

l'esterno, aumentando la superficie di interazione tra flusso e pallina, fenomeno che aumenta il valore di resistenza e che comporta un diretto aumento del  $C_D$ . Un altro effetto che genera un aumento della resistenza è la presenza della portanza generata dalla rotazione, che comporta un contributo aggiuntivo alla resistenza, chiamato resistenza indotta.

#### Comportamento del $C_D$ al variare dello spin e dell'usura della pallina.

Nello studio precedente era stato ottenuto una riduzione di  $C_D$  di 0,04 per palline soggette a 1500 impatti rispetto alle palline in perfetto stato. Nell'esperienza qui trattato si ottiene un risultato che concorda esattamente con quello precedente, osservabile nelle immagini 9 e 10.

Le palline soggette ad un numero di impatti compreso tra 0 e 60 hanno un comportamento del tutto analogo a quelle nuove. Le palline soggette ad un numero maggiore di impatti, per esempio 500 o 1000, presentano un  $C_D$  che aumenta con lo spin, come nell'esperienza precedente, ma con un tasso di crescita leggermente inferiore. Il range più largo di valori ottenuti si può osservare per un valore di  $S$  pari a 0,15. In questa particolare situazione si ottiene un valore di  $C_D = 0,61$  per le palline più

usurate, e un  $C_D = 0,67$  per le palline nuove. Ciò che si misura è una riduzione del coefficiente di resistenza per le palline usurate rispetto a quelle nuove, con una differenza di almeno 0,04 per le due tipologie di palline testate. Questo risultato è perfettamente in linea con quello già ottenuto per le palline prive di spin, in quanto, per ogni valore di  $S$ , si ha una differenza dell'ordine di 0,03-0,04 tra il  $C_D$  delle palline nuove rispetto a quelle usurate.

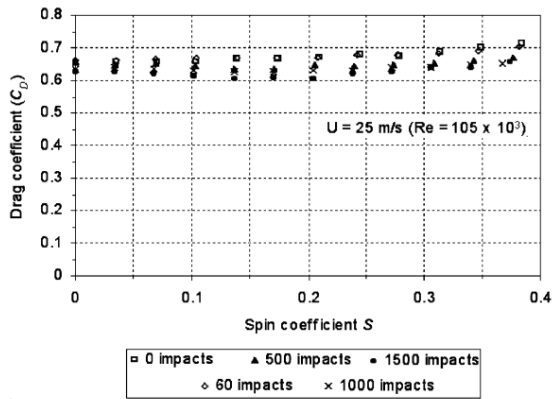


Figura 9: coefficiente di resistenza al variare del coefficiente di spin, ad un valore fissato della velocità del flusso  $V=25 \text{ m/s}$ , per palline con diversa usura. [1]

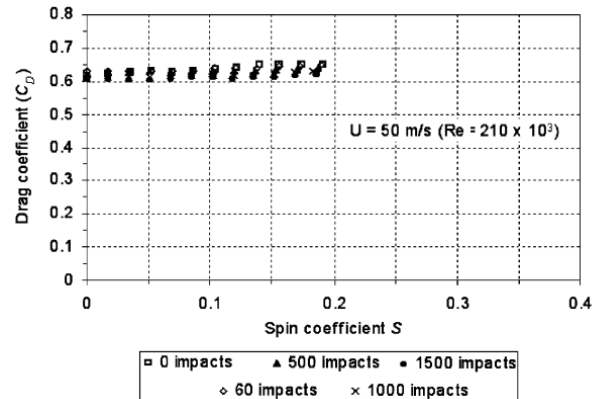


Figura 10: coefficiente di resistenza al variare del coefficiente di spin, ad un valore fissato della velocità del flusso  $V=50 \text{ m/s}$ , per palline con diversa usura. [1]

### Comportamento del $C_L$ al variare di $S$ e del $Re$ .

Come già menzionato nel capitolo 1, la portanza è una forza che si genera dall'asimmetria del campo di pressione ottenuto conferendo rotazione alla pallina. L'intensità della portanza è proporzionale alla rotazione della pallina; aumentando lo spin si otterranno dei valori di portanza sempre maggiori. Anche in questo caso vengono usate palline di diverse marche e nuovamente non si misurano differenze apprezzabili tra le stesse.

Lo studio qui riportato viene confrontato con quello sviluppato da Chadwick [9]. Tra i due esperimenti sembrerebbero esserci delle notevoli differenze, tuttavia, è da notare che lo studio condotto da Chadwick utilizzava una pallina da tennis con un diametro significativamente maggiore; se si utilizzano gli stessi risultati ottenuti da Chadwick per la pallina con il diametro utilizzato in questo studio i risultati sperimentali tra i due esperimenti coincidono.

Una prima osservazione può essere fatta su come varia  $C_L$  con il  $Re$ , a parità di  $S$ . Per valori di  $S$  inferiori a 0,1 si ottengono dei valori di  $C_L$  inferiori quando la velocità del flusso è  $V = 50 \text{ m/s}$ , e dei valori di  $C_L$  maggiori per  $V = 25 \text{ m/s}$ , come si può vedere dalle figure 12 e 11. Da ciò si può immediatamente attribuire una dipendenza del  $C_L$  dal  $Re$ . Tuttavia, questa dipendenza è limitata per valori di  $S$  inferiori a 0,1 in quanto non è più osservabile per  $0,1 < S < 0,2$  range in cui il  $C_L$  risulta equivalente alle due velocità del flusso.

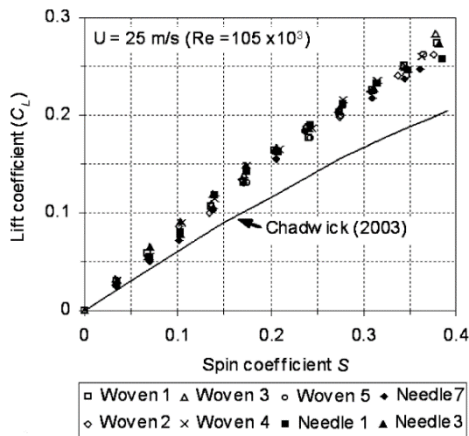


Figura 12: coefficiente di portanza al variare del coefficiente di spin, ad un valore fissato della velocità del flusso  $V=25$  m/s. [1]

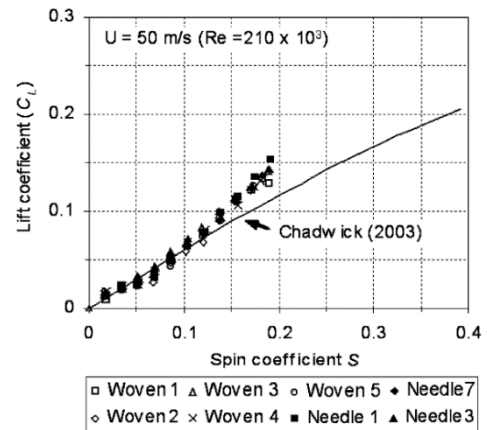


Figura 11: coefficiente di portanza al variare del coefficiente di spin, ad un valore fissato della velocità del flusso  $V=50$  m/s. [1]

Questo fenomeno, come quello relativo al  $C_D$  è sempre da attribuire al fatto che ad alte velocità la peluria esterna della pallina tende a schiacciarsi sulla superficie rigida della pallina stessa, andando a modificare effettivamente il diametro della pallina, la cui variazione ha delle dirette conseguenze sulle proprietà della pallina.

