



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale
A.a. 2024/2025
Sessione di Laurea Ottobre 2025

Analisi dinamica delle strutture in un canale piano turbolento con riblets

Relatori:

Prof. Gioacchino CAFIERO
Ing. Enrico AMICO

Candidato:

Camillo LASAGNA

Sommario

Considerate la crescita incessante del settore dell'aviazione civile e l'incombere dei termini dettati dal *Green Deal* che punta ad annullare le emissioni di CO_2 entro il 2050 all'interno di tale settore, è sempre maggiore l'interesse della comunità scientifica nei confronti delle tecniche di *drag reduction* e in particolare dei *passive flow control methods*. Tra i *passive flow control methods* più studiati vi sono le *riblets*, microscanalature superficiali allineate con la direzione del flusso. I benefici delle *riblets* in termini di riduzione della resistenza di attrito a parete sono stati molto spesso dimostrati con tecniche sperimentali, tuttavia, alcuni aspetti del comportamento di queste restano tuttora ignoti.

All'interno di questo contesto, il presente elaborato si pone come obiettivo quello di cercare un riscontro numerico dei risultati sperimentali presenti in letteratura con il fine di spiegare come le *riblets* modifichino il flusso nei pressi della parete e comportino quindi una riduzione della resistenza d'attrito. Sfruttando i risultati di una simulazione DNS di un canale piano turbolento realizzata dal Dr A. Busse e dal Dr F. Alves Portela si è quindi effettuata l'analisi statistica della morfologia delle strutture coerenti che popolano il campo di moto e successivamente l'analisi della loro evoluzione spazio-temporale. L'analisi viene condotta per tre differenti casi, ciascuno dei quali presenta una diversa configurazione geometrica delle pareti del canale: caso di parete liscia, caso di parete equipaggiata con *riblets* longitudinali e caso di parete equipaggiata con *riblets* sinusoidali. L'identificazione delle strutture coerenti viene effettuata attraverso due diverse metodologie: la prima è basata sulla coerenza del prodotto delle fluttuazioni di velocità in direzione *streamwise* e *wall-normal*, la seconda è basata invece sulla definizione del *Q-factor*.

I risultati hanno mostrato evidenti differenze nella morfologia delle strutture coerenti tra il caso di parete liscia e i casi manipolati, mentre si sono riscontrate differenze di minore entità tra il caso manipolato con *riblets* longitudinali e quello manipolato con *riblets* sinusoidali.

Abstract

In view of the relentless growth of the civil aviation sector and the imminent deadlines stipulated by the Green Deal, which aims to eliminate CO_2 emissions by 2050 within that sector, there is an increasing interest in the scientific community in drag reduction techniques, and in particular, passive flow control methods. It is evident that riblets, surface microgrooves which are aligned with the direction of flow, are among the most studied passive flow control methods. The benefits of riblets in terms of reducing wall drag have frequently been demonstrated through experimental techniques. Nevertheless, some aspects of their behaviour remain to be elucidated.

In this work, the objective is to utilise numerical analysis to verify experimental results reported in the literature. The aim is to elucidate the impact of riblets on flow dynamics near the wall, and thereby, their role in reducing frictional resistance. The results of a DNS simulation of a turbulent plane channel flow, conducted by Dr A. Busse and Dr F. Alves Portela, were utilised to conduct a statistical analysis of the morphology of the coherent structures populating the momentum field. This analysis was then followed by an examination of their spatiotemporal evolution. The analysis is conducted for three different cases, each of which presents a different geometric configuration of the channel walls: the case of a smooth wall, the case of a wall equipped with longitudinal riblets and the case of a wall equipped with sinusoidal riblets. The identification of coherent structures is achieved through the implementation of two distinct methodologies. The primary methodology is founded on the coherence of the product of the velocity fluctuations in the streamwise and wall-normal directions. The secondary methodology is predicated on the definition of the Q-factor.

The results demonstrated clear disparities in the morphology of coherent structures between the smooth wall case and the manipulated cases, while minore discrepancies were identified between the manipulated case with longitudinal riblets and the manipulated case with sinusoidal riblets.

Ringraziamenti

Innanzitutto desidero ringraziare il Professor Cafiero per avermi dato l'opportunità di vivere, senza ombra di dubbio, l'esperienza più formante del mio percorso universitario, l'Ingegnere Amico per avermi seguito e guidato con immensa pazienza durante questo percorso e tutte le persone del laboratorio M. Panetti del Politecnico di Torino per avermi sempre fatto sentire a casa.

Ringrazio la mia famiglia: la mia mamma e il mio papà per avermi tenuto in piedi quando le mie forze sembravano mancare, i miei fratellini per aver colorato anche i giorni più grigi, i miei nonni, i miei zii e il mio cuginetto Jonathan. Questo traguardo è soprattutto vostro.

Ringrazio Annalisa, sei il mio sorriso più grande.

Ringrazio i miei fantastici coinquilini per avermi sopportato e accompagnato nella quotidianità, gli amici di una vita che saranno per me sempre un punto di riferimento.

Infine, grazie agli amici che l'università mi ha donato per aver camminato fianco a fianco in questo percorso a volte "turbolento".

Grazie.

Camillo

Indice

Sommario	I
Abstract	II
1 Introduzione	1
1.1 Resistenza d'attrito	3
1.2 Caso turbolento	6
1.2.1 Modellazione e simulazione della turbolenza	6
1.3 Le tecniche di <i>drag reduction</i> e le <i>riblets</i>	10
1.3.1 Le <i>riblets</i>	11
1.3.2 <i>Riblets</i> sinusoidali	13
1.4 Analisi dei quadranti e studio delle strutture	15
1.4.1 <i>Quadrant analysis</i>	16
1.4.2 <i>Q-criterion</i>	18
1.4.3 Evoluzione delle strutture coerenti	18
2 Dataset DNS e casi esaminati	21
2.1 <i>Dataset</i> DNS	21
2.2 Casi analizzati	22
3 Identificazione delle strutture coerenti	24
3.1 Campo medio di velocità e calcolo del volume	24
3.1.1 Calcolo del campo medio di velocità	25
3.1.2 Calcolo del volume	25
3.2 Identificazione delle strutture, <i>Metodo 1</i>	26
3.2.1 Individuazione delle strutture	26
3.2.2 Proprietà delle strutture e salvataggio dei dati	26
3.2.3 Scelta del <i>Reynolds shear stress magnitude parameter</i>	27
3.3 Identificazione delle strutture, <i>Metodo 2</i>	29
3.3.1 Individuazione delle strutture	29
3.3.2 Proprietà delle strutture e salvataggio dei dati	31

4	<i>Tracking</i> delle strutture coerenti	32
4.1	Ricerca delle connessioni tra strutture di <i>snapshots</i> consecutivi	32
4.1.1	Ricerca delle connessioni	33
4.1.2	Selezione delle connessioni e salvataggio dati	34
4.2	Individuazione dei rami primari	35
4.2.1	Utilizzo della <i>function digraph</i> e creazione del grafo	35
4.2.2	Dal grafo ai rami primari	37
4.2.3	<i>Postprocessing</i> della matrice <i>PATH_3D</i>	38
4.3	Creazione e salvataggio dei percorsi	41
5	Analisi statistica della morfologia delle strutture coerenti	43
5.1	Validazione del <i>dataset</i> DNS	44
5.1.1	Confronto della distribuzione delle strutture coerenti	44
5.1.2	Confronto della morfologia delle strutture coerenti	46
5.2	Analisi delle strutture identificate con il <i>Metodo 1</i>	48
5.2.1	Analisi statistica della distribuzione delle strutture coerenti . .	49
5.2.2	Analisi statistica della morfologia delle strutture coerenti . . .	52
5.2.3	Analisi statistica della morfologia delle strutture coerenti per tipologia	61
5.3	Analisi delle strutture identificate con il <i>Metodo 2</i>	65
5.3.1	Analisi statistica della distribuzione delle strutture coerenti . .	66
5.3.2	Analisi statistica della morfologia delle strutture coerenti . . .	67
6	Analisi statistica del <i>tracking</i> delle strutture coerenti	78
6.1	Analisi dei <i>paths</i> delle strutture identificate con il <i>Metodo 1</i>	79
6.1.1	Analisi statistica della distribuzione dei <i>paths</i>	79
6.1.2	Analisi statistica del <i>tracking</i> delle strutture	81
6.2	Analisi dei <i>paths</i> delle strutture identificate con il <i>Metodo 2</i>	90
6.2.1	Analisi statistica della distribuzione dei <i>paths</i>	91
6.2.2	Analisi statistica del <i>tracking</i> delle strutture	93
7	Conclusioni	103

Elenco delle figure

1.1	Strato limite su lamina piana.	3
1.2	Strato limite laminare e turbolento.	5
1.3	Esempio di decomposizione di Reynolds.	7
1.4	Struttura dello strato limite turbolento [3].	9
1.5	Geometria delle <i>riblets</i> [5].	11
1.6	Esempio di curva di <i>drag reduction</i> in funzione di S^+ [4].	12
1.7	Curva di <i>drag reduction</i> per <i>riblets</i> sinusoidali e longitudinali [12].	14
1.8	Profilo di varianza della componente di velocità <i>streamwise</i> per due differenti valori del numero di Reynolds [12].	15
1.9	Produzione di energia cinetica turbolenta nel piano <i>wall-normal</i> [11].	15
1.10	Schema di un <i>hairpin vortex</i> [3].	16
1.11	<i>Hole</i> di Willmarth e Lu [20].	17
1.12	Evoluzione e classificazione dei rami [22].	19
2.1	Schema del canale piano esaminato.	22
3.1	<i>snapshot</i> 19 caso <i>wavy</i> , $H = 1$	28
3.2	<i>snapshot</i> 19 caso <i>wavy</i> , $H = 1.75$	28
3.3	<i>snapshot</i> 19 caso <i>wavy</i> , $H = 3.5$	29
3.4	<i>snapshot</i> 19 caso <i>wavy</i> , <i>threshold</i> = 2500.	31
4.1	Connessione tra le strutture struct_14_1 e struct_29_2	33
4.2	Esempio di grafo.	36
4.3	Esempio di ramo soggetto a <i>pruning</i>	38
4.4	Esempio di inversione del grafo.	40
5.1	J.p.d.f. della minima e massima distanza dalla parete normalizzate con la semi altezza del canale, strutture Q^-	45
5.2	J.p.d.f. del logaritmo della dimensione <i>streamwise</i> e del logaritmo della dimensione <i>wall-normal</i>	46
5.3	J.p.d.f. del logaritmo della dimensione <i>spanwise</i> e del logaritmo della dimensione <i>wall-normal</i>	47

5.4	J.p.d.f. del logaritmo della dimensione <i>streamwise</i> e del logaritmo della dimensione <i>spanwise</i> normalizzate con la dimensione <i>wall-normal</i> .	47
5.5	J.p.d.f. del logaritmo della dimensione <i>wall-normal</i> e del logaritmo del volume.	48
5.6	Distribuzione della tipologia in numero (a) e volume (b), <i>all structures</i> , Metodo 1.	50
5.7	Distribuzione della tipologia in numero (a) e volume (b), <i>atteched structures</i> , Metodo 1.	51
5.8	Distribuzione della tipologia in numero (a) e volume (b), <i>wall detached structures</i> , Metodo 1.	51
5.9	p.d.f. della dimensione <i>streamwise</i>	52
5.10	p.d.f. della dimensione <i>spanwise</i>	53
5.11	p.d.f. della dimensione <i>wall-normal</i>	54
5.12	p.d.f. del volume.	55
5.13	p.d.f. della distanza del baricentro dalla parete.	56
5.14	J.p.d.f. della dimensione <i>streamwise</i> e della dimensione <i>spanwise</i> . . .	58
5.15	J.p.d.f. della dimensione <i>streamwise</i> e della dimensione <i>wall-normal</i> . .	59
5.16	J.p.d.f. della dimensione <i>spanwise</i> e della dimensione <i>wall-normal</i> . . .	60
5.17	p.d.f. della dimensione <i>streamwise</i> , studio della tipologia. (a) <i>ejection</i> . (b) <i>outward</i> . (c) <i>inward</i> . (d) <i>sweep</i>	61
5.18	p.d.f. della dimensione <i>spanwise</i> . (a) <i>ejection</i> . (b) <i>outward</i> . (c) <i>inward</i> . (d) <i>sweep</i>	62
5.19	p.d.f. della dimensione <i>wall-normal</i> . (a) <i>ejection</i> . (b) <i>outward</i> . (c) <i>inward</i> . (d) <i>sweep</i>	62
5.20	p.d.f. del volume. (a) <i>ejection</i> . (b) <i>outward</i> . (c) <i>inward</i> . (d) <i>sweep</i> . . .	63
5.21	p.d.f. della distanza del baricentro dalla parete. (a) <i>ejection</i> . (b) <i>outward</i> . (c) <i>inward</i> . (d) <i>sweep</i>	63
5.22	J.p.d.f. della dimensione <i>streamwise</i> e della dimensione <i>spanwise</i> . (b) <i>outward</i> . (c) <i>inward</i> . (d) <i>sweep</i>	64
5.23	J.p.d.f. della dimensione <i>streamwise</i> e della dimensione <i>wall-normal</i> . (b) <i>outward</i> . (c) <i>inward</i> . (d) <i>sweep</i>	64
5.24	J.p.d.f. della dimensione <i>spanwise</i> e della dimensione <i>wall-normal</i> . (b) <i>outward</i> . (c) <i>inward</i> . (d) <i>sweep</i>	65
5.25	p.d.f. della dimensione <i>streamwise</i>	67
5.26	p.d.f. della dimensione <i>spanwise</i>	68
5.27	p.d.f. della dimensione <i>wall-normal</i>	69
5.28	p.d.f. del volume.	70
5.29	p.d.f. della distanza del baricentro dalla parete.	71

5.30	Visualizzazione delle strutture di una <i>slice spanwise</i> , <i>wall-normal</i> nel punto di massima pendenza della sinusoide, caso <i>wavy</i> , $H = 1.75$ e $threshold = 2500$	72
5.31	Visualizzazione delle strutture di una <i>slice spanwise</i> , <i>wall-normal</i> nel punto di massima pendenza della sinusoide, caso <i>wavy</i> , $H = 1$ e $threshold = 500$	73
5.32	Visualizzazione delle strutture di una <i>slice spanwise</i> , <i>wall-normal</i> nel punto di massima pendenza della sinusoide, caso <i>smooth</i> , $H = 1.75$ e $threshold = 2500$	74
5.33	Visualizzazione delle strutture di una <i>slice spanwise</i> , <i>wall-normal</i> nel punto di massima pendenza della sinusoide, caso <i>smooth</i> , $H = 1$ e $threshold = 500$	74
5.34	J.p.d.f. della dimensione <i>streamwise</i> e della dimensione <i>spanwise</i> . . .	75
5.35	J.p.d.f. della dimensione <i>streamwise</i> e della dimensione <i>wall-normal</i> . .	76
5.36	J.p.d.f. della dimensione <i>spanwise</i> e della dimensione <i>wall-normal</i> . . .	77
6.1	Distribuzione della tipologia in numero <i>all branches</i> (a), <i>wall attached branches</i> (b), <i>wall detached branches</i> (c), <i>Metodo 1</i>	80
6.2	P.d.f. della dimensione <i>streamwise</i> , in valore assoluto, della traiettoria. .	81
6.3	P.d.f. della dimensione <i>spanwise</i> , in valore assoluto, della traiettoria. .	82
6.4	J.p.d.f. della dimensione <i>streamwise</i> e <i>wall-normal</i> , in valore assoluto, della traiettoria.	83
6.5	J.p.d.f. della dimensione <i>spanwise</i> e <i>wall-normal</i> , in valore assoluto, della traiettoria.	84
6.6	P.d.f. della somma delle deformazioni parziali in direzione <i>spanwise</i> lungo la traiettoria.	85
6.7	P.d.f. della deformazione media in direzione <i>streamwise</i> lungo la traiettoria normalizzata con la dimensione della struttura di partenza del ramo.	86
6.8	P.d.f. della deformazione media in direzione <i>spanwise</i> lungo la traiettoria normalizzata con la dimensione della struttura di partenza del ramo.	87
6.9	J.p.d.f. della deformazione media in direzione <i>streamwise</i> e <i>spanwise</i> lungo la traiettoria normalizzate con la dimensione della struttura di partenza del ramo.	88
6.10	J.p.d.f. della deformazione media in direzione <i>spanwise</i> e <i>wall-normal</i> lungo la traiettoria normalizzate con la dimensione della struttura di partenza del ramo.	89
6.11	Distribuzione della tipologia in numero <i>all branches</i> (a), <i>wall attached branches</i> (b), <i>wall detached branches</i> (c), <i>Metodo 2</i>	92
6.12	P.d.f. della dimensione <i>streamwise</i> , in valore assoluto, della traiettoria. .	93

6.13	P.d.f. della dimensione <i>spanwise</i> , in valore assoluto, della traiettoria. .	94
6.14	J.p.d.f. della dimensione <i>streamwise</i> e <i>wall-normal</i> , in valore assoluto, della traiettoria.	95
6.15	J.p.d.f. della dimensione <i>spanwise</i> e <i>wall-normal</i> , in valore assoluto, della traiettoria.	96
6.16	P.d.f. della somma delle deformazioni parziali in direzione <i>spanwise</i> lungo la traiettoria.	97
6.17	P.d.f. della deformazione media in direzione <i>streamwise</i> lungo la traiettoria normalizzata con la dimensione della struttura di partenza del ramo.	98
6.18	P.d.f. della deformazione media in direzione <i>spanwise</i> lungo la traiettoria normalizzata con la dimensione della struttura di partenza del ramo.	99
6.19	J.p.d.f. della deformazione media in direzione <i>streamwise</i> e <i>spanwise</i> lungo la traiettoria normalizzate con la dimensione della struttura di partenza del ramo.	100
6.20	J.p.d.f. della deformazione media in direzione <i>spanwise</i> e <i>wall-normal</i> lungo la traiettoria normalizzate con la dimensione della struttura di partenza del ramo.	101

Elenco delle tabelle

2.1	Parametri delle simulazioni DNS.	22
2.2	Parametri geometrici delle pareti con <i>riblets</i>	23
3.1	Grandezze di attrito.	25
4.1	Numeri identificativi delle tipologie di strutture.	33
4.2	<code>tree_stru_graf_2_3.mat</code>	35
5.1	Confronto della distribuzione della tipologia in numero e volume.	45
5.2	Numero di strutture e volume occupato, <i>Metodo 1</i>	49
5.3	Numero di strutture per unità di volume (N/l_τ^3) nei pressi della parete.	49
5.4	Numero di strutture per unità di volume (N/l_τ^3) lontano della parete.	50
5.5	Numero di strutture e volume occupato, <i>Metodo 2</i>	66
5.6	Numero di strutture per unità di volume (N/l_τ^3) nei pressi della parete.	66
5.7	Numero di strutture per unità di volume (N/l_τ^3) lontano dalla parete.	66
6.1	Distribuzione in numero dei rami primari, <i>Metodo 1</i>	80
6.2	Distribuzione in numero dei rami primari, <i>Metodo 2</i>	91

Capitolo 1

Introduzione

L'aviazione civile è un settore in continua espansione. Secondo le stime IATA [1], nel 2024 il numero di passeggeri è aumentato del 10.4% e nei prossimi vent'anni subirà un incremento annuo medio del 3.8%. L'aviazione rappresenta, tra i trasporti, il settore che più di tutti svolge un ruolo cruciale nella scena socio-economica globale; infatti, sempre secondo IATA, l'aviazione commerciale genera 65.5 milioni di posti di lavoro diretti in tutto il mondo, oltre a garantire un'efficiente rete di connessioni tra Paesi, idee e persone. Proprio per l'importanza che riveste, l'aviazione commerciale è enormemente influenzata dagli aspetti geopolitici e macroeconomici.

Tra questi aspetti, quello che è destinato a cambiare più di tutti il mondo dell'aviazione è sicuramente quello ambientale. Il *Green Deal* prevede che l'aviazione civile arrivi ad annullare completamente le emissioni di CO_2 entro il 2050. Una sfida sicuramente ambiziosa che necessiterà di un enorme supporto da parte dell'industria tecnologia ed energetica. Ma quanto impatta sull'ambiente l'aviazione commerciale? Il Jet A/A-1 è il combustibile più comune utilizzato dai moderni velivoli, un liquido inodore composto da una miscela di idrocarburi a base di cherosene. Sebbene il Jet A venga miscelato con una sempre più importante frazione di SAF¹, combustibili non derivanti da idrocarburi, con ridotto impatto ambientale, la sua combustione genera: anidride carbonica (CO_2), monossido di carbonio (CO), vapore acqueo (H_2O), ossidi di azoto (NO_x), particolati e tutta una serie di composti organici. Numeri alla mano, l'aviazione commerciale è responsabile del 2.5% delle emissioni di anidride carbonica derivanti da tutte le attività antropiche, ma questo dato potrebbe facilmente raddoppiare di qui al 2050, in assenza di contromisure. Inoltre, si stima che il settore contribuisca per il 5% al surriscaldamento globale [2]. Non è assolutamente in dubbio l'impatto che l'aviazione ha sulla questione climatica, ma è altrettanto vero il contrario. Le restrizioni normative imposte per combattere il cambiamento climatico rischiano infatti di far lievitare i costi e di renderne così

¹Sustainable Aviation Fuels

difficile la gestione da mettere in crisi tutto il settore.

Fortunatamente, negli anni si sono susseguite proposte e progetti per rendere l'aviazione ecologicamente ed economicamente sostenibile: da un più ampio utilizzo dei SAF, a propulsori con una migliore efficienza di conversione dell'energia, fino a configurazioni di velivoli elettrici o ibrido-elettrici e al miraggio, almeno per il momento, della propulsione a idrogeno. I più importanti costruttori stanno portando avanti, ormai da qualche anno, progetti di velivoli di nuova generazione con architetture in grado di migliorarne l'efficienza aerodinamica. Gli esempi più lampanti sono: Airbus ZEROe e Boeing SUGAR Volt.

Un altro aspetto, strettamente legato all'efficienza, è rappresentato dalla riduzione della resistenza aerodinamica. L'adozione di tecniche cosiddette di *drag reduction* non rappresenterà sicuramente da sola la soluzione al problema, ma potrebbe portare, affiancata ad esempio alle soluzioni sopra citate, notevoli vantaggi. Basti pensare che, secondo alcune stime, la riduzione dell'1% della resistenza aerodinamica garantirebbe un risparmio di 1.6 tonnellate del peso operativo (all'incirca 10 passeggeri) per un comune velivolo commerciale. Rifacendosi a concetti basilari della meccanica del volo, è intuibile come una riduzione della resistenza aerodinamica comporti una minore spinta necessaria per muovere il velivolo e di conseguenza una riduzione del consumo di carburante, delle emissioni e dei costi. Analizziamo ora il concetto di resistenza aerodinamica.

La resistenza fluidodinamica è la forza che si oppone al moto di un corpo in un fluido e nel caso questo sia un aeriforme prende il nome di resistenza aerodinamica. La resistenza di un corpo può essere decomposta in vari contributi indipendentemente delle forze elementari che la generano. È necessario precisare che tale decomposizione è del tutto ideale, poiché la resistenza si manifesta come un'unica forza agente sul velivolo.

- Resistenza di attrito: è dovuta alle azioni tangenziali scambiate tra fluido e superficie del corpo. La resistenza di attrito si manifesta in modo significativo sui corpi sottili o affusolati per i quali risulta elevata la superficie lambita dal fluido, mentre per i corpi tozzi fornisce un modesto contributo alla resistenza totale;
- Resistenza di forma: anche detta resistenza di pressione, legata all'azione delle pressioni normali esercitate dal fluido sulla superficie del corpo, è prodotta dal parziale recupero di pressione a valle dovuto agli effetti della separazione del flusso. La resistenza di pressione è rilevante per corpi tozzi per i quali costituisce il grosso della resistenza complessiva, mentre nei corpi sottili o affusolati essa fornisce un contributo di modesta entità;

- Resistenza indotta: è il risultato della generazione della portanza. La resistenza indotta è causata dalla distribuzione di velocità indotte dai vortici di scia che si distaccano ad esempio dalle estremità alari del velivolo;
- Resistenza d'onda: si manifesta ai regimi delle alte velocità di volo quando, in almeno un punto della superficie del corpo, la velocità del fluido è maggiore di quella del suono locale.

Per un velivolo da trasporto commerciale la resistenza d'attrito rappresenta circa il 50% della resistenza aerodinamica totale e proprio sulla resistenza d'attrito si focalizzerà l'interesse del presente elaborato.

1.1 Resistenza d'attrito

Come si è detto la resistenza d'attrito è la conseguenza diretta degli effetti della viscosità dell'aria ed è legata alle azioni tangenziali scambiate fra fluido e superficie. Per comprendere meglio la natura della resistenza d'attrito, è necessario introdurre il concetto di strato limite. Secondo la teoria dello strato limite è possibile suddividere il fluido in movimento attorno al corpo in due regioni: una sottile vicino al corpo dove gli effetti della viscosità non sono trascurabili (lo strato limite, appunto) e una più lontana dal corpo in cui invece sono trascurabili gli effetti della viscosità. Quando un fluido scorre sulla superficie di un corpo, per effetto della viscosità, la parte di fluido in contatto con la superficie ha velocità nulla (condizione di *no slip*). Poiché per la continuità del flusso non sono possibili salti improvvisi di velocità, deve esistere una piccola regione all'interno del fluido, vicino al corpo, in cui la velocità del flusso aumenta da zero alla velocità principale del flusso. Questa regione è il cosiddetto strato limite.

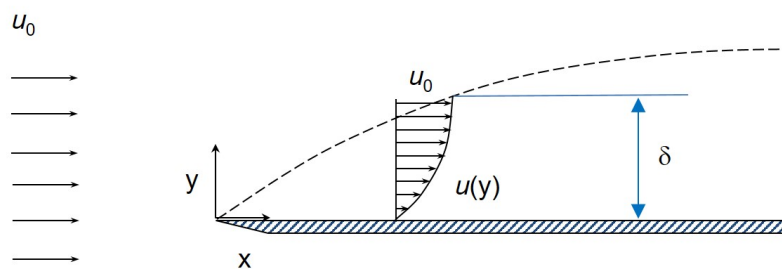


Figura 1.1: Strato limite su lamina piana.

Come si può vedere nella figura sovrastante, lo strato limite ha un tipico profilo a

"U". Non esistendo una marcata linea di separazione tra strato limite e flusso libero, si assume che lo strato limite si estenda fino al punto dove la velocità del fluido raggiunge il 99% della velocità del flusso libero (U_0). Lo spessore dello strato limite viene indicato con la lettera δ e ad ogni istante e in ogni punto è sempre molto più piccolo della dimensione caratteristica del flusso (ad esempio: lunghezza della lamina se flusso su una lamina, diametro del condotto se flusso in un condotto).

Lo strato limite può presentarsi laminare o turbolento, per spiegare ciò si fa riferimento al flusso su una lamina piana come riportato in figura 1.1. In prossimità del bordo d'attacco della lamina il flusso è interamente laminare, ovvero, si può immaginare che il fluido viaggi in strati che non si mescolano. In sostanza, non vi è alcuno scambio di particelle tra strati adiacenti. La velocità del flusso all'interno di ciascuna lamina è costante e aumenta, come si evince dal profilo, con la distanza dalla superficie. Tra gli strati di fluido che si muovono a diverse velocità nascono degli sforzi di attrito (sforzi di taglio), questi sono interamente funzione della viscosità (μ) e del gradiente di velocità ($\frac{du}{dy}$). Gli sforzi di taglio sono generalmente indicati con la lettera τ :

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

Più a valle, il flusso laminare diventa instabile e le particelle di fluido iniziano a muoversi, oltre che parallelamente, anche perpendicolarmente alla superficie. Pertanto, gli strati di flusso precedentemente divisi e ordinati iniziano a mescolarsi e le particelle di fluido vengono scambiate tra gli strati adiacenti. Un flusso caratterizzato da questi movimenti di particelle, apparentemente casuali, è detto turbolento. La natura del flusso laminare o turbolento e la transizione dal regime laminare a quello turbolento sono regolate da un unico parametro noto come numero di Reynolds (Re). Il numero di Reynolds è un parametro adimensionale proporzionale al rapporto tra la forza di inerzia e quelle viscosi:

$$Re = \frac{\rho U d}{\mu}$$

Dove ρ è la densità del fluido, U la velocità locale e d la dimensione caratteristica. Quando il numero di Reynolds è al di sotto di una determinata soglia il flusso è in regime laminare, quando è al di sopra è in regime turbolento. Questa soglia è detta numero di Reynolds critico e dipende dal tipo di flusso (lamina piana, canale a sezione circolare, ecc.). In realtà il Reynolds critico non è mai un valore ben definito, ma è un range di valori, perché il flusso non diventa immediatamente turbolento al crescere del Reynolds, ma subisce una transizione dal regime laminare a quello turbolento.

Come vedremo successivamente con maggiore precisione, il mescolamento nel flusso turbolento non può verificarsi nelle immediate vicinanze della superficie, ma porta alla nascita di un sottostrato viscoso, sotto lo strato limite turbolento, in cui il flusso

è laminare. In questa regione dello strato limite turbolento vale la stessa relazione riportata in precedenza che lega sforzi di taglio e gradiente di velocità.

La forma dello strato limite laminare è diversa da quella dello strato limite turbolento. In uno strato limite turbolento, lo spessore aumenta più rapidamente a causa del maggiore grado di miscelazione all'interno del flusso principale. Inoltre il mescolamento trasversale del fluido e lo scambio di quantità di moto tra i singoli strati inducono forze di taglio supplementari note come sforzi di Reynolds.

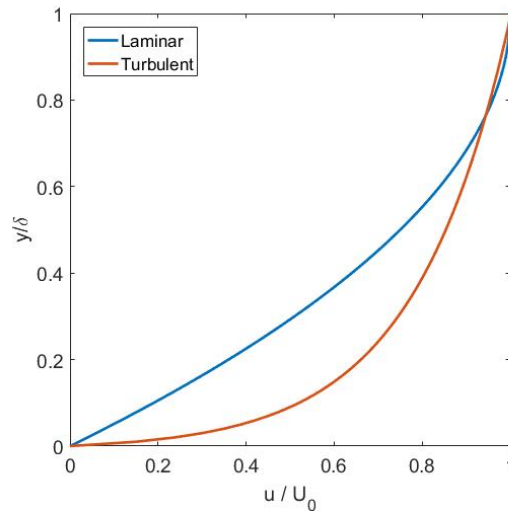


Figura 1.2: Strato limite laminare e turbolento.

Per rispettare la continuità, nello strato limite la velocità aumenta dolcemente dal valore nullo a parete fino alla velocità del flusso esterno: questo è ciò che determina il profilo ad "U" dello strato limite. Nel caso laminare, la forma dello strato limite è abbastanza regolare e non cambia molto nel tempo. Per uno strato limite turbolento, invece, si ha un aumento più rapido della velocità allontanandosi dalla parete e una velocità del fluido più uniforme in tutto lo strato limite. Ciò significa che, per uno strato limite turbolento, il gradiente di velocità a parete è maggiore rispetto al caso laminare. Dato che nelle immediate vicinanze della parete è sempre valida la relazione che descrive gli sforzi di taglio: per uno strato limite turbolento si avrà un maggiore sforzo di taglio a parete.

La resistenza di attrito è quindi il diretto risultato degli sforzi di taglio scambiati all'interno dello strato limite tra fluido e superficie del corpo. Essendo lo sforzo di taglio maggiore per uno strato limite turbolento, questo vedrà anche una maggiore resistenza d'attrito.

Analizziamo nel dettaglio la resistenza di attrito per un flusso in regime turbolento.

1.2 Caso turbolento

Prima di entrare nei meandri del flusso turbolento è necessario introdurre gli strumenti matematici utili per descrivere un flusso turbolento.

La turbolenza è un fenomeno disordinato, intrinsecamente tridimensionale e non stazionario. Un flusso turbolento è caratterizzato da fluttuazioni di velocità a carattere non deterministico. Nell'ambito dei flussi turbolenti è curioso osservare che se si ripete un esperimento (per esempio la misura di una quantità in un punto per un intervallo temporale) si ottengono dei valori istantanei notevolmente diversi ad ogni esperimento, ma si ottengono sempre le medesime caratteristiche statistiche come ad esempio il valore medio della grandezza misurata. A primo impatto quest'osservazione sembra in totale disaccordo con la natura deterministica delle equazioni di Navier-Stokes che governano il moto del fluido. Questo dilemma trova soluzione per la prima volta nel 1963 quando Lorentz dimostrò che alcuni sistemi non lineari possono essere così sensibili alle condizioni iniziali che anche un'infinitesima variazione di queste porta a soluzioni completamente differenti. Nel ripetere l'esperimento è impossibile replicare con precisione infinita le condizioni al contorno: per tale motivo, le soluzioni divergono in questo modo.

1.2.1 Modellazione e simulazione della turbolenza

Sebbene le equazioni di Naviers-Stokes siano completamente in grado di descrivere le oscillazioni non deterministiche della velocità attorno al valore medio il loro diretto utilizzo non rappresenta un approccio pratico alla risoluzione dei problemi turbolenti. Il problema turbolento è notoriamente complesso per via della sua stessa natura e non vi è quindi il prospetto di una soluzione analitica. Risulta però possibile, grazie alla sempre più importante potenza dei calcolatori, l'implementazione di modelli semplificati, più o meno accurati, che permettono di calcolare numericamente le grandezze fisiche di interesse. Pope [3] stila quindi una lista di cinque criteri sulla base dei quali è possibile valutare i diversi modelli:

- Livello di descrizione: quanto sono specifiche le grandezze fisiche che il modello è in grado di calcolare (grandezze istantanee, grandezze medie);
- Completezza: un modello si dice completo se le sue equazioni costitutive sono indipendenti dalle specifiche del flusso analizzato;
- Costo e semplicità di utilizzo: essendo che le equazioni costitutive devono essere risolte numericamente, le risorse impiegate per far ciò rappresentano una peculiarità fondamentale di un modello;

- Range di applicabilità: a causa delle proprie caratteristiche ogni modello può essere utilizzato per particolari tipologie di flussi;
- Accuratezza: la soluzione numerica delle equazioni costitutive è affetta da errori di natura numerica, l'accuratezza permette di quantificare quanto questi affliggano i risultati.

Tra i modelli comunemente utilizzati per risolvere i flussi turbolenti si decide di descrivere brevemente i tre più noti: *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS), *Direct Numerical Simulation* (DNS), *Large Eddy Simulation* (LES).

Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)

Per alcune applicazioni pratiche la soluzione al problema turbolento può essere trovata partendo dalla mera conoscenza delle grandezze medie: in quest'ottica è possibile decomporre qualsiasi grandezza dipendente dal tempo (come la velocità) in valore medio e fluttuazione. Questo approccio prende il nome di decomposizione di Reynolds:

$$u(x, t) = U(x) + u'(x, t)$$

$U(x)$ rappresenta il valore medio e $u'(x, t)$ rappresenta la fluttuazione della grandezza attorno al valore medio.

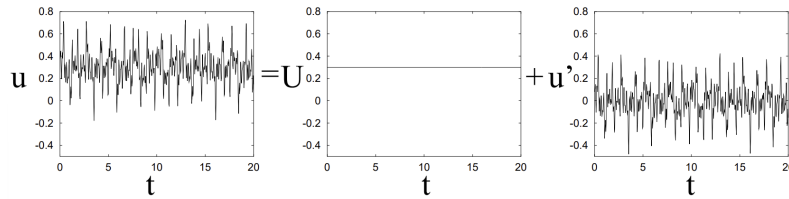


Figura 1.3: Esempio di decomposizione di Reynolds.

Applicando la decomposizione di Reynolds a tutte le variabili indipendenti delle equazioni di Navier-Stokes è possibile scrivere le equazioni di Navier-Stokes mediate alla Reynolds, meglio note come *Reynolds averaged Navier-Stokes* (RANS). Per sottolineare con più facilità il termine degli sforzi di Reynolds, citati nella sezione precedente, si riportano di seguito le equazioni RANS per il caso incomprimibile.

Equazione di continuità:

$$\nabla \cdot u = \nabla \cdot (U + u') = 0$$

$$\nabla \cdot U = 0$$

$$\nabla \cdot u' = 0$$

Equazione della quantità di moto:

$$\rho \left(\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - p - \rho \overline{u'_i u'_j} \right]$$

Il termine tra parentesi quadre rappresenta la somma di tre sforzi: sforzi viscosi, sforzi derivanti dal campo medio di pressione e sforzi di Reynolds. Anche se il termine degli sforzi di Reynolds ha espressione $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ è convenzione indicarlo con $\overline{u'_i u'_j}$. Quando si applica la decomposizione di Reynolds al termine convettivo dell'equazione di Navier-Stokes, la fluttuazione di velocità dà origine ad un termine aggiuntivo contenente la correlazione tra le componenti di velocità fluttuanti [3]. Questo termine (gli sforzi di Reynolds) appare come uno sforzo di attrito aggiuntivo e viene matematicamente rappresentato con un tensore simmetrico: il tensore degli sforzi di Reynolds. Sulla diagonale stanno i termini di sforzo normale ($\overline{u'_i u'_i}$), fuori dalla diagonale quelli di sforzo di taglio ($\overline{u'_i u'_j}$). Gli sforzi di Reynolds rappresentano il flusso di quantità di moto medio dovuto alle fluttuazioni turbolente di velocità, attraverso il tensore degli sforzi di Reynolds la parte fluttuante del flusso interagisce con quella media originando una forza di attrito fittizia.

L'introduzione del tensore degli sforzi di Reynolds permette allora di caratterizzare il comportamento del flusso turbolento quando questo si trova nei pressi di una parete.