#### Comportamento del $C_L$ al variare di $S$ e dell'usura della pallina.

Come si può chiaramente vedere dai grafici riportati,  $C_L$  assume valori nettamente differenti per  $0,05 < S < 0,15$  al variare dell'usura della pallina. I valori di  $C_L$  riportati in questo range di spin sono nettamente inferiori per palline usurate rispetto alle palline in perfetto stato. Questa netta distinzione di valori svanisce per valori di  $S > 0,15$  poiché si ottengono dei valori di  $C_L$  approssimativamente costanti, o comunque in cui la variazione è paragonabile alla sensibilità degli strumenti di misurazione. La massima differenza di  $C_L$  misurata è di 0,03.

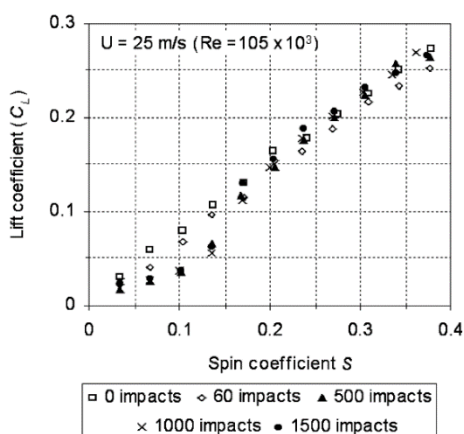


Figura 14: coefficiente di portanza al variare del coefficiente di spin, ad un valore fissato della velocità del flusso  $V=50$  m/s, per palline con diversa usura. [1]

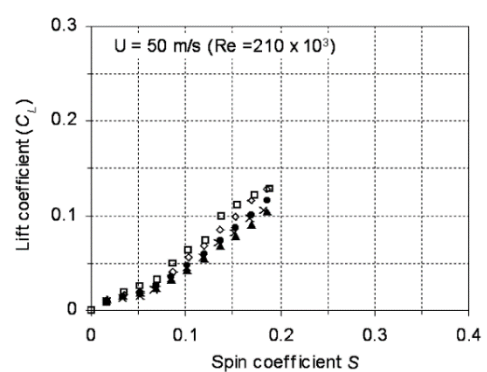


Figura 13: coefficiente di portanza al variare del coefficiente di spin, ad un valore fissato della velocità del flusso  $V=50$  m/s, per palline con diversa usura. [1]

#### 4.4 Implicazioni dei risultati ottenuti nel gioco del Tennis e osservazioni conclusive.

Tirando le somme degli esperimenti svolti, si può chiaramente affermare che per palline usurate sia  $C_L$  che  $C_D$  assumono valori tipicamente più bassi rispetto alle palline nuove e che questo effetto è correlato al fatto che le palline perfettamente nuove presentano una quantità maggiore di peluria esterna rispetto a quelle usurate. È proprio la presenza della peluria a determinare l'ampiezza della scia a valle della pallina. Le palline nuove sono caratterizzate da una scia più ampia rispetto a quelle usurate ed è proprio questo fenomeno che comporta che i due coefficienti abbiano valori più elevati. Si può anche concludere che queste differenze risultano sempre meno apprezzabili all'aumentare della velocità del flusso incidente poiché quest'ultimo costringe la peluria ad essere sempre più schiacciata sulla superficie rigida, perciò, le differenze relative alla scia diventano sempre meno significative fino ad annullarsi.

L'apparato sperimentale utilizzato consente di valutare al meglio i valori di  $C_L$  e  $C_D$ , tuttavia, per quantificare le differenze che un giocatore sente al variare delle diverse condizioni della pallina nelle varie situazioni è stato sviluppato un software per valutare la traiettoria di una pallina da tennis, che può essere facilmente descritta dalle leggi del moto Newtoniane, simulando un tipico servizio e tenendo conto del rimbalzo della pallina sulla superficie di gioco.

Le palline testate nel software sono di diverso tipo, si differenziano infatti non solo per valori di  $C_D$  ma anche per le dimensioni del diametro, presentano però tutte la stessa massa. Le palline confrontate sono le seguenti: una pallina nuova, di diametro standard di 65 mm a cui è associato un  $C_D = 0,64$  come già visto precedentemente; una pallina soggetta ad usura massima, ovvero 1500 impatti, di diametro standard, a cui è associato un  $C_D = 0,60$  ottenuto per lo studio in esame; una pallina sovradimensionata, con un diametro maggiorato del 6.5%, che presenta lo stesso coefficiente di resistenza della pallina nuova perciò  $C_D = 0,64$ ; infine una pallina usurata, di dimensioni standard, che presenta un  $C_D = 0,54$  ottenuto in uno studio analogo [10]. Osservando la posizione delle palline dopo un determinato tempo, fissato per tutte le palline, è possibile apprezzare le differenze, riportate nella figura 16.

Queste traiettorie sono esplicative di come le variazioni del coefficiente di resistenza vengano percepite dai giocatori. La pallina ad arrivare prima è ovviamente quella usurata con dimensioni standard dotata del coefficiente di resistenza più basso ( $C_D = 0,54$ ), seguita da quella usurata presentata nello studio qui analizzato ( $C_D = 0,60$ ). La pallina con il diametro maggiore risulta essere la più lenta in quanto, pur avendo un  $C_D$  dello stesso valore di quella nuova, essendo caratterizzata da un diametro più elevato, genera una scia a valle di dimensioni maggiori che ne rallenta significativamente il moto. Questo particolare comportamento giustifica la scelta dell'ITF, che ha scelto di introdurre una pallina sovradimensionata allo scopo di rallentare il gioco.

Per capire ulteriormente come l'effetto dell'usura possa influenzare le strategie di gioco sono state testate le palline nel software precedentemente menzionato, ed è stato conferito alle stesse uno spin (topspin) definito e assunto costante per tutta la traiettoria. In questo caso le palline testate sono solo due: la pallina nuova e la pallina sottoposta a 1500 impatti, entrambe di dimensioni e massa standard. Le traiettorie testate sono differenti, in un primo caso, indicato in figura 15, le due palline sono state lanciate allo stesso angolo e alla stessa velocità, impattando in punti differenti sulla superficie di gioco, in un secondo caso, più fedele alla realtà, la pallina usurata è stata lanciata con un angolo differente allo scopo di far impattare entrambe le palline nello stesso punto della superficie.

Ciò che si è potuto osservare è che la pallina usurata ha percorso circa 0,5 m in più rispetto alla pallina nuova, a causa del fatto che il  $C_L$  associato è sensibilmente inferiore. La vera differenza sta nel fatto che alle palline nuove, dotate di un  $C_L$  più elevato, è più facile conferire uno spin tale da farle percorrere una traiettoria che tende a scendere più velocemente verso la superficie al di là della rete. Questa differenza nelle traiettorie è più apprezzabile nel secondo caso di studio, illustrato nella figura



17, in cui, per far impattare le palline nello stesso punto, la pallina usurata ha superato la rete con un'altezza di 35 mm inferiore rispetto alla pallina nuova.

Nel gioco del tennis il top spin viene utilizzato dai giocatori per avere una maggiore sicurezza di colpire la superficie di gioco, soprattutto nel caso in cui siano coinvolte elevate velocità, tipiche nella fase di servizio; permette ai giocatori di diminuire perciò il margine di errore nella battuta. L'utilizzo di palline usurate lo rende più difficile, avendo queste un  $C_L$  inferiore.

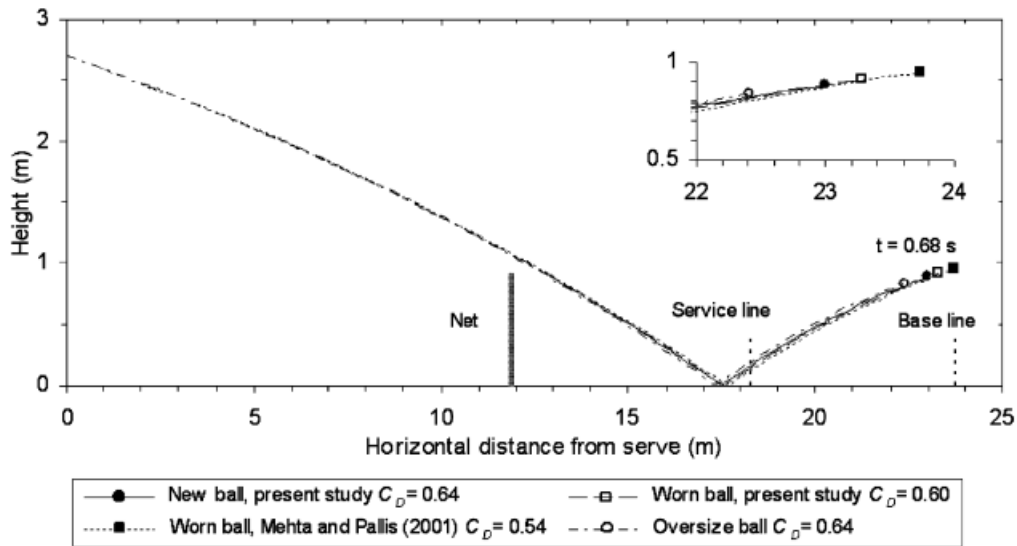


Figura 15: traiettorie delle varie palline testate, con valori differenti di diametro e coefficiente di resistenza. [1]

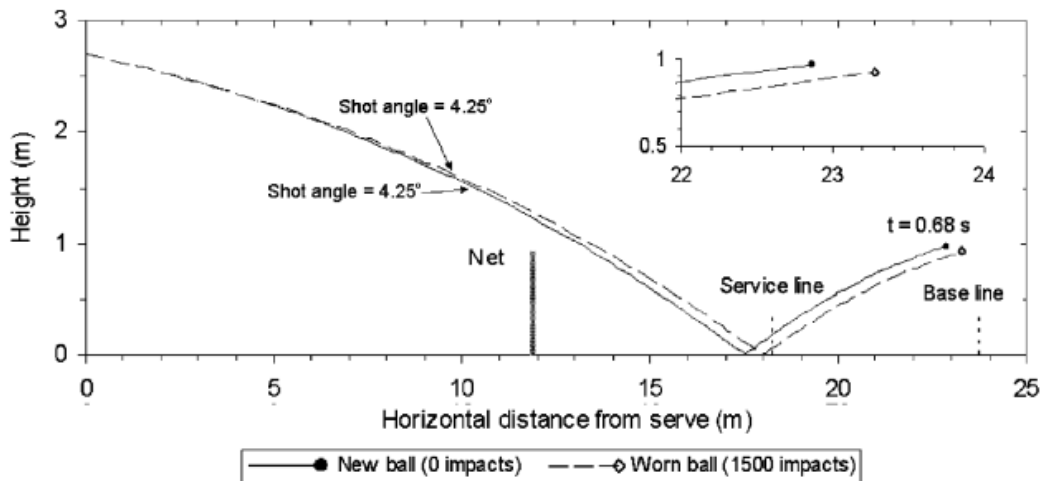


Figura 16: traiettorie delle due palline proiettate alla stessa velocità e angolo iniziale, con valori differenti di coefficiente di portanza, ma a parità di dimensioni e massa. [1]

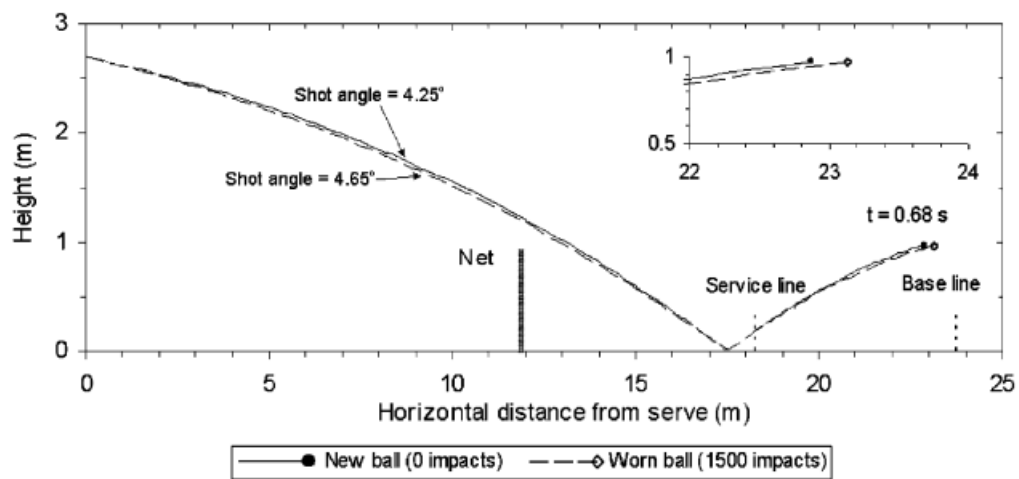


Figura 17: traiettorie delle due palline proiettate con diversi angoli per farle impattare nello stesso punto, con valori differenti di coefficiente di portanza, ma a parità di dimensioni e massa. [1]

## Capitolo 5. Influenza del feltro sull'aerodinamica.

### 5.1 Studio effettuato da R. Mehta, F. Alam e A. Subic. Apparato sperimentale.

Questo studio, effettuato nel 2008 [3], non solo conferma i risultati ottenuti nello studio precedentemente descritto ma aggiunge nuovi risultati e, in particolare, rende più apprezzabile il comportamento della pallina da tennis al variare delle varie condizioni, già discusso in precedenza. In questo particolare studio viene utilizzato un apparato sperimentale basato su una galleria del vento in cui è presente un sensore di forze suddiviso in sei componenti. La galleria è lunga 9 m, larga 3 m e alta 2 m, osservabile nella figura 18; sono state sottoposte alle prove dodici palline differenti, a vari valori di spin e Reynolds. Per quanto riguarda il Reynolds, è stato fatto variare tra  $46 \cdot 10^3$  e  $161 \cdot 10^3$ , valori che corrispondono rispettivamente a 40 e 140 km/h. Lo spin conferito alle palline invece è stato fatto variare tra 500 e 3000 rpm.



Figura 18: galleria del vento dell'università RMIT usata nell'esperimento. [3]

È stata utilizzata una pallina di 28 mm di diametro, posta nella galleria del vento, allo scopo di mostrare le linee di corrente che si sviluppano intorno alla pallina stessa sia nella condizione priva di spin che nella condizione con spin. Dall'immagine 19 si può apprezzare il fenomeno già menzionato nel capitolo 2, secondo cui la resistenza generata è principalmente dovuta alla differenza di pressioni che si sviluppa tra il flusso a valle e a monte della pallina. In questo particolare caso, alla pallina, priva di spin, è associato un  $Re = 167 \cdot 10^3$ . In realtà il contributo dovuto alla differenza di pressione non è l'unico, è presente un ulteriore contributo legato agli effetti della viscosità legati alla forma del corpo trattato; tuttavia, quest'ultimo contributo può essere trascurato in quanto, come mostrato da Achenbach [11], contribuisce solo per il 2% alla resistenza totale. L'immagine 20 invece è particolarmente esplicativa per quanto riguarda la generazione della portanza. Si può chiaramente vedere l'asimmetria delle linee di corrente tra la parte superiore e inferiore della pallina. Nel caso mostrato alla pallina è stato conferito un topspin di 4 rot/sec ossia 24 rpm, mentre il Re corrisponde anche in questo caso a  $167 \cdot 10^3$ .