Strato limite turbolento

Nello strato limite turbolento il comportamento del flusso dipende fortemente dalla distanza dalla parete a cui ci si trova, prima di descriverne la struttura è necessario introdurre alcune grandezze utili:

- $u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \rightarrow$ velocità di attrito (τ_w sforzo di taglio a parete);
- $\delta_v = \frac{\nu}{u_\tau} \rightarrow$ lunghezza di attrito;
- $Re_\tau = \frac{u_\tau \delta}{\nu} \rightarrow$ numero di Reynolds di attrito;
- $y^+ = \frac{y}{\delta_v} \rightarrow$ unità di parete;
- $u^+ = \frac{U}{u_\tau} \rightarrow$ velocità adimensionale .

Lo strato limite turbolento può essere diviso in prima approssimazione in due regioni: l'*inner layer* dove la somma degli sforzi di attrito e di Reynolds si mantiene costante ($\tau = \tau_v + \tau_{Re} = cost$) e l'*outer layer*. Il confine tra *inner layer* e *outer layer* è situato a $y^+ \approx 50$.

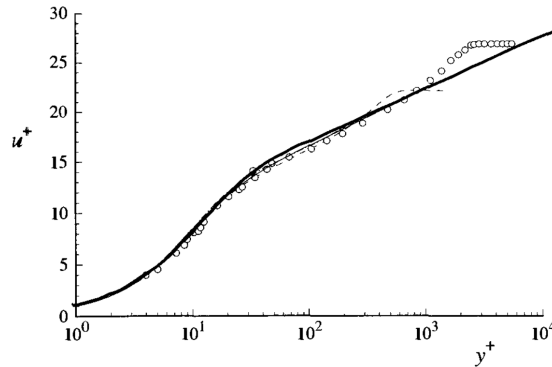


Figura 1.4: Struttura dello strato limite turbolento [3].

A sua volta l'*inner layer* è suddiviso in tre regioni ognuna caratterizzata da una diversa forma della relazione $u^+ = f(y^+)$. Partendo dalla parete troviamo:

- *Viscous sublayer* ($0 \leq y^+ \leq 5$): qui gli sforzi di Reynolds sono trascurabili rispetto alla viscosità e la distribuzione di velocità è lineare $u^+ = y^+$;
- *Buffer layer* ($5 \leq y^+ \leq 30$): è la regione di raccordo tra il *viscous sublayer* e il *log layer*, in questa regione si ha la massima produzione di energia cinetica turbolenta, gli sforzi viscosi e quelli di Reynolds coesistono;
- *Log layer*: ($y^+ \geq 30$): questa regione è dominata dagli sforzi di Reynolds, che si mantengono costanti, mentre quelli viscosi sono trascurabili. La distribuzione di velocità è logaritmica $u^+ = \frac{1}{k} \log(y^+) + B$ dove k è la costante di Von Karman ($k \approx 0.41$) e B è la costante di Coles ($k \approx 0.52$).

Direct Numerical Simulation (DNS)

La decomposizione di Reynolds rappresenta un approccio alquanto semplificato al problema turbolento. L'estrema precisione con cui le equazioni di Navier-Stokes descrivono l'evoluzione del flusso fa sì che il costo computazionale per risolvere il problema numericamente cresca vertiginosamente con il numero di Reynolds ($\sim Re^3$). Per questo motivo è impensabile risolvere il problema direttamente a meno che questo non abbia un numero di Reynolds modesto (qualche migliaio) e che la geometria del problema non sia semplificata. Questo è il caso della *Direct numerical simulation* (DNS), che permette la simulazione diretta di problemi semplificati che sarebbe difficile replicare sperimentalmente e rappresenta il modello più accurato e con il più alto livello di descrizione presente in letteratura. La DNS inoltre ha il pregio di non applicare nessun taglio alle scale del moto turbolento andando a simulare tutte le scale: da quella integrale fino a quella di Kolmogorov. I dati derivanti da simulazioni DNS saranno protagonisti di questo elaborato.

Large Eddy Simulation (LES)

In termini di costo computazionale, il modello LES si posiziona tra quello RANS e quello DNS. Infatti l'enorme costo del modello DNS risiede nella risoluzione delle piccole scale dissipative della turbolenza, sebbene l'energia e il carattere anisotropo del flusso turbolento sia contenuto prevalentemente nei moti di larga scala. Il modello LES sfrutta questo concetto calcolando esattamente la dinamica delle grandi scale della turbolenza (influenzate dalla geometria del flusso) e lasciando invece a semplici modelli quella dei moti di piccola scala. Il campo di velocità $U(\vec{x}, t)$ viene quindi decomposto in una componente "filtrata" (o "risolta") $\overline{U}(\vec{x}, t)$ e in una residua $u'(\vec{x}, t)$. La componente filtrata del campo di velocità, ottenuta mediante la risoluzione delle equazioni costitutive, rappresenta un'approssimazione dei moti di larga scala mentre la componente residua è ottenuta comunemente con un *eddy-viscosity model*.

1.3 Le tecniche di *drag reduction* e le *riblets*

Compresi i potenziali vantaggi di adottare tecniche in grado di ridurre la resistenza aerodinamica e in particolare la resistenza di attrito, è possibile analizzare più nel dettaglio le tecniche di *drag reduction* e in particolare quelle più di nostro interesse: le *riblets*.

La classificazione delle tecniche di *drag reduction* non è univoca, tuttavia generalmente si può dire che per ridurre la resistenza di attrito le strade percorribili siano due: ritardare la transizione del flusso da laminare a turbolento, poiché si è visto che un flusso turbolento genera più resistenza d'attrito, oppure, quando la transizione è inevitabile, cercare di ridurre direttamente la resistenza d'attrito per il flusso turbolento.

Volendo classificare le tecniche da un altro punto di vista è possibile dividerle in due gruppi: *active flow control methods* e *passive flow control methods*. Le tecniche di controllo attivo consistono nel modificare le proprietà e il comportamento del flusso, richiedono una fonte di potenza per poter funzionare e portano maggiori vantaggi in termini di riduzione della resistenza. Nel valutare le tecniche attive è importante tenere conto non solo della riduzione della resistenza ma anche della potenza spesa per ottenere la riduzione, ne sono esempio: l'imposizione di oscillazioni periodiche *span-wise* della parete, il raffreddamento della parete, il *flow mass injection*. Le tecniche di controllo passivo sono di più facile implementazione e consistono solitamente nel variare la forma della parete. Le tecniche passive garantiscono una minore riduzione della resistenza rispetto alle tecniche attive, inoltre sono ottimizzate per determinate condizioni operative, non necessitano però di alcuna potenza di attuazione.

Si tratterà nello specifico uno dei più noti e studiati *passive flow control method*, applicato ad un flusso turbolento: le *riblets*.

1.3.1 Le *riblets*

Le *riblets* sono microscanalature superficiali allineate con la componente *streamwise* della velocità locale del flusso libero. Lo scopo delle *riblets* è quello di modificare la struttura dello strato limite turbolento in prossimità della parete in modo da ridurre la resistenza di attrito. Le *riblets* sono state ampiamente testate in galleria del vento negli ultimi trent'anni evidenziando una riduzione della resistenza di attrito dell'ordine del 10% rispetto al caso di parete liscia, come dimostrato da Bechert *et al.* [4]. Nonostante siano stati dimostrati i vantaggi delle *riblets*, alcuni aspetti del loro comportamento restano ancora controversi. È stato dimostrato che le performance delle *riblets* mostrano una forte dipendenza dalla loro geometria, in particolare i parametri più rilevanti sembrerebbero essere: la spaziatura tra due striature (S), la profondità della gola (h) e il loro profilo (a lama, triangolare, parabolico, ecc.).

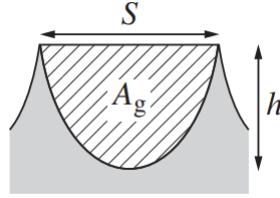


Figura 1.5: Geometria delle *riblets* [5].

Una volta definito il parametro S (S^+ se espresso in unità di parete), è possibile definire anche la *drag reduction* $DR = -\frac{\Delta\tau}{\tau_0}$ dove $\Delta\tau$ è la variazione di sforzo di attrito a parete rispetto al caso liscio (espresso con τ_0). DR è proporzionale a S^+ ed è possibile quindi tracciare la curva della riduzione di resistenza aerodinamica in funzione di S^+ come riportato in figura 1.6. Come si nota è possibile definire un valore di S^+ per cui è massima la riduzione di resistenza d'attrito, questo valore di S^+ viene indicato con S_{opt}^+ e solitamente assume valori compresi tra 10 e 20.

Tracciando queste curve per diverse configurazioni di *riblets* si è visto come i valori di S_{opt}^+ raggiungessero variazioni del 40%. Nel tentativo di caratterizzare il comportamento delle *riblets* con un parametro meno variabile García-Mayolar e Jiménez [5] hanno introdotto il parametro $l_g^+ = (A_g^+)^{\frac{1}{2}}$ ovvero la radice quadrata dell'area di gola espressa in unità di parete. Il valore tipico del parametro $l_{g,opt}^+$ è circa 11 con una variazione, tra i diversi casi esaminati, del 10%.

Sulla base di come la *drag reduction* dipende da S^+ è possibile definire differenti regimi di resistenza. Partendo dall'origine, si incontra il regime viscoso caratterizzato dal decremento lineare della resistenza al crescere di S^+ . La pendenza della curva per un generico *spacing* all'interno del regime viscoso equivale a $m_S = -[\frac{\partial(\Delta\tau/\tau_0)}{\partial S^+}]_{S^+=0}$. Quando lo *spacing* raggiunge valori prossimi (ma comunque inferiori) a S_{opt}^+ il regime viscoso si interrompe (*viscous breackdown*). Una volta superato S_{opt}^+ un ulteriore

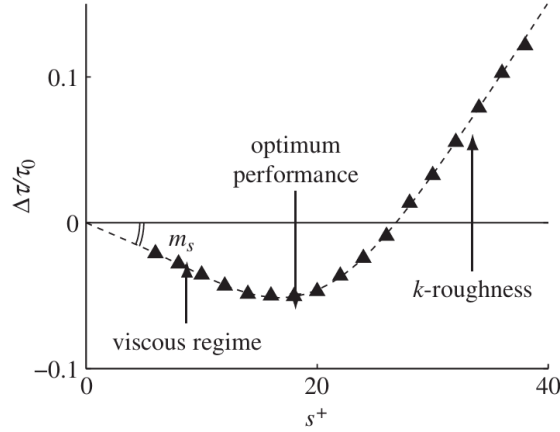


Figura 1.6: Esempio di curva di *drag reduction* in funzione di S^+ [4].

aumento dello *spacing* non genera più alcun beneficio in termini di *drag reduction* ma porta addirittura a un aumento della resistenza; in questo regime le *riblets* si comportano come una rugosità. Per comprendere il funzionamento delle *riblets* è quindi necessario analizzare il comportamento del flusso all'interno dei diversi regimi.

Abbiamo visto come nello strato limite turbolento la regione più vicina alla parete veda la predominanza degli sforzi viscosi: in questa regione gli effetti inerziali non lineari sono trascurabili e il profilo di velocità è perciò lineare. Quando si introducono le *riblets* gli eventi turbolenti fanno sì che il flusso in direzione *streamwise* resti attaccato alla parete con origine nelle gole delle *riblets*. Quello in direzione *spanwise*, invece, caratterizzato dalla presenza di vortici, vede la sua origine spostarsi più lontano dalla parete a causa delle creste delle *riblets*. L'allontanamento dalla parete delle strutture turbolente responsabili degli sforzi di Reynolds sembrerebbe poter spiegare la riduzione di resistenza d'attrito [4]. Secondo Luchini *et al.* [6] la quantità fondamentale per originare *drag reduction* è l'altezza di protrusione (Δh) ovvero la distanza tra l'origine del flusso longitudinale e quella del flusso trasversale. Come l'altezza di protrusione influisca sulla riduzione di resistenza è spiegato dalla teoria classica della turbolenza di parete. Se l'altezza delle *riblets* è di gran lunga inferiore rispetto allo spessore dello strato limite, gli effetti di quest'ultime restano confinati vicino alla parete. L'effetto delle *riblets* sarebbe quindi quello di modificare il profilo di velocità all'interno dello strato limite turbolento facendo traslare verso l'alto la curva che descrive il profilo di velocità nel *log layer*. Questo si traduce in un incremento del termine B dell'espressione che lega u^+ e y^+ nel *log layer*. Essendo gli effetti delle *riblets* ancorati nei pressi della parete, dove vige la linearità, la variazione del termine B (ΔB) e l'altezza di protrusione (espressa in unità di parete)

dovrebbero essere legati da una relazione lineare [5]:

$$\Delta B = \mu_0 \Delta h^+$$

Dove $\mu_0 \approx 0.66$ costante universale misurata sperimentalmente da Jiménez [7].

Più complesso è trovare la causa del *viscous breakdown* e del deterioramento della *drag reduction*. La bibliografia su questo si divide in due differenti teorie. La prima teoria attribuisce il deterioramento alla formazione di vortici trasversali di piccola scala generati dalla separazione del flusso tra le creste delle *riblets*. Secondo Goldstein e Tuan [8] questo meccanismo sarebbe deleterio per la *drag reduction*. La seconda teoria, convalidata da Choi *et al.* [9], vede anch'essa come protagonisti del deterioramento i vortici trasversali di piccola scala, ma fa corrispondere l'aumento di resistenza al posizionamento di questi vortici all'interno delle gole delle *riblets*.

Effetto delle condizione di off-design (*yaw*)

Le *riblets*, come tutte le tecniche di *drag reduction* passive, sono ottimizzate per determinate condizioni operative. In particolare, le *riblets* sono progettate per lavorare parallelamente al flusso che le investe. È comunque importante valutare come varia il loro comportamento quando il flusso che le investe è disallineato rispetto alla direzione longitudinale (θ). Gli studi di Walsh del 1990 [10] hanno evidenziato che fino ad un angolo di disallineamento $\theta = 15^\circ$ gli effetti sulla *drag reduction* sono trascurabili mentre per $\theta = 25 - 35^\circ$ non vi è alcuna riduzione della resistenza di attrito.

1.3.2 *Riblets* sinusoidali

Fino ad ora si è trattato il funzionamento delle *riblets* longitudinali, negli ultimi tempi però sta diventando sempre più di interesse per la comunità scientifica lo studio delle *riblets* sinusoidali. L'idea delle *riblets* sinusoidali nasce dall'idea di unire i vantaggi delle *riblets* longitudinali con quelli delle oscillazioni periodiche *spanwise* della parete [11]. L'imposizione di oscillazioni *spanwise* è infatti una tecnica attiva poco pratica da realizzare in diversi contesti, il ruolo delle *riblets* sinusoidali è quello di imporre comunque un'oscillazione spaziale del flusso.

Cafiero e Iuso [12], analizzando il comportamento delle *riblets* sinusoidali con diversa ampiezza, ma uguale lunghezza d'onda, rispettivamente indicate con a e λ , hanno evidenziato un incremento di *drag reduction* di circa il 2.5% rispetto al caso delle *riblets* longitudinali. Lo studio appena citato sottolinea come le *riblets* sinusoidali riducano l'intensità turbolenta nel *buffer layer* allontanandola dalla parete, questo comportamento è apprezzabile osservando il profilo di varianza della componente media di velocità in direzione *streamwise* riportato in figura 1.8. Viene inoltre

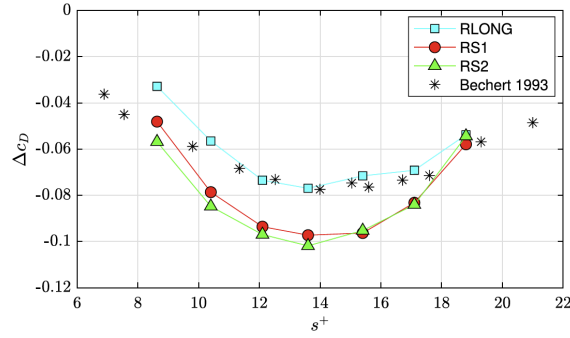


Figura 1.7: Curva di *drag reduction* per *riblets* sinusoidali e longitudinali [12].

sottolineata un'attenuazione delle oscillazioni di velocità in direzione *streamwise*, responsabili della produzione di turbolenza, accompagnata però da un incremento delle fluttuazioni di velocità *spanwise* e *wall-normal*. La spiegazione all'attenuazione dell'intensità della turbolenza non è però ancora del tutto chiara, una delle possibili spiegazioni è che l'effetto delle *riblets* sinusoidali sia quello di rompere la coerenza dei vortici in direzione *spanwise* [13] e di conseguenza di inibire la turbolenza. Un'altra possibile spiegazione è che il profilo sinuoso delle *riblets* origini dei flussi secondari caratterizzati da vortici controrotanti di intensità e dimensione variabile lungo le gole. L'inversione del segno di questi vortici darebbe vita alla disomogeneità spaziale della vorticità trasversale, andando quindi a modificare la morfologia delle strutture vicino alla parete e arrivando addirittura a disgregarle [12]. Studiando il comportamento delle strutture coerenti Cafiero, Amico e Iuso [11] hanno infatti osservato come il caso manipolato con *riblets* sinusoidali, presenti un maggiore numero di *low-speed streaks* e come queste siano più sottili e vicine una alle altre in direzione *spanwise*. Inoltre, è stato riscontrato un incremento della componente *wall-normal* di vorticità accompagnato da un incremento del gradiente di velocità *streamwise* in direzione *spanwise* e da una riduzione del gradiente di velocità *streamwise* lungo la stessa direzione *streamwise*. L'analisi delle strutture coerenti ha in aggiunta permesso di individuare un'attenuazione del termine di produzione di energia cinetica turbolenta sia nel piano parallelo alla parete, sia nel piano *wall-normal*, come è possibile osservare in figura 1.9

Nonostante i numerosi studi e ipotesi la questione delle *riblets* sinusoidali rimane aperta in attesa di ulteriori investigazioni sperimentali e numeriche.

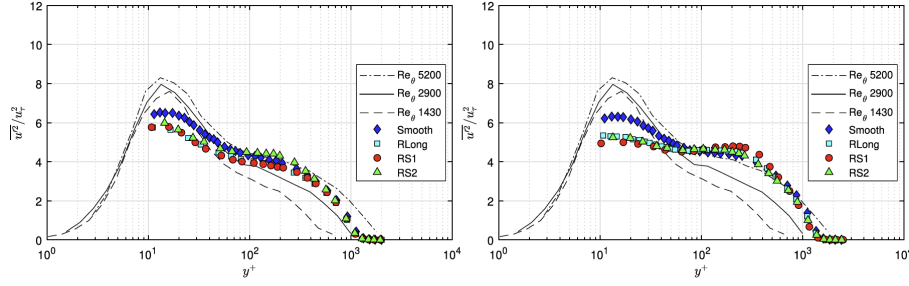


Figura 1.8: Profilo di varianza della componente di velocità *streamwise* per due differenti valori del numero di Reynolds [12].

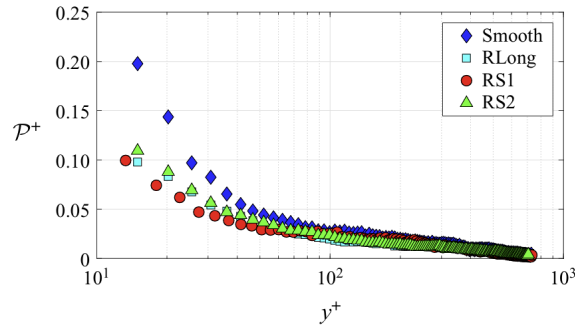


Figura 1.9: Produzione di energia cinetica turbolenta nel piano *wall-normal* [11].

1.4 Analisi dei quadranti e studio delle strutture

I processi di trasporto sono una delle proprietà più importanti del fenomeno turbolento. Di particolare interesse è il trasporto di quantità di moto che si è visto in precedenza essere responsabile dell'incremento di resistenza d'attrito a parete quando il flusso transisce da laminare a turbolento. Con l'intento di capire l'evoluzione del fenomeno di trasporto della quantità di moto e di conseguenza la generazione degli sforzi di Reynolds, alcuni studiosi pensarono di studiare, attraverso tecniche di visualizzazione, l'evoluzione delle strutture generate in un flusso turbolento.

In un flusso turbolento è infatti possibile visualizzare delle regioni nello spazio e nel tempo dove il flusso presenta caratteristiche uniformi. Queste regioni del flusso sono note come strutture coerenti o quasi coerenti. Lo studio di queste strutture è fondamentale non solo per capire i meccanismi di generazione degli sforzi di Reynolds ma anche per imparare come manipolare il flusso in modo da ridurre questi ultimi. Diversi studi, tra cui quello di Kline *et al.* [14] hanno evidenziato la presenza di zone di flusso a bassa velocità (circa la metà della velocità media del flusso *streamwise*). Queste strutture prendono il nome di *streaks* ed è interessante studiare il loro

comportamento, noto come *bursting*. procedendo in direzione *streamwise*, le *streaks* si muovono lentamente allontanandosi dalla parete e ad un certo punto cominciano ad allontanarsi con maggiore velocità: questo processo prende il nome di *ejection*. La *streaks* subisce poi una rapida oscillazione e si separa in moti di piccola scala. Quando il flusso si allontana dalla parete a seguito di un *ejection* per la continuità si origina un moto di una porzione di flusso ad alta velocità in direzione della parete, questo evento prende il nome di *sweep*. Parlando invece di strutture vorticosi, quelle che dominano lo strato limite turbolento secondo [15] sono i cosiddetti *hairpin vortices*.

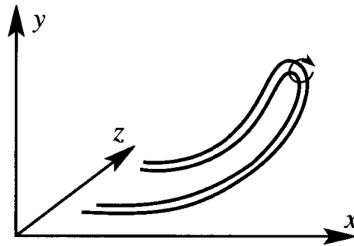


Figura 1.10: Schema di un *hairpin vortex* [3].

Gli *hairpin vortices*, come quello riportato in figura 1.10, sono strutture vorticosi che si generano a cavallo delle *streaks* caratterizzate da due vortici controrotanti in direzione *streamwise* uniti da un filamento vorticoso in direzione *spanwise*. Gli *hairpin vortices* sono organizzati in pacchetti allineati nella direzione della corrente in cui gli *hairpin vortices* generati per primi aumentano di dimensione allungandosi e alzandosi rispetto alla parete [15].

1.4.1 *Quadrant analysis*

Nella sezione precedente sono stati citati i fenomeni di *ejection* e *sweep*, questi sono i protagonisti dell'analisi dei quadranti.

L'analisi dei quadranti, condotta per la prima volta da Wallace nel 1972, nasce dal desiderio di comprendere l'origine degli sforzi di Reynolds e il meccanismo di produzione dell'energia cinetica turbolenta così da poter predire il comportamento dei flussi turbolenti [16]. Corino e Brodkey [17] osservarono che, in un canale a olio turbolento, vi erano importanti informazioni nel segno delle fluttuazioni di velocità *streamwise* (u') e *wall-normal* (v'). Sulla base di queste osservazioni, Wallace *et al.* [18] classificarono gli effetti di queste fluttuazioni in quattro categorie:

- $Q1 \rightarrow (+u', +v')$ flusso ad alta velocità che si allontana dalla parete (*outward interaction*);
- $Q2 \rightarrow (-u', +v')$ flusso a bassa velocità che si allontana dalla parete (*ejection*);

- $Q3 \rightarrow (-u', -v')$ flusso a bassa velocità che si avvicina alla parete (*inward interaction*);
- $Q4 \rightarrow (+u', -v')$ flusso ad alta velocità che si avvicina alla parete (*sweep*).

Il termine di produzione di energia turbolenta è espresso dalla relazione: $P = -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$. Gli eventi $Q2$ e $Q4$ sono caratterizzati dal prodotto $u'v'$ negativo e producono quindi energia turbolenta [3]. A una certa distanza dalla parete, la somma dei contributi frazionari dei quattro quadranti è unitaria. Nei pressi della parete gli eventi $Q2$ forniscono maggiore contributo agli sforzi di taglio turbolenti rispetto ai $Q4$, allontanandosi dalla parete vale invece il contrario [19].

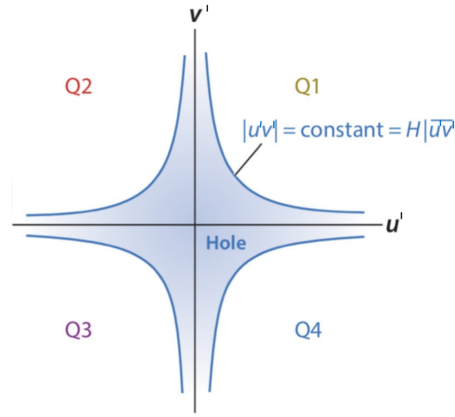


Figura 1.11: *Hole* di Willmarth e Lu [20].

Per studiare il contributo agli sforzi di Reynolds dato dagli eventi di ogni quadrante, Willmarth e Lu [20] decisero di introdurre il parametro H noto come *Reynolds shear stress magnitude parameter*. L'introduzione del parametro H permette di tenere in considerazione solo gli eventi più rilevanti per ogni quadrante. Questi eventi sono quelli che stanno al di fuori della *hole*, ovvero tutti gli eventi per cui $|u'v'| \geq H |\overline{u'v'}|$ dove $\overline{u'v'}$ rappresenta il valore medio del prodotto $u'v'$ a una data distanza dalla parete. Il parametro H dipende dalla distanza dalla parete e il suo valore cambia a seconda del caso analizzato.

Lozano-Durán *et al.* [19] hanno dimostrato che gli eventi appena descritti si separano in eventi attaccati alla parete ed eventi staccati dalla parete. Gli eventi staccati sono più piccoli, mentre quelli attaccati hanno dimensioni maggiori e il loro contributo agli sforzi di Reynolds è superiore. Nel caso preso in esame gli eventi attaccati alla parete, che per lo più sono rappresentati da *sweeps* ed *ejections*, contribuiscono per il 60% agli sforzi di Reynolds totali indipendentemente dalla distanza dalla parete. Si è inoltre dimostrato che esiste un legame tra eventi attaccati e staccati,

in quanto può succedere che piccoli eventi staccati si uniscano e formino un evento più grande attaccato.

1.4.2 *Q-criterion*

Lo studio delle fluttuazioni di velocità *streamwise* e *wall-normal* non è però l'unico metodo grazie a cui è possibile individuare le strutture coerenti in un flusso turbolento. Hunt *et al.* [21] proposero un diverso approccio allo studio delle strutture coerenti basando la loro individuazione su un parametro noto come *Q-factor*. Secondo questa definizione, è possibile catalogare come struttura coerente qualsiasi zona del campo di moto per cui il secondo invariante del gradiente di velocità (Q) risulta essere maggiore di zero.

$$Q = \frac{1}{2}(\|\Omega\|^2 - \|S\|^2)$$

Dove S e Ω rappresentano rispettivamente la componente simmetrica e antisimmetrica del gradiente di velocità.

$$\begin{aligned}\|S\| &= [\text{tr}(SS^t)]^{1/2} \\ \|\Omega\| &= [\text{tr}(\Omega\Omega^t)]^{1/2}\end{aligned}$$

Il *Q-factor* ha la peculiarità di assumere valore nullo a parete e di non presentare quindi difficoltà nel descrivere il moto vorticoso nei pressi di quest'ultima.

1.4.3 Evoluzione delle strutture coerenti

Con l'intento di studiare come manipolare un flusso turbolento, è fondamentale comprendere la dinamica delle strutture coerenti che lo popolano. Questo può avvenire solamente conoscendo come queste evolvono nel tempo e nello spazio. Sempre Lozano-Durán *et al.* [22] hanno ideato un metodo per tracciare le strutture coerenti durante tutta la loro vita. Ciò è stato possibile grazie alla risoluzione DNS di un canale piano turbolento in cui le strutture coerenti sono state identificate sfruttando la definizione introdotta da Willmarth e Lu [20] illustrata in precedenza. Il *tracking* delle strutture si articola in tre fasi:

1. Connessione delle strutture: le strutture, di due *snapshots* consecutivi, appartenenti ad una determinata tipologia, vengono copiati in una griglia comune così da trovare le sovrapposizioni spaziali tra di esse. Quando due strutture presentano una sovrapposizione spaziale sono considerate connesse;
2. Organizzazione in grafi: il risultato del punto 1 consiste in una serie di connessioni (indietro e in avanti) tra le strutture. Se una struttura presenta più

connessioni indietro, allora significa che più strutture si sono unite a formarla. Se una struttura presenta più connessioni in avanti, allora questa si è divisa in più strutture. Se una struttura ha una connessione indietro e una in avanti allora questa si è evoluta senza unioni o divisioni;

3. Organizzazione in rami: ad ogni connessione individuata viene assegnato un peso $\Delta V/V_i$ dove ΔV rappresenta la differenza di volume tra le strutture connesse e V_i il volume occupato dalla sovrapposizione delle due strutture. L'attribuzione dei pesi alle connessioni permette di selezionarle e individuare i differenti rami. Quando una struttura presenta più connessioni *incoming*, cioè all'indietro, quella con il peso minore viene considerata parte del ramo primario mentre le altre vengono considerate parti di rami che li si interrompono. Discorso simile quando una struttura presenta più connessioni *outgoing*, ovvero in avanti. La connessione con il minore peso viene considerata la connessione primaria mentre le altre il punto di origine di nuovi rami. I grafi sono così organizzati in rami ognuno dei quali rappresenta l'evoluzione spazio-temporale di una struttura [22].

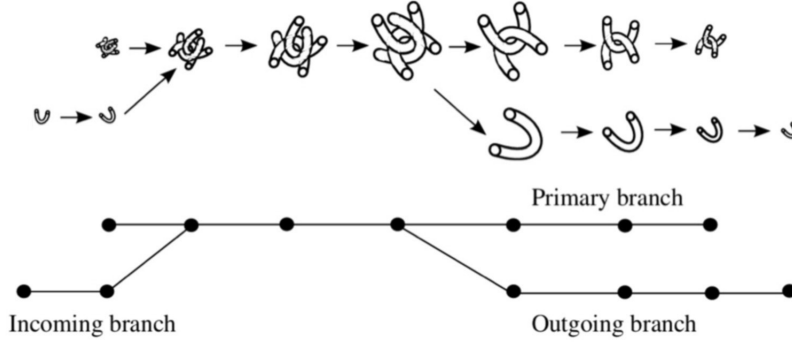


Figura 1.12: Evoluzione e classificazione dei rami [22].

Come anticipato, i rami possono essere classificati sulla base di come vengono creati e distrutti. Quando i rami si originano e muoiono nel *background* turbolento sono classificati come primari. Tutti gli altri sono considerati rami secondari e possono essere: *incoming* se nascono da zero e si uniscono ad un ramo primario, oppure *outcoming* se nascono da un ramo primario e muoiono nel *background*. Esistono poi i rami connettori che si separano da un ramo primario per unirsi ad un altro. La simulazione M4200, condotta a $Re_\tau = 4160$ ha permesso di evidenziare come, tra i rami individuati, il 52% sia rappresentato da rami primari, il 20% da rami *incoming*, il 27% da rami *outgoing* e solo l'1% da rami connettori. Risultati simili sono stati ottenuti per le simulazioni M950 e M2000 condotte rispettivamente a $Re_\tau = 930$ e $Re_\tau = 2000$ [22]. La distribuzione delle diverse tipologie di rami ha permesso di

notare come lo squilibrio tra il numero di rami *incoming* e *outgoing* possa essere interpretata come una misura della predominanza della cascata energetica diretta verso le strutture più piccole sulla cascata energetica inversa verso strutture più grandi [22]. Il procedimento di *tracking* appena illustrato non ha sempre successo, specialmente quando la ricerca delle connessioni viene effettuata per strutture di dimensioni molto piccole. Le principali ragioni possono essere che la struttura abbia una vita più breve del passo di discretizzazione temporale che separa due istantanee oppure che tra due istantanee successive questa venga trasportata dal campo di moto per una distanza maggiore rispetto alla sua dimensione. Le strutture coerenti che rimangono isolate durante il processo di *tracking* rappresentano comunque l'1% del totale delle strutture individuate e sono solitamente piccoli oggetti il cui volume è pari all'1% di quello medio [22]. Così come per i singoli eventi, anche i rami possono essere classificati in rami attaccati e staccati dalla parete. In aggiunta, nella classificazione dei rami, viene introdotta la definizione di *tall wall attached branches* ovvero quei rami che contengono almeno una struttura che risulta attaccata alla parete ma che si estende sino all'interno del *log layer*.

L'analisi del *tracking* delle strutture coerenti ha permesso di confermare il fatto che i *tall wall attached branches* composti da strutture di tipo *sweep* ed *ejection* con lunghi tempi di esistenza siano i principali responsabili del trasporto di quantità di moto in direzione *wall-normal* come già riportato da precedenti studi. È stata inoltre misurata la velocità convettiva in direzione *streamwise* che si è dimostrata dipendente dalla distanza dalla parete dimostrando che le strutture sono abbastanza deformate dal campo medio che il loro tempo di vita risulta essere controllato dalla deformazione subita così come dall'interazione con altri rami il che rende questo un fenomeno non trascurabile [22]. I risultati ottenuti hanno avvalorato l'ipotesi che *sweeps* ed *ejections* non siano strutture indipendenti bensì differenti manifestazioni dei vortici *quasi-streamwise* in cui sono incorporate. I risultati portati da Lozano-Durán *et al.* [22] hanno infatti evidenziato come le *ejections* si originino del *buffer layer*, restino nei pressi della parete per circa due terzi della propria vita e poi si allontanino repentinamente da quest'ultima, mentre le *sweeps* hanno origine lontano dalla parete e solo in un secondo momento si avvicinano a lei. Si è inoltre dimostrato come i moti ascendenti e discendenti di *ejections* e *sweeps* avvengano mediamente con velocità *wall-normal* antisimmetriche, rispettivamente $+u_\tau$ e $-u_\tau$. *Ejections* e *sweeps* non vengono originate una allineata all'altra ma una a fianco all'altra il che porta a pensare che le *sweeps* costituiscano la componente di "alta velocità" della *streak* mentre le *ejections* quella di "bassa velocità" [22].

Capitolo 2

Dataset DNS e casi esaminati

Come riportato nel capitolo precedente, le *riblets* sono state protagoniste di numerose ricerche e campagne sperimentali che hanno evidenziato interessanti vantaggi in termini di *drag reduction*. Nonostante ciò, il loro comportamento e i meccanismi che lo governano mantengono dei lati oscuri e non ancora del tutto chiari.

L'obiettivo del presente lavoro è quello di cercare un riscontro numerico dei risultati sperimentali presenti in letteratura con l'obiettivo di spiegare come, in generale, le *riblets*, in particolare quelle sinusoidali, modifichino il flusso turbolento nei pressi della parete e comportino quindi una riduzione della resistenza aerodinamica. Per far ciò si effettua l'analisi statistica della morfologia delle strutture coerenti e del loro *tracking* come riportato da Lozano-Durán *et al.* [22]. L'analisi viene applicata ai risultati di una simulazione DNS di un canale piano turbolento condotta dal Dr A. Busse e dal Dr F. Alves Portela.

2.1 *Dataset* DNS

Il canale piano turbolento, ovvero il flusso racchiuso da pareti piane parallele spinto da un gradiente di pressione costante, è ampiamente impiegato nell'ambito della ricerca con lo scopo di indagare i meccanismi fondamentali caratterizzanti i flussi turbolenti. La semplicità della sua geometria permette di effettuare analisi numeriche con costo computazionale contenuto e di poter, inoltre, una volta fissate le condizioni di ingresso, studiare l'effetto che la geometria delle pareti ha sul flusso. Per di più, l'ampia disponibilità di materiale bibliografico permette il confronto dei risultati ottenuti.

Le dimensioni del canale piano preso in esame, schematizzato in figura 2.1, e i parametri della simulazione sono riportati in tabella 2.1. Δx , Δy , Δz rappresentano rispettivamente le dimensioni *streamwise*, *spanwise* e *wall-normal* del canale, mentre n_x , n_y , n_z rappresentano il numero di nodi della griglia di calcolo nelle omonime

direzioni. La griglia risulta equispaziata nelle direzioni *streamwise* e *spanwise* ma presenta *stretching* verso le pareti in direzione *wall-normal*, essendo molto rilevante ai fini dell'analisi ciò che succede nei pressi di quest'ultime. Il numero di Reynolds d'attrito è fissato a 540: non si tratta di un valore elevato se paragonato agli studi presenti in letteratura, ma porta con sé un enorme vantaggio in termini di costo computazionale della simulazione.

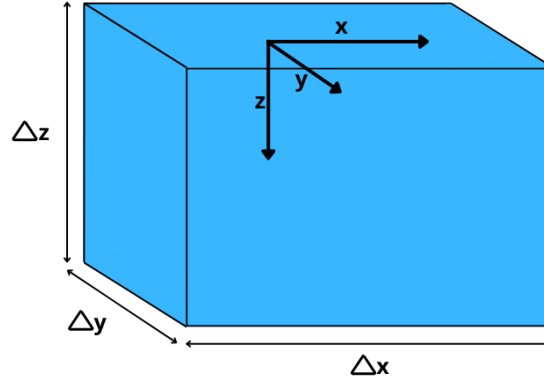


Figura 2.1: Schema del canale piano esaminato.

	Re_τ	Δx	Δy	Δz	n_x	n_y	n_z
<i>Smooth</i>	540	2.8444	0.9333	2.0000	320	128	384
<i>Straight</i>	540	2.8444	0.9333	2.0000	256	672	256
<i>Wavy</i>	540	2.8444	0.9333	2.0000	256	672	256

Tabella 2.1: Parametri delle simulazioni DNS.