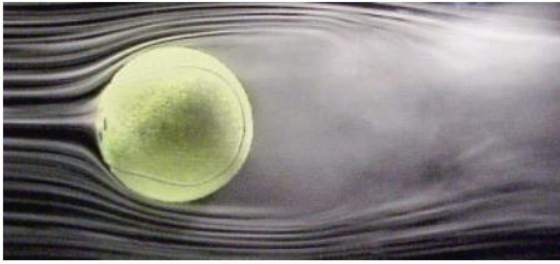


Figura 20: visualizzazione del flusso attorno ad una pallina da tennis di 28 mm di diametro,  $Re = 167 \cdot 10^3$ , priva di spin. [3]

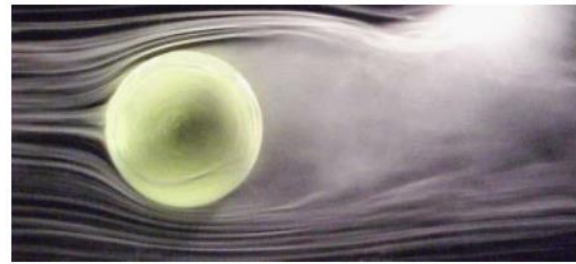


Figura 19: visualizzazione del flusso attorno ad una pallina da tennis di 28 mm di diametro,  $Re = 167 \cdot 10^3$ , con topspin pari a 4 rot/sec. [3]

## 5.2 Risultati ottenuti.

Come già accennato precedentemente, lo studio qui presente tende a confermare i risultati ottenuti nel primo esperimento analizzato; tuttavia, non si limita solo a questo, si propone anche di fare un confronto con altri studi effettuati tempo addietro in cui venivano considerati anche casi che non coinvolgevano strettamente il campo delle palline da tennis. Metha e Pallis [12], hanno trovato un  $C_D = 0,62$  per palline di tennis nuove, risultato che potrebbe sembrare in linea con le misurazioni effettuate da Achenbach [13], [14]. Tuttavia, ci sono dei risultati non coincidenti che sono probabilmente da ricondurre al modo in cui, nei vari studi, si misura il diametro delle palline.

Per capire al meglio il modo in cui varia il  $C_D$  bisogna fare riferimento a ciò che è stato già menzionato nel capitolo 2, in cui si sono discussi i vari comportamenti del coefficiente di resistenza al variare del Reynolds. Si pensa che se ci si trova nel regime transcritico il  $C_D$  assume valori solitamente più elevati di 0,5 poiché nel regime transcritico la transizione del flusso da laminare a turbolento è già avvenuta perciò il punto di separazione, all'aumentare del  $Re$ , tende a spostarsi a monte, generando una scia più ampia e di conseguenza un  $C_D$  più elevato.

Se invece si fa un confronto tra sfere lisce e rugose, si può affermare che all'aumentare della rugosità la dimensione dello strato limite aumenta, causando anche in questo caso un punto di separazione sempre più spostato verso monte e quindi un ulteriore aumento del  $C_D$ . Tuttavia, come dimostrato da Achenbach [15], per sfere completamente lisce, si raggiunge un limite superiore coincidente con il valore di  $C_D \cong 0,4$ . Il fenomeno che spiega questo comportamento riguarda il contributo alla resistenza generato dagli effetti viscosi concentrati nello strato limite: a questi valori di  $C_D$  si associa solitamente un punto di separazione che si trova nella regione di gradiente di pressione avverso; ciò che ci si aspetta è che il punto di separazione si sposti a monte all'aumentare della rugosità, tuttavia questo effetto è limitato da un altro fenomeno; all'aumentare della rugosità si presuppone che la dimensione dello strato limite stia aumentando, con l'aumento della dimensione dello strato limite il contributo alla resistenza degli effetti viscosi aumenta e rende il flusso intorno alla pallina, specialmente all'interno dello strato limite, più resistente alla separazione, cioè, il punto di separazione si sposta verso valle. La sovrapposizione di questi due effetti fa sì che si raggiunga un limite per il coefficiente di resistenza in regime transcritico. Tuttavia, questo comportamento non è tipico di ogni sfera, devono essere soddisfatte determinate condizioni affinché i due effetti si bilancino perfettamente.

Per quanto riguarda il caso specifico della pallina da tennis, ci sono diversi effetti da considerare. La presenza della peluria suggerisce un'elevata rugosità, ma non bisogna solo tener conto di questo; dato che i filamenti che fanno parte della peluria hanno dimensioni finite, l'aria può fluire all'interno di questo strato esterno. Questa osservazione ci porta a dire che la pallina da tennis può essere vista come una sfera con una elevata rugosità e con uno strato esterno poroso che concede all'aria di entrare. Bisogna perciò andare a valutare il contributo alla resistenza generato da ogni singolo

filamento. I risultati sperimentali suggeriscono che questo contributo si aggira attorno al 20-40% della resistenza totale, in base al Reynolds. Ciò che inizialmente non si riusciva a giustificare era il comportamento del  $C_D$  a valori bassi del Re. Il  $C_D$  infatti, per Re relativamente bassi, assumeva valori sorprendentemente elevati. Questo comportamento è stato già spiegato nello studio precedente e viene confermato in questo. Quando il Re assume valori relativamente elevati, i filamenti della peluria tendono ad allinearsi alla direzione del flusso, invece di assumere un orientamento perpendicolare alla superficie della pallina, come si può notare per Re bassi. Questo effetto è chiaramente osservabile nell'immagine 21. Oltre a questo effetto bisogna tener conto anche del contributo generato dal singolo filamento: nel range di Re coinvolti, il  $C_D$  per il singolo filamento tende a diminuire con l'aumento del Re. È proprio la sovrapposizione di questi effetti a giustificare il comportamento del  $C_D$  a bassi Re.

L'influenza significativa della peluria, come già visto nello studio precedente, può essere apprezzata al variare dell'usura della pallina. In questo studio, oltre all'effetto già spiegato per cui, all'aumentare dell'usura, il feltro della pallina era più consumato e di conseguenza si otteneva un valore inferiore della resistenza, si fanno ulteriori osservazioni, direttamente collegate a quello che avviene realmente durante il gioco.

Ciò che si misura è che le palline che sono state usate per tre partite hanno un comportamento analogo a palline completamente nuove, tuttavia, dopo sei partite si misura stranamente un coefficiente di resistenza nettamente più elevato, osservabile in figura 22. Questo fenomeno è noto a molti tennisti ed è da ricondurre al fatto che dopo questo determinato numero di partite il feltro della pallina risulta particolarmente crespo e gonfio e, pur non essendo visibile macroscopicamente, questo comportamento è confermato dalle misurazioni. Se poi la pallina viene utilizzata per un numero maggiore di partite il feltro si consuma e si osserva una riduzione della resistenza.

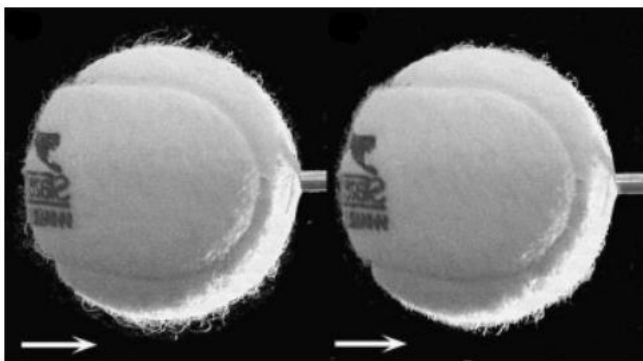


Figura 22: pallina da tennis sottoposta ad un flusso d'aria di velocità  $V=20$  m/s a sinistra e di velocità  $V=60$  m/s a destra. [3]

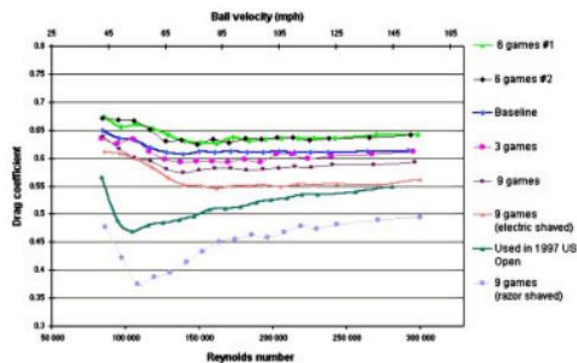


Figura 21: coefficiente di resistenza al variare del Re per varie palline, sottoposte a un numero differente di partite. [3]

### 5.3 Conclusioni e confronto con gli studi precedenti.

È di particolare utilità riassumere tutte le conclusioni a cui si è giunti nel corso di questo esperimento, che hanno confermato ciò che era già stato detto negli studi posteriori, e, contemporaneamente, ha fornito ulteriori giustificazioni ad alcuni comportamenti che non erano stati osservati precedentemente.

I comportamenti che sono stati confermati sono molteplici: il coefficiente di resistenza diminuisce all'aumentare dell'usura, l'orientazione delle cuciture non influisce significativamente sul comportamento aerodinamico delle palline, il coefficiente di resistenza relativo ad una pallina di dimensioni maggiori è di valore confrontabile con quello di una pallina di dimensioni standard, tuttavia, la pallina sovradimensionata risulta essere più lenta perché ad essa è associata una scia di dimensioni maggiori, il coefficiente di resistenza aumenta con l'aumentare dello spin e il coefficiente

di portanza naturalmente aumenta con l'aumentare dello spin, ma il suo tasso di crescita diminuisce all'aumentare del Reynolds. Non solo la veridicità di questi effetti è stata confermata ma anche i fenomeni che li giustificano corrispondono a quelli già ipotizzati.

Tuttavia, ci sono ulteriori effetti trattati, che vengono giustificati da comportamenti che negli studi precedenti non erano stati presi in considerazione. Prima di tutto è stato confermato il fatto che la pallina da tennis, se non è in una condizione usurata, alle velocità caratteristiche utilizzate nel gioco del tennis, si trova nella regione transcritica, in cui il punto di separazione dello strato limite rimane pressoché invariato al variare del Reynolds e, dato che in questa configurazione la maggior parte della resistenza è dovuta alla differenza di pressione tra valle e monte, il coefficiente di resistenza risulta essere poco dipendente dal numero di Reynolds.

Come già menzionato, la presenza del feltro tende a far spostare il punto di separazione dello strato limite verso monte, causando perciò un aumento delle dimensioni della scia e dello strato limite stesso, tuttavia, un'ulteriore osservazione che non era stata fatta in precedenza riguarda il comportamento del coefficiente di resistenza a valori di Reynolds relativamente bassi, che risulta essere particolarmente elevato; questo comportamento viene giustificato dal fatto che a bassi Reynolds i filamenti sono praticamente perpendicolari alla superficie rigida e dal comportamento del coefficiente di resistenza per il singolo filamento. Per concludere sono state fatte delle osservazioni che hanno un riscontro diretto nel mondo del tennis: è stato detto che generalmente una pallina da tennis usurata è caratterizzata da un coefficiente di resistenza più basso rispetto ad una pallina nuova, ma questa affermazione è stata smentita, in quanto è stato trovato un caso particolare in cui la pallina sottoposta ad un numero di partite pari a sei aveva un coefficiente di resistenza maggiore rispetto ad una pallina nuova. Questo comportamento non era stato osservato in precedenza ma potrebbe avere delle dirette implicazioni nel mondo del tennis.

## Capitolo 6. Flusso attorno alla pallina da tennis.

Nel corso degli anni sono stati effettuati ulteriori studi sul comportamento aerodinamico della pallina da tennis e, in particolare, sul comportamento del flusso attorno alla pallina da tennis. Un esempio di studio è proposto nel seguente esperimento, in cui vengono alla luce risultati discordanti con quelli ottenuti negli studi precedentemente esposti [16].

### 5.1 Apparato sperimentale usato nello studio di T. Nakajima, M. Hiratsuka, S. Ito e A. Konno.

In questo particolare esperimento è stato utilizzato un metodo di misurazione di tipo PIV, ossia Particle Image Velocimetry, allo scopo di analizzare con precisione il modo in cui il flusso si sviluppa attorno alla pallina da tennis. Questo metodo di misurazione si focalizza principalmente sul modo in cui il fluido influisce sulle linee di corrente del flusso intorno alla pallina. La procedura prevede di diffondere nel flusso delle particelle traccianti, che non devono avere caratteristiche troppo diverse (densità, viscosità ecc.) rispetto al fluido da analizzare, che poi vengono colpite da due impulsi consecutivi di raggi laser. La luce rifrange sulle particelle e viene catturata da una telecamera. Avendo la posizione delle particelle in due istanti consecutivi, poco distanti tra loro, è possibile ottenere il vettore velocità delle particelle (noto il tempo che intercorre tra la rilevazione delle due immagini). Questo metodo di misurazione si focalizza principalmente sul modo in cui il fluido influisce sulle linee di corrente del flusso intorno alla pallina.

Vengono testati due tipi di palline con due differenti gradi di usura. Queste palline sono già state indicate e sono osservabili nella figura 2. Vengono usate due palline nuove di due brand differenti e due palline della stessa marca ma usurate, con un grado di usura pari a 50 ore di gioco in competizione. Le palline testate sono state fatte ruotare con velocità angolare compresa tra 3700 e 4000 rpm. Allo scopo di evitare che le misurazioni fossero compromesse dall'ovalizzazione della pallina, dovuta sia all'effetto della rotazione sia al fatto che le palline usurate sono caratterizzate da una pressione interna inferiore, sono state testate altre quattro palline, analoghe, ma state riempite con uretano.

Per misurare i coefficienti di resistenza e di portanza le palline sono state sottoposte ad un flusso d'aria con velocità comprese tra 14 e 18 m/s e ad una rotazione di 4000 rpm all'interno di una galleria del vento. Le forze sulle palline sono state calcolate usando uno strumento di misurazione della forza a tre componenti, come già indicato negli esperimenti precedenti. Le misurazioni PIV 2D sono servite

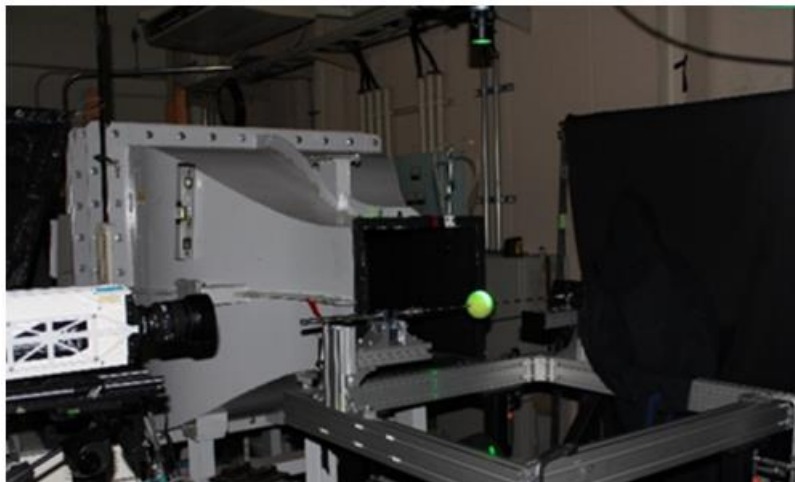


Figura 23: strumento di misurazione 2D PIV. [16]

allo scopo di visualizzare come si sviluppa il flusso attorno alla pallina e come si comporta il feltro nelle diverse condizioni; l'apparato sperimentale impiegato è indicato nella figura 23.