Le simulazioni forniscono i valori istantanei di pressione e velocità nelle tre componenti per ogni punto della griglia a ogni istante temporale (*snapshot*). I dati sono espressi attraverso matrici tridimensionali a ciascuna delle quali è associato uno dei 4800 *snapshots* che compongono l'intera simulazione.

2.2 Casi analizzati

Le simulazioni DNS sono state effettuate per tre differenti casi, a ciascuno dei quali corrisponde una diversa configurazione geometrica delle pareti superiore ($z = 0$) e inferiore ($z = \Delta z$) del canale. Per i tre differenti casi vengono mantenuti invariati il numero di Reynolds di attrito, le dimensioni del canale e la griglia computazionale. Il primo caso preso in esame rappresenta un canale piano con pareti lisce mentre il

secondo e il terzo vedono le pareti equipaggiate con *riblets* a profilo parabolico, una volta longitudinali (RLong) e una volta sinusoidali (RS1). I parametri geometrici delle pareti equipaggiate con *riblets*, la cui nomenclatura segue quella riportata nel capitolo precedente, vengono riportati in tabella 2.2. Questi sono i medesimi di quelli riportati nello studio di Cafiero e Iuso [12] (casi RLong e RS1), ma in questo caso la dimensione *streamwise* del canale è tale da contenere solamente due lunghezze d'onda delle *riblets* sinusoidali.

	RLong	RS1
s (mm)	0.30	0.30
h (mm)	0.21	0.21
h/s	0.70	0.70
a (mm)	0	0.15
λ (mm)	∞	19.2

Tabella 2.2: Parametri geometrici delle pareti con *riblets*.

Nel corso dell'analisi i tre casi verranno identificati con la seguente denominazione:

- Caso *smooth*: canale con pareti lisce;
- Caso *straight*: canale con pareti equipaggiate con *riblets* longitudinali (RLong);
- Caso *Wavy*: canale con pareti equipaggiate con *riblets* sinusoidali (RS1).

L'analisi statistica della morfologia delle strutture coerenti verrà effettuata per tutti e tre i casi mentre il *tracking* solamente per i casi *straight* e *Wavy* in quanto il passo di discretizzazione temporale della simulazione con pareti lisce non permette la risoluzione temporale del campo di moto. In questo modo sarà possibile validare i risultati dell'analisi morfologica del caso *smooth* con i numerosi presenti in letteratura e indagare l'effetto della manipolazione sulle strutture coerenti. L'analisi statistica del *tracking* dei casi manipolati invece permetterà una più chiara comprensione della dinamica delle strutture coerenti all'interno di un canale manipolato oltre a chiarire l'effetto della manipolazione su di essa.

Entrambe le analisi verranno condotte considerando solamente 400 *snapshots* dei 4800 a disposizione. La scelta del numero di *snapshots* che comporrà il *dataset* è dettata dalla necessità di avere una mole di dati tale per cui i risultati ottenuti siano statisticamente rilevanti senza gravare però sul costo computazionale dell'analisi stessa.

Capitolo 3

Identificazione delle strutture coerenti

Prima di poter effettuare l'analisi della morfologia delle strutture coerenti è necessaria la loro identificazione. Per ognugno dei 400 *snapshots* presi in analisi si effettua quindi la ricerca delle zone del campo di moto che possono essere considerate coerenti, l'identificazione delle strutture avviene mediante due differenti metodologie che verranno d'ora in avanti denominate: *Metodo 1* e *Metodo 2*.

- *Metodo 1*: le strutture vengono individuate sulla base della coerenza del prodotto delle fluttuazioni di velocità in direzione *streamwise* e *wall-normal* come riportato da Wallace [16];

$$|u'v'| \geq H |\overline{u'v'}|$$

- *Metodo 2*: le strutture vengono individuate sulla base della coerenza del secondo invariante del gradiente di velocità come riportato da Hunt *et al.* [21].

$$Q = \frac{1}{2}(\|\Omega\|^2 - \|S\|^2)$$

Entrambe le metodologie vengono applicate a tutti e tre i casi presi in considerazione. Tutte le analisi riportate vengono effettuate con l'ausilio di codici MATLAB appositamente redatti per questo studio.

3.1 Campo medio di velocità e calcolo del volume

Data la simmetria del canale piano viene presa in considerazione solo una delle due metà del canale ovvero lo spazio compreso tra $z = 0$ e $z = \Delta z/2$. Per ridurre il costo computazionale delle operazioni, per la metà del canale analizzata, si prende in considerazione solamente la metà dei punti di griglia nella direzione *wall-normal*,

in particolare uno ogni due. Nota la semi altezza del canale pari a $H_{channel} = 1$ e il numero di Reynolds di attrito, è possibile valutare la lunghezza e la velocità di attrito riportate in tabella 3.1.

l_τ	0.0019
u_τ	1

Tabella 3.1: Grandezze di attrito.

3.1.1 Calcolo del campo medio di velocità

Come riportato nel capitolo precedente i risultati delle simulazioni sono rappresentati dai campi istantanei di pressione e velocità nelle tre direzioni. Entrambi i metodi di identificazione delle strutture prevedono però di conoscere, per ogni punto della griglia, i valori delle fluttuazioni istantanee di velocità. Il *Metodo 1* si serve di queste per il vero e proprio processo di individuazione delle strutture, mentre il *Metodo 2* per la sola definizione della tipologia delle strutture individuate. Con l'obiettivo di calcolare le fluttuazioni di velocità ci si serve della *function time_av_zplane* che permette di calcolare il campo di velocità e pressione medio per ogni punto della griglia, noto il campo medio sarà possibile sottrarlo a quello di ogni *snapshot* preso in considerazione per ottenere il campo di fluttuazioni.

3.1.2 Calcolo del volume

Per caratterizzare le strutture coerenti è fondamentale riuscire a calcolare il volume, la difficoltà di quest'operazione risiede nella non uniformità della griglia di calcolo nella direzione *wall-normal*. Per ovviare al problema, noto il numero dei nodi della griglia in ogni direzione e la dimensione del dominio di calcolo di interesse, si calcola la differenza tra ogni punto della griglia nelle tre direzioni. A questo punto si costruiscono tre matrici tridimensionali che contengono, per ognuna delle tre direzioni, le distanze tra i nodi adiacenti della griglia. Effettuando il prodotto di queste tre matrici si ottiene un'unica matrice tridimensionale con le dimensioni pari al numero di punti della griglia e i cui elementi rappresentano il volume dei parallelepipedi racchiusi tra otto punti adiacenti della griglia. La matrice appena descritta prende il nome di dV e sarà fondamentale nel processo di individuazione delle strutture coerenti.

3.2 Identificazione delle strutture, *Metodo 1*

Calcolato il campo medio, ed essendo in grado di calcolare il volume di ogni zona coerente del campo di moto, è possibile individuare e catalogare le strutture coerenti per ognuno dei 400 *snapshots* presi in analisi.

3.2.1 Individuazione delle strutture

La *function* `read_flow_inst` permette di leggere, per ogni *snapshot*, il file di output della simulazione DNS fornito e ottenere il campo di velocità e pressione istantaneo. La *function* restituisce i campi interi che devono quindi essere adattati alle considerazioni sulla griglia di calcolo fatte in precedenza. A questo punto è possibile sottrarre al campo di velocità e pressione istantanei, quello medio, precedentemente calcolato, ottenendo così i campi di fluttuazioni di pressione e velocità nelle tre direzioni. Ottenuti i campi di fluttuazioni, a ogni punto della griglia, viene applicata la relazione $|u'v'| \geq H |\overline{u'v'}|$ dove u' e v' rappresentano le fluttuazioni istantanee di velocità in direzione *streamwise* e *wall-normal* appena calcolate e $\overline{u'v'}$ rappresenta il prodotto tra il valore medio del prodotto uu e il valore medio del prodotto vv . Il risultato di quest'operazione è una matrice binaria tridimensionale (*Sel*), di dimensioni pari a quelle della griglia di calcolo, che contiene 1 in quei punti della griglia dove la relazione riportata prima è verificata e 0 nei restanti. Definita la matrice *Sel* il passo successivo consiste nell'etichettare i gruppi di elementi 1 adiacenti della suddetta matrice con un numero che va da uno al numero di gruppi individuati. I gruppi di elementi adiacenti individuati rappresentano le strutture coerenti del campo di moto. Il Procedimento appena descritto considera coerenti anche i singoli elementi della matrice isolati che presentano valore 1, per questo motivo prima di effettuare qualsiasi altra operazione vengono scartati tutti i gruppi rappresentati da tre elementi o meno della matrice *Sel* di partenza.

3.2.2 Proprietà delle strutture e salvataggio dei dati

Una volta individuate le strutture coerenti è possibile calcolarne le proprietà peculiari e salvarle. Per ogni struttura individuata viene creata una matrice binaria tridimensionale che contiene elementi 1 solo nei punti appartenenti a quella struttura. Viene quindi calcolato:

- Volume: si moltiplica la matrice relativa alla singola struttura per la matrice dV , in questo modo si calcola il volume di ogni parallelepipedo racchiuso dai punti adiacenti della struttura e sommandoli si ottiene il volume totale della strutture;

- Coordinate dei punti appartenenti alla struttura: dalla matrice relativa alla singola struttura è possibile estrapolare le coordinate x , y e z dei punti che la costituiscono;
- Coordinate del baricentro della struttura: note le coordinate dei punti che costituiscono la struttura, si effettua la media ponderata di queste dove il peso è rappresentato dagli elementi della matrice dV ;
- Fluttuazioni medie di velocità: come per il calcolo delle coordinate del baricentro, note le fluttuazioni di velocità nei punti appartenenti alla struttura, si effettua la media ponderata di queste utilizzando ancora una volta come peso gli elementi della matrice dV ;
- Tipologia della struttura: avendo calcolato il valore medio della fluttuazione di velocità in direzione *streamwise* e *wall-normal* è possibile, sulla base del segno di quest'ultime, individuare la tipologia della struttura.

Una volta raccolte le informazioni peculiari di ogni struttura queste vengono salvate in una variabile di tipo *Struct* e quindi in un file *.mat* a cui viene assegnato un nome che richiama il numero con cui la struttura è stata etichettata all'interno dello *snapshot* e il numero dello *snapshot* stesso a cui essa appartiene.

struct_12_387.mat

Il file qui riportato, ad esempio, conterrà le informazioni della struttura dello *snapshot* 387, che è stata etichettata con il numero 12. Oltre ai file contenenti le informazioni peculiari di ogni struttura presente, per ogni *snapshot*, viene salvata un'immagine raffigurante la visualizzazione del campo di moto in cui sono presenti tutte le strutture individuate.

3.2.3 Scelta del *Reynolds shear stress magnitude parameter*

Il valore del *Reynolds shear stress magnitude parameter* imposto è frutto sia dell'analisi bibliografica, sia di quella della visualizzazione del campo di moto. Il parametro H determina l'intensità degli eventi che soddisfano la relazione utilizzata per individuare le zone coerenti del campo di moto: un valore ridotto del parametro H (per esempio 1) comporta un numero più elevato di strutture coerenti individuate, mentre un valore elevato di H ($3 \div 5$) lo riduce. Di seguito si riportano tre visualizzazioni istantanee del campo di moto, relative allo stesso *snapshot*, per tre diversi valori del parametro H . In queste sono evidenti le strutture coerenti individuate suddivise in quattro tonalità di colore, ognuno dei quali individua una tipologia di struttura coerente. Osservando le figure 3.1, 3.2, 3.3 si nota appunto come, per $H = 1$, le porzioni del campo di moto considerate coerenti siano ben più estese rispetto ai casi in cui H viene posto pari a 1.75 e 3.5.

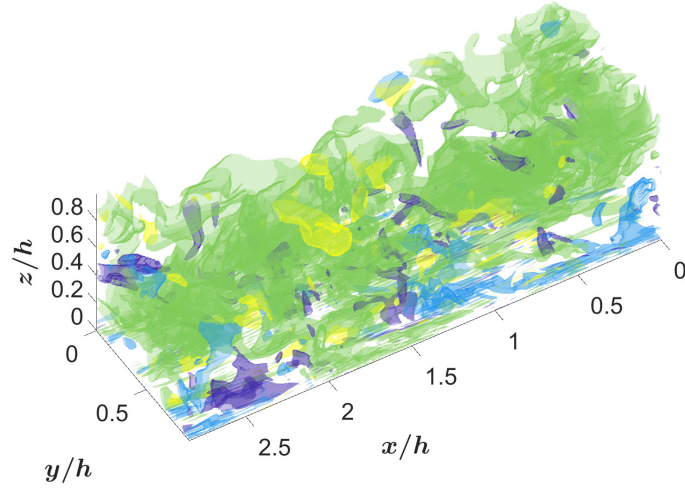


Figura 3.1: *snapshot 19* caso *wavy*, $H = 1$.

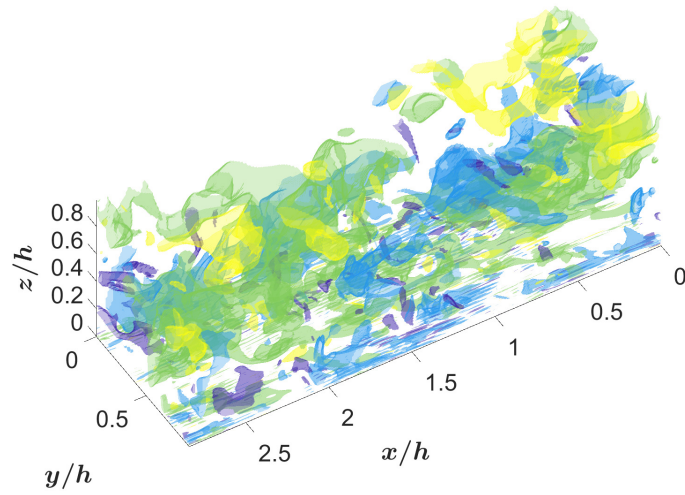


Figura 3.2: *snapshot 19* caso *wavy*, $H = 1.75$.

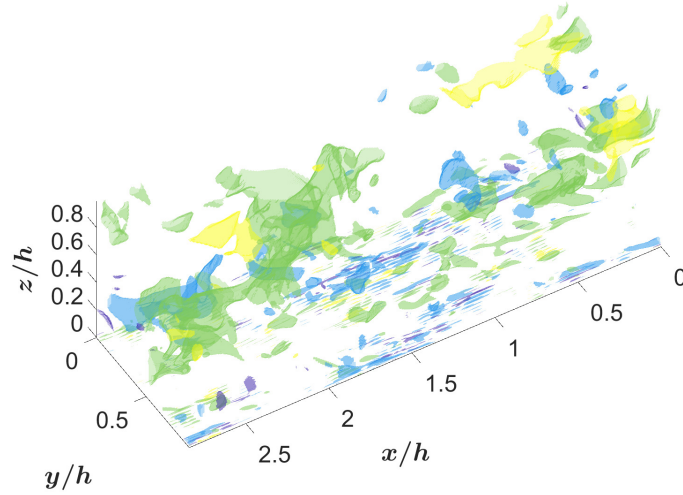


Figura 3.3: *snapshot* 19 caso *wavy*, $H = 3.5$.

Per questo caso studio si è deciso di porre il parametro H pari ad 1.75 in quanto questo permette di visualizzare un buon numero di strutture coerenti nei pressi della parete mantenendo comunque computazionalmente modesto il numero di strutture coerenti totali. Questo valore del *Reynolds shear stress magnitude parameter* è inoltre coerente con quello scelto da Lozano-Durán *et al.* [19].

3.3 Identificazione delle strutture, *Metodo 2*

L'individuazione delle strutture coerenti con il *Metodo 2* eredita dalla metodologia appena descritta l'intero procedimento, a esclusione del criterio con cui le zone del campo di moto vengono considerate coerenti.

3.3.1 Individuazione delle strutture

Per ognuno dei 400 *snapshots*, servendosi della stessa *function* `read_flow_inst`, vengono letti i file di output della simulazione DNS e i campi istantanei sono successivamente adattati alla griglia di calcolo. Noto il campo di velocità istantaneo nelle tre direzioni e calcolati i campi delle fluttuazioni di velocità, è quindi possibile applicare la definizione del *Q-factor* e individuare le zone coerenti del campo di

moto.

$$Q = \frac{1}{2}(\|\Omega\|^2 - \|S\|^2)$$

$$\|S\| = [tr(SS^t)]^{1/2}$$

$$\|\Omega\| = [tr(\Omega\Omega^t)]^{1/2}$$

Essendo che S ed Ω rappresentano rispettivamente la componente simmetrica e antisimmetrica del gradiente di velocità ($\nabla \vec{V}$) risulta necessario calcolare quest'ultimo.

$$\nabla \vec{V} = \begin{bmatrix} \frac{du}{dx} & \frac{du}{dy} & \frac{du}{dz} \\ \frac{dv}{dx} & \frac{dv}{dy} & \frac{dv}{dz} \\ \frac{dw}{dx} & \frac{dw}{dy} & \frac{dw}{dz} \end{bmatrix}$$

u , v e w rappresentano rispettivamente le componenti di velocità in direzione *streamwise*, *spanwise* e *wall-normal*. Per ogni componente di velocità viene quindi calcolato il gradiente sfruttando la *function gradient* già implementata in MATLAB che sfrutta uno schema alle differenze centrate per approssimare le derivate parziali all'interno del dominio mentre utilizza uno schema *forward* o *backward* ai bordi. Fatto ciò, per ogni punto del dominio di calcolo viene assemblata la matrice gradiente di velocità e con questa vengono calcolate prima le matrici S ed Ω , secondo le espressioni riportate, e successivamente il valore del Q -factor relativo al punto specifico del dominio di calcolo.

$$S = \frac{1}{2}(V_{i,j} + V_{j,i})$$

$$\Omega = \frac{1}{2}(V_{i,j} - V_{j,i})$$

Con $V_{i,j}$ componenti della matrice gradiente di velocità. Effettuando il procedimento appena descritto per ogni punto della griglia è possibile ottenere una matrice tridimensionale i cui elementi rappresentano i valori del Q -factor in tutti i punti del dominio.

Il passo successivo è quindi quello di individuare le zone coerenti all'interno del campo di moto. Secondo quanto riportato da Hunt *et al.* [21], sarebbe opportuno considerare coerente qualsiasi zona del campo di moto per cui il valore del Q -factor risulta essere maggiore di zero. Con l'obiettivo di ottenere un numero di strutture coerenti individuate il più possibile simile a quello ottenuto con il *Metodo 1*, in questo studio vengono considerate coerenti solo quelle zone del campo di moto in cui il Q -factor risulta essere maggiore di una determinata soglia che viene posta pari a

2500. A questo punto viene costruita una matrice binaria tridimensionale (Sel), con dimensioni pari a quelle della griglia di calcolo, che contiene 1 in quei punti della griglia dove $Q > 2500$ e 0 nei restanti. Esattamente come effettuato per il *Metodo 1* le strutture coerenti individuate vengono etichettate con un numero avendo cura di scartare quelle costituite da tre punti di griglia o meno.

3.3.2 Proprietà delle strutture e salvataggio dei dati

Una volta etichettate le strutture, vengono calcolate le loro proprietà peculiari che vengono salvate in una variabile di tipo *Struct* seguendo lo stesso principio di nomenclatura trattato nella sezione precedente. Come per il *Metodo 1*, per ogni *snapshot*, viene salvata un'immagine raffigurante tutte le strutture coerenti presenti nel campo di moto. In figura 3.4 viene riportato un esempio di visualizzazione del campo di moto relativo al medesimo *snapshot* del caso *wavy* di cui sono state riportate le visualizzazioni nella sezione precedente.

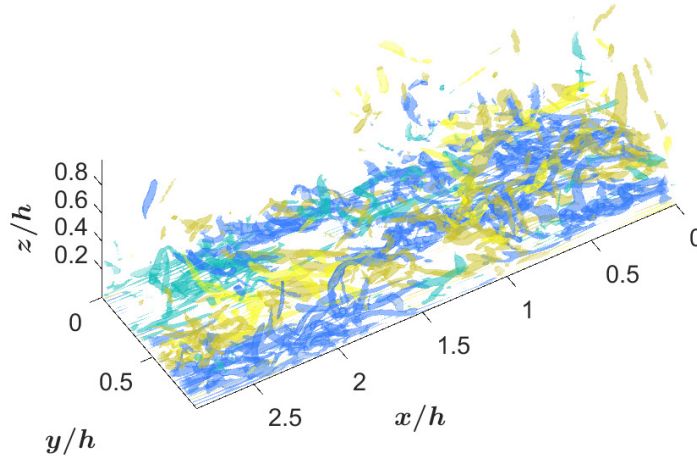


Figura 3.4: *snapshot* 19 caso *wavy*, $threshold = 2500$.

Capitolo 4

Tracking delle strutture coerenti

Volendo effettuare l'analisi statistica del *tracking* delle strutture coerenti, è necessario ripercorrere la loro evoluzione spazio-temporale. Come accennato nei capitoli precedenti, il *tracking* delle strutture verrà effettuato solamente per i casi *wavy* e *straight*, poiché il passo di discretizzazione temporale della simulazione con pareti lisce non permette la risoluzione temporale del campo di moto. Il procedimento verrà effettuato sia per le strutture identificate con il *Metodo 1* sia per quelle identificate con il *Metodo 2*.

4.1 Ricerca delle connessioni tra strutture di *snapshots* consecutivi

Il primo step per ricostruire l'evoluzione delle strutture coerenti consiste nell'identificare e selezionare le connessioni esistenti tra le strutture di due *snapshots* consecutivi. Per far ciò, ci si serve ancora una volta della *function* `read_flow_inst` che permette, con un procedimento identico a quello descritto per l'identificazione delle strutture coerenti, di leggere i file di output della simulazione DNS, individuare ed etichettare le strutture coerenti presenti in ogni *snapshot* e salvare le matrici *Sel* relative a ognuno di questi in una variabile *Cell* di MATLAB. Oltre alle matrici *Sel* vengono salvati, in un'altra variabile *Cell*, degli *array* numerici, di dimensioni pari a quelle del numero di strutture individuate per ogni *snapshot*, i cui elementi rappresentano la tipologia di ogni struttura individuata. Per far ciò, a ogni tipologia di struttura viene associato un numero identificativo, secondo quanto riportato in tabella 4.1.

1	<i>Outward</i>
2	<i>Sweep</i>
3	<i>Ejection</i>
4	<i>Inward</i>

Tabella 4.1: Numeri identificativi delle tipologie di strutture.

4.1.1 Ricerca delle connessioni

Ottenute le due variabili *Cell* appena citate, si passa all'individuazione delle connessioni tra le strutture coerenti di due *snapshots* consecutivi. Per ogni struttura coerente presente nello *snapshot* di partenza si crea una matrice binaria tridimensionale contenente elementi 1 solo nei punti della griglia occupati da quella determinata struttura. A questa matrice viene quindi sovrapposta la matrice *Sel* dello *snapshot* successivo in modo da individuare le strutture connesse a quella di partenza. In questa fase del *tracking* vengono ritenute connesse tutte le strutture che condividono almeno un punto della griglia di calcolo con la struttura di partenza, un esempio di connessione viene riportato in figura 4.1. I punti di colore blu rappresentano i nodi della griglia appartenenti alla struttura di partenza, quelli di colore verde appartengono alla struttura connessa, i punti di colore rosso sono invece quelli in comune alle due strutture e rappresentano appunto la connessione tra esse.

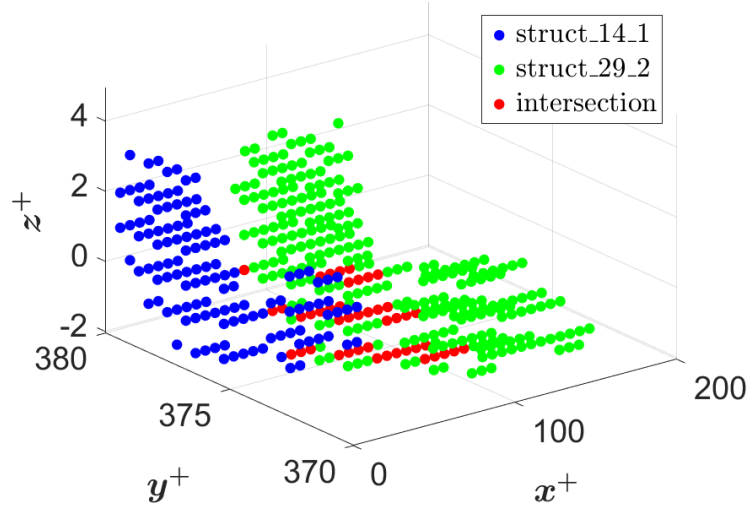


Figura 4.1: Connessione tra le strutture `struct_14_1` e `struct_29_2`.

Nella ricerca delle strutture connesse a quella di partenza potrebbe capitare che a questa non risulti connessa alcuna struttura o che addirittura questa sia connessa a

più strutture dello *snapshot* successivo. In caso siano presenti più connessioni, queste vengono tenute comunque in considerazione e il percorso spazio-temporale della struttura verrà valutato successivamente durante il processo di *tracking*. Trovate le strutture connesse a quella di partenza se ne calcola il volume che sarà fondamentale durante la selezione delle connessioni.

4.1.2 Selezione delle connessioni e salvataggio dati

Una volta note le strutture connesse a quella di partenza, le connessioni vengono selezionate sulla base di alcuni criteri come riportato da Lozano-Durán *et al.* [19]. I criteri su cui si basa la selezione delle connessioni tra le strutture sono i seguenti:

- Due strutture sono considerate connesse solamente se appartengono alla stessa tipologia;
- Due strutture sono considerate connesse solamente se la differenza di volume relativa tra le due è inferiore al 90%;
- Due strutture sono considerate connesse solamente se la differenza di volume relativa tra le due è superiore al 5%.

La scelta dei criteri di selezione delle connessioni garantisce che la struttura mantenga sempre la stessa tipologia durante la propria esistenza e che la connessione non sia frutto della discretizzazione del dominio di calcolo, tralasciando le connessioni in cui la differenza di volume è troppo grande o troppo piccola.

Scartate le connessioni che non rientrano nei criteri sopracitati, le rimanenti vengono salvate in una variabile di tipo *Cell*. Questa si presenta come una matrice composta da tre righe e da un numero di colonne pari al numero delle connessioni individuate. La prima riga contiene tutti i nomi, in formato di stringa, delle strutture coerenti dello *snapshot* di partenza per cui è stata individuata una connessione. Per facilitarne la lettura, viene riportata la sola parte "numerica" del nome della struttura: ad esempio, per la struttura `struct_14_1` si riporta solamente "14_1". La seconda riga invece contiene i nomi, sempre in formato di stringa, delle strutture connesse a quelle riportate nella prima riga. In caso una struttura dello *snapshot* di partenza presenti più connessioni che rispettano i criteri di selezione, il nome di quest'ultima apparirà in più colonne in modo da salvare tutte le connessioni individuate. La terza riga della matrice contiene dei fattori numerici, il cui valore è compreso tra 0 e 1, che corrispondono al rapporto, per ogni coppia di strutture connesse, tra il volume della struttura con volume minore e il volume di quella con volume maggiore. Questi fattori numerici saranno fondamentali nell'individuare il percorso spazio-temporale compiuto dalle strutture. La variabile *Cell*, di cui è stata appena descritta la composizione, viene salvata in un file `.mat` a cui viene assegnato un nome che richiama

il numero dei due *snapshots* consecutivi di partenza e arrivo delle connessioni.

`tree_stru_graf_2_3.mat`

Il file riportato, ad esempio, conterrà le connessioni delle strutture appartenenti agli *snapshots* 2 e 3. In tabella 4.2 vengono mostrate le prime sei colonne del file `tree_stru_graf_2_3.mat`. Leggendo il file per colonne è possibile osservare, ad esempio, come la struttura "5_2" dello *snapshot* 2 sia connessa alla struttura "12_3" dello *snapshot* 3 e che il fattore numerico relativo alla connessione è pari a 0.2000.

"5_2"	"6_2"	"30_2"	"32_2"	"42_2"	"45_2"
"12_3"	"13_3"	"30_3"	"41_3"	"57_3"	"28_3"
0.2000	0.6879	0.4783	0.6283	0.6303	0.5202

Tabella 4.2: `tree_stru_graf_2_3.mat`.

4.2 Individuazione dei rami primari

A questo punto dell'analisi, essendo note le connessioni tra le strutture coerenti di due *snapshots* consecutivi, si procede all'individuazione del percorso spazio-temporale delle strutture nell'ambito dei 400 *snapshots* presi in considerazione. Le connessioni tra le strutture devono quindi essere ordinate in rami che, come riportato da Lozano-Durán *et al.* [22], possono essere primari, se nascono e muoiono nel *background* turbolento, oppure secondari. In quest'analisi si decide di ricercare e analizzare statisticamente il comportamento dei rami primari in quanto ritenuti più rilevanti ai fini della descrizione del comportamento del flusso.

4.2.1 Utilizzo della *function* `digraph` e creazione del grafo

Con lo scopo di ordinare le connessioni tra *snapshots* consecutivi, ci si serve della *function* `digraph` già presente all'interno del software. Questa permette, dati in input tre vettori di uguale dimensione, di creare un grafo direzionale in cui il primo vettore contiene i nodi di partenza e il secondo i nodi di arrivo. Ciò significa che per ogni coppia di valori, ovvero componenti col medesimo indice dei primi due vettori, viene creata una connessione a cui è possibile attribuire un valore numerico noto come peso della connessione. I valori dei pesi sono contenuti nel terzo vettore di input, a ogni coppia di valori è associata la componente di quest'ultimo contraddistinta dallo stesso indice a cui appartengono i nodi di partenza e arrivo nei rispettivi vettori. Creato il grafo, richiamando la *function* `addedge`, è possibile aggiungere a

questo nuovi nodi, sia di partenza sia di arrivo, e quindi nuove connessioni, ognuna contraddistinta dal proprio peso. La variabile di tipo *Graph*, in cui il programma salva i nodi, le connessioni e i pesi, permette di riconoscere in automatico se un nodo aggiunto al grafo era già presente cosicché il grafo non presenti nodi doppi. Inoltre, all'interno del grafo, ogni nodo può presentare più connessioni contemporaneamente. Le peculiarità del grafo appena descritte lo rendono uno strumento molto efficace per l'analisi delle connessioni tra le strutture. Si procede quindi con la creazione del grafo utilizzando come vettori di input le tre righe della matrice `tree_stru_graf_1_2.mat`: in questo modo è possibile salvare e visualizzare le connessioni tra le strutture dei primi due *snapshots* presi in considerazione. I nodi di partenza del grafo sono rappresentati dalle strutture dello *snapshot* 1 mentre quelli di arrivo sono rappresentati dalle strutture dello *snapshot* 2. I pesi attribuiti alle connessioni sono invece rappresentati dai rapporti tra i volumi delle strutture connesse presenti nella terza riga del file. Una volta creato il grafo, si aggiungono i nodi e i pesi contenuti nel file `tree_stru_graf_2_3.mat` seguendo lo schema appena descritto: in questo modo è possibile individuare le connessioni che una struttura presente nel secondo *snapshot* possiede con strutture del primo e del terzo. Continuando ad aggiungere in coda al grafo i file contenenti le connessioni tra strutture di *snapshots* successivi, si ottiene il grafo completo di tutte le strutture connesse presenti nei 400 *snapshots* presi in considerazione.

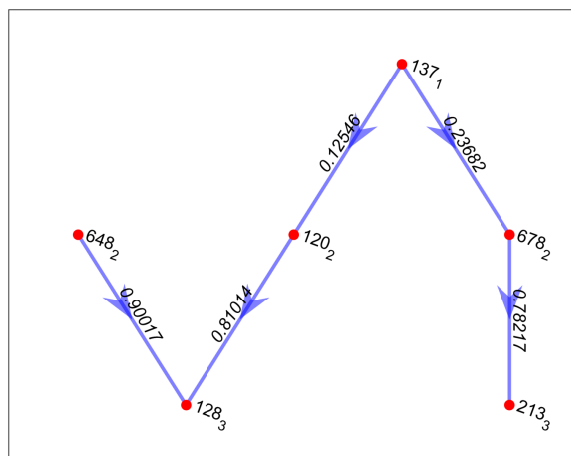


Figura 4.2: Esempio di grafo.

In figura 4.2 è riportata una parte del grafo che permette di apprezzare alcune connessioni tra le strutture appartenenti ai primi tre *snapshots*. È possibile osservare come la struttura "137_1" presenti ben due connessioni con strutture appartenenti

al secondo *snapshot*; la struttura "648_2", invece, non ha connessioni con strutture appartenenti allo *snapshot* 1. Si osserva inoltre come la struttura "128_3" presenti ben due connessioni con strutture del secondo *snapshot* (la "648_2" e la "120_2").

4.2.2 Dal grafo ai rami primari

Il grafo appena ottenuto permette quindi di individuare facilmente i rami primari. Presa una struttura di partenza, si considera connessione primaria con una struttura dello *snapshot* successivo quella connessione che presenta la più piccola differenza di volume tra le due strutture connesse. In altre parole, i rami primari vengono individuati come quei percorsi spazio-temporali delle strutture che più di tutti mantengono invariato il volume della struttura di partenza. È qui che entrano in gioco i rapporti tra i volumi delle strutture connesse che rappresentano i pesi delle connessioni del grafo. Avendo calcolato quei fattori numerici come il rapporto tra il volume della struttura connessa con volume minore e il volume di quella con volume maggiore, le connessioni che garantiscono la più piccola differenza di volume tra le due strutture connesse saranno quelle che presentano il rapporto tra i volumi più vicino all'unità. Se una struttura presenta, ad esempio, due connessioni con strutture dello *snapshot* successivo, la connessione da tenere in considerazione per individuare il ramo primario sarà quella che presenta il maggiore peso tra i due, ovvero il rapporto tra i volumi più vicino al valore unitario. In questo modo è possibile individuare i rami primari delle strutture nel campo di moto. Per ogni struttura presente nel grafo e appartenente ai primi 390 *snapshots* dei 400 presi in considerazione, si crea un vettore che presenta, nella posizione contraddistinta dall'indice 1, l'etichetta della medesima struttura. A questo punto, servendosi della *function outedges*, vengono individuate le strutture connesse a quella di partenza e i pesi delle connessioni. Tra le strutture connesse individuate viene presa in considerazione solo quella che presenta la connessione distinta dal peso maggiore, l'etichetta della struttura così individuata viene copiata nel vettore appena creato nella posizione contraddistinta dall'indice 2. Procedendo in questo modo, è possibile risalire ai rami primari che hanno come origine tutte le strutture presenti nei primi 390 *snapshots*. In caso la struttura, la cui etichetta è stata copiata nel vettore, non presentasse alcuna connessione con strutture dello *snapshot* successivo, il ramo viene considerato interrotto e nel vettore vengono inseriti zeri fino a quando il vettore non raggiunge la dimensione del numero di *snapshots* considerati, ossia 400. I vettori creati vengono inseriti come righe di una matrice denominata *PATH_3D* che al termine del processo conterrà tutti i rami primari con origine ogni struttura presente nei primi 390. La scelta di considerare come strutture di partenza solamente quelle presenti nei primi 390 *snapshots* deriva dal fatto che i rami primari originati da strutture presenti negli *snapshots* successivi si sarebbero rivelati lunghi solo poche istantanee e quindi non di particolare interesse ai fini dell'analisi.

Prendendo sempre come esempio la figura 4.2, consideriamo che la struttura di partenza del ramo primario sia la struttura "137_1". Nel vettore appositamente creato si inserisce nella posizione con indice 1 l'etichetta "137_1". Richiamando la *function* *outedges* si ottengono in output le due strutture a questa connessa ("120_2" e "678_2") e il peso delle due connessioni (0.12546 e 0.23682). Seguendo il ragionamento appena illustrato, essendo che la struttura "678_2" presenta una connessione con la struttura di partenza con un peso maggiore rispetto a quella con la struttura "120_2", l'etichetta copiata in posizione 2 nel vettore sarà "678_2". Quest'ultima struttura presenta una sola connessione e sarà quindi l'etichetta relativa a quest'ultima ad essere copiata in posizione 3.

4.2.3 *Postprocessing* della matrice *PATH_3D*

La matrice *PATH_3D* contiene tutti i rami primari originati a partire da ogni struttura presente nei primi 390 *snapshots*. A questo punto dell'analisi, per come la matrice è stata creata, vi saranno sicuramente alcuni rami ridondanti all'interno di quest'ultima che devono essere opportunamente eliminati prima di condurre l'analisi statistica.

Pruning dei rami primari

Per spiegare il concetto di *pruning* si osserva un'altra parte di grafo, riportata in figura 4.3.

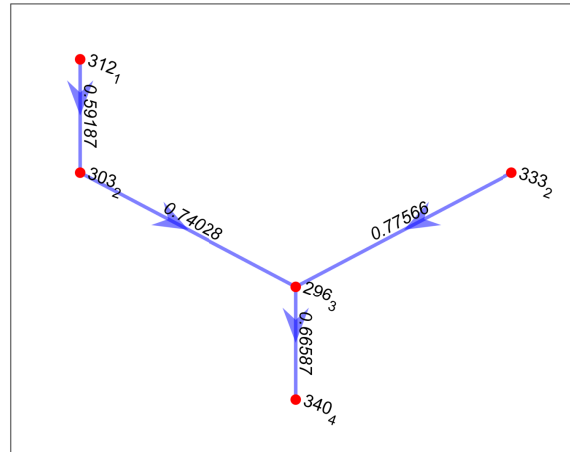


Figura 4.3: Esempio di ramo soggetto a *pruning*.

Se si considera come struttura di partenza la struttura "312_1" le prime cinque colonne della riga della matrice $PATH_3D$ ad essa relativa sono:

312_1	303_2	296_3	340_4	0
-------	-------	-------	-------	---

Quando invece la struttura di partenza del ramo è la "303_2" le prime cinque colonne della riga della matrice $PATH_3D$ ad essa relativa si presentano come:

303_2	296_3	340_4	0	0
-------	-------	-------	---	---

Il secondo ramo primario riportato rappresenta una parte di quello precedente e deve quindi essere eliminato dalla matrice $PATH_3D$ in quanto non rappresenta di per sé un ramo primario del campo di moto, eliminando questi rami primari si effettua il processo di *pruning*. I rami primari che non vengono interessati dal *pruning* vengono salvati in una matrice con la stessa struttura dalla matrice $PATH_3D$, ma che prende il nome di $PATH_3D_corr$.

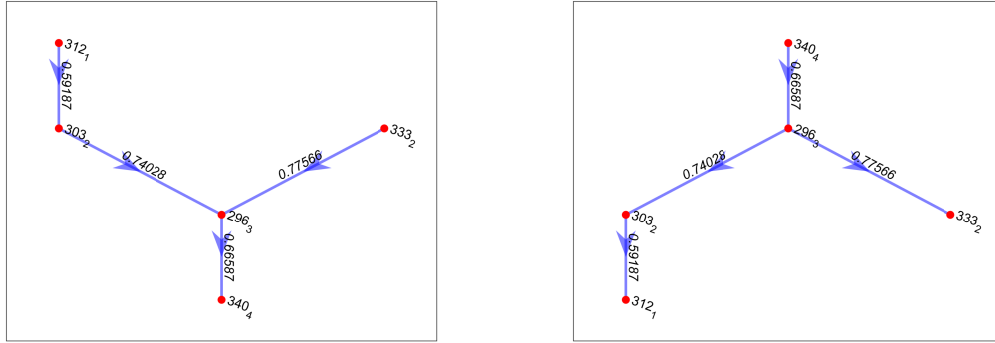
Trattamento dei rami *incoming* e *outgoing*

Eliminati i rami doppi, risulta necessario intervenire quando si verificano i fenomeni di *split* e *merger*. Lo *split* si verifica quando una struttura presenta più connessioni con strutture dello *snapshot* successivo, mentre il fenomeno di *merger* si verifica quando una struttura presenta più connessioni con strutture dello *snapshot* precedente. *Split* e *merger* danno rispettivamente origine a rami *outgoing* e *incoming* che si distaccano dal ramo primario o si uniscono a questo.

Per come è stato impostato il processo di individuazione dei rami primari, il fenomeno di *split* e di conseguenza i rami *outgoing* vengono correttamente scartati. Questo perché, quando si individuano i rami primari a partire da ogni struttura coerente presente nei primi 390 *snapshots*, se una struttura presenta due o più connessioni con strutture dello *snapshot* successivo (figura 4.3), viene selezionata la connessione che presenta il peso maggiore e quindi il ramo primario, mentre quelli *outgoing* vengono scartati.

Il caso dei rami *incoming* richiede invece una maggiore attenzione. Facendo sempre riferimento alla figura 4.3 è possibile notare come i rami primari originati dalla struttura "312_1" e dalla struttura "333_2" si uniscono in un unico ramo in quanto entrambi presentano una connessione con la struttura "296_3". In questo caso il procedimento così impostato individua come rami primari sia quello con origine la struttura "312_1" sia quello con origine la struttura "333_2". Per ovviare a questo problema, si sfrutta la *function* `flipedge` già implementata nel software, che permette, dato un grafo direzionale, di restituirne un altro con i medesimi nodi ma con le connessioni cambiate di segno. Se ora si applica al grafo invertito il procedimento

di ricerca dei rami primari, questo restituirà tutti i rami primari che hanno come origine la totalità delle strutture presenti nei primi 390 *snapshots* ma che procedono indietro nel tempo. La matrice che ospita i rami primari viene denominata in questo caso *PATH_3D_reverse* e ha la stessa struttura di *PATH_3D*. L'individuazione dei rami primari nel grafo invertito permette di trattare il fenomeno di *merger* come veniva trattato il fenomeno di *split* precedentemente, infatti, se procedendo in avanti nel tempo due strutture presentano una connessione con la stessa struttura dello *snapshot* successivo, procedendo indietro nel tempo è la singola struttura ad avere due connessioni con strutture dello *snapshot* "successivo". La figura 4.4 riporta un esempio di grafo e la sua controparte invertita. Da questa è possibile notare che nel grafo originale la struttura "303_2" e la struttura "333_2" presentano entrambe una connessione con la struttura "296_3", mentre invertendo il verso delle connessioni risulta che la struttura "296_3" è connessa sia alla struttura "303_2", sia alla struttura "333_2".



(a) Grafo originale

(b) Grafo invertito

Figura 4.4: Esempio di inversione del grafo.

È quindi chiaro che il processo di individuazione dei rami primari originale permette facilmente di eliminare i rami *outgoing*, mentre l'utilizzo del grafo invertito permette di eliminare quelli *incoming*. Con l'obiettivo di ottenere all'interno della matrice *PATH_3D_corr* i soli rami primari, escludendo quelli *outgoing* e *incoming*, si considera un ramo primario solo se presente sia nella matrice *PATH_3D*, sia in quella *PATH_3D_reverse*. Ottenute le due matrici dai rispettivi grafi, queste vengono depurate dai rami doppi ottenendo rispettivamente le matrici *PATH_3D_corr* e *PATH_3D_reverse_corr*. A questo punto i rami primari presenti nella matrice *PATH_3D_reverse_corr* vengono riordinati sulla base del numero di *snapshot* crescente, in modo che questi procedano avanti nel tempo. Essendo ora i rami primari

delle due matrici nello stesso ordine temporale, è possibile eliminare tutte le righe della matrice *PATH_3D_corr* che non sono presenti in *PATH_3D_reverse_corr*.

4.3 Creazione e salvataggio dei percorsi

Ottenuta la matrice *PATH_3D_corr*, contenente i rami primari del campo di moto privi di ridondanze, si procede con la creazione dei percorsi spazio-temporali delle strutture coerenti, comunemente detti *paths*. La creazione dei *paths* prevede, per ogni ramo primario individuato, di salvare, in una variabile di tipo *Struct*, le proprietà delle strutture coerenti che formano il ramo.

Le proprietà delle strutture di interesse ai fini dell'analisi statistica del *tracking* sono:

- Volume;
- Dimensioni del *bounding box* contenente la struttura: note le coordinate dei punti che costituiscono la struttura si effettua la sottrazione tra il valore massimo e minimo delle coordinate lungo le tre direzioni ottenendo così le dimensioni del più piccolo parallelepipedo che contiene la struttura;
- Coordinate del baricentro della struttura;
- Coordinate del baricentro della struttura relative a quelle della struttura di origine del ramo primario;
- Fluttuazioni medie di velocità;
- Tipologia della struttura.

Le proprietà sopra riportate rappresentano i *fields* delle variabili di tipo *Struct* in cui vengono salvati i percorsi spazio-temporali delle strutture. Per ogni riga della matrice *PATH_3D_corr* viene creata una variabile di tipo *Struct* a cui è assegnato un nome che richiama il numero della riga della matrice a cui quel *path* si riferisce. Alla prima riga della matrice corrisponderà la variabile *Path_3D_1* e così per tutte le altre. Ogni riga esaminata viene letta per colonne, a ognuna di queste corrisponde un'etichetta che identifica una struttura parte del ramo primario relativo a quella riga della matrice. L'etichetta permette di richiamare i file contenenti le proprietà delle strutture coerenti che erano stati opportunamente salvati in fase di identificazione di quest'ultime. Richiamato il file, vengono estratte da questo le informazioni di interesse e vengono salvate nella riga della variabile *Path_3D_n* il cui indice rispecchia quello che l'etichetta della struttura possedeva all'interno della riga della matrice *PATH_3D_corr*. Per esempio, se l'etichetta della struttura si trova in posizione 1 all'interno della riga, allora le informazioni relative a quella

struttura verranno salvate nella prima riga della variabile `Path_3D_n`. Effettuato questo procedimento per ogni colonna della riga esaminata contenente un'etichetta, la variabile di tipo *Struct* viene salvata in un file `.mat` con lo stesso nome che era stato in precedenza assegnato alla variabile. Consideriamo ora la nona riga della matrice *PATH_3D_corr*, le sue prime cinque colonne si presentano come:

75_1	90_2	536_3	0	0
------	------	-------	---	---

Quando viene letta la riga numero nove della matrice *PATH_3D_corr* viene creata la variabile `Path_3D_9` e vengono richiamati i file `struct_75_1`, `struct_90_2` e `struct_536_3`, ovvero i file che contengono le proprietà delle tre strutture coerenti che formano il ramo primario relativo alla nona riga della matrice. Il risultato del procedimento appena presentato è che la variabile *Struct Path_3D_9* sarà composta da tre righe: la prima contenente le proprietà della struttura "75_1", la seconda le proprietà della struttura "90_2" e la terza quelle della struttura "536_3".

Capitolo 5

Analisi statistica della morfologia delle strutture coerenti

Identificate e salvate le strutture coerenti come trattato nel terzo capitolo, vengono presentati i risultati dell'analisi statistica. Prima di tutto però si illustrano gli strumenti utilizzati per condurre l'analisi, il processo di *preprocessing* dei dati e la suddivisione in gruppi delle strutture.

Per condurre l'analisi statistica si sfruttano la *probability density function* (p.d.f.) e la *joint probability density function* (j.p.d.f.). La *probability density function* è una funzione che descrive la distribuzione di probabilità di una variabile casuale e continua ed è una funzione tale per cui il suo integrale su un determinato intervallo fornisce la probabilità che la variabile di interesse ricada in quell'intervallo. La *joint probability density function* invece è una funzione che descrive la distribuzione di probabilità di due o più variabili casuali e continue indicando la probabilità che queste assumano contemporaneamente determinati valori.

Con l'obiettivo di utilizzare le funzioni appena presentate per condurre l'analisi statistica della morfologia delle strutture coerenti è necessario effettuare una fase di *preprocessing*. Per ognuna delle proprietà delle strutture coerenti di interesse viene creato un vettore e vengono aperti i file relativi ad ognuna delle strutture coerenti identificate. Le proprietà delle strutture vengono allora salvate nei rispettivi vettori in modo da rendere i dati di più semplice gestione per condurre l'analisi statistica. Essendo l'obiettivo dell'analisi quello di valutare l'effetto che la manipolazione delle pareti ha sul campo di moto, risulta interessante indagare questo effetto a seconda della distanza dalla parete a cui la struttura è situata. Per questo motivo le strutture coerenti vengono divise in due gruppi.

- *Wall attached structures*: strutture coerenti il cui punto di minima distanza dalla parete è situato a meno di $20l_\tau$ da quest'ultima;

- *Wall detached structures*: strutture coerenti il cui punto di minima distanza dalla parete è situato a più di $20l_\tau$ da quest'ultima.

Ad entrambi i gruppi di strutture inoltre vengono applicati due filtri in modo tale da escludere dall'analisi le strutture coerenti che non rispettano determinati requisiti.

- Filtro sulle strutture planari: vengono escluse dall'analisi tutte le strutture che hanno una delle tre dimensioni (intese come dimensioni del *bounding box* contenete la struttura) pari a quella di un punto della griglia. In questo modo vengono escluse dall'analisi quelle strutture che non sono tridimensionali;
- Filtro sulla massima posizione in direzione *wall-normal*: vengono escluse dall'analisi tutte le strutture che presentano almeno un punto con posizione *wall-normal* pari al limite superiore del dominio, ovvero la metà del canale. In questo modo vengono escluse dall'analisi quelle strutture che giacciono a cavallo della mezzeria del canale e di cui ne è stata identificata di conseguenza solamente la parte rientrante nel dominio di calcolo.

A questo punto, dopo un'analisi preliminare necessaria per la validazione del *dataset*, vengono riportati i risultati dell'analisi statistica separatamente per le strutture coerenti identificate con il *Metodo 1* e per quelle identificate con il *Metodo 2*.

5.1 Validazione del *dataset* DNS

Prima di procedere con l'analisi statistica vera e propria si illustrano i risultati dell'analisi di confronto tra il caso *smooth* e il caso L950 relativo allo studio condotto da Lozano-Durán *et al.* [19]. Durante il confronto è necessario tenere in considerazione il fatto che lo studio appena citato è stato condotto a numero di Reynolds di attrito molto più elevato, con una risoluzione della griglia nettamente superiore e con un *dataset* molto più esteso rispetto a quanto effettuato nel seguente elaborato.

Durante il processo di validazione le strutture coerenti verranno suddivise sia sulla base della distanza dalla parete, come riportato precedentemente, sia sulla base della tipologia. A questo proposito verrà rispettata la nomenclatura proposta da Lozano-Durán *et al.* [19] per cui vengono indicati con Q^- le tipologie di strutture coerenti che hanno il prodotto tra le componenti delle fluttuazioni di velocità in direzione *streamwise* e *wall-normal* negativo: *ejection* ($Q2$) e *sweep* ($Q4$); mentre vengono indicati con Q^+ le tipologie di strutture coerenti che hanno il prodotto di segno positivo: *outward* ($Q1$) e *inward* ($Q3$).

5.1.1 Confronto della distribuzione delle strutture coerenti

Con l'obiettivo di ovviare ai problemi di risoluzione della griglia, le strutture coerenti con un volume inferiore a $30^3 l_\tau^3$ vengono scartate. Nonostante queste rappresenti-

no il 73% del numero delle strutture individuate, contribuiscono al volume totale solamente per il 5%, risultati in linea con quanto riportato da Lozano-Durán *et al.* [19]. La figura 5.1 mostra la j.p.d.f. della minima e massima distanza da parete

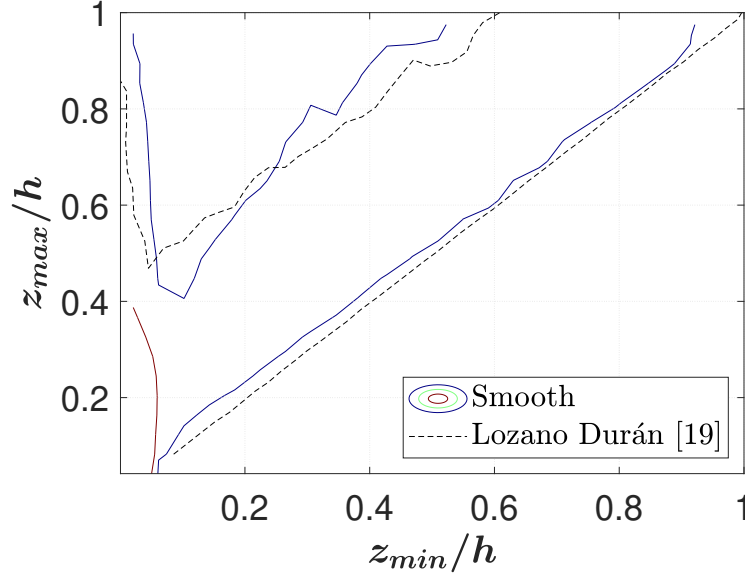


Figura 5.1: J.p.d.f. della minima e massima distanza dalla parete normalizzate con la semi altezza del canale, strutture Q^- .

delle strutture coerenti di tipo Q^- e permette di apprezzare come queste siano suddivisibili in due famiglie. La prima formata dalle strutture che occupano la stretta banda verticale vicino alla parete e che rappresenta la famiglia delle *wall attached structures*. La seconda formata invece dalle *wall detached structures* contenute nella banda più larga parallela alla bisettrice del primo quadrante [19]. Le isolinee riportate, contenenti rispettivamente il 50% e il 98% della p.d.f., mostrano una buona aderenza ai risultati ottenuti da Lozano-Durán *et al.* [19].

	N_1	N_2	N_3	N_4	V_1	V_2	V_3	V_4
<i>Lozano D. (all)</i>	0.18	0.33	0.19	0.31	0.004	0.056	0.006	0.025
<i>Lozano D. (att.)</i>	0.02	0.15	0.006	0.13	0.000	0.053	0.000	0.014
<i>All s.</i>	0.19	0.34	0.11	0.36	0.005	0.029	0.002	0.025
<i>Attached s.</i>	0.005	0.15	0.003	0.12	0.000	0.019	0.000	0.011

Tabella 5.1: Confronto della distribuzione della tipologia in numero e volume.

In tabella 5.1 viene riportato il confronto tra le distribuzioni della tipologia delle strutture coerenti sia in numero, espressa come frazione rispetto alla totalità delle

strutture individuate, sia in volume, espressa come frazione rispetto al volume del canale preso in esame. Le strutture $Q2$ e $Q4$ che appartengono alla famiglia delle *wall attached structures* rappresentano il 43% del numero totale delle strutture Q^- ma contribuiscono al 55% del loro volume. Le strutture $Q1$ e $Q3$ che appartengono a questa famiglia risultano invece essere molto poche in quanto rappresentano il 2% del numero totale delle strutture Q^+ e contribuiscono solamente al 5% del loro volume. Anche in questo caso i risultati riportati mostrano una buona coerenza con quelli ottenuti da Lozano-Durán *et al.* [19] a meno del fatto che, nello studio appena citato, il volume occupato dalle strutture $Q2$ e $Q4$ *attached* occupa l'80% del volume occupato dalle strutture Q^- . Le strutture Q^- individuate, nei pressi della parete, presentano quindi statisticamente un volume inferiore rispetto a quelle individuate da Lozano-Durán.

5.1.2 Confronto della morfologia delle strutture coerenti

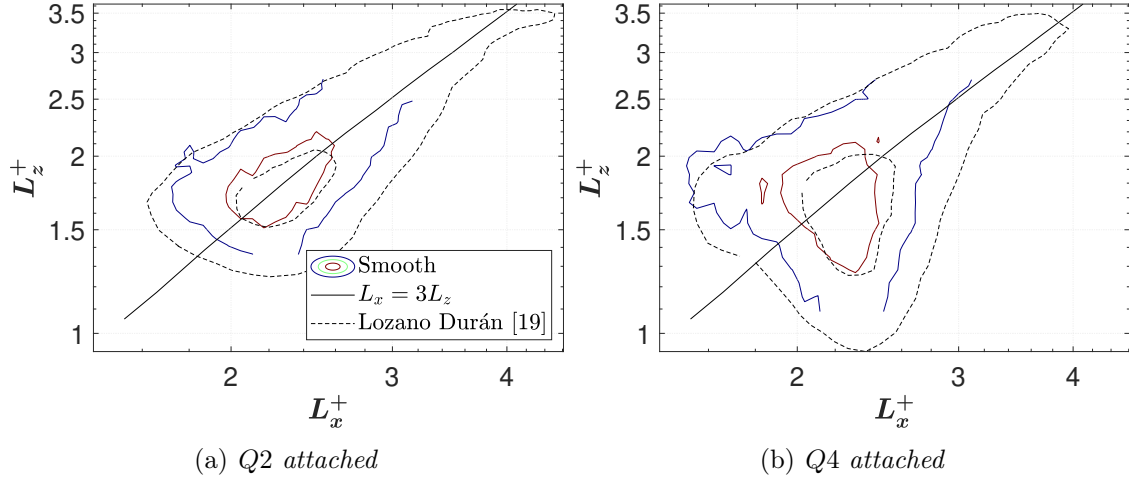


Figura 5.2: J.p.d.f. del logaritmo della dimensione *streamwise* e del logaritmo della dimensione *wall-normal*.

Le j.p.d.f. riportate nelle figure 5.2, 5.3, 5.4 mostrano tutte una buona aderenza ai risultati ottenuti da Lozano-Durán *et al.* [19] a meno di quella riportata in figura 5.4 (b). Le distribuzioni di figura 5.2 e figura 5.3 seguono le leggi lineari

$$L_x \approx 3L_z \quad L_y \approx L_z$$

già riportate da Álamo *et al.* [23] e che si confermano quindi indipendenti dal numero di Reynolds.

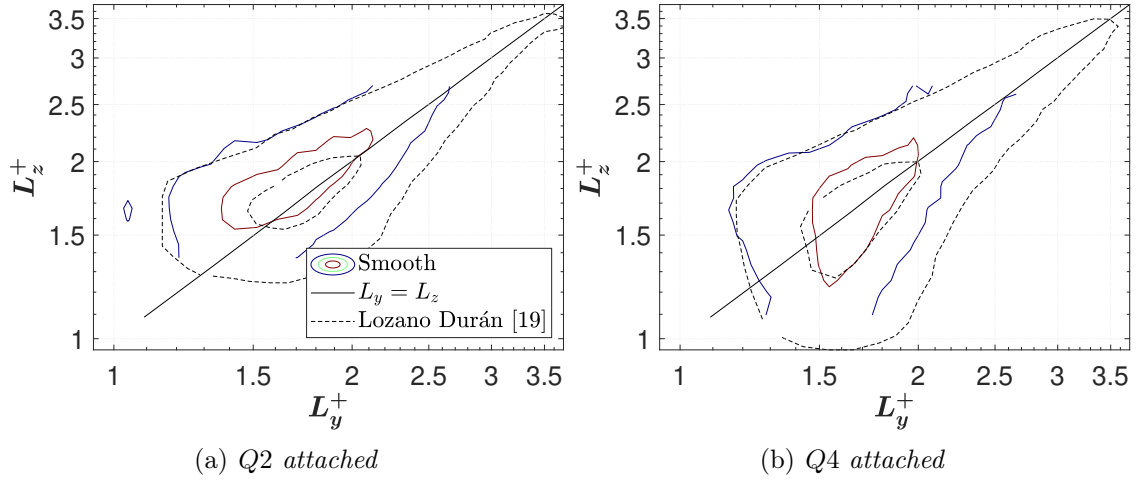


Figura 5.3: J.p.d.f. del logaritmo della dimensione *spanwise* e del logaritmo della dimensione *wall-normal*.

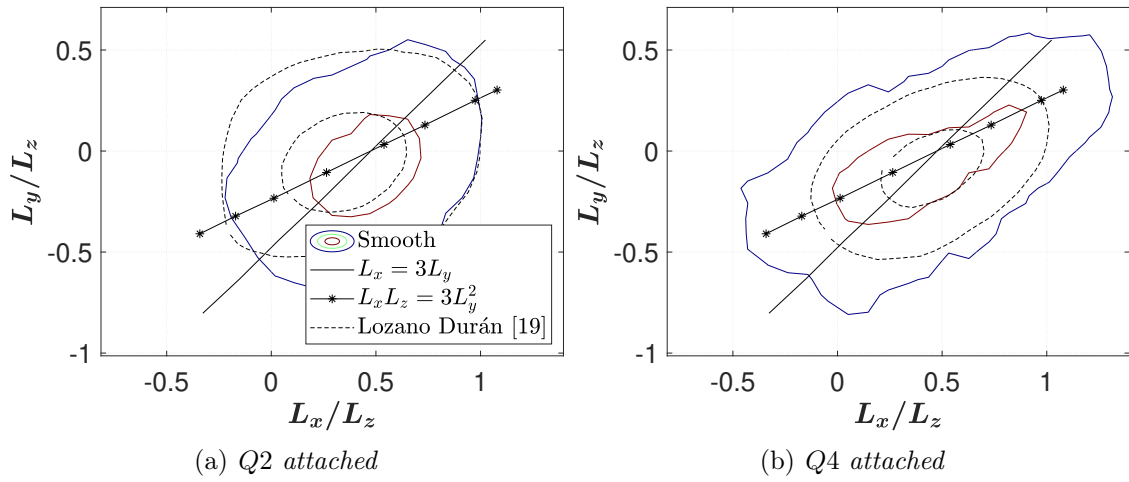


Figura 5.4: J.p.d.f. del logaritmo della dimensione *streamwise* e del logaritmo della dimensione *spanwise* normalizzate con la dimensione *wall-normal*.

La distribuzione di figura 5.4 mostra invece come la relazione tra L_x ed L_y a fissata L_z non sia lineare bensì del tipo $L_x L_z \propto L_y^2$.

$$L_x L_z \approx 3L_y^2$$

Il fatto che la distribuzione si allinei ad una legge non lineare, anche in questo caso indipendente dal numero di Reynolds, implica che vi sia più variazione in L_x rispetto a quanto ve ne sia in L_y . Questo potrebbe essere dovuto al diverso meccanismo di

deformazione delle strutture coerenti lungo le direzioni *streamwise* e *spanwise*. Un modello plausibile prevede che le strutture vengano deformate in direzione *streamwise* dall'attrito mentre dalla debole dispersione del background turbolento in direzione *spanwise* [19].

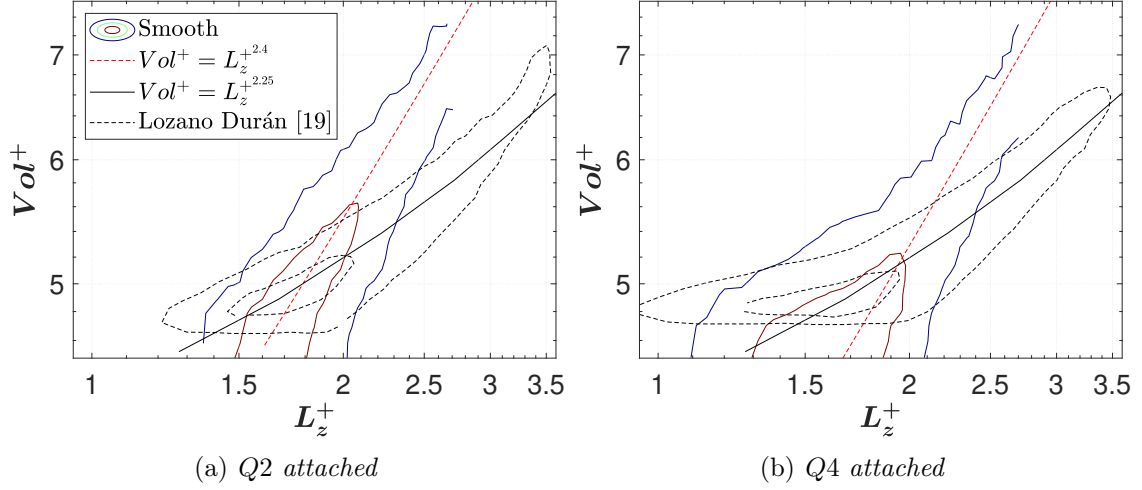


Figura 5.5: J.p.d.f. del logaritmo della dimensione *wall-normal* e del logaritmo del volume.

La j.p.d.f. di figura 5.5 mostra come la distribuzione del caso *smooth* risulti allineata alla legge $Vol^+ = L_z^{+2.4}$ mentre quella riportata da Lozano-Durán *et al.* [19] risulta allineata alla legge $Vol^+ = L_z^{+2.25}$. Un simile risultato è stato ottenuto anche da Álamo *et al.* [23]: $Vol^+ = L_z^{+2}$. La discrepanza appena individuata potrebbe essere frutto del differente numero di Reynolds a cui sono state condotte le diverse simulazioni.

In conclusione i risultati ottenuti mostrano una buona aderenza con quelli riportati da Lozano-Durán *et al.* [19]. I risultati ottenuti non presentano comunque lo stesso livello di convergenza di quelli con cui sono stati confrontati essendo stati ottenuti analizzando solamente 400 *snapshots* rispetto ai 10^4 utilizzati da Lozano-Durán *et al.* [19].

5.2 Analisi delle strutture identificate con il *Metodo 1*

Validato il *dataset*, in prima battuta si riporta l'analisi della distribuzione delle strutture in numero, volume e tipologia a diverse distanze dalla parete, si passa quindi in un secondo momento alla vera e propria analisi della morfologia delle strutture coe-

renti con l'ausilio della *probability density function* e della *joint probability density function* per poi effettuare la medesima analisi per le differenti tipologie di strutture.

5.2.1 Analisi statistica della distribuzione delle strutture coerenti

La tabella 5.2 mostra come le strutture individuate con il *Metodo 1* in generale (*All structures*) risultino essere in numero maggiore nei casi manipolati rispetto al caso di parete liscia, inoltre queste occupano un volume inferiore. Nei pressi della parete (*wall attached structures*) i casi manipolati mostrano un numero di strutture sette volte superiore rispetto al caso di parete liscia, le strutture del caso *straight* occupano un volume inferiore al caso di parete liscia così come il caso *wavy* in cui però il volume occupato risulta essere superiore rispetto al caso *straight*. In tabella 5.3 è

	<i>Smooth</i>	<i>Straight</i>	<i>Wavy</i>
<i>All structures</i>	116861	315273	305448
<i>All s. volume</i>	$1.0897 \cdot 10^{10} l_\tau^3$	$9.6739 \cdot 10^9 l_\tau^3$	$9.2732 \cdot 10^9 l_\tau^3$
<i>wall attached structures</i>	31759	224817	227735
<i>Attached s. volume</i>	$5.2040 \cdot 10^9 l_\tau^3$	$4.9985 \cdot 10^9 l_\tau^3$	$5.1869 \cdot 10^9 l_\tau^3$
<i>wall detached structures</i>	85102	90456	77713
<i>Detached s. volume</i>	$5.6931 \cdot 10^9 l_\tau^3$	$4.6753 \cdot 10^9 l_\tau^3$	$4.0863 \cdot 10^9 l_\tau^3$

Tabella 5.2: Numero di strutture e volume occupato, *Metodo 1*.

riportata la densità di strutture nei pressi della parete, questa viene calcolata come il rapporto tra il numero di strutture e il volume da esse occupato e rappresenta la quantità di strutture presenti per unità di volume (l_τ^3). I casi manipolati presentano una densità sette volte superiore al caso di parete liscia, il caso *wavy* presenta una densità inferiore del 3% rispetto al caso *straight*.

<i>Smooth</i>	<i>Straight</i>	<i>Wavy</i>
$6.1028 \cdot 10^{-6}$	$4.4977 \cdot 10^{-5}$	$4.3906 \cdot 10^{-5}$

Tabella 5.3: Numero di strutture per unità di volume (N/l_τ^3) nei pressi della parete.

Lontano dalla parete (*wall detached structures*) il caso *straight* presenta un maggiore numero di strutture sia rispetto al caso *smooth* che rispetto al caso *wavy* che risulta essere quello con il minore numero di strutture in assoluto e anche con il minore volume occupato. Dalla tabella 5.4 si evince che i casi manipolati presentano una densità di strutture lontano da parete superiore del 30% rispetto al caso *smooth*.

<i>Smooth</i>	<i>Straight</i>	<i>Wavy</i>
$1.4948 \cdot 10^{-5}$	$1.9348 \cdot 10^{-5}$	$1.9018 \cdot 10^{-5}$

Tabella 5.4: Numero di strutture per unità di volume (N/l_τ^3) lontano della parete.

La differenza tra il caso *straight* e il caso *wavy* risulta essere invece del 2%. I casi manipolati presentano una maggiore densità di strutture rispetto al caso di parete liscia e la differenza risulta essere più marcata nei pressi della parete, tra i casi manipolati si riscontra una lieve differenza per cui il caso *wavy* risulta avere una minore densità di strutture rispetto al caso *straight*. I risultati riscontrati con questa metodologia sono coerenti col meccanismo di frammentazione delle strutture ipotizzato.

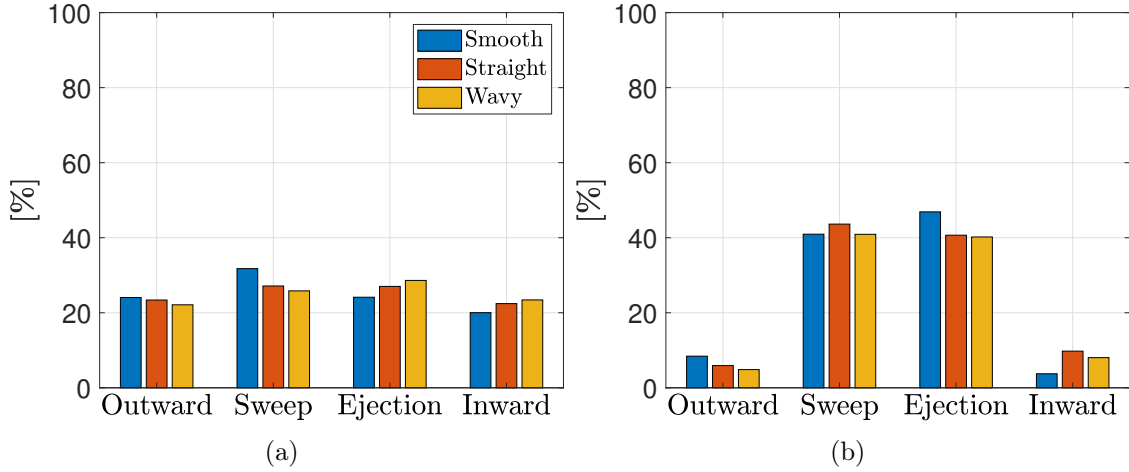


Figura 5.6: Distribuzione della tipologia in numero (a) e volume (b), *all structures*, *Metodo 1*.

In figura 5.6, 5.7, 5.8 viene riportato lo studio della distribuzione della tipologia delle strutture in numero, espressa come percentuale sul totale delle strutture individuate, e in volume, espressa come percentuale sul volume totale delle strutture individuate. Nei pressi della parete (Figura 5.7) è possibile apprezzare come la percentuale di volume occupato dalle strutture di tipo *ejection* sia inferiore nei casi manipolati rispetto al caso di parete liscia mentre risulta essere superiore la percentuale di volume occupata da strutture di tipo *sweep*. Questo comportamento indica che nei casi manipolati la "comunicazione" tra gli strati di fluido è superiore rispetto a quanto avviene nel caso *smooth*; inoltre le *ejections* risultano essere le principali responsabili dello scambio di quantità di moto dato che gli sforzi di Reynolds da queste generati risultano essere di maggiore entità rispetto a quelli generati

dalle *sweeps* [19], una loro riduzione percentuale a parete sarebbe coerente con la *drag reduction* misurata sperimentalmente nei casi manipolati.

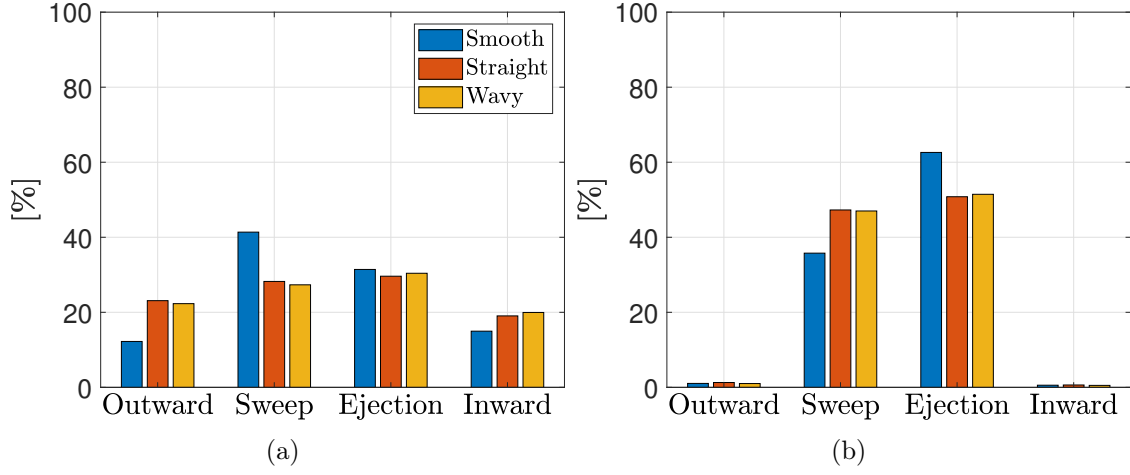


Figura 5.7: Distribuzione della tipologia in numero (a) e volume (b), *attached structures*, Metodo 1.

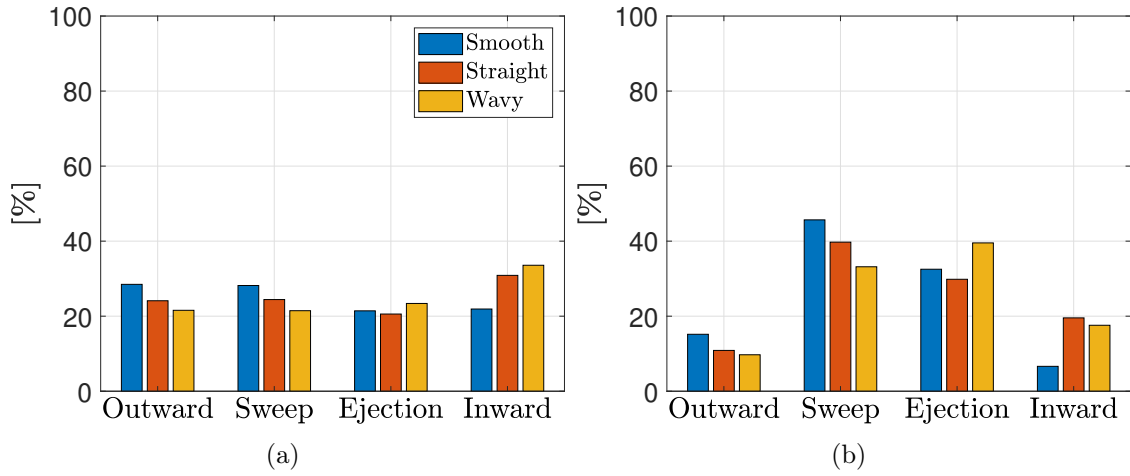


Figura 5.8: Distribuzione della tipologia in numero (a) e volume (b), *wall detached structures*, Metodo 1.