## 5.2 Risultati ottenuti.

Contrariamente a quanto era stato ottenuto ed esplicito negli studi differenti, i coefficienti di resistenza e di portanza sembrerebbero assumere valori nettamente più elevati per le palline usurate rispetto alle palline in una condizione nuova. Nelle figure 24, 25, 26 e 27 sono stati rappresentati gli

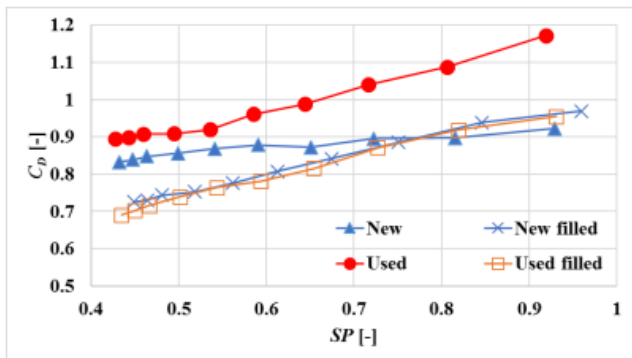


Figura 26: coefficiente di resistenza della pallina FORT al variare del coefficiente di spin. [16]

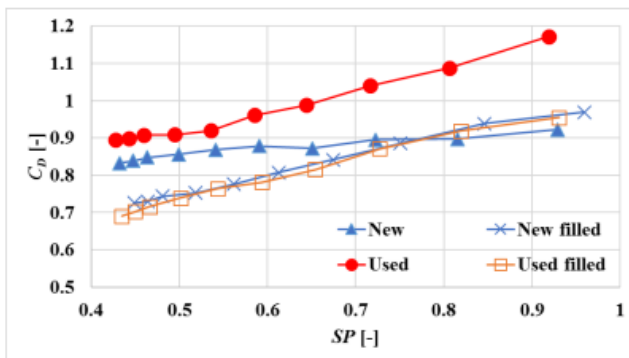


Figura 27: coefficiente di resistenza della pallina XT8 al variare del coefficiente di spin. [16]

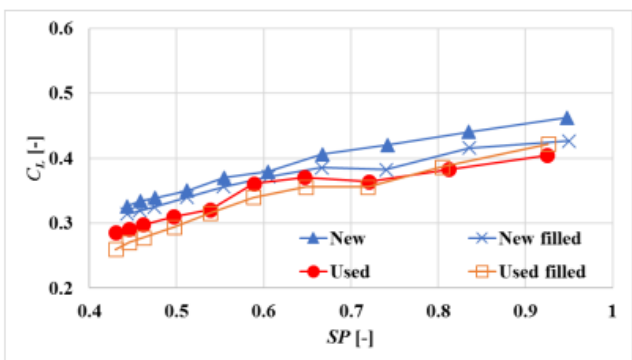


Figura 25: coefficiente di portanza della pallina FORT al variare del coefficiente di spin. [16]

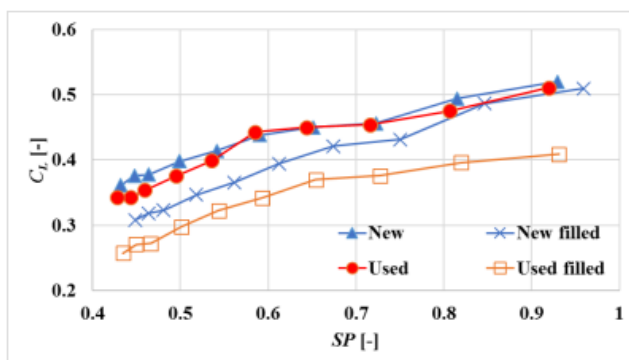


Figura 24: coefficiente di portanza della pallina XT8 al variare del coefficiente di spin. [16]

andamenti ottenuti. Sono indicati gli andamenti del coefficiente di resistenza e del coefficiente di portanza al variare del coefficiente di spin, per entrambe le palline testate, sia per quelle nuove che quelle usurate, e sono rappresentati anche gli analoghi andamenti per le palline riempite di uretano.

Una prima proprietà che può essere messa in luce è quanto il feltro influisca sulle proprietà aerodinamiche. La pallina FORT è caratterizzata da un feltro intrecciato satinato che garantisce una maggiore durabilità, infatti, non si notano significative differenze tra la pallina FORT nuova e quella usurata e questo viene anche confermato dal fatto che i dati ottenuti sui vari coefficienti sono notevolmente simili. Per quanto riguarda la XT8 invece, che è caratterizzata da un feltro convenzionale, le differenze tra i vari coefficienti al variare dell'usura sono maggiormente apprezzabili. Questo risultato dimostra come la peluria abbia un notevole impatto sui coefficienti aerodinamici della pallina da tennis.

Un'ulteriore proprietà che può essere osservata è relativa al fatto che alle palline usurate sono quasi sempre associati coefficienti di resistenza e di portanza più elevati rispetto a quelle nuove. Questo risultato è totalmente in disaccordo con quelli ottenuti in precedenza, in cui invece si osservava una riduzione per entrambi i coefficienti, ma può essere giustificato. Un comportamento del genere può essere dovuto alla riduzione della pressione interna della pallina da tennis, conseguenza diretta dell'usura. Questa ipotesi trova conferma con il fatto che la differenza dei vari coefficienti con l'usura non si osserva per le palline che sono state riempite di uretano. Se si osservano i grafici e si fa



particolare attenzione all'andamento dei coefficienti per le palline riempite, è possibile notare come i coefficienti ottenuti per le palline usurate siano inferiori o uguali a quelli misurati per le palline nuove. Questo risultato, a differenza di quello precedente, conferma tutti i risultati degli studi già analizzati.

Grazie al metodo di misurazione 2D PIV è possibile apprezzare come il feltro si modifica nelle diverse condizioni. I risultati ottenuti sono stati rappresentati nella figura 28. Prima di tutto è possibile focalizzarsi su come il feltro risulti più schiacciato sulla superficie rigida per le palline più usurate. Si può chiaramente osservare come alle palline nuove corrisponda un feltro che tende a spostarsi verso l'esterno; a ciò corrisponde una scia attorno alla pallina più ampia e una direzione del flusso a valle più inclinata diagonalmente, inoltre dalle immagini è risultato possibile affermare che l'aria attorno alla palla viene catturata dal feltro. Sono proprio queste differenze nel flusso a giustificare le variazioni dei coefficienti ottenuti.

Le immagini, tuttavia, sono state compromesse dal fatto che la pallina non è un corpo liscio; la presenza della peluria fa sì che il laser utilizzato nel PIV si disperda. Inoltre, il colore giallo caratteristico della pallina riflette in parte il laser e comporta la creazione di aloni nelle immagini.