5.2.2 Analisi statistica della morfologia delle strutture coerenti

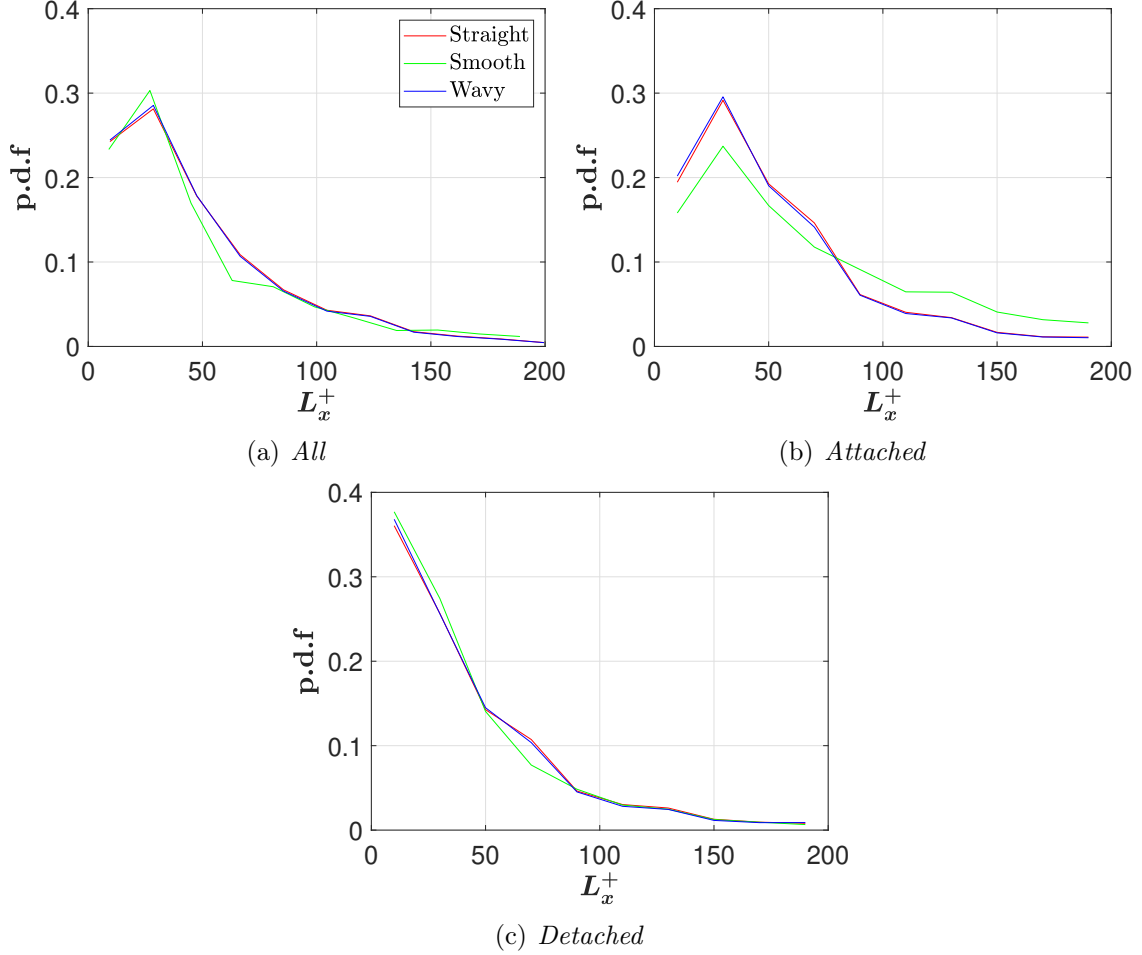


Figura 5.9: p.d.f. della dimensione *streamwise*.

La p.d.f. della dimensione *streamwise* delle strutture coerenti, riportata in figura 5.9, mostra come, considerando la totalità delle strutture, il caso *smooth* presenti una distribuzione leggermente più stretta rispetto a quella dei casi manipolati che risultano essere perfettamente sovrapposte. Per dimensioni superiori a $90l_\tau$ non è visibile l'effetto della manipolazione in quanto tutte e tre le curve risultano sovrapposte. Nei pressi della parete è possibile osservare come le curve dei casi manipolati risultino nuovamente sovrapposte mentre quella del caso *smooth* si discosta da queste, in particolare questa è al di sotto delle curve dei casi manipolati per $l_x^+ < 80$ mentre è al di sopra di queste al di fuori di quest'intervallo. Allontanandosi dalla parete le tre curve si sovrappongono l'una alle altre, sinonimo di un mancato effetto

della manipolazione.

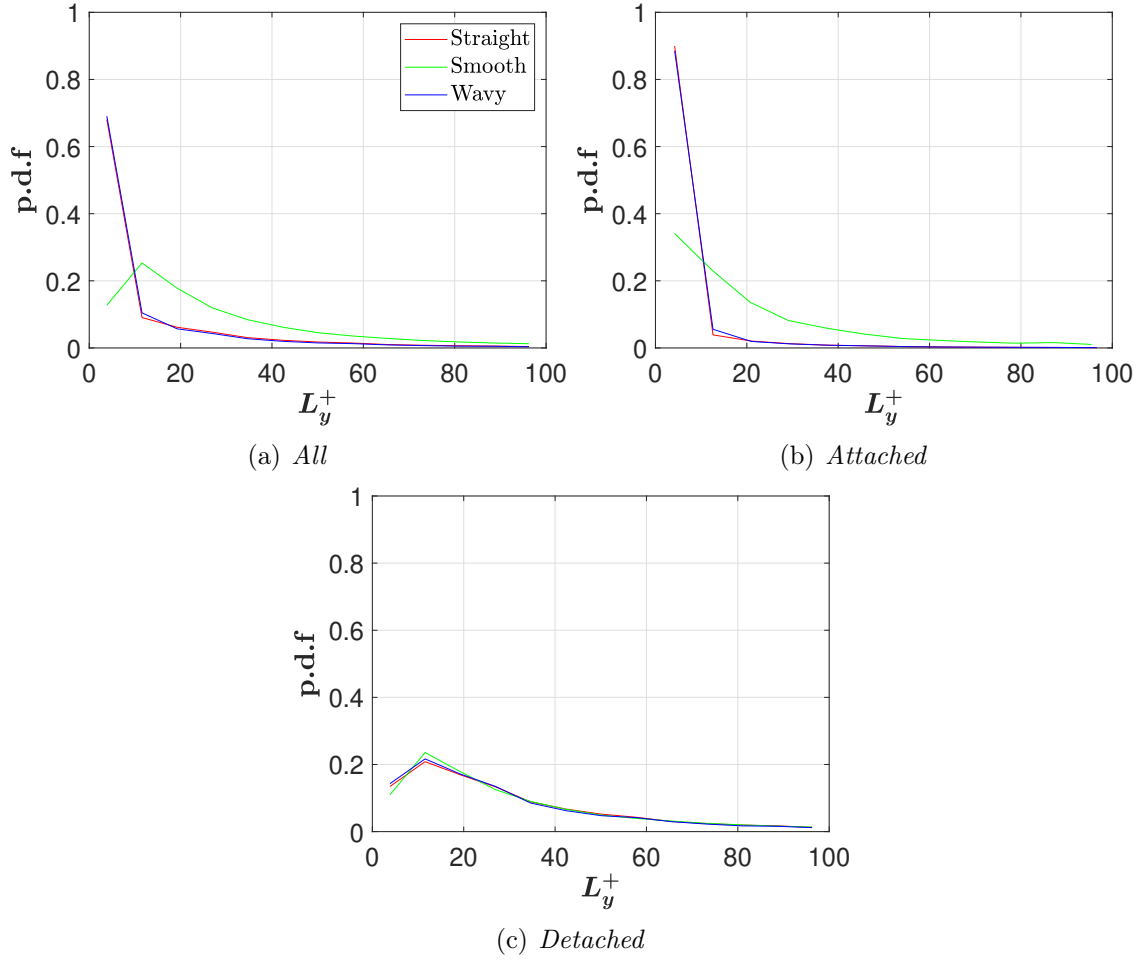


Figura 5.10: p.d.f. della dimensione *spanwise*.

In figura 5.10 viene riportata la p.d.f. della dimensione *spanwise* delle strutture coerenti, questa mostra come, considerando la totalità delle strutture, i casi manipolati siano uno sovrapposto all'altro con una distribuzione più stretta rispetto a quella del caso di parete liscia. Il picco delle distribuzioni dei casi *wavy* e *straight* è situato a $l_y^+ \approx 5$ mentre quello del caso *smooth* risulta trovarsi a $l_y^+ \approx 12$. Il comportamento appena descritto può essere osservato nei pressi della parete mentre lontano da questa l'effetto della manipolazione risulta quasi inesistente.

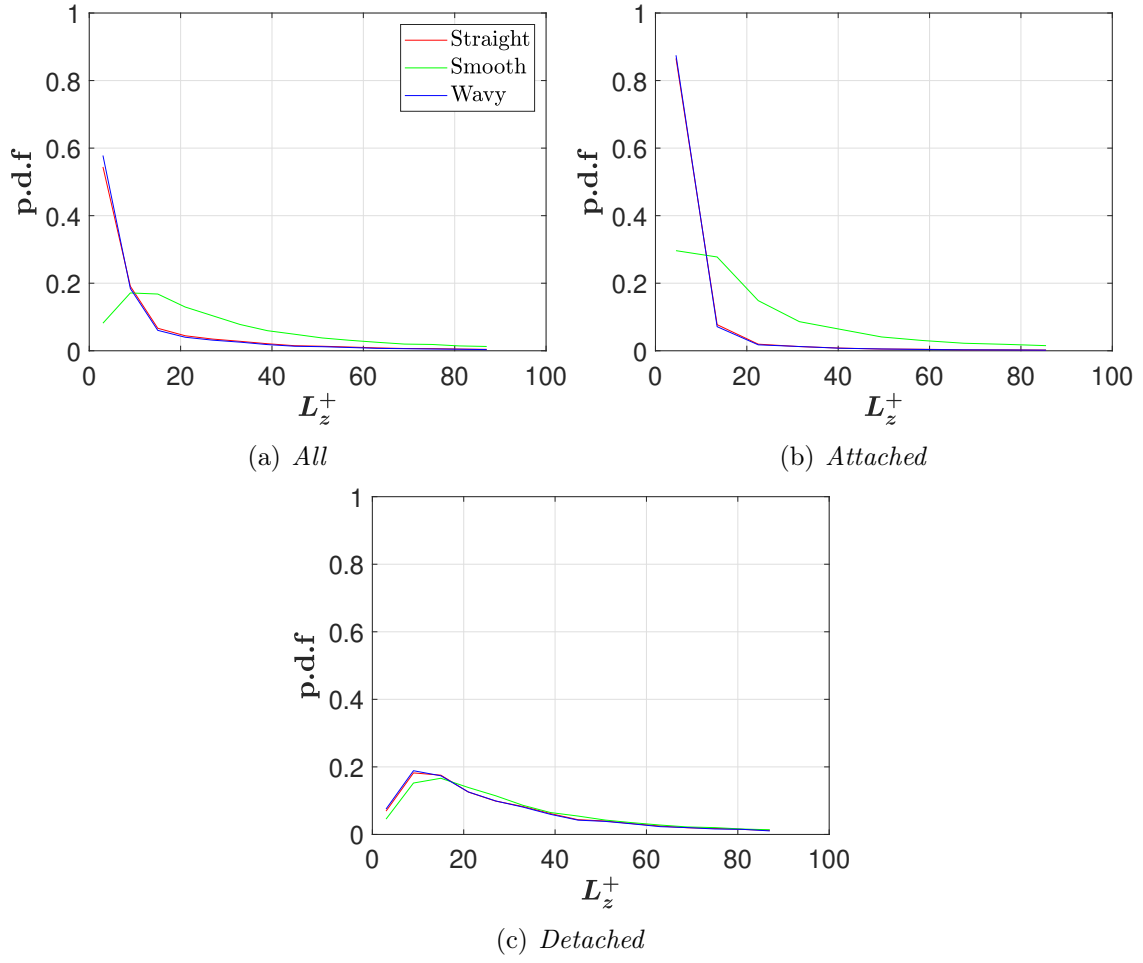


Figura 5.11: p.d.f. della dimensione *wall-normal*.

La p.d.f. della dimensione *wall-normal* delle strutture coerenti, riportata in figura 5.11 mostra come, considerando la totalità delle strutture, i casi manipolati siano uno sovrapposto all'altro con una distribuzione più stretta rispetto a quella del caso di parete liscia. Il picco delle distribuzioni dei casi *wavy* e *straight* è situato a $l_z^+ \approx 5$ mentre quello del caso *smooth* risulta trovarsi a $l_z^+ \approx 15$. Il comportamento appena descritto può essere osservato nei pressi della parete anche se in questo caso il picco della distribuzione del caso *smooth* è situato a $l_z^+ \approx 10$. Allontanandosi da questa l'effetto della manipolazione risulta quasi inesistente.

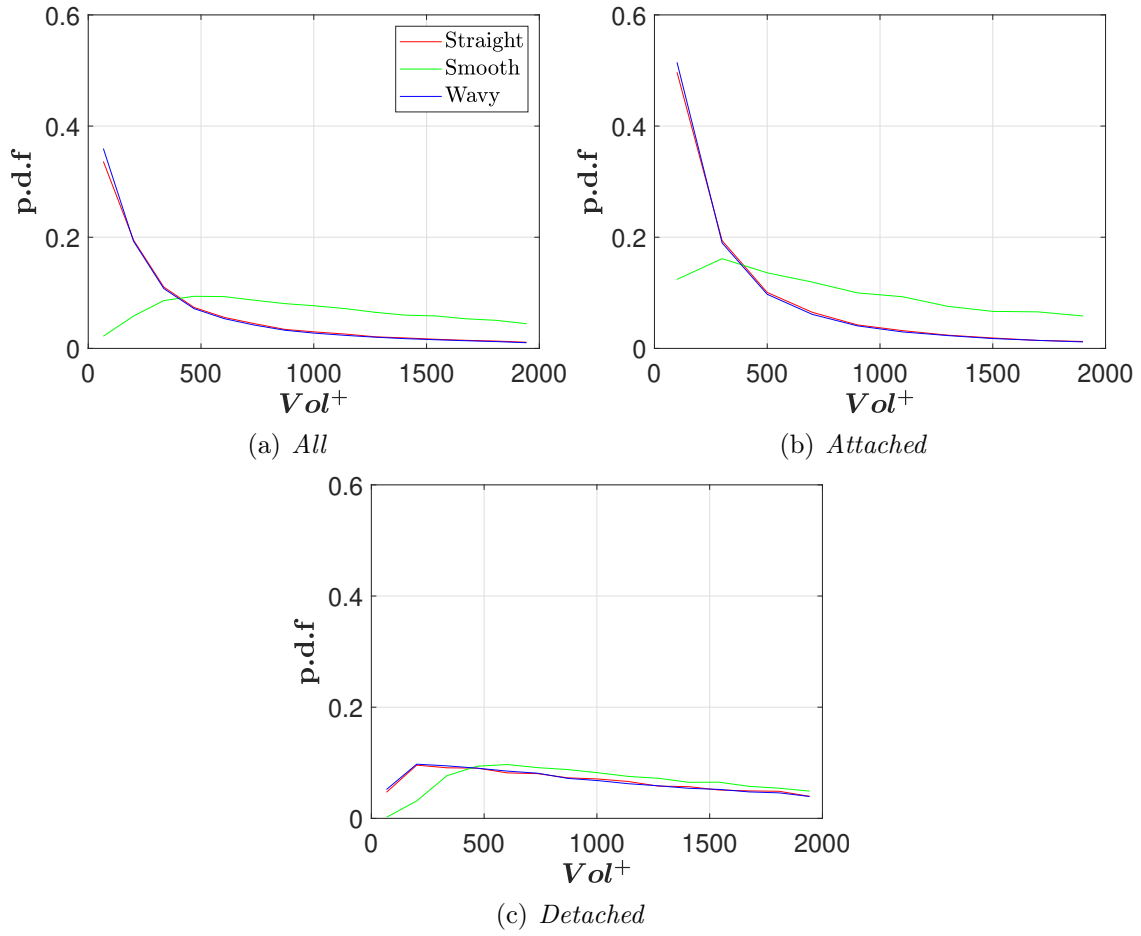


Figura 5.12: p.d.f. del volume.

La p.d.f. del volume, riportata in figura 5.12, mostra come, considerando la totalità delle strutture coerenti, i casi manipolati siano uno sovrapposto all'altro con una distribuzione più stretta rispetto a quella del caso *smooth*. Il picco della distribuzione del caso *smooth* è posizionato a $Vol^+ \approx 500$ mentre quello dei casi manipolati a $Vol^+ \approx 100$. A contrario delle distribuzioni osservate in precedenza, la differente posizione dei picchi delle distribuzioni è osservabile indipendentemente dalla distanza dalla parete. Nei pressi di quest'ultima la differenza tra i picchi risulta essere di circa $200l_\tau^3$ mentre lontano da essa di circa $400l_\tau^3$, inoltre lontano dalla parete le distribuzioni dei casi manipolati e del caso di parete liscia risultano avere il medesimo andamento.

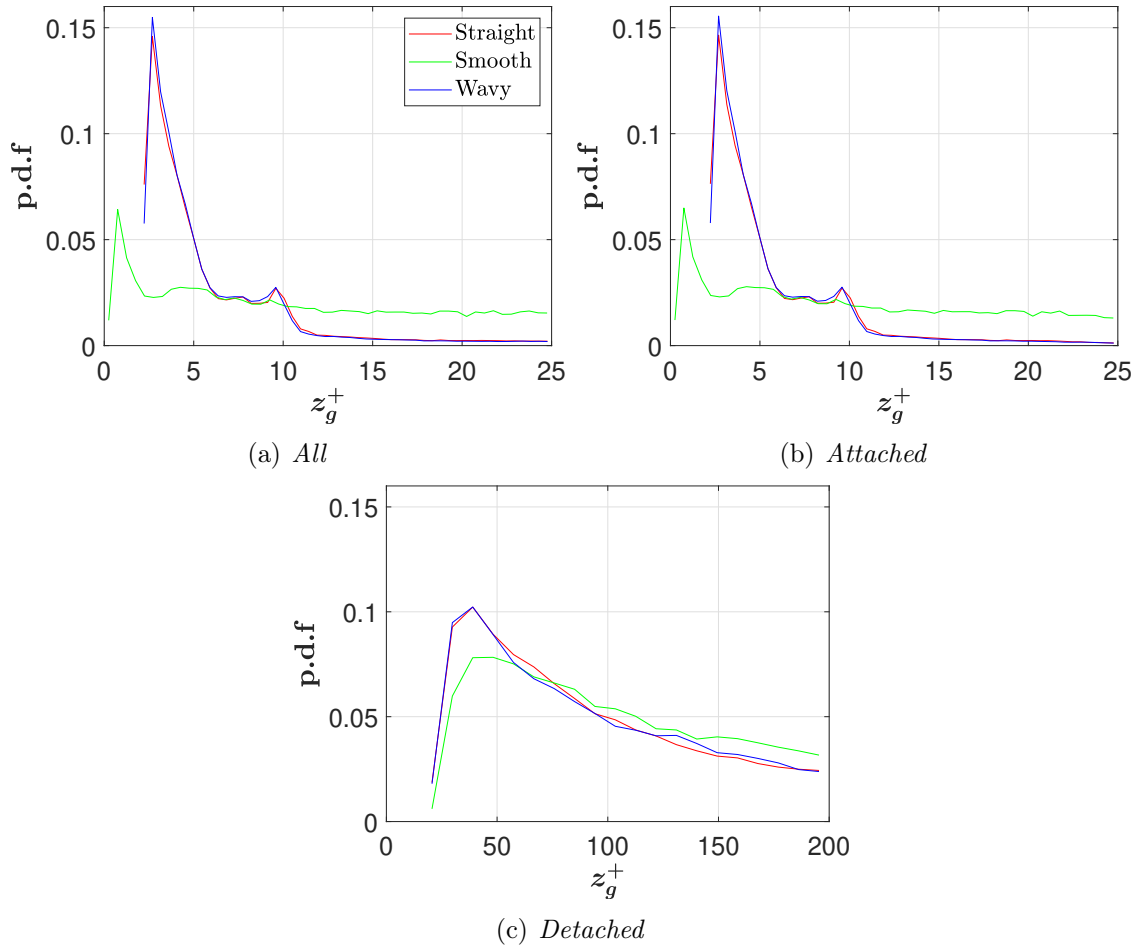


Figura 5.13: p.d.f. della distanza del baricentro dalla parete.

In figura 5.13 viene riportata la p.d.f. della distanza del baricentro dalla parete delle strutture coerenti, questa mostra come, considerando la totalità delle strutture, i casi manipolati siano sovrapposti ma con importanti differenze rispetto al caso di parete liscia. La distribuzione dei casi manipolati mostra un primo picco nei pressi della parete ($z^+ \approx 3$) e un secondo a $z^+ \approx 10$ a valle del quale la distribuzione tende ad assumere valore nullo. Il caso *smooth* presenta invece una distribuzione con un picco soltanto situato a $z^+ \approx 1$ a valle del quale tende ad assumere un andamento piatto. Il comportamento appena descritto è riscontrabile osservando il caso delle *wall attached structures* mentre allontanandosi dalla parete l'effetto della manipolazione svanisce.

Gli andamenti delle p.d.f. appena analizzati permettono di effettuare alcune considerazioni importanti sull'effetto della manipolazione sulla morfologia delle strutture

coerenti. Prima di tutto è interessante notare come sia stato possibile evidenziare notevoli differenze tra il caso di parete liscia e i casi manipolati tra i quali però non è emersa alcuna differenza. Inoltre è possibile evidenziare come gli effetti della manipolazione siano evidenti solamente nei pressi della parete, a meno di quello sul volume delle strutture coerenti, mentre lontano da questa l'effetto della manipolazione sembra svanire. Risulta quindi possibile affermare come le distribuzioni dei casi manipolati siano meno disperse rispetto a quelle del caso *smooth*, ciò significa che, per quanto riguarda i casi manipolati, è meno probabile che i valori della distribuzione cadano lontano dal picco rispetto a quanto accade per il caso di parete liscia. Le p.d.f. delle dimensioni *spanwise*, *wall-normal* e del volume mostrano inoltre come il picco della distribuzione del caso *smooth* risulti spostato verso valori maggiori delle rispettive grandezze rispetto a quello dei casi manipolati. L'effetto della manipolazione, sulle grandezze appena citate, sembrerebbe quindi quello di rendere la distribuzione più deterministica spostando il picco di quest'ultima verso valori più bassi delle suddette grandezze. Oltre a ciò, lo studio della distanza delle strutture dalla parete evidenzia come, nei casi manipolati, le strutture statisticamente siano situate ad una distanza da parete leggermente superiore rispetto a quella riscontrabile nel caso *smooth*. Queste inoltre occupano la zona del flusso compresa tra la parete e le creste delle *riblets* mentre le strutture nel caso di parete liscia tendono a distribuirsi più uniformemente.

I risultati ottenuti sembrerebbero quindi in linea con il meccanismo di frammentazione ipotizzato e con quello di allontanamento delle strutture coerenti dalla parete.

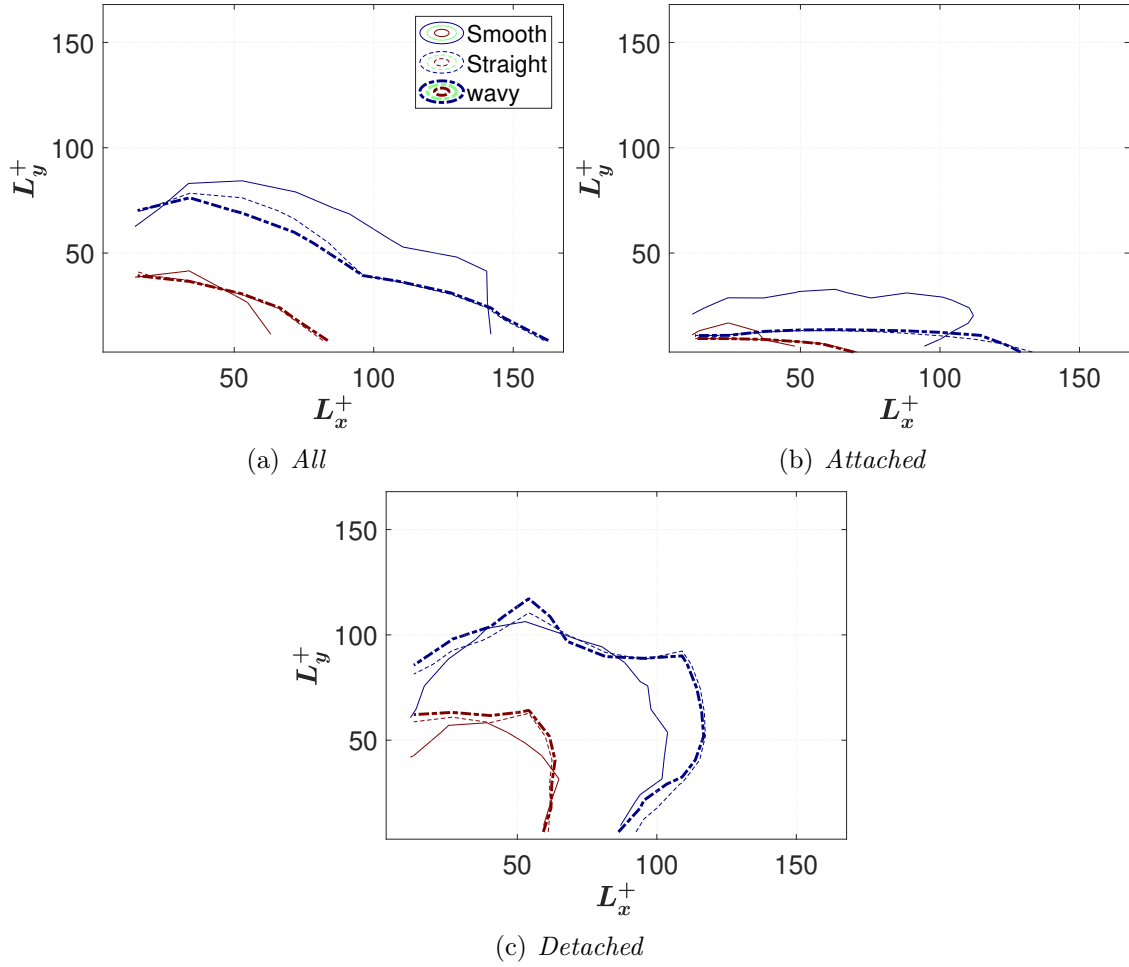


Figura 5.14: J.p.d.f. della dimensione *streamwise* e della dimensione *spanwise*.

La j.p.d.f. di figura 5.14 della dimensione *streamwise* e *spanwise* delle strutture coerenti mostra come vi sia un'elevata probabilità che le strutture dei casi manipolati si presentino più allungate nella direzione del flusso e più strette in direzione *spanwise* rispetto a quelle del caso *smooth*. Questo effetto è visibile nei pressi della parete mentre lontano da questa è possibile notare, per l'isolinea a maggiore probabilità, come persista l'effetto di allungamento delle strutture manipolate in direzione *streamwise* (comunque più lieve rispetto al caso delle *wall attached structures*) mentre si perda quello nella direzione *spanwise*.

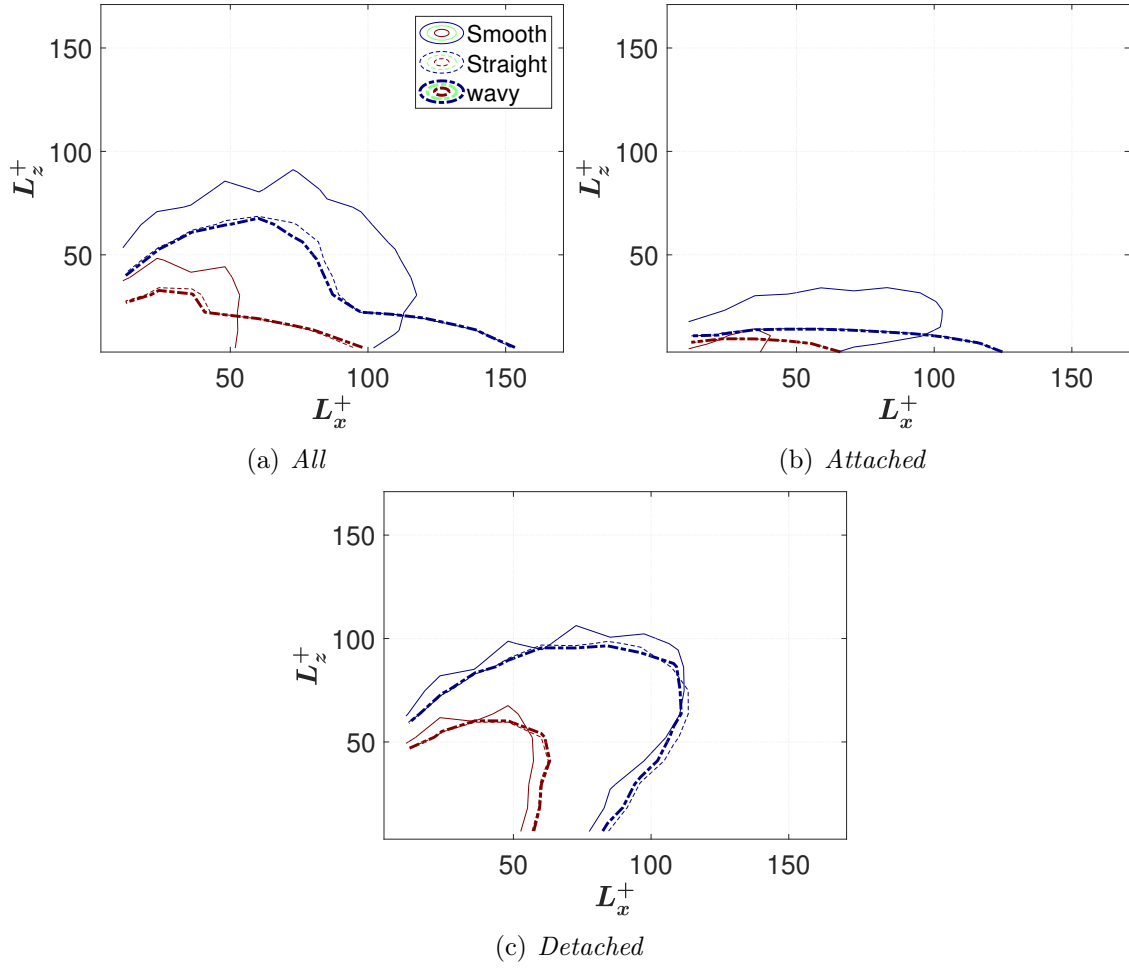


Figura 5.15: J.p.d.f. della dimensione *streamwise* e della dimensione *wall-normal*.

La figura 5.15, raffigurante la j.p.d.f. della dimensione *streamwise* e *wall-normal* delle strutture coerenti, evidenzia nuovamente come le strutture dei casi manipolati si presentino più allungate nella direzione *streamwise* rispetto a quelle del caso *smooth*. Risulta inoltre possibile osservare come vi sia una maggiore probabilità che le strutture dei casi manipolati siano più strette anche in direzione *wall-normal* rispetto al caso di parete liscia. Il comportamento appena descritto risulta molto marcato nei pressi della parete mentre svanisce lontano da questa.

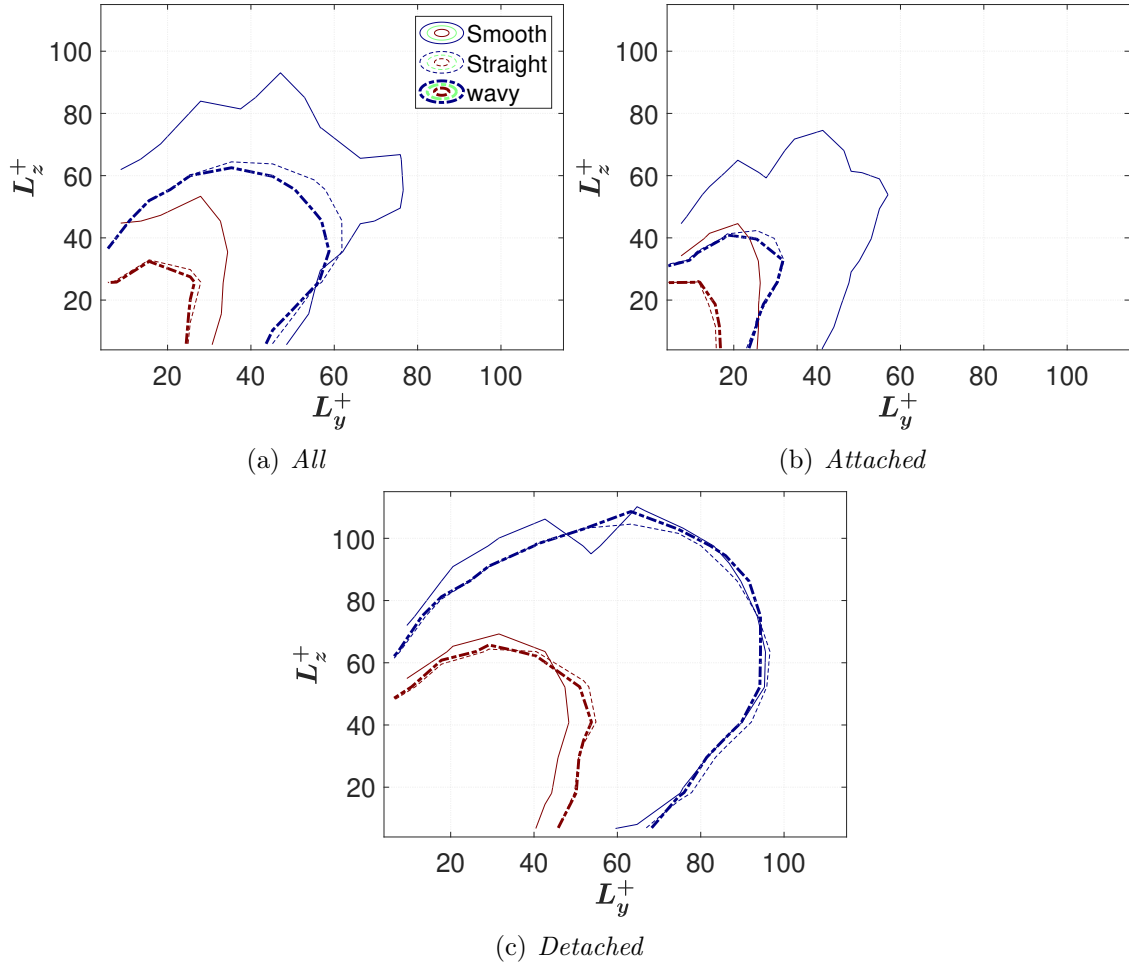


Figura 5.16: J.p.d.f. della dimensione *spanwise* e della dimensione *wall-normal*.

La j.p.d.f. di figura 5.16 della dimensione *spanwise* e *wall-normal* delle strutture coerenti permette di confermare quanto affermato. Vi è una maggiore probabilità che le strutture dei casi manipolati si presentino più strette sia in direzione *spanwise* sia in quella *wall-normal* rispetto a quelle del caso di parete liscia. Questo effetto è ben visibile nei pressi della parete mentre svanisce lontano da questa.

Gli andamenti delle j.p.d.f. appena analizzate permettono di confermare quanto osservato in precedenza nell'analisi mediante p.d.f. . Anche lo studio mediante j.p.d.f. non permette di evidenziare differenze significative nella morfologia delle strutture coerenti tra i casi *wavy* e *straight*.

5.2.3 Analisi statistica della morfologia delle strutture coerenti per tipologia

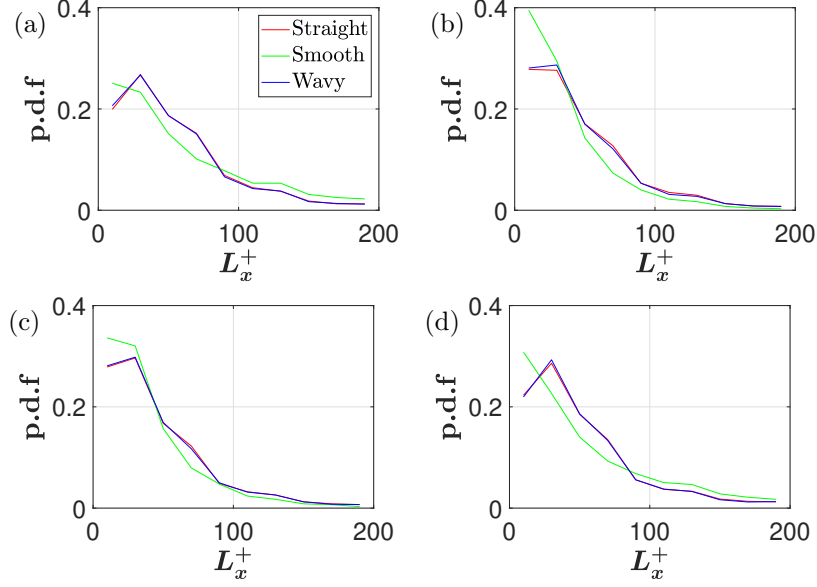


Figura 5.17: p.d.f. della dimensione *streamwise*, studio della tipologia. (a) *ejection*. (b) *outward*. (c) *inward*. (d) *sweep*.