In conclusione, lo studio appena presentato consiste in una ulteriore conferma della forte dipendenza dal feltro delle proprietà aerodinamiche della pallina da tennis.

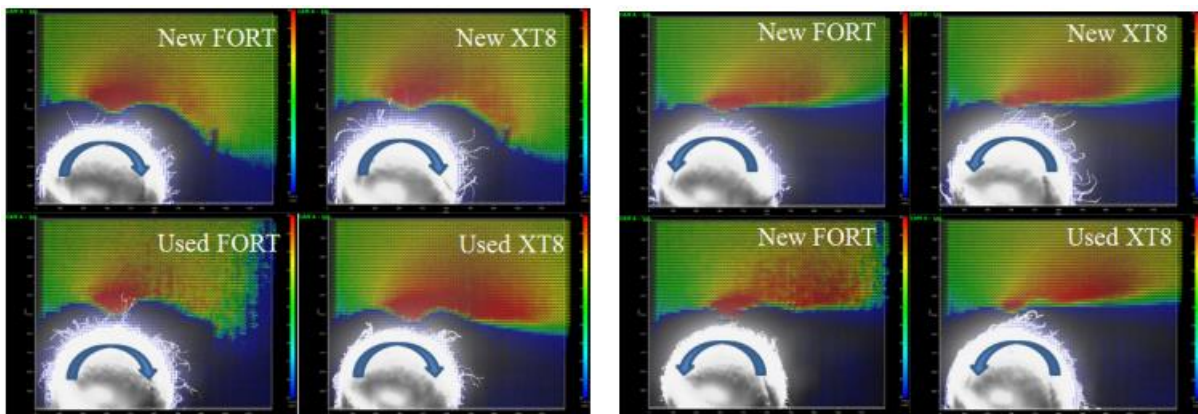


Figura 28: immagini del flusso attorno alla pallina ottenute con il metodo di misurazione PIV 2D, con particolare focus sulla posizione del feltro. [16]

## Capitolo 7. Conclusioni.

### 7.1 Risultati ottenuti.

Negli studi proposti e analizzati si è cercato di studiare il comportamento di una generica pallina da tennis usando diversi apparati sperimentali, i quali si proponevano di focalizzarsi su uno specifico aspetto dell'aerodinamica della pallina. Nel primo studio proposto è stato possibile verificare la variazione delle proprietà aerodinamiche della pallina al variare dell'usura della stessa [1]. Si è dimostrato che queste proprietà subiscono notevoli variazioni, ognuna delle quali legata ad aspetti che vengono successivamente analizzati negli studi seguenti, per esempio si è dimostrato, dai risultati ottenuti, che l'orientazione delle cuciture e l'utilizzo di palline da tennis di brand differenti non influiscono significativamente sull'aerodinamica, mentre l'usura, la peluria e la grandezza della pallina sono fattori fondamentali. L'usura della pallina è strettamente correlata al fatto che, durante l'utilizzo della pallina, il feltro che la caratterizza si consuma e con il variare del suo spessore analogamente anche il flusso intorno alla pallina stessa viene influenzato, come viene evidenziato nell'ultimo studio proposto [16]. In questo studio infatti è stato visto che, andando a confrontare le immagini ottenute tramite l'utilizzo del PIV, il feltro risulta essere più schiacciato sulla pallina nel caso di pallina usurata, mentre, nel caso di pallina nuova, questo tende maggiormente verso l'esterno, generando così una scia più ampia a valle. Gran parte delle proprietà da cui dipende il moto della pallina sono da ricercare nel modo in cui il flusso si sviluppa, attorno e a valle, della pallina stessa. Da ciò si può ben intuire come lo studio delle proprietà che modificano l'ampiezza della scia e che agiscono direttamente sullo strato limite del flusso attorno alla pallina sia di fondamentale importanza per definire al meglio il modo in cui la pallina si comporta. Oltre a ciò, è stata fatta un'analisi locale del feltro per avere un'idea più chiara di come la sovrapposizione di più effetti vada a influenzare complessivamente le proprietà [3]. In particolare si va a considerare quali sono gli effetti che determinano la posizione del punto di separazione del flusso: da un lato l'aumento di rugosità tenderebbe a spostare il punto di separazione verso valle, nella regione di pressione avversa, andando perciò a ridurre la dimensione della scia, tuttavia, è da considerare anche il fatto che, con l'aumentare della rugosità si assiste anche ad un aumento dello strato limite stesso che fa sì che il flusso sia più resistente alla separazione. Solo andando a considerare entrambi i fenomeni è possibile ragionare sull'ampiezza della scia a valle e su come questa influenzi il comportamento della pallina.

Ciò che si può affermare è che le palline usurate hanno coefficienti di resistenza e di portanza di valori inferiori alle palline nuove; il fatto che il feltro si consumi ha delle dirette conseguenze sull'ampiezza della scia a valle, che si restringe, conferendo perciò alla pallina una minore resistenza, nel caso di pallina priva di spin, e una minore portanza, nel caso in cui la pallina sia dotata anche di rotazione. Il comportamento potrebbe non sembrare sempre coerente, in quanto si misurano valori del coefficiente di resistenza più alti per alcuni valori del Reynolds, relativamente bassi, ma il fenomeno è stato spiegato grazie ad uno studio locale del feltro, in cui si è scoperto che questo tenda particolarmente verso l'esterno a causa della rotazione e il flusso, che, come già menzionato, non ha una velocità elevata, non lo costringe ad appiattirsi sulla pallina. La sovrapposizione di questi effetti ha permesso di definire meglio il comportamento della pallina al variare del Re e dell'usura.

### 7.2 Implicazioni dei risultati ottenuti nel gioco del Tennis.

I risultati a cui si è giunti nei diversi studi citati hanno avuto delle implicazioni dirette nel gioco del Tennis. Uno dei risultati più importanti è relativo all'utilizzo delle palline sovradimensionate. Si è infatti dimostrato che queste sono caratterizzate da coefficienti di portanza e di resistenza analoghi, o comunque confrontabili, con quelli che caratterizzano le palline da tennis di dimensioni standard. Ciò che distingue le due tipologie è la resistenza, che nel caso delle palline sovradimensionate risulta

adeguatamente più elevata, tanto da far rallentare il gioco quanto basta da renderlo apprezzabile e competitivo, dando appunto ai giocatori il tempo necessario per reagire ad un servizio particolarmente veloce. Da queste conclusioni la ITF ha deciso di integrare le palline sovradimensionate all'interno del gioco negli anni 90'. Inoltre, conoscendo le proprietà delle palline più usurate, che accentuerebbero significativamente la velocità del servizio, essendo dotate di una resistenza inferiore, si è potuto agire impostando delle regole di gioco che prevedono di sostituire le palline dopo un numero ben definito di partite, allo scopo di evitare questo fenomeno. Un ulteriore motivo per cui si cerca di evitare di utilizzare palline usurate durante le partite è legato al fatto che queste sono dotate di un coefficiente di portanza inferiore; ciò rende il gioco più complicato per i tennisti, che dovrebbero conferire alla pallina uno spin maggiore per ottenere la stessa traiettoria che otterrebbero con una pallina nuova. Inoltre, l'utilizzo di palline più usurate di altre durante la stessa partita potrebbe confondere i giocatori. Oltre a ciò, sono stati individuati dei casi in cui, ad una determinata condizione di usura della pallina (dopo un numero di partite pari a 6) la resistenza ha in realtà un valore maggiore rispetto alle palline nuove, per una particolare condizione legata al feltro esterno.