Le p.d.f. della dimensione *streamwise*, riportata in figura 5.17, mostra come gli effetti delle manipolazioni descritti nella sezione precedente siano più marcati per le strutture di tipo *ejection* e *sweep*. Le p.d.f. della dimensione *spanwise*, *wall-normal* e del volume riportate in figura 5.18, 5.19, 5.20 non permettono di evidenziare marcate differenze nell'effetto della manipolazione sulle differenti tipologie di strutture. Osservando la p.d.f. della distanza del baricentro dalla parete (figura 5.21) si nota come le strutture di tipo *outward* e *inward* presentino, per il caso *smooth* una distribuzione stretta con un picco nei pressi della parete mentre per i casi manipolati una distribuzione con due picchi come descritto nella sezione precedente. Le strutture di tipo *ejection* mostrano un caso *smooth* con una distribuzione che presenta un picco a parete e di seguito un andamento piuttosto piatto mentre i casi manipolati mostrano una distribuzione stretta e con un solo picco nei pressi della parete a z_g^+ maggiore rispetto quello del caso *smooth*. Le strutture di tipo *sweep* invece evidenziano per i casi manipolati una distribuzione simile a quella delle *ejections* mentre quella del caso *smooth* presenta una distribuzione meno piatta rispetto a quanto osservato in precedenza e con un picco situato a z_g^+ maggiore rispetto quello dei casi manipolati.

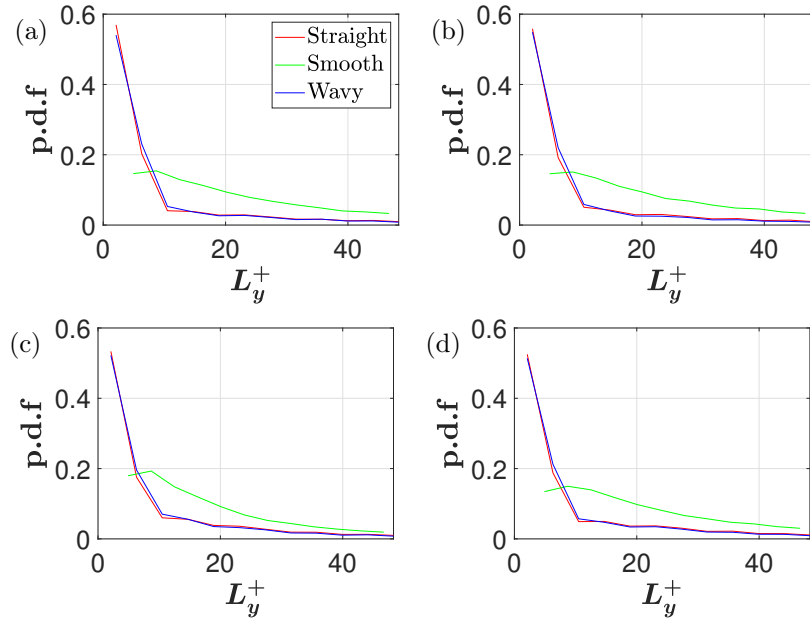


Figura 5.18: p.d.f. della dimensione *spanwise*. (a) *ejection*. (b) *outward*. (c) *inward*. (d) *sweep*.

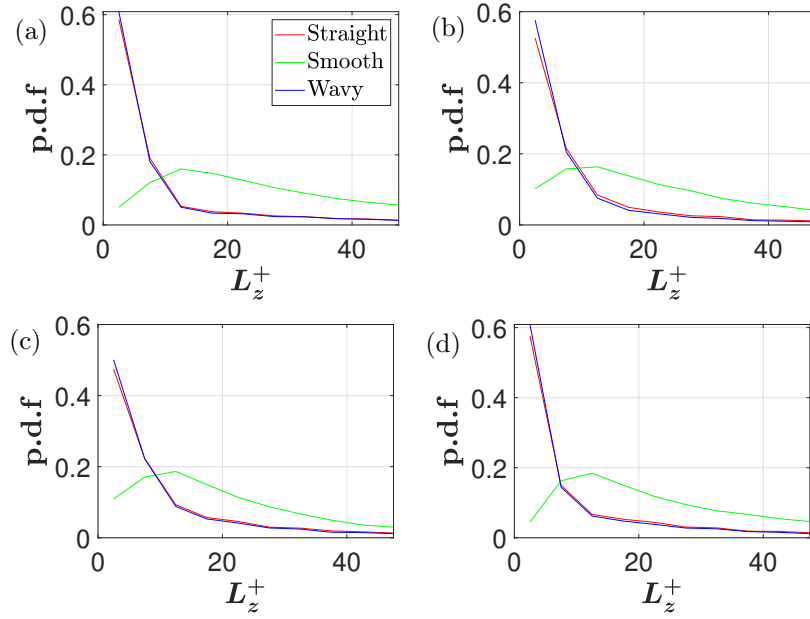


Figura 5.19: p.d.f. della dimensione *wall-normal*. (a) *ejection*. (b) *outward*. (c) *inward*. (d) *sweep*.

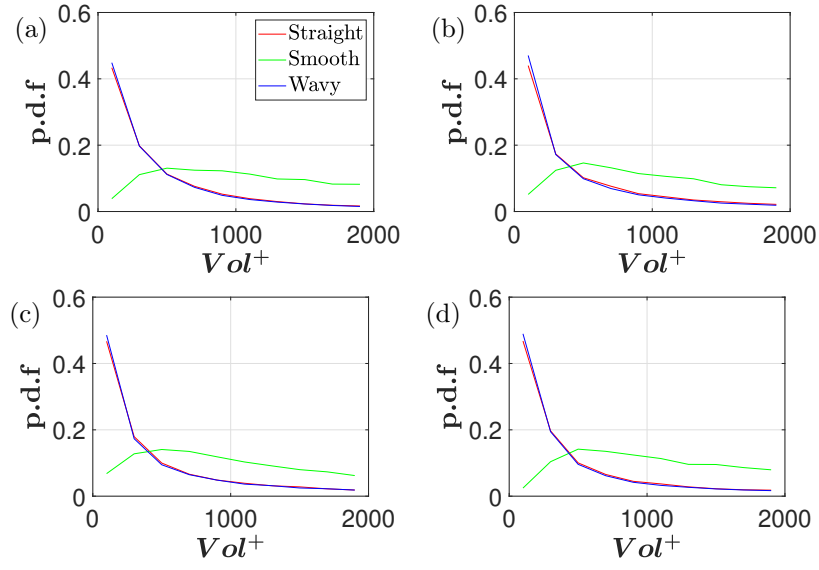


Figura 5.20: p.d.f. del volume. (a) *ejection*. (b) *outward*. (c) *inward*. (d) *sweep*.

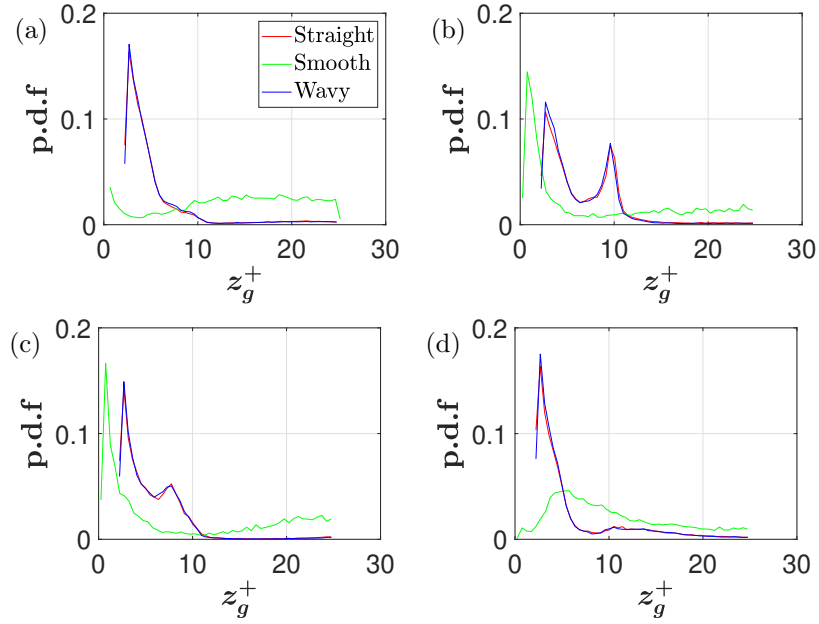


Figura 5.21: p.d.f. della distanza del baricentro dalla parete. (a) *ejection*. (b) *outward*. (c) *inward*. (d) *sweep*.

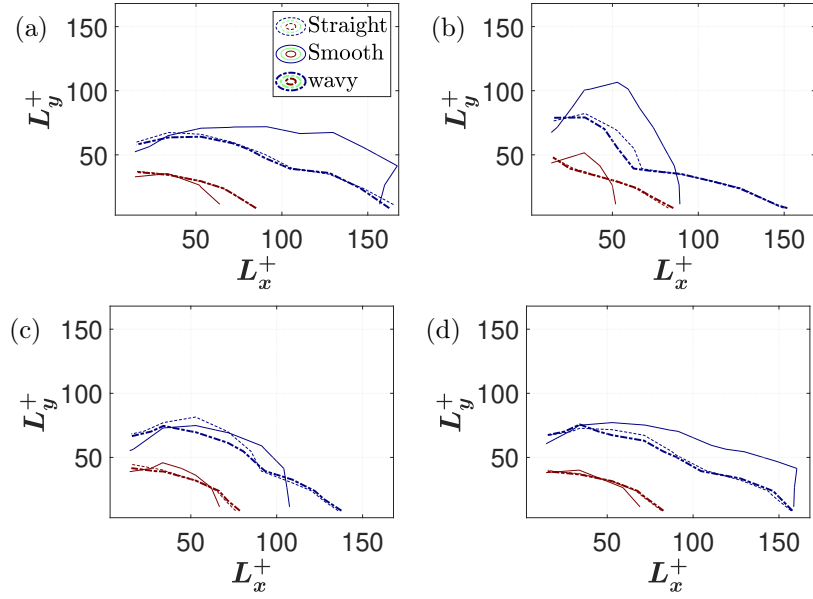


Figura 5.22: J.p.d.f. della dimensione *streamwise* e della dimensione *spanwise*. (b) *outward*. (c) *inward*. (d) *sweep*.

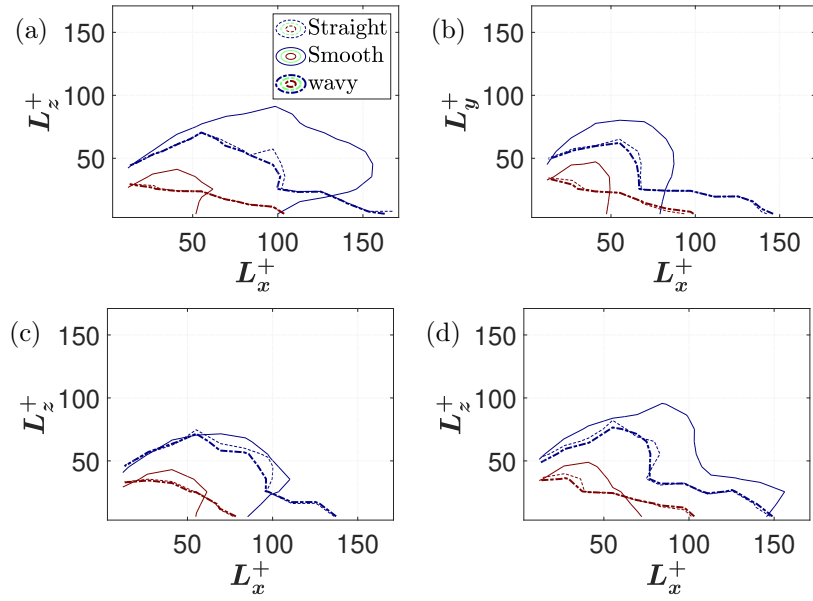


Figura 5.23: J.p.d.f. della dimensione *streamwise* e della dimensione *wall-normal*. (b) *outward*. (c) *inward*. (d) *sweep*.

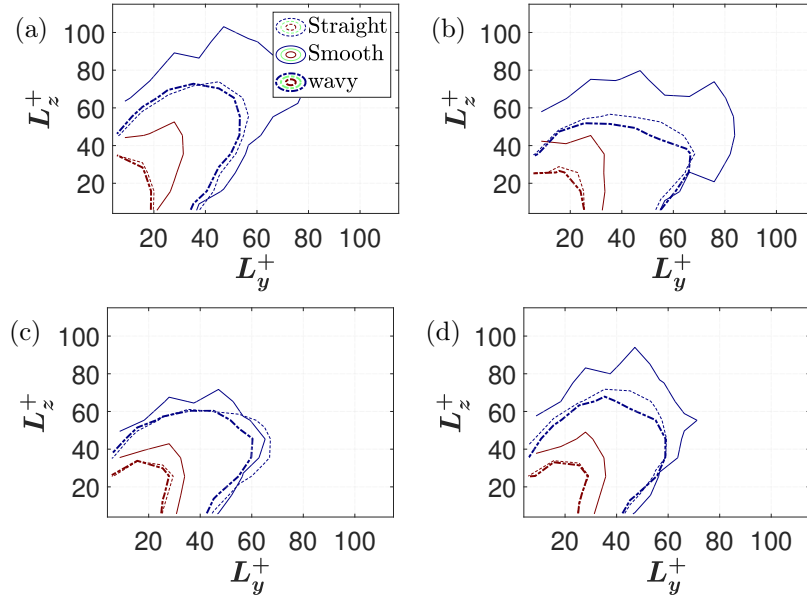


Figura 5.24: J.p.d.f. della dimensione *spanwise* e della dimensione *wall-normal*. (b) *outward*. (c) *inward*. (d) *sweep*.

Le j.p.d.f. riportate nelle figure 5.22, 5.23 mostrano come le differenze tra i casi manipolati e quello di parete liscia siano più evidenti per le strutture di tipo *ejection* e *sweep* in accordo con quanto osservato in precedenza, mentre quella di figura 5.24 non permette di apprezzare questo comportamento. Non sono presenti però evidenti differenze tra i due casi manipolati.

Sembrerebbe quindi possibile affermare che lo studio della tipologia non abbia mostrato differenze significative tra gli effetti della manipolazione sulle diverse tipologie di strutture anche se in alcuni casi le strutture di tipo *ejection* e *sweep* risultano essere quelle che più di tutti li subiscono.

5.3 Analisi delle strutture identificate con il *Metodo 2*

Come per le strutture coerenti identificate con il *Metodo 1* si riporta prima di tutto l'analisi della distribuzione delle strutture in numero, volume e tipologia a diverse distanze dalla parete per poi passare all'analisi della morfologia delle strutture con l'ausilio della *probability density function* e della *joint probability density function*. Essendo le strutture individuate sulla base della coerenza del gradiente di velocità si decide di non effettuare l'analisi statistica per le diverse tipologie di strutture.

5.3.1 Analisi statistica della distribuzione delle strutture coerenti

La tabella 5.5 mostra come le strutture individuate con il *Metodo 2* in generale risultino essere in numero maggiore nei casi manipolati rispetto al caso di parete liscia, inoltre queste occupano un volume maggiore. Nei pressi della parete i casi manipolati possiedono un numero di strutture tre volte superiore rispetto a quello del caso *smooth* occupando però un maggiore volume.

	<i>Smooth</i>	<i>Straight</i>	<i>Wavy</i>
<i>All structures</i>	222790	282282	297293
<i>All s. volume</i>	$4.9882 \cdot 10^9 l_\tau^3$	$5.3862 \cdot 10^9 l_\tau^3$	$5.3669 \cdot 10^9 l_\tau^3$
<i>wall attached structures</i>	37149	116484	130134
<i>Attached s. volume</i>	$2.6978 \cdot 10^9 l_\tau^3$	$2.9388 \cdot 10^9 l_\tau^3$	$2.8588 \cdot 10^9 l_\tau^3$
<i>wall detached structures</i>	185641	165798	167159
<i>Detached s. volume</i>	$2.2904 \cdot 10^9 l_\tau^3$	$2.4475 \cdot 10^9 l_\tau^3$	$2.5081 \cdot 10^9 l_\tau^3$

Tabella 5.5: Numero di strutture e volume occupato, *Metodo 2*.

Per quanto riguarda la densità di strutture, nei pressi della parete il caso *wavy* risulta essere quello con la più alta densità di strutture come riportato in tabella 5.6: +15% rispetto a *straight* e +230% rispetto a *smooth*.

<i>Smooth</i>	<i>Straight</i>	<i>Wavy</i>
$1.3770 \cdot 10^{-5}$	$3.9637 \cdot 10^{-5}$	$4.5520 \cdot 10^{-5}$

Tabella 5.6: Numero di strutture per unità di volume (N/l_τ^3) nei pressi della parete.

Lontano dalla parete i casi manipolati risultano avere un minore numero di strutture ma comunque un volume occupato da queste superiore rispetto al caso con parete liscia. Come è possibile osservare in tabella 5.7, lontano dalla parete i casi manipolati presentano, a contrario di quanto osservato nei pressi della parete, una minore densità di strutture rispetto al caso *smooth* (−16%).

<i>Smooth</i>	<i>Straight</i>	<i>Wavy</i>
$8.1052 \cdot 10^{-5}$	$6.7742 \cdot 10^{-5}$	$6.6648 \cdot 10^{-5}$

Tabella 5.7: Numero di strutture per unità di volume (N/l_τ^3) lontano dalla parete.

5.3.2 Analisi statistica della morfologia delle strutture coerenti

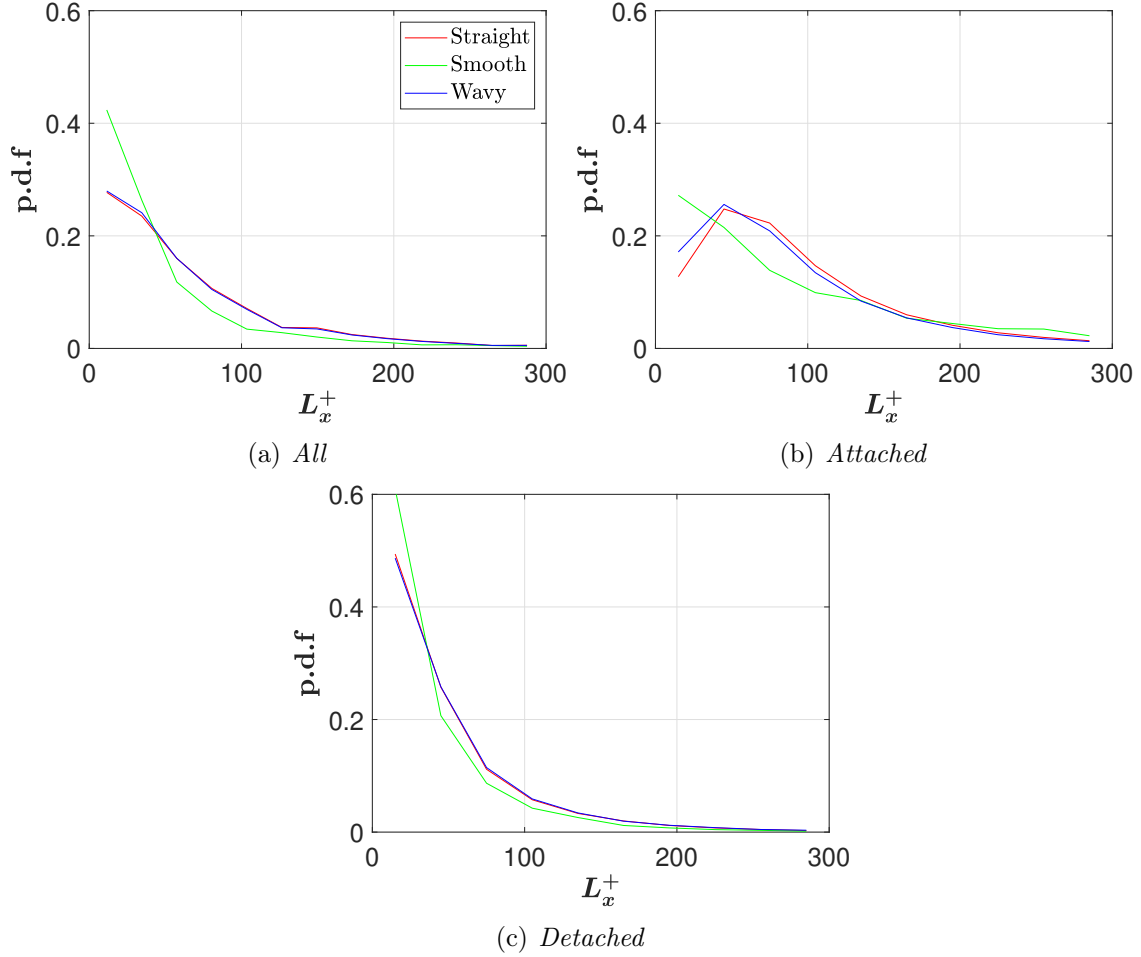


Figura 5.25: p.d.f. della dimensione *streamwise*.

La p.d.f. della dimensione *streamwise* delle strutture coerenti, riportata in figura 5.25, mostra come, considerando la totalità delle strutture, il caso *smooth* presenti una distribuzione più stretta rispetto a quella dei casi manipolati le cui distribuzioni risultano essere perfettamente sovrapposte. Nei pressi della parete è possibile osservare come le curve dei casi manipolati risultino leggermente scostate una dall'altra, inoltre quella del caso *smooth* si discosta da queste. In particolare questa è al di sotto delle curve dei casi manipolati per $l_x^+ < 130$ mentre è al di sopra di queste al di fuori di quest'intervallo. A destra del picco la curva della distribuzione del caso *straight* risulta trovarsi al di sopra di quella del caso *wavy*. Allontanandosi dalla parete le tre curve si sovrappongono l'una alle altre, sinonimo di un mancato effetto

della manipolazione.

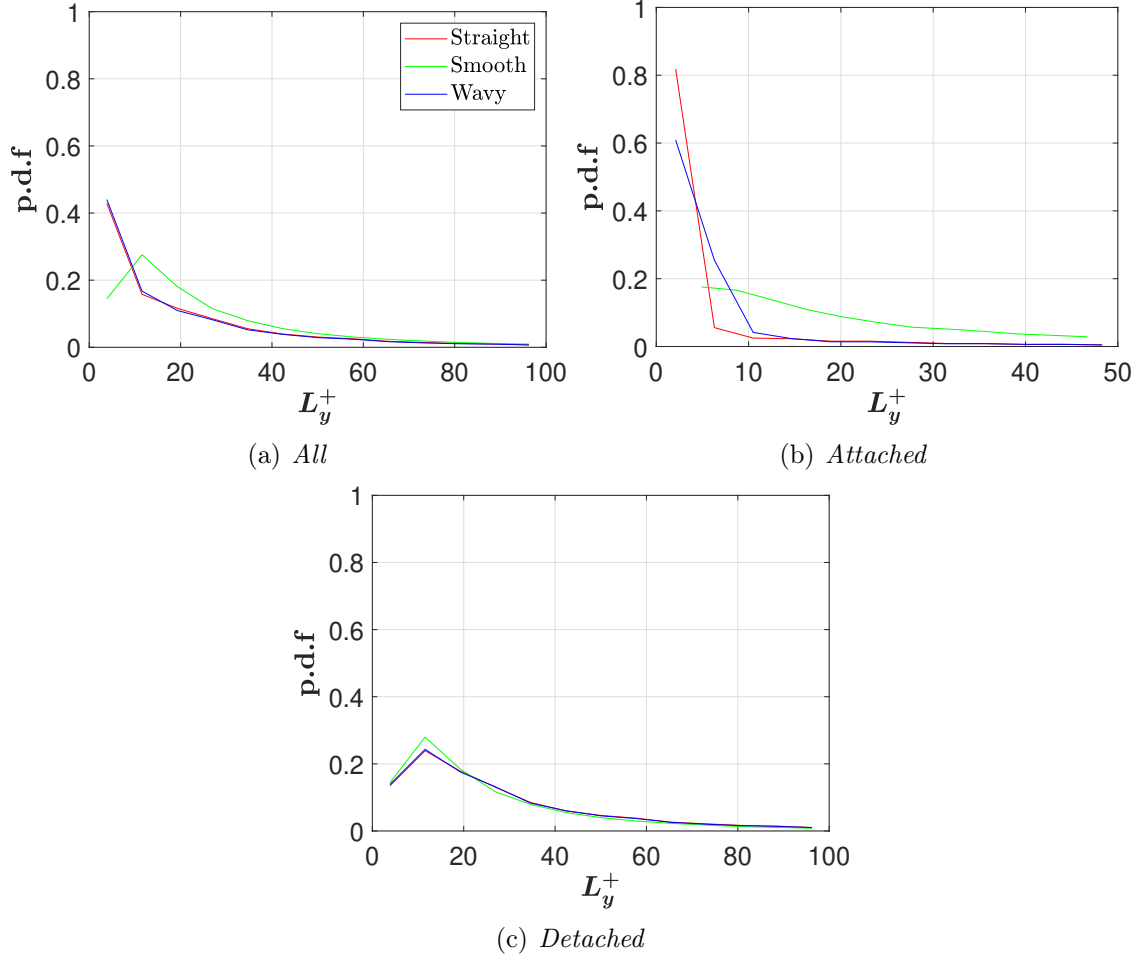


Figura 5.26: p.d.f. della dimensione *spanwise*.

In figura 5.26 viene riportata la p.d.f. della dimensione *spanwise* delle strutture coerenti, questa mostra come, considerando la totalità delle strutture, i casi manipolati siano uno sovrapposto all'altro con una distribuzione più stretta rispetto a quella del caso di parete liscia. Il picco delle distribuzioni dei casi *wavy* e *straight* è situato a $l_y^+ \approx 5$ mentre quello del caso *smooth* risulta trovarsi a $l_y^+ \approx 12$. Il comportamento appena descritto può essere osservato nei pressi della parete dove è possibile evidenziare un importante scostamento delle distribuzioni dei casi manipolati, la curva relativa al caso *wavy* risulta trovarsi al di sopra di quella del caso *straight* per $5 < l_y^+ < 15$ mentre per $l_y^+ > 15$ la differenza tra i casi manipolati svanisce così come lontano dalla parete l'effetto della manipolazione.

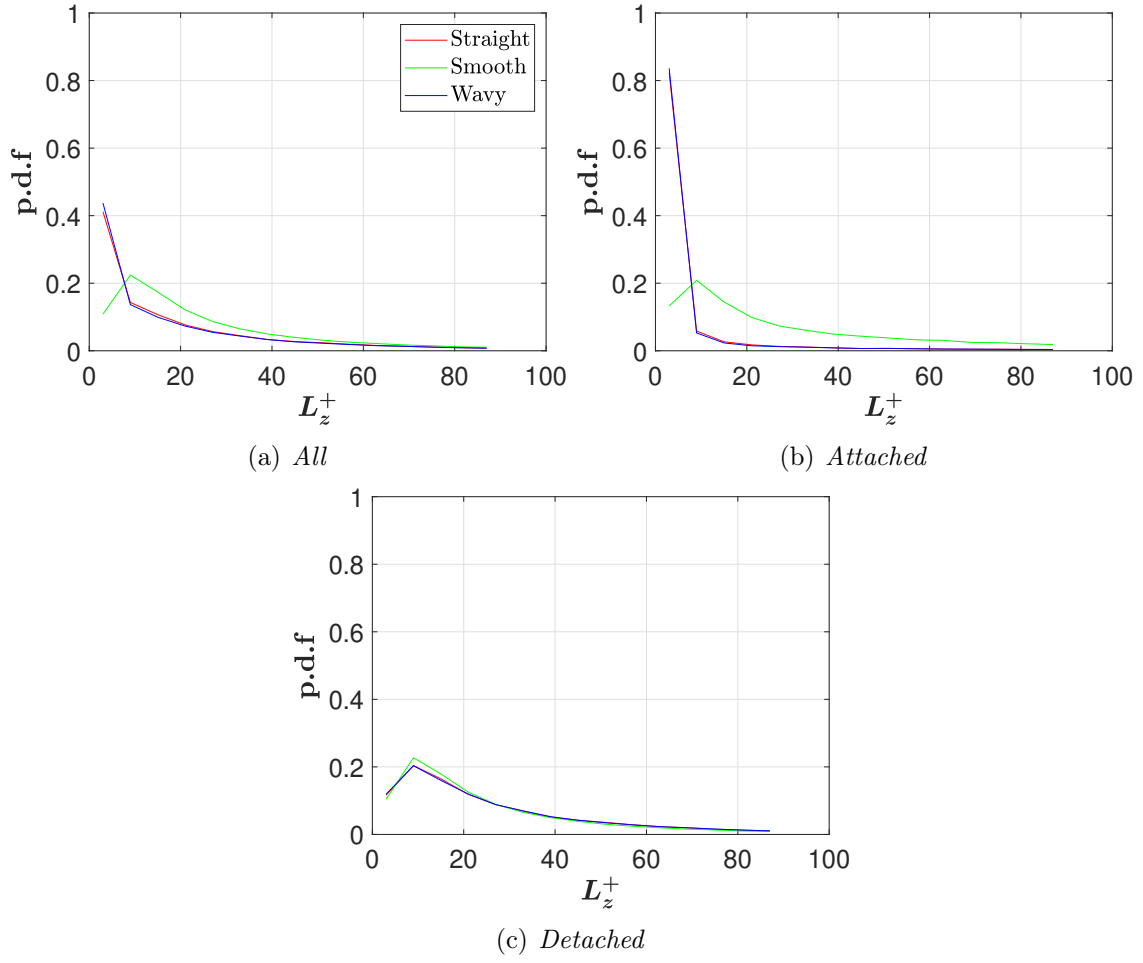


Figura 5.27: p.d.f. della dimensione *wall-normal*.

La p.d.f. della dimensione *wall-normal* delle strutture coerenti, riportata in figura 5.27 mostra come, considerando la totalità delle strutture, i casi manipolati siano uno sovrapposto all'altro con una distribuzione più stretta rispetto a quella del caso di parete liscia. Il picco delle distribuzioni dei casi *wavy* e *straight* è situato a $l_z^+ \approx 3$ mentre quello del caso *smooth* risulta trovarsi a $l_z^+ \approx 9$. Il comportamento appena descritto può essere osservato nei pressi della parete anche se in questo caso il picco della distribuzione del caso *smooth* è situato a $l_z^+ \approx 7$. Allontanandosi da questa l'effetto della manipolazione risulta quasi inesistente.

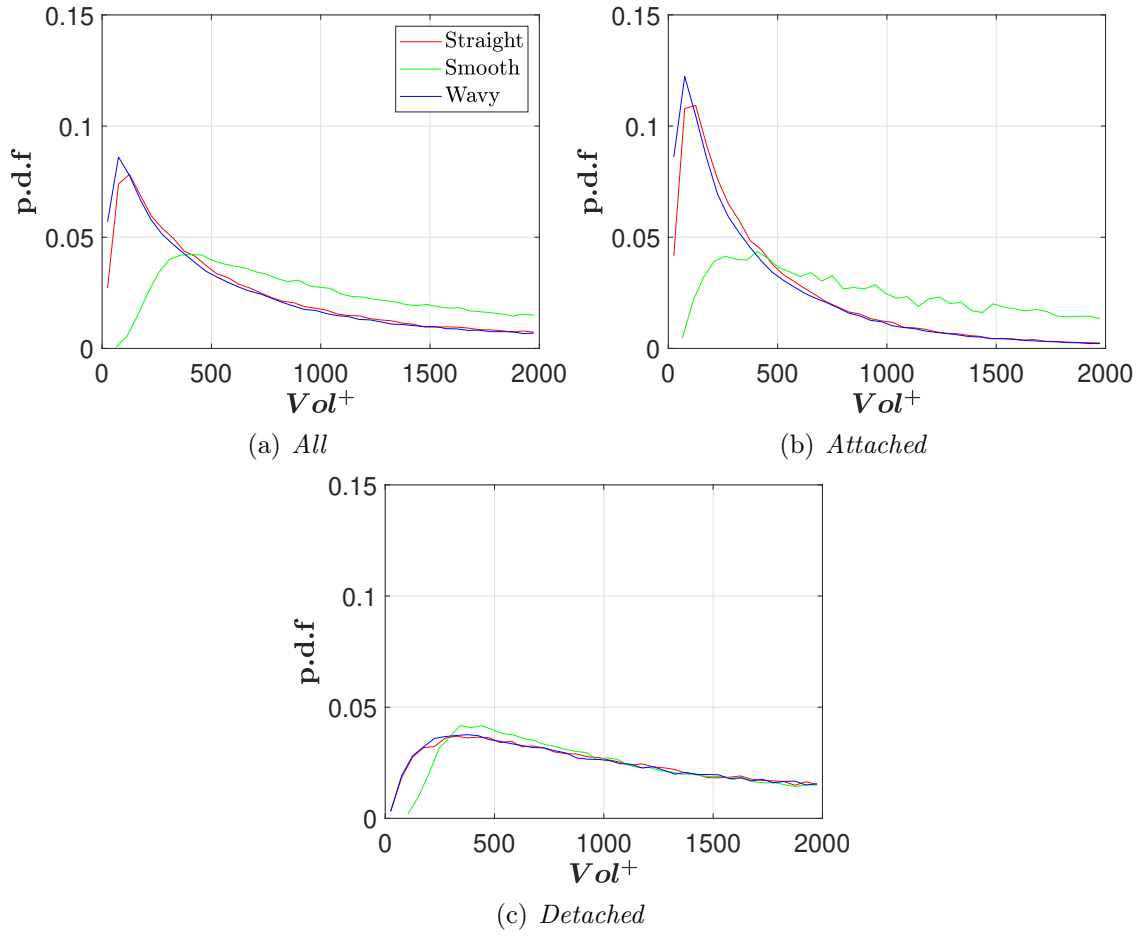


Figura 5.28: p.d.f. del volume.

La p.d.f. del volume, riportata in figura 5.28, mostra come, considerando la totalità delle strutture, i casi manipolati si discostino lievemente uno dall'altro con una distribuzione più stretta rispetto a quella del caso *smooth*. Il picco della distribuzione del caso *smooth* è posizionato a $Vol^+ \approx 400$ mentre quello dei casi manipolati a $Vol^+ \approx 80$ per il caso *wavy* e a $Vol^+ \approx 120$ per quello *straight*. Nei pressi della parete, è osservabile la differente posizione dei picchi delle distribuzioni e la curva relativa al caso *straight* risulta essere leggermente al di sopra di quella relativa al caso *wavy* a valle del picco per $Vol^+ < 700$. Lontano dalla parete i casi manipolati risultano essere sovrapposti con una distanza tra il picco della loro distribuzione e quella del caso *smooth* di circa $100l_T^3$.

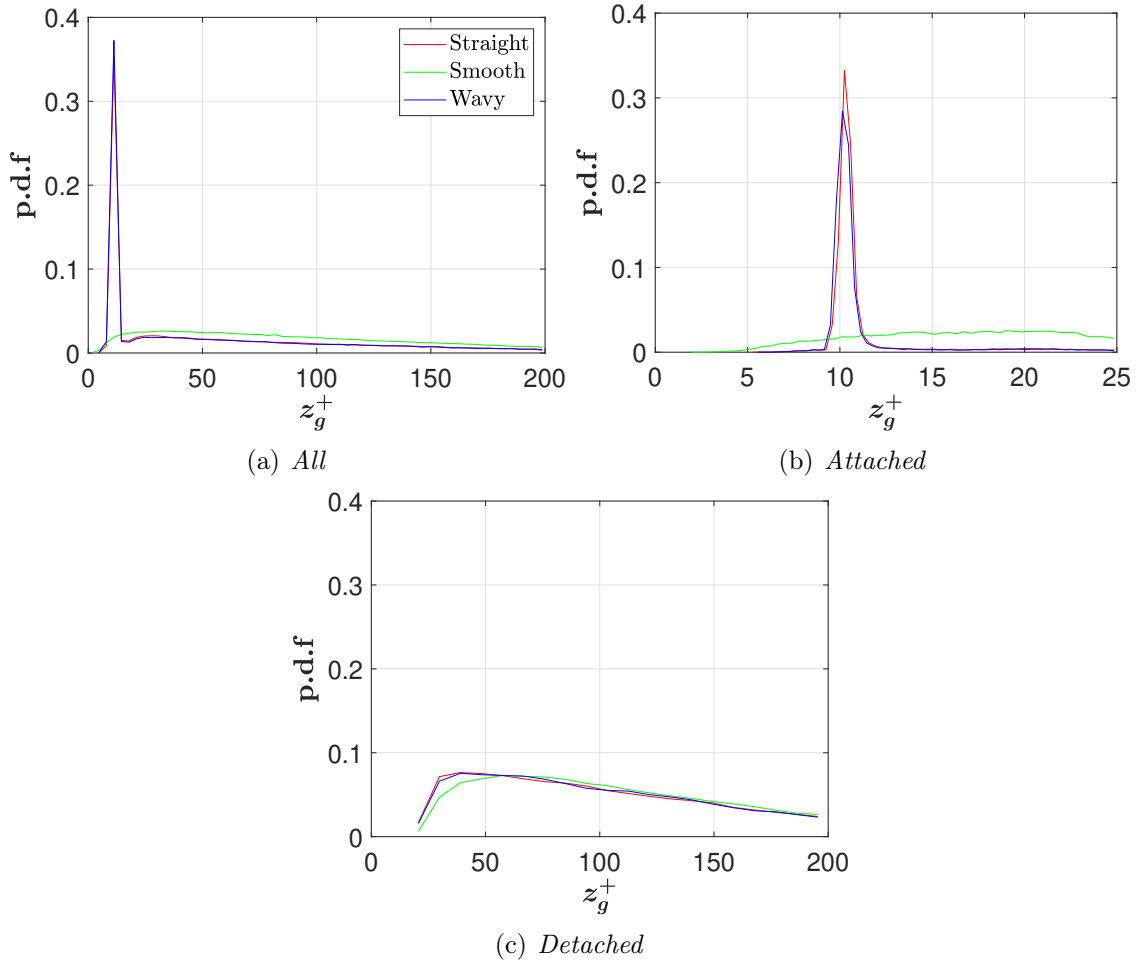
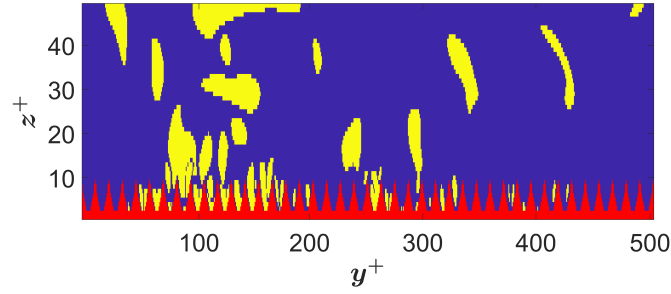


Figura 5.29: p.d.f. della distanza del baricentro dalla parete.