Tutti i comportamenti studiati hanno modificato il gioco del Tennis fino ad arrivare al gioco per come lo conosciamo oggi. Come già menzionato, oggi la gamma delle palline utilizzate è estremamente vasta, sia per quanto riguarda le marche delle stesse, che, però, influisce ben poco sulle proprietà aerodinamiche, che sulle tipologie di palline utilizzate su superfici diverse. Sono state infatti introdotti tre tipi di palline, da utilizzare nel gioco sulle rispettive superfici, più una quarta tipologia, relativa a partite giocate a quote significativamente elevate, tanto da necessitare di una tipologia di pallina differente dalle altre tre. Lo scopo di utilizzare palline di diverse caratteristiche e proprietà in funzione della superficie di gioco è da ricercare nella volontà della ITF di standardizzare la velocità del gioco.

## Indice delle figure

<i>Figura 1: Effetto del numero di Reynolds sul coefficiente di resistenza di una sfera investita da corrente uniforme. [3]</i>	6
<i>Figura 2: confronto tra palline nuove e palline usurate. [16]</i>	9
<i>Figura 3: confronto tra una pallina di dimensioni standard (a sinistra) e una di dimensioni standard (a destra). [3]</i>	9
<i>Figura 4: apparato sperimentale all'interno della galleria del vento [1]</i>	10
<i>Figura 5: Coefficiente di resistenza al variare del numero di Reynolds [1]</i>	12
<i>Figura 6: coefficiente di resistenza al variare del Reynolds per palline con diversa usura. [1]</i>	12
<i>Figura 7: coefficiente di resistenza al variare del coefficiente di spin, ad un valore fissato della velocità del flusso <math>V=50</math> m/s. [1]</i>	13
<i>Figura 8: coefficiente di resistenza al variare del coefficiente di spin, ad un valore fissato della velocità del flusso <math>V=25</math> m/s. [1]</i>	13
<i>Figura 9: coefficiente di resistenza al variare del coefficiente di spin, ad un valore fissato della velocità del flusso <math>V=25</math> m/s, per palline con diversa usura. [1]</i>	14
<i>Figura 10: coefficiente di resistenza al variare del coefficiente di spin, ad un valore fissato della velocità del flusso <math>V=50</math> m/s, per palline con diversa usura. [1]</i>	14
<i>Figura 11: coefficiente di portanza al variare del coefficiente di spin, ad un valore fissato della velocità del flusso <math>V=50</math> m/s. [1]</i>	15
<i>Figura 12: coefficiente di portanza al variare del coefficiente di spin, ad un valore fissato della velocità del flusso <math>V=25</math> m/s. [1]</i>	15
<i>Figura 13: coefficiente di portanza al variare del coefficiente di spin, ad un valore fissato della velocità del flusso <math>V=50</math> m/s, per palline con diversa usura. [1]</i>	15
<i>Figura 14: coefficiente di portanza al variare del coefficiente di spin, ad un valore fissato della velocità del flusso <math>V=50</math> m/s, per palline con diversa usura. [1]</i>	15
<i>Figura 15: traiettorie delle varie palline testate, con valori differenti di diametro e coefficiente di resistenza. [1]</i>	17
<i>Figura 16: traiettorie delle due palline proiettate alla stessa velocità e angolo iniziale, con valori differenti di coefficiente di portanza, ma a parità di dimensioni e massa. [1]</i>	17
<i>Figura 17: traiettorie delle due palline proiettate con diversi angoli per farle impattare nello stesso punto, con valori differenti di coefficiente di portanza, ma a parità di dimensioni e massa. [1]</i>	18
<i>Figura 18: galleria del vento dell'università RMIT usata nell'esperimento. [3]</i>	19
<i>Figura 20: visualizzazione del flusso attorno ad una pallina da tennis di 28 mm di diametro, <math>Re=167 \cdot 10^3</math>, con topspin pari a 4 rot/sec. [3]</i>	20
<i>Figura 19: visualizzazione del flusso attorno ad una pallina da tennis di 28 mm di diametro, <math>Re = 167 \cdot 10^3</math>, priva di spin. [3]</i>	20
<i>Figura 21: coefficiente di resistenza al variare del <math>Re</math> per varie palline, sottoposte a un numero differente di partite. [3]</i>	21
<i>Figura 22: pallina da tennis sottoposta ad un flusso d'aria di velocità <math>V=20</math> m/s a sinistra e di velocità <math>V=60</math> m/s a destra. [3]</i>	21
<i>Figura 23: strumento di misurazione 2D PIV. [16]</i>	23
<i>Figura 24: coefficiente di portanza della pallina XT8 al variare del coefficiente di spin. [16]</i>	24
<i>Figura 25: coefficiente di portanza della pallina FORT al variare del coefficiente di spin. [16]</i>	24
<i>Figura 26: coefficiente di resistenza della pallina FORT al variare del coefficiente di spin. [16]</i>	24
<i>Figura 27: coefficiente di resistenza della pallina XT8 al variare del coefficiente di spin. [16]</i>	24
<i>Figura 28: immagini del flusso attorno alla pallina ottenute con il metodo di misurazione PIV 2D, con particolare focus sulla posizione del feltro. [16]</i>	25

## Bibliografia.

1. Goodwill S.R., Chin S.B., Haake S.J. "Aerodynamics of spinning and non-spinning tennis ball", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 92: 935–958, 2004.
2. Chiocchia G., Germano M. *Termofluidodinamica*. Torino, Levrotto & Bella, 2012.
3. Metha R., Alam F., Subic A. "Review of tennis ball aerodynamics". *Sports Technology*, 2008.
4. Arina R. *Fondamenti di aerodinamica*. Torino : Levrotto & Bella, 2015.
5. Lane B., Sherrat P., Harland A. "Characterisation of ball degradation events in professional tennis", *Sports Eng* 20: 185–197, 2017.
6. <https://www.federtennis.it/Giocare-a-tennis/Conosci-il-tennis/Le-palline>.
7. Fuss F., Subic A., Strangwood M. *Routledge handbook of sports technology and engineering*. Taylor & Francis Group, 2008.
8. Achenbach E., Fluid Mech J. "Experiments on the flow past spheres at very high Reynolds number", *Journal of Fluid Mechanics*, 1972.
9. Chadwick S.G. "The aerodynamics of tennis balls", Ph.D. Thesis, University of Sheffield, 2003.
10. Mehta R., Pallis J. "Tennis science collaboration between NASA and Cislunar aerospace", In: A. Coe, S.J. Haake (Eds.), *First International Congress on Tennis Science and Technology*, Roehampton, London, pp. 135–144, 2000.
11. Achenbach E. "Experiments on the flow past spheres at very high Reynolds". *Journal of Fluid Mechanics*, 1972.
12. Mehta R.D., Pallis J.M. "The aerodynamics of a tennis ball". *Sports Engineering*, 2001.
13. Alam F., Subic A., Watkins S. "An Experimental Study on the Aerodynamic Drag of a Series of Tennis Ball". *Proceedings of the Sports Dynamics Discovery and Application: The International Congress on Sports Dynamics*; 1–3 September, 2003.
14. Alam F., Subic A., Watkins S. "Effects of Spin on Aerodynamic Properties of Tennis Ball". *Proceedings of the ISEA 5th International Conference on Sports Engineering*, 2004.
15. Achenbach E., "The effects of surface roughness and tunnel blockage on the flow past spheres". *Journal of Fluid Mechanics*, 1974.
16. Nakajima T., Hiratsuka M., Ito S. and Konno A. "Aerodynamic characteristics and PIV analyses concerning tennis balls", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 249, 2017.