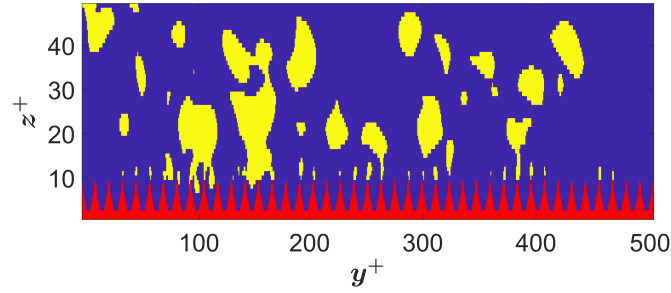
In figura 5.29 viene riportata la p.d.f. della distanza del baricentro dalla parete delle strutture coerenti, questa mostra come, considerando la totalità delle strutture, i casi manipolati presentino una distribuzione molto stretta il cui picco è situato a $z^+ \approx 9$. Il caso di parete liscia presenta importanti differenze rispetto a questi due con una distribuzione che si mantiene molto piatta per $z^+ > 10$. Il comportamento appena descritto è riscontrabile osservando il caso delle *wall attached structures* per cui risulta esserci una ridotta differenza tra la posizione del picco del caso *wavy* e quella del caso *straight*. Allontanandosi dalla parete i casi manipolati risultano essere sovrapposti mentre la distribuzione del caso *smooth* risulta leggermente traslata verso z_g^+ maggiori.

Gli andamenti delle p.d.f. appena analizzate mostrano come sia stato possibile evidenziare notevoli differenze tra il caso di parete liscia e i casi manipolati tra i quali

però sono emerse alcune interessanti differenze. Inoltre, come osservato per l'analisi relativa alle strutture del *Metodo 1*, è possibile evidenziare come gli effetti della manipolazione siano evidenti solamente nei pressi della parete, a meno di quello sul volume e della distanza del baricentro dalla parete delle strutture coerenti, mentre lontano da questa l'effetto della manipolazione sembra svanire. Come evidenziato in precedenza le distribuzioni dei casi manipolati risultano meno disperse rispetto a quelle del caso *smooth* fatta eccezione per la p.d.f. della dimensione *streamwise*. Le p.d.f. delle dimensioni *spanwise*, *wall-normal* e del volume mostrano come il picco della distribuzione del caso *smooth* risulti spostato verso valori maggiori delle rispettive grandezze rispetto a quello dei casi manipolati. Al contrario, per quanto riguarda la p.d.f. della dimensione *streamwise*, è il picco della distribuzione dei casi manipolati ad essere spostato verso valori maggiori di L_x^+ . Oltre a ciò, lo studio della distanza *wall-normal* delle strutture dalla parete evidenzia come, nei casi manipolati, le strutture statisticamente siano situate ad una distanza da parete pari a quella a cui sono situate le creste delle *riblets* mentre le strutture nel caso di parete liscia tendono a distribuirsi più uniformemente.



(a) *Metodo 1*

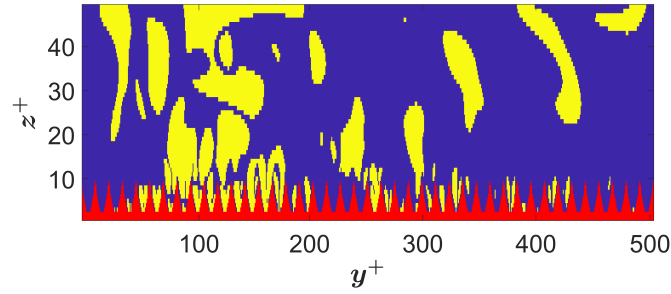


(b) *Metodo 2*

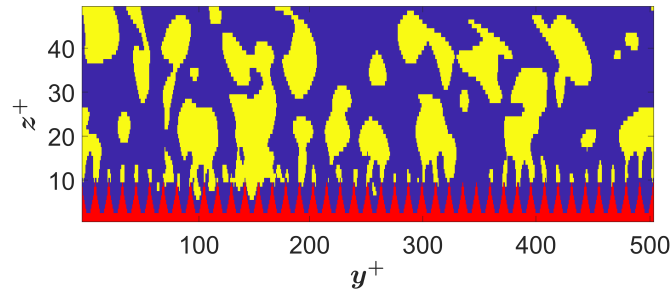
Figura 5.30: Visualizzazione delle strutture di una *slice spanwise*, *wall-normal* nel punto di massima pendenza della sinusoide, caso *wavy*, $H = 1.75$ e $threshold = 2500$.

I risultati ottenuti sono quindi in linea con quelli riscontrati nell'analisi delle strut-

ture coerenti identificate con il *Metodo 1* a meno della distanza del baricentro delle strutture dalla parete. In questo caso infatti, le distribuzioni dei casi manipolati mostrano un solo picco alla distanza dalla parete pari all'altezza delle creste delle *riblets*. Il motivo sta nel fatto che, essendo il *Q-factor* basato sulla coerenza del gradiente di velocità, la probabilità di trovare strutture coerenti è massima dove lo è quest'ultimo ovvero in coincidenza delle creste delle *riblets*. In figura 5.30 è riportato un confronto tra due visualizzazioni delle strutture coerenti in una *slice* bidimensionale *spanwise, wall-normal*. Da questa è possibile notare come, le strutture identificate con il *Metodo 1* si trovino spesso ad occupare lo spazio presente all'interno delle gole delle *riblets* mentre ciò non si verifica per le strutture identificate con il *Metodo 2*. Lo spazio nelle gole delle *riblets* è occupato saltuariamente da parti di strutture identificate con il *Metodo 2* che comunque presentano un baricentro ad una distanza dalla parete uguale o maggiore all'altezza delle creste delle *riblets*. È stato inoltre possibile dimostrare che quanto appena osservato è indipendente sia dal *Reynolds shear stress magnitude parameter* sia dalla *threshold* scelta nell'identificazione delle strutture coerenti con il *Metodo 2* come mostrato in figura 5.31 dove viene riportata la stessa visualizzazione riportata in figura 5.30 ma con diversi valori di soglia.



(a) *Metodo 1*



(b) *Metodo 2*

Figura 5.31: Visualizzazione delle strutture di una *slice spanwise, wall-normal* nel punto di massima pendenza della sinusoide, caso *wavy*, $H = 1$ e *threshold* = 500.

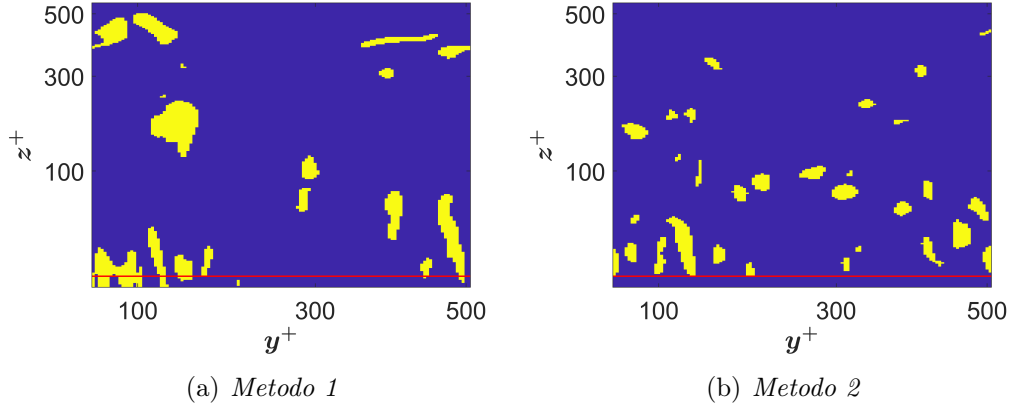


Figura 5.32: Visualizzazione delle strutture di una *slice spanwise, wall-normal* nel punto di massima pendenza della sinusoide, caso *smooth*, $H = 1.75$ e *threshold* = 2500.

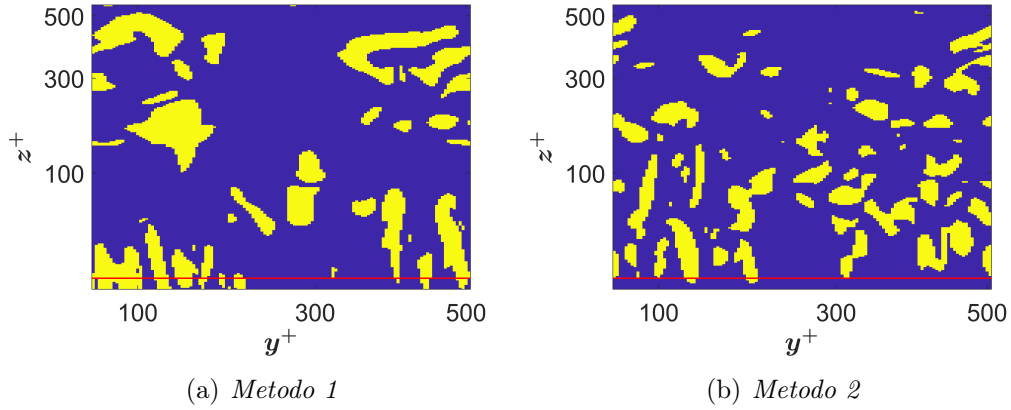


Figura 5.33: Visualizzazione delle strutture di una *slice spanwise, wall-normal* nel punto di massima pendenza della sinusoide, caso *smooth*, $H = 1$ e *threshold* = 500.

Le visualizzazioni riportate in figura 5.32 e 5.33, relative alle strutture coerenti in una *slice* bidimensionale *spanwise, wall-normal* del caso *smooth*, permettono di osservare come effettivamente le strutture identificate con il *Metodo 2* non presentino baricentri al di sotto di $y^+ = 5$. Sebbene questo comportamento potrebbe sembrare indipendente dai valori di soglia impostati, se la *threshold* venisse ulteriormente abbassata a valori prossimi allo zero le strutture identificate con il *Metodo 2* presenterebbero anch'esse baricentri al di sotto di $y^+ = 5$ essendo che il *Q-factor* tende ad assumere nei pressi della parete valori molto bassi.

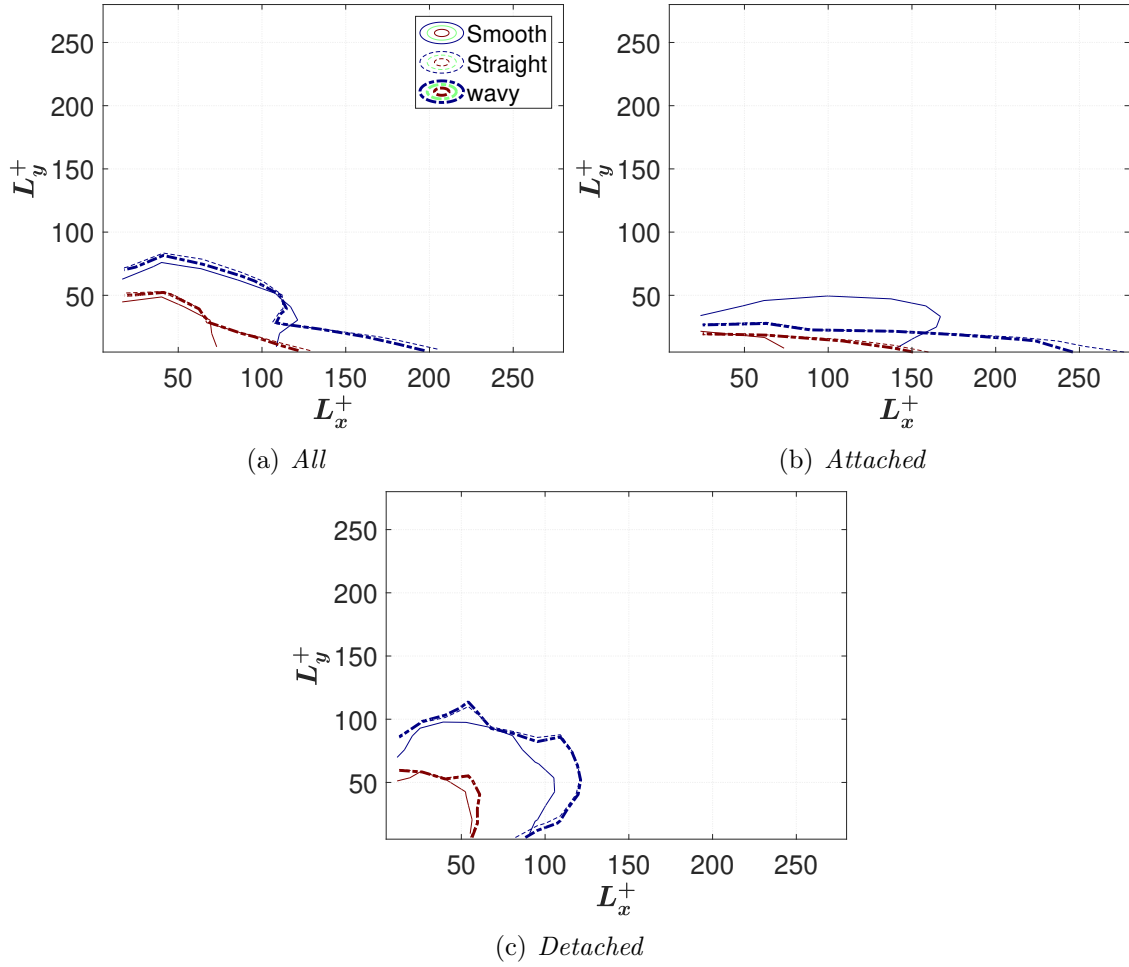


Figura 5.34: J.p.d.f. della dimensione *streamwise* e della dimensione *spanwise*.

La j.p.d.f. di figura 5.34 della dimensione *streamwise* e *spanwise* delle strutture coerenti mostra come vi sia un'elevata probabilità che le strutture dei casi manipolati si presentino più allungate nella direzione del flusso e più strette in direzione *spanwise* rispetto a quelle del caso *smooth*. Risulta inoltre possibile osservare come l'effetto di allungamento sia più marcato per il caso *straight* rispetto a quello *wavy*. Questo effetto è visibile nei pressi della parete mentre lontano da questa è possibile notare, per l'isolinea a maggiore probabilità, come persista l'effetto di allungamento delle strutture manipolate in direzione *streamwise* (comunque più lieve rispetto al caso delle *wall attached structures*) mentre si perda quello nella direzione *spanwise* così com'è possibile osservare per la totalità delle strutture.

La figura 5.35, raffigurante la j.p.d.f. della dimensione *streamwise* e *wall-normal* delle strutture coerenti, evidenzia nuovamente come le strutture dei casi manipola-

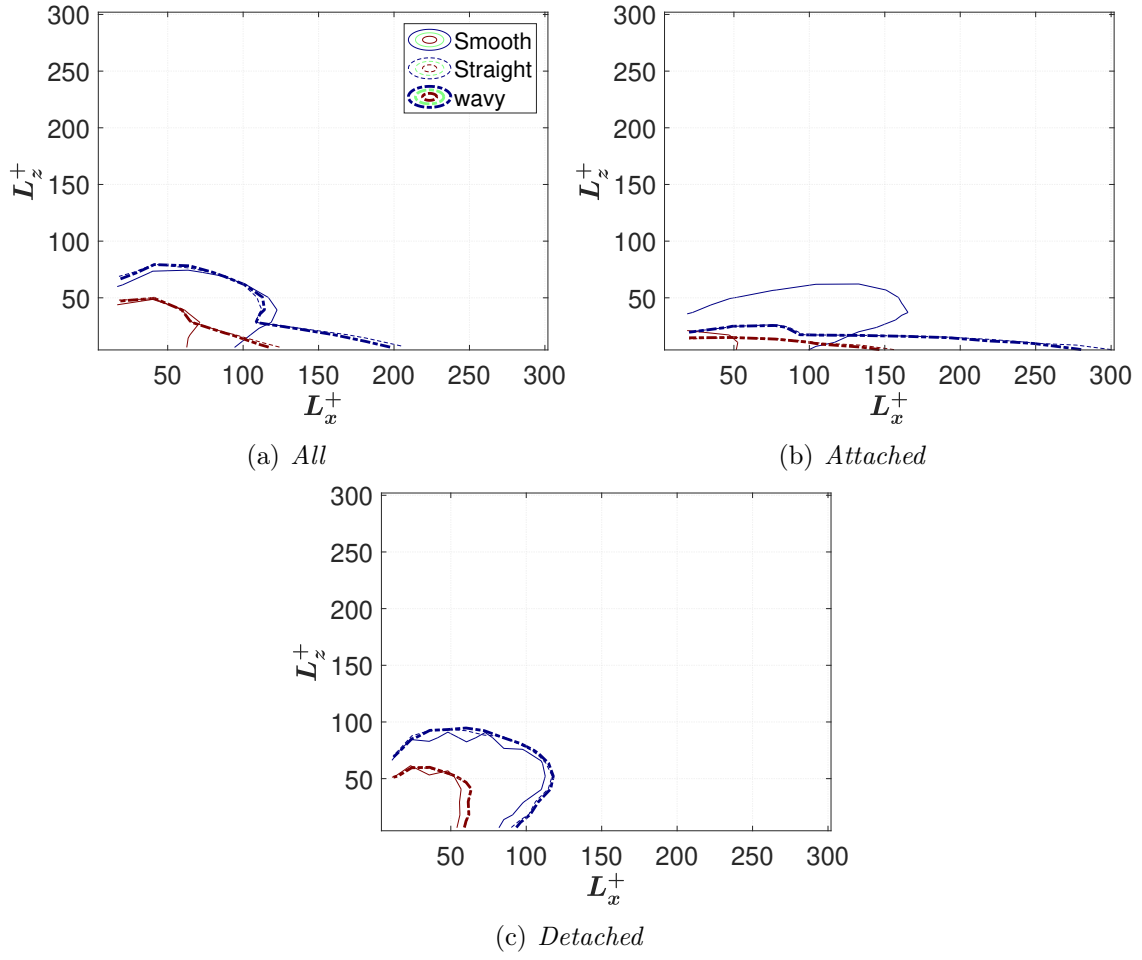


Figura 5.35: J.p.d.f. della dimensione *streamwise* e della dimensione *wall-normal*.

ti si presentino più allungate nella direzione *streamwise* rispetto a quelle del caso *smooth* e come questo effetto sia più marcato per il caso *straight*. Risulta inoltre possibile osservare come vi sia una maggiore probabilità che le strutture dei casi manipolati siano più strette anche in direzione *wall-normal* rispetto al caso di parete liscia. Il comportamento appena descritto risulta molto marcato nei pressi della parete mentre svanisce lontano da questa.

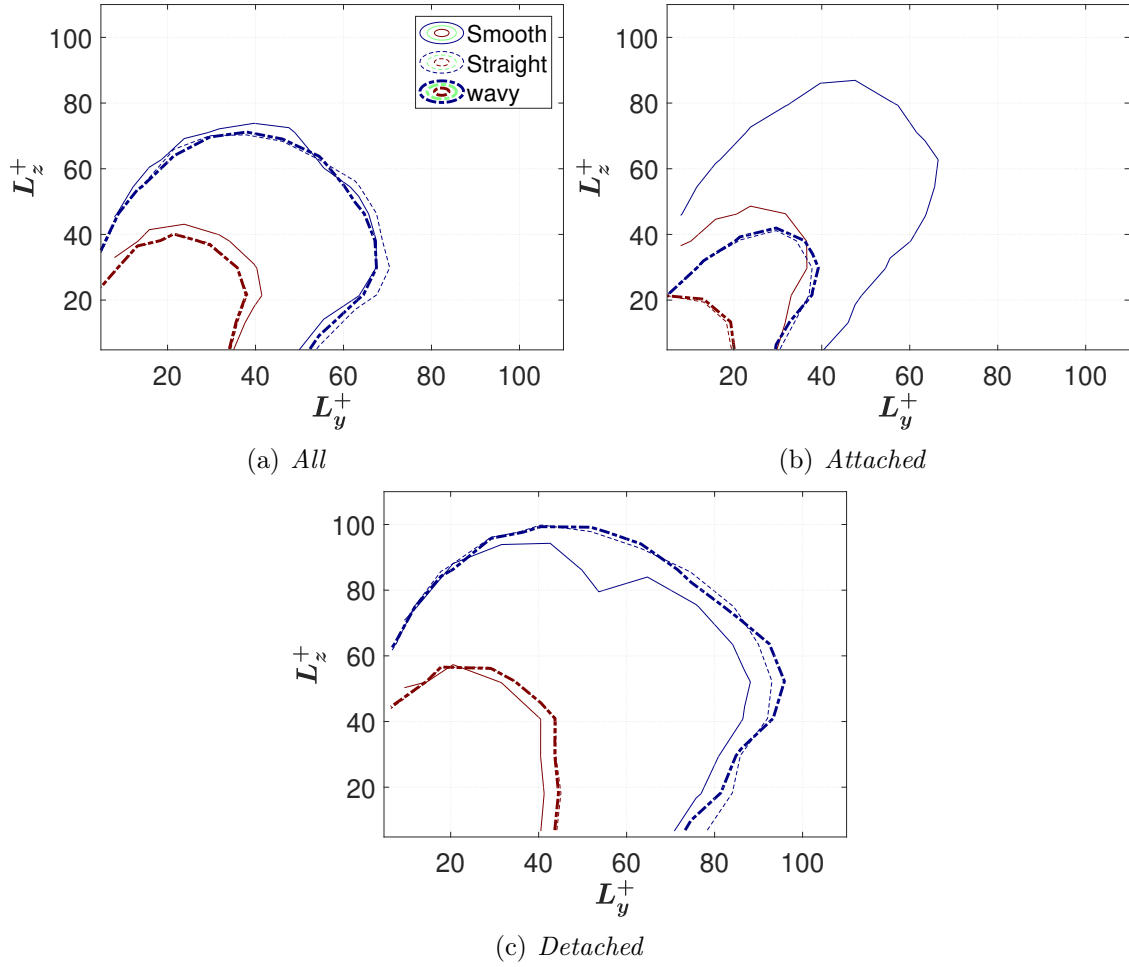


Figura 5.36: J.p.d.f. della dimensione *spanwise* e della dimensione *wall-normal*.

La j.p.d.f. di figura 5.36 della dimensione *spanwise* e *wall-normal* delle strutture coerenti permette di confermare quanto affermato. Vi è una maggiore probabilità che le strutture dei casi manipolati si presentino più strette sia in direzione *spanwise* sia in quella *wall-normal* rispetto a quelle del caso di parete liscia. Questo effetto è ben visibile nei pressi della parete mentre svanisce lontano da questa.

Gli andamenti delle j.p.d.f. appena analizzate permettono di confermare quanto osservato in precedenza nell'analisi mediante p.d.f. e quanto osservato nell'analisi delle strutture identificate con il *Metodo 1*.

Capitolo 6

Analisi statistica del *tracking* delle strutture coerenti

Individuati e salvati i percorsi spazio-temporali delle strutture coerenti relativi ai rami primari, come trattato nel quarto capitolo, vengono riportati i risultati dell'analisi statistica. Gli strumenti utilizzati per condurre l'analisi statistica sono gli stessi di quelli utilizzati durante l'analisi della morfologia delle strutture coerenti mentre risultano leggermente differenti sia il processo di *preprocessing* dei dati sia la suddivisione in gruppi dei *paths*.

Per ognuna delle proprietà dei *paths* di interesse viene creato un vettore e vengono aperti i file relativi ad ognuno dei *paths* individuati. Le proprietà dei *paths* vengono allora salvate nei rispettivi vettori in modo da rendere i dati di più semplice gestione per condurre l'analisi statistica.

Essendo l'obiettivo dell'analisi quello di valutare l'effetto che la manipolazione delle pareti ha sull'evoluzione spazio-temporale delle strutture coerenti, risulta interessante indagare questo effetto a seconda della distanza dalla parete a cui la struttura si trova durante la sua esistenza. Per questo motivo i *paths*, denominati anche *branches*, vengono divisi in due gruppi.

- *Wall attached branches*: percorsi spazio-temporali che contengono almeno una struttura coerente il cui punto di minima distanza dalla parete è situato a meno di $20l_\tau$ da quest'ultima;
- *Wall detached branches*: percorsi spazio-temporali che non contengono nemmeno una struttura coerente il cui punto di minima distanza dalla parete è situato a meno di $20l_\tau$ da quest'ultima.

Ad entrambi i gruppi di *paths* vengono inoltre, applicati due filtri in modo tale da escludere dall'analisi i percorsi che non rispettano determinati requisiti.

- Filtro sulle strutture planari: vengono esclusi dall'analisi tutti i *paths* che contengono almeno una struttura che possiede una delle tre dimensioni (intese come dimensioni del *bounding box* contenete la struttura) pari a quella di un punto della griglia. In questo modo vengono escluse dall'analisi quei *paths* che contengono almeno una struttura che non è tridimensionale;
- Filtro sulla minima estensione temporale: vengono esclusi dall'analisi tutti i *paths* che si estendono per meno di tre *snapshots*. In questo modo vengono esclusi dall'analisi quei percorsi considerati troppo brevi per poter essere rappresentativi del campo di moto.

A questo punto, vengono riportati i risultati dell'analisi statistica separatamente per i percorsi delle strutture coerenti identificate con il *Metodo 1* e per quelle identificate con il *Metodo 2*.

6.1 Analisi dei *paths* delle strutture identificate con il *Metodo 1*

Prima di tutto si riportano i risultati del processo di *tracking* in termini di numero e volume delle strutture che presentano connessione, successivamente si riporta l'analisi della distribuzione dei *paths* in tipologia delle strutture coerenti che li compongono per poi passare alla vera e propria analisi dei rami primari.

6.1.1 Analisi statistica della distribuzione dei *paths*

Per le strutture coerenti identificate con il *Metodo 1*, il processo di *tracking* ha come risultato che solamente il 22% della totalità delle strutture identificate presenta almeno una connessione con una struttura di uno *snapshot* adiacente. Il volume occupato dalle strutture connesse rappresenta però il 71% del volume occupato da tutte le strutture coerenti identificate. Le strutture isolate risultano essere piccoli oggetti il cui volume è mediamente pari al 37% del volume medio di tutte le strutture identificate. Quanto appena osservato è valido per il caso *wavy* ma i risultati del processo di *tracking* sono simili anche per il caso *straight*. Le strutture che presentano almeno una connessione rappresentano il 20% della totalità delle strutture identificate e il volume da queste occupato è pari al 71% del volume occupato da tutte le strutture coerenti identificate. Anche in questo caso le strutture isolate risultano essere piccoli oggetti il cui volume è mediamente pari al 39% del volume medio di tutte le strutture identificate.

La tabella 6.1 mostra come circa il 63% dei rami primari individuati si estenda solamente per due *snapshots*, questi vengono di conseguenza esclusi dall'analisi. Ciò si

verifica sia per il caso *straight* sia per quello *wavy*. Dei rami primari con una maggiore estensione temporale, l'81% risulta appartenere al gruppo degli *wall attached branches* per il caso *straight* mentre i rami appartenenti a questo gruppo per il caso *wavy* risultano essere l'84% del totale.

	<i>All b.</i>	<i>All b. ($t > 2dt$)</i>	<i>Attached b.</i>	<i>Detached b.</i>
<i>Straight</i>	25039	8417	6813	1604
<i>Wavy</i>	26145	8912	7449	1463

Tabella 6.1: Distribuzione in numero dei rami primari, *Metodo 1*.

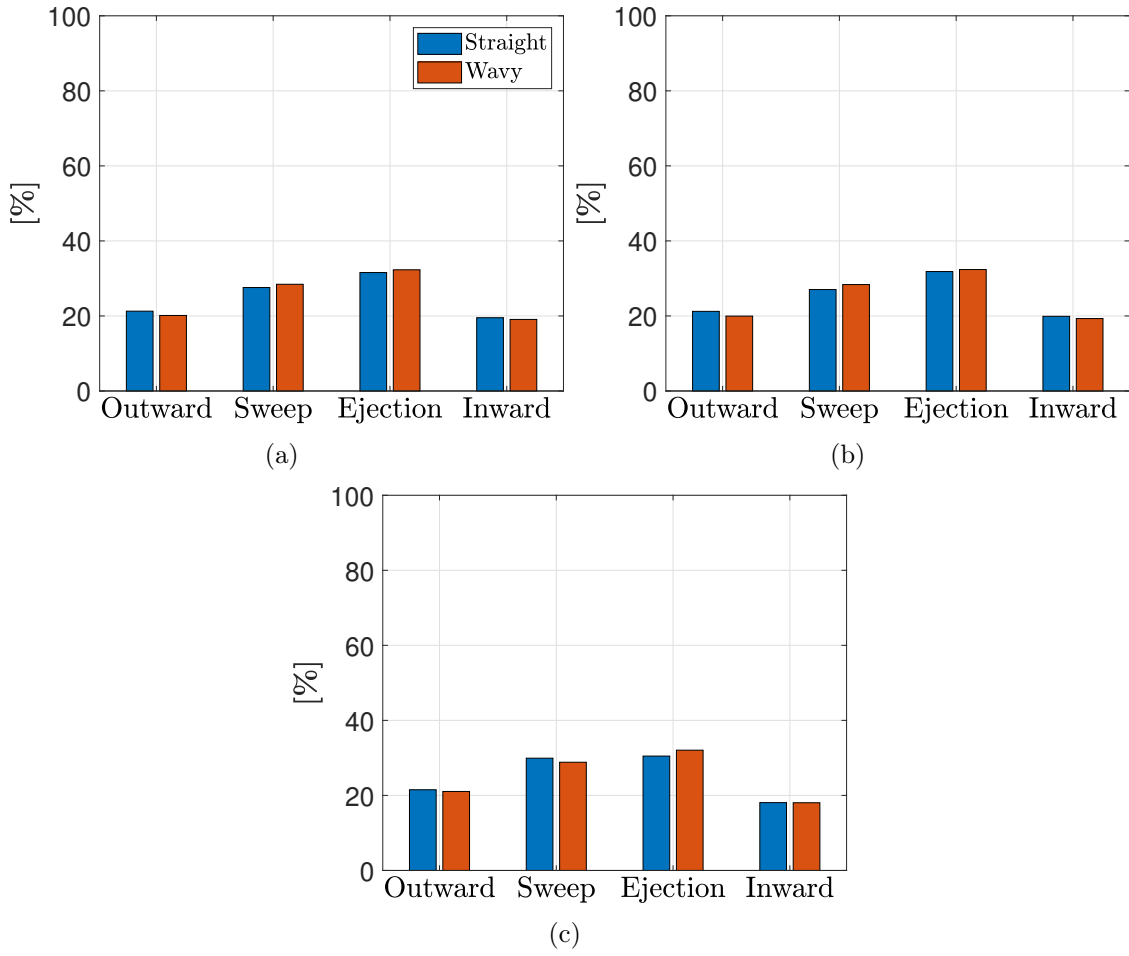


Figura 6.1: Distribuzione della tipologia in numero *all branches* (a), *wall attached branches* (b), *wall detached branches* (c), *Metodo 1*.

In figura 6.1 viene riportato lo studio della distribuzione della tipologia dei *paths* in numero, espressa come percentuale sul totale dei rami primari individuati. Nei pressi della parete è possibile apprezzare come la distribuzione del caso *wavy* sia più sbilanciata a favore di *paths* di tipo *ejection* e *sweep* rispetto alla distribuzione del caso *straight*. Oltre a quella appena evidenziata, lo studio della tipologia non permette di osservare alcuna differenza rilevante tra i due casi analizzati.

6.1.2 Analisi statistica del *tracking* delle strutture

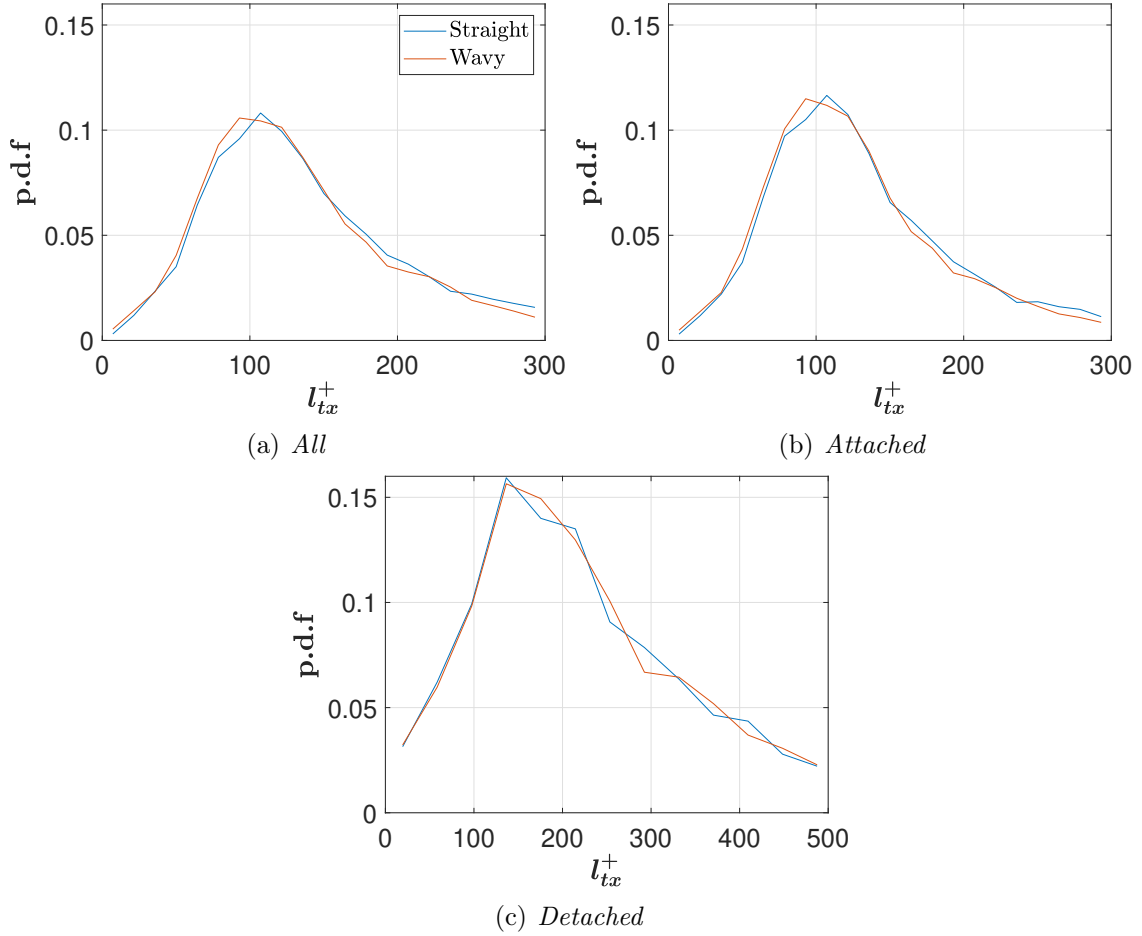


Figura 6.2: P.d.f. della dimensione *streamwise*, in valore assoluto, della traiettoria.

In figura 6.2 è riportata la p.d.f. della dimensione *streamwise*, in valore assoluto, della traiettoria calcolata come la somma in modulo delle distanze relative in direzione *streamwise* tra le strutture che formano il *path*. Seppur le differenze riscontrate tra le due distribuzioni siano di lieve entità, è possibile notare come il picco della

distribuzione del caso *wavy* sia situato a un valore circa $13l_\tau$ più basso rispetto a quello della distribuzione del caso *straight*. La distribuzione del caso *wavy* risulta essere inoltre leggermente spostata verso l_{tx}^+ minori rispetto a quella del caso *straight*. I comportamenti appena evidenziati sono visibili per il gruppo degli *wall attached branches* mentre, per quello dei *wall detached branches*, le lievi differenze tra i due casi risultano svanire.

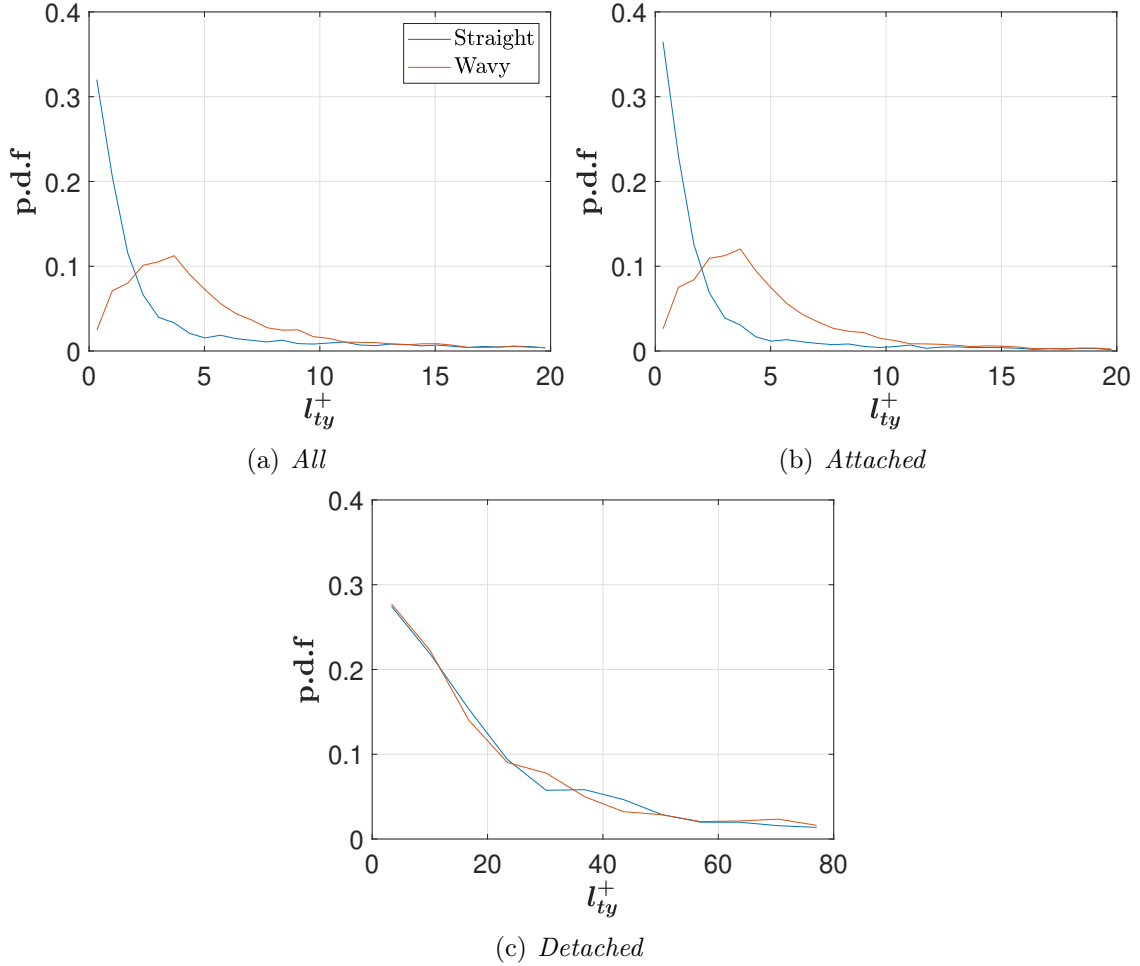


Figura 6.3: P.d.f. della dimensione *spanwise*, in valore assoluto, della traiettoria.

La p.d.f. della dimensione *spanwise*, in valore assoluto, della traiettoria, riportata in figura 6.3, mostra come la distribuzione del caso *straight* si presenti molto più stretta rispetto a quella del caso *wavy* con un picco situato a un valore di circa $3l_\tau$ più basso. Il comportamento osservato risulta visibile per il gruppo degli *wall attached branches* mentre per quello dei *wall detached branches* le due distribuzioni risultano sovrapposte.

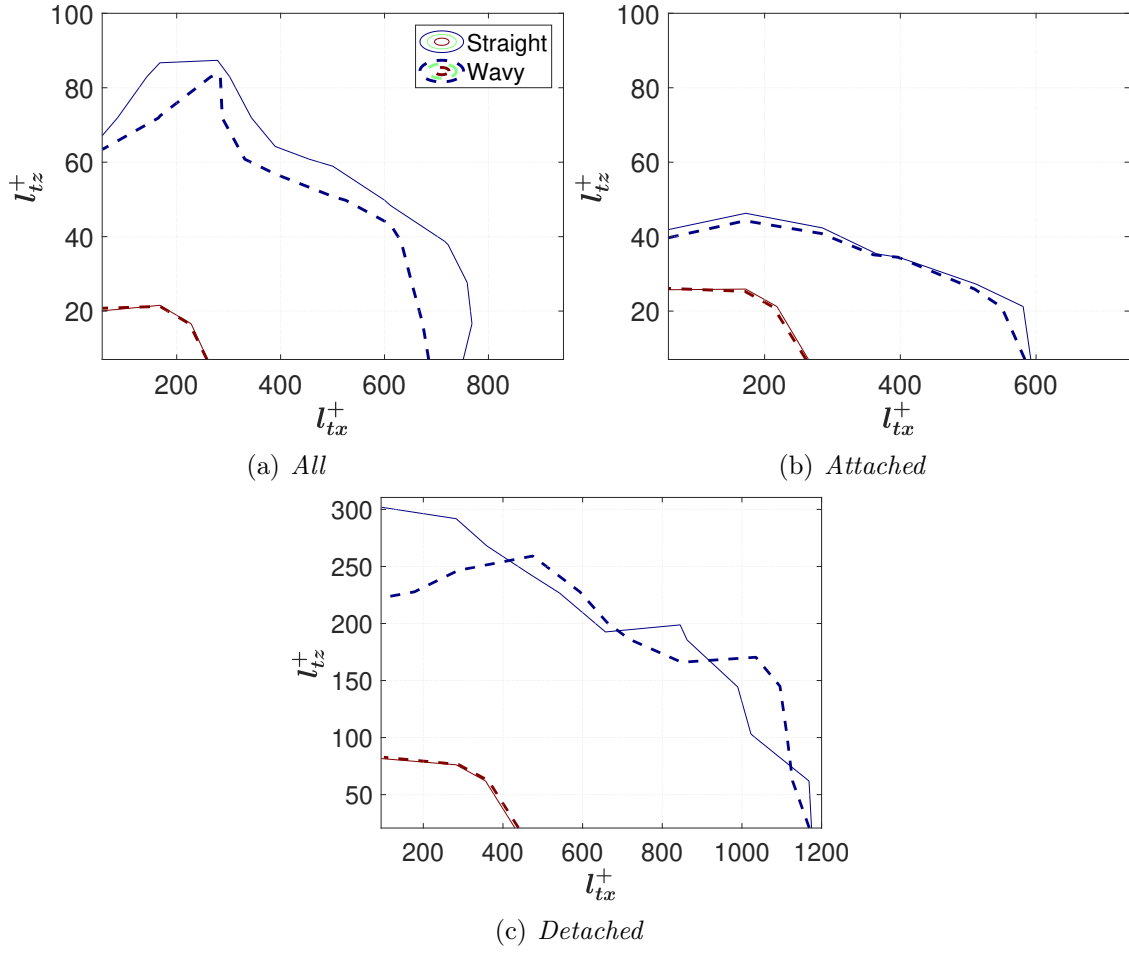


Figura 6.4: J.p.d.f. della dimensione *streamwise* e *wall-normal*, in valore assoluto, della traiettoria.

La figura 6.4 mostra la j.p.d.f. della dimensione *streamwise* e *wall-normal*, in valore assoluto, della traiettoria. Da questa è possibile notare come vi sia un'elevata probabilità che i *paths* del caso *straight* presentino una traiettoria più lunga sia nella direzione del flusso sia in direzione *wall-normal* rispetto a quelle del caso *wavy*. Questo effetto risulta più marcato osservando il gruppo degli *wall attached branches* rispetto a quello dei *wall detached branches* per cui non sembrano esserci evidenti differenze tra le distribuzioni dei due casi analizzati.

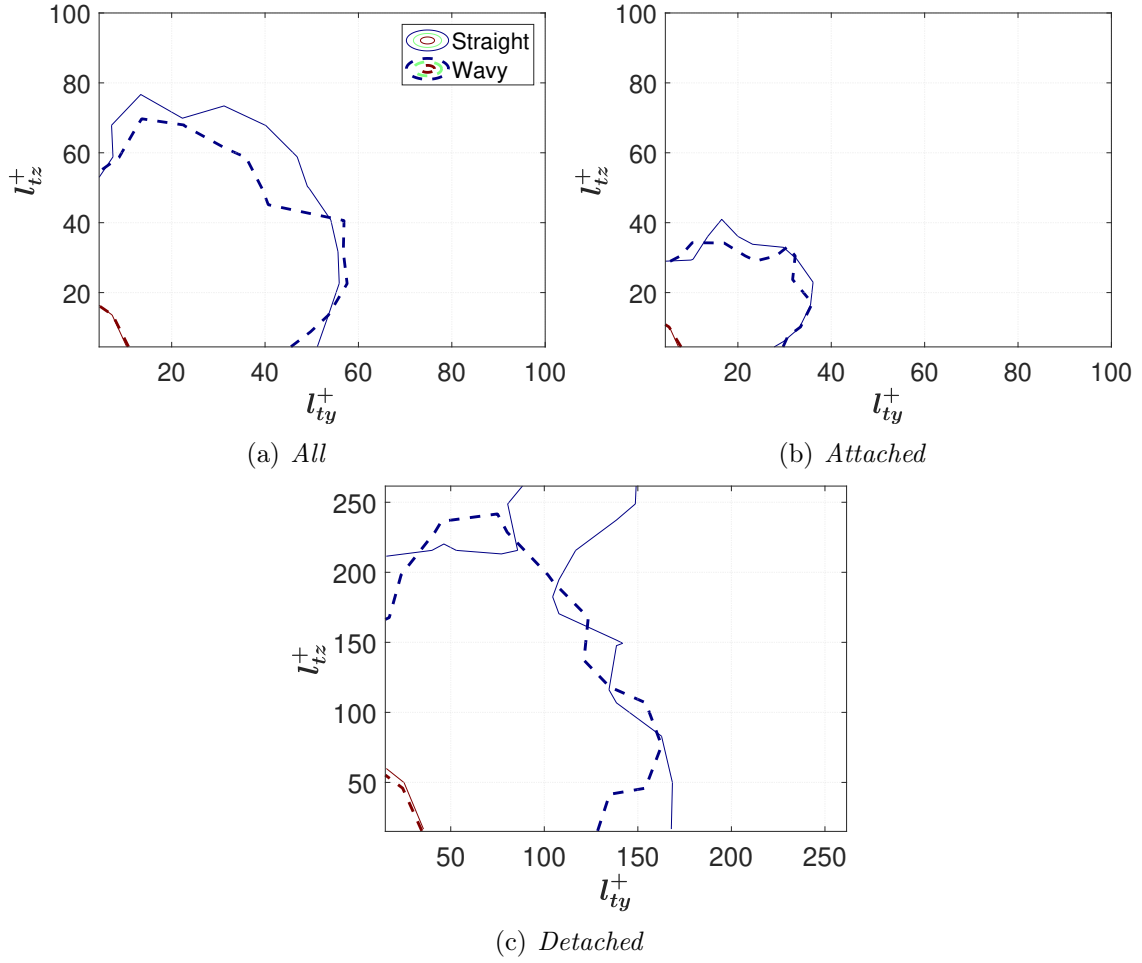


Figura 6.5: J.p.d.f. della dimensione *spanwise* e *wall-normal*, in valore assoluto, della traiettoria.

La j.p.d.f. della dimensione *spanwise* e *wall-normal*, in valore assoluto, della traiettoria, riportata in figura 6.5, evidenzia come vi sia un'elevata probabilità che i *paths* del caso *wavy* si presentino leggermente più lunghi in direzione *spanwise* e più corti in direzione *wall-normal* come osservato in figura 6.4. L'effetto appena osservato risulta visibile solamente per il gruppo degli *wall attached branches* mentre non sembrano esserci evidenti differenze tra le distribuzioni dei due casi per il gruppo dei *wall detached branches*

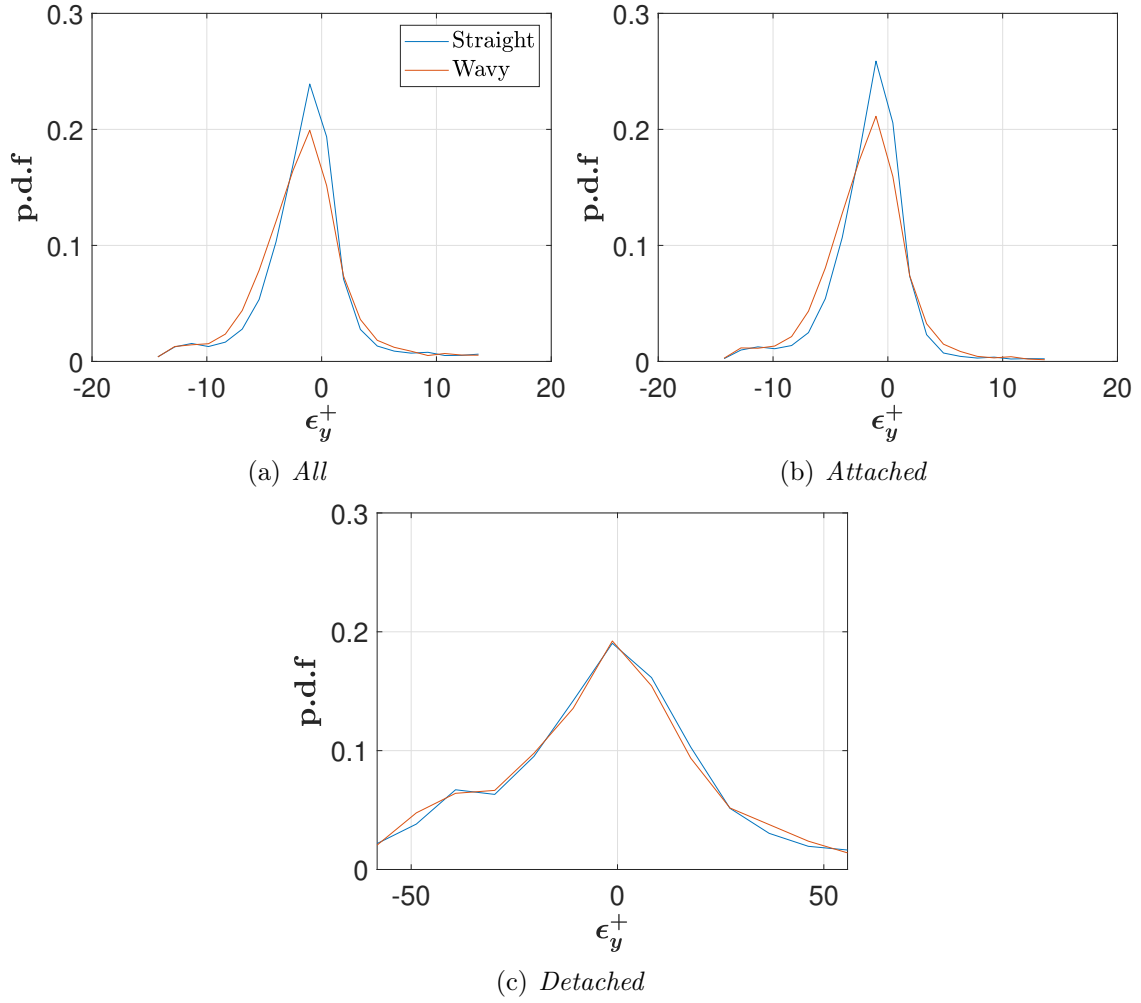


Figura 6.6: P.d.f. della somma delle deformazioni parziali in direzione *spawise* lungo la traiettoria.

La figura 6.6 mostra la p.d.f. della somma delle deformazioni parziali in direzione *spawise* lungo la traiettoria. Questa viene calcolata come la somma delle differenze tra le dimensioni in direzione *spawise* delle strutture adiacenti all'interno del *path* normalizzata con l_τ . Osservando le distribuzioni è possibile osservare come entrambe mostrino un picco posizionato a un valore inferiore allo zero indipendentemente dal gruppo di appartenenza dei *paths*. La distribuzione del caso *wavy* risulta meno stretta rispetto a quella del caso *straight* e più spostata verso valori negativi di ϵ_y^+ . Questa differenza tra i due casi risulta visibile solamente per il gruppo degli *wall attached branches*.

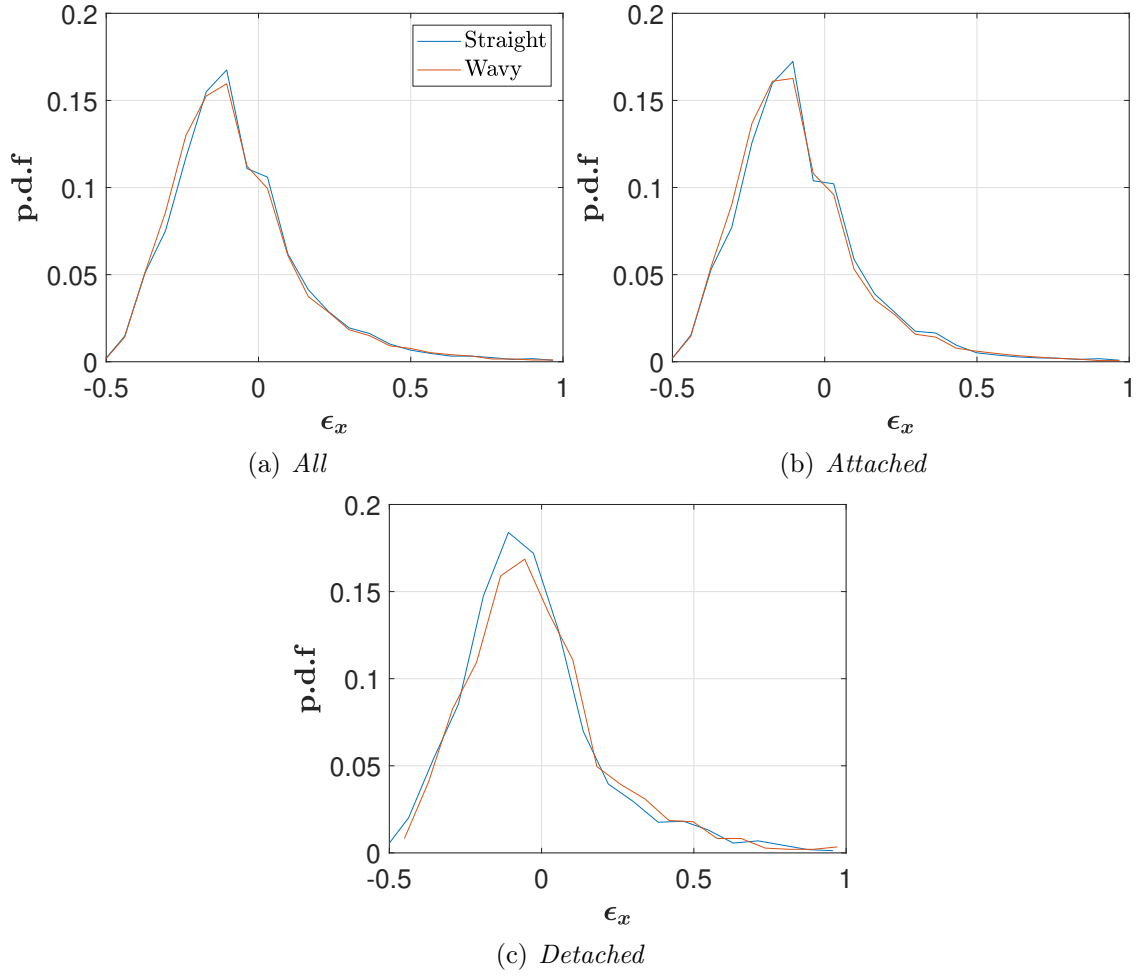


Figura 6.7: P.d.f. della deformazione media in direzione *streamwise* lungo la traiettoria normalizzata con la dimensione della struttura di partenza del ramo.

In figura 6.7 è riportata la p.d.f. della deformazione media in direzione *streamwise* lungo la traiettoria normalizzata con la dimensione della struttura di partenza del ramo, ottenuta facendo la media delle differenze tra le dimensioni in direzione *streamwise* delle strutture adiacenti all'interno del *path* e normalizzando con la dimensione *streamwise* della prima struttura del *path*. Entrambe le distribuzioni mostrano il picco posizionato a un valore inferiore allo zero ed è possibile notare, per gli *wall attached branches* come la distribuzione del caso *wavy* risulti leggermente spostata verso valori negativi di ϵ_x .

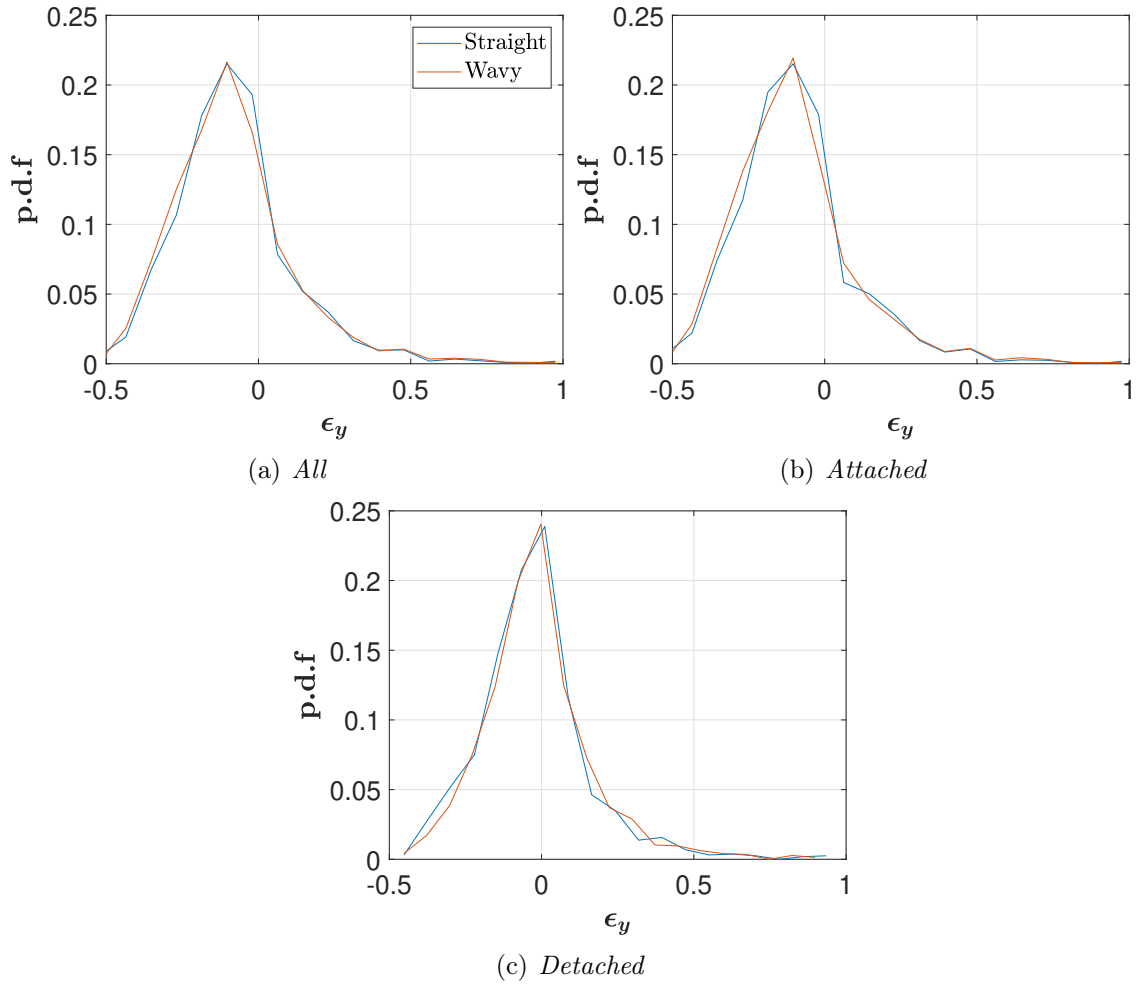


Figura 6.8: P.d.f. della deformazione media in direzione *spanwise* lungo la traiettoria normalizzata con la dimensione della struttura di partenza del ramo.

La p.d.f. della deformazione media in direzione *spanwise* lungo la traiettoria normalizzata con la dimensione della struttura di partenza del ramo, riportata in figura 6.8, permette di osservare nuovamente come, considerando gli *wall attached branches*, entrambe le distribuzioni presentino il picco posizionato a un valore inferiore allo zero. È inoltre possibile notare come la distribuzione del caso *wavy* risulti lievemente più spostata verso valori negativi di ϵ_y rispetto a quella del caso *straight*. Osservando le distribuzioni relative al gruppo dei *wall detached branches* si nota come non siano visibili le lievi differenze tra i due casi appena descritte e come il picco delle due distribuzioni sia posizionato ad valore più prossimo allo zero rispetto a quanto osservato per gli *wall attached branches*.

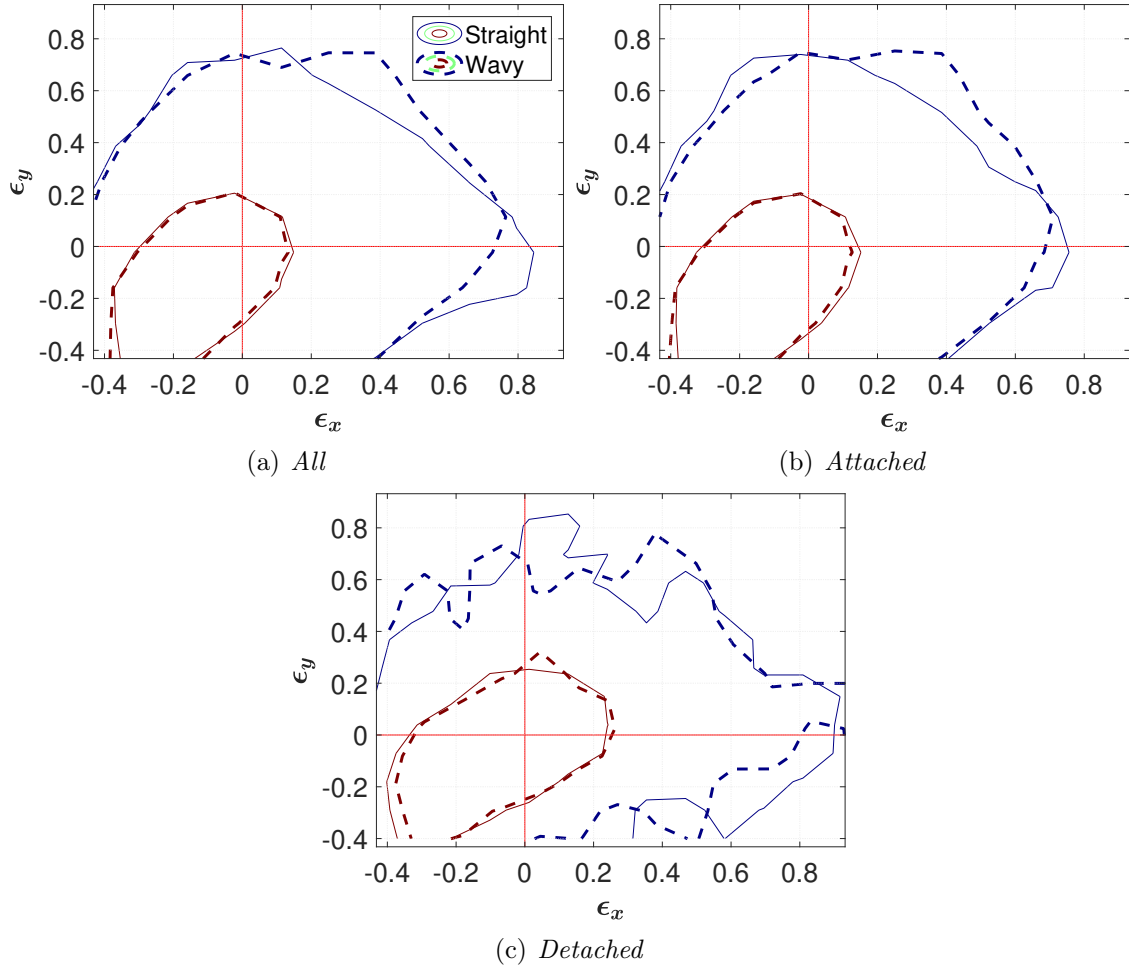


Figura 6.9: J.p.d.f. della deformazione media in direzione *streamwise* e *spanwise* lungo la traiettoria normalizzate con la dimensione della struttura di partenza del ramo.

La figura 6.9 mostra la j.p.d.f. della deformazione media in direzione *streamwise* e *spanwise* lungo la traiettoria normalizzate con la dimensione della struttura di partenza del ramo. Questa permette di evidenziare come vi sia una maggiore probabilità che le strutture appartenenti a i *paths* del caso *wavy* subiscano una deformazione isotropa lungo la traiettoria rispetto a quelli appartenenti ai *paths* del caso *straight*. Ciò significa che se una struttura appartenente ad un *path* del caso *wavy* subisce lungo la sua traiettoria un allungamento in direzione *streamwise* ha più probabilità rispetto ad una struttura appartenente ad un *path* del caso *straight* di subire un allungamento anche in direzione *spanwise*. Al contrario vi è una maggiore probabilità che i *paths* del caso *straight* subiscano una deformazione anisotropa lungo la traiettoria, ovvero deformazioni di segno discorde, rispetto a quelli appartenenti ai

paths del caso *wavy*. Il comportamento appena evidenziato risulta visibile solamente per il gruppo degli *wall attached branches* mentre non lo è per il gruppo dei *wall detached branches*.

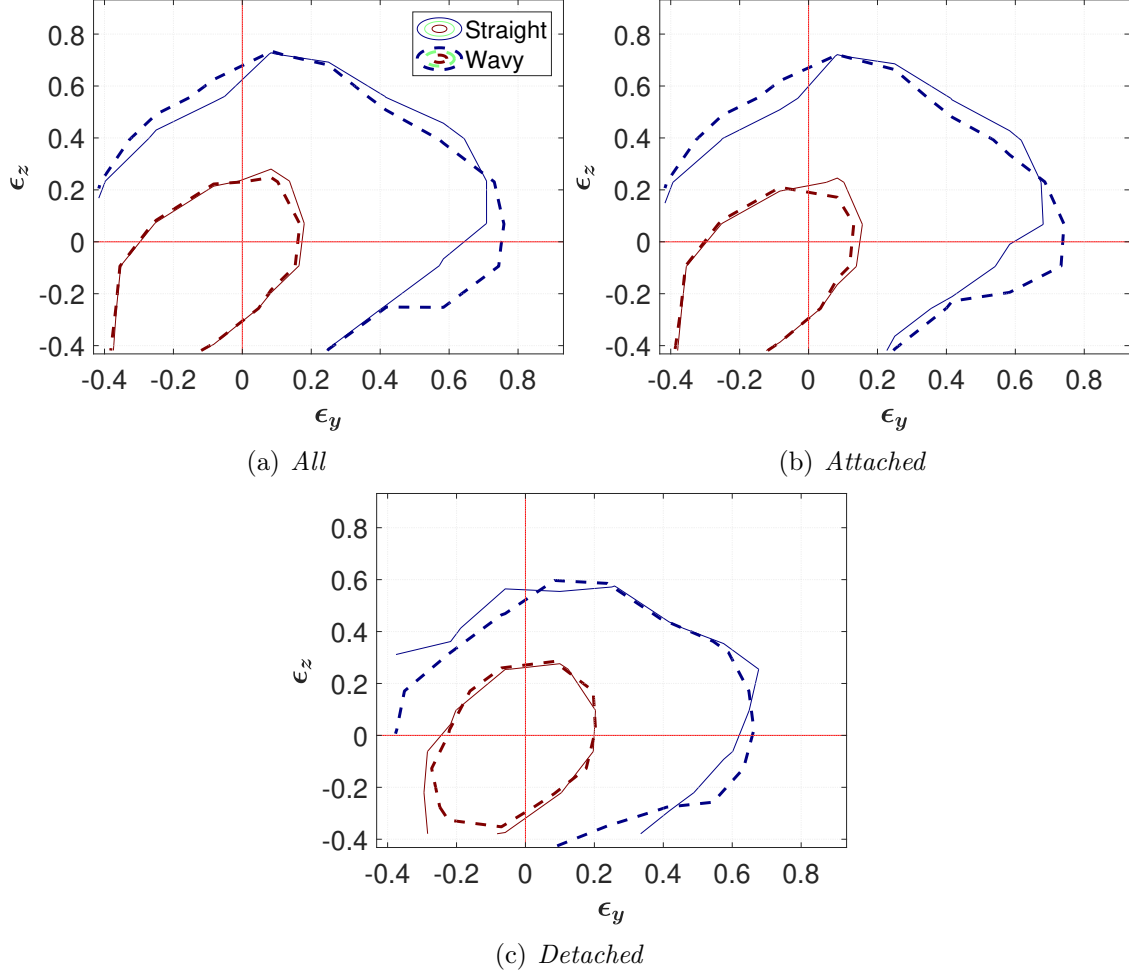


Figura 6.10: J.p.d.f. della deformazione media in direzione *spanwise* e *wall-normal* lungo la traiettoria normalizzate con la dimensione della struttura di partenza del ramo.

In figura 6.10 è riportata la j.p.d.f. della deformazione media in direzione *spanwise* e *wall-normal* lungo la traiettoria normalizzate con la dimensione della struttura di partenza del ramo. Questa permette di osservare come, considerando il piano *spanwise/wall-normal*, siano le strutture appartenenti ai *paths* del caso *straight* ad avere una maggiore probabilità, rispetto a quelle appartenenti ai *paths* del caso *wavy*, di subire lungo la traiettoria una deformazione isotropa. Al contrario vi è una maggiore probabilità che i *paths* del caso *wavy* subiscano una deformazione aniso-

tropa lungo la traiettoria rispetto a quelli appartenenti ai *paths* del caso *straight*. Il comportamento appena evidenziato risulta visibile solamente per il gruppo degli *wall attached branches* mentre non lo è per il gruppo dei *wall detached branches*.

Gli andamenti delle p.d.f. e delle j.p.d.f. appena analizzati permettono di effettuare alcune considerazioni importanti sugli effetti della manipolazione sull'evoluzione spazio-temporale delle strutture coerenti. Inoltre è interessante notare come sia stato possibile evidenziare alcune sottili differenze tra il caso *wavy* e il caso *straight*, che non era stato possibile notare durante l'analisi statistica della morfologia delle strutture coerenti. Le differenze trovate sono state osservate solamente per i *paths* appartenenti al gruppo degli *wall attached branches*, mentre non è stato possibile evidenziarne alcuna per quello dei *wall detached branches*. Volendo suddividere i comportamenti osservati tra quelli riguardanti la traiettoria delle strutture coerenti e quelli riguardanti la loro deformazione lungo quest'ultima; si nota come la differenza tra i picchi delle distribuzioni nelle figure 6.2 e 6.3 mostri come vi sia più probabilità che le strutture appartenenti al caso *wavy* percorrano più spazio in direzione *spanwise* e meno in direzione *streamwise* rispetto a quelle del caso *straight*. Il comportamento appena descritto trova riscontro nelle j.p.d.f. di figura 6.4 e 6.5 che permettono inoltre di affermare come vi sia una maggiore probabilità che le strutture del caso *straight* percorrano più spazio in direzione *wall-normal*, lungo la traiettoria, rispetto alle strutture del caso *wavy*. Trattando invece il differente effetto delle due manipolazioni sulla deformazione delle strutture coerenti lungo la traiettoria, si nota come le distribuzioni del caso *wavy*, nelle figure 6.6, 6.7 e 6.8, risultino meno strette rispetto a quelle del caso *straight* e spostate verso valori inferiori delle rispettive grandezze. Questo permette di affermare che vi è una maggiore probabilità che le strutture del caso *wavy* subiscano lungo la traiettoria una maggiore riduzione delle dimensioni *spanwise* e *streamwise* rispetto a quelle del caso *straight*. Risulta curioso il comportamento osservato nelle j.p.d.f. di figura 6.9 e 6.10 per cui sembrerebbe esserci una maggiore probabilità che le strutture del caso *wavy* subiscano una deformazione isotropa nel piano *streamwise/spanwise* e anisotropa nel piano *spanwise/wall-normal*.

6.2 Analisi dei *paths* delle strutture identificate con il *Metodo 2*

Come per i percorsi delle strutture identificate con il *Metodo 1*, prima di tutto si riportano i risultati del processo di *tracking* in termini di numero e volume delle strutture che presentano connessione, successivamente si riporta l'analisi della distribuzione dei *paths* in tipologia delle strutture coerenti che li compongono per poi

passare alla vera e propria analisi dei rami primari.

6.2.1 Analisi statistica della distribuzione dei *paths*

Per le strutture coerenti identificate con il *Metodo 2*, il processo di *tracking* ha come risultato che solamente il 21% della totalità delle strutture identificate presenta almeno una connessione con una struttura di uno *snapshot* adiacente. Il volume occupato dalle strutture connesse rappresenta inoltre solo il 21% del volume occupato da tutte le strutture coerenti identificate. Le strutture isolate risultano essere oggetti il cui volume è mediamente pari al volume medio di tutte le strutture identificate. Quanto appena osservato è valido per il caso *wavy* ma i risultati del processo di *tracking* sono simili anche per il caso *straight*. Le strutture che presentano almeno una connessione rappresentano il 19% della totalità delle strutture identificate e il volume da queste occupato è pari al 22% del volume occupato da tutte le strutture coerenti identificate. Anche in questo caso le strutture isolate risultano essere oggetti il cui volume è mediamente pari al volume medio di tutte le strutture identificate. Sebbene la percentuale di strutture che presentano connessione in numero sia pari tra i due metodi di identificazione delle strutture coerenti; per il *Metodo 1*, le strutture che vengono escluse dal processo di *tracking* sono oggetti di piccola dimensione, mentre per il *Metodo 2* gli oggetti esclusi risultano avere una dimensione coerente con quella media delle strutture coerenti identificate.

	<i>All b.</i>	<i>All b. ($t > 2dt$)</i>	<i>Attached b.</i>	<i>Detached b.</i>
<i>Straight</i>	26057	9589	7661	1928
<i>Wavy</i>	27211	9844	7696	2148

Tabella 6.2: Distribuzione in numero dei rami primari, *Metodo 2*.

Come già osservato per i *paths* delle strutture identificate con il *Metodo 1*, la tabella 6.2 mostra come circa il 63% dei rami primari individuati si estenda solamente per due *snapshots*, questi vengono di conseguenza esclusi dall'analisi. Ciò si verifica sia per il caso *straight* sia per quello *wavy*. Dei rami primari con una maggiore estensione temporale, il 78% risulta appartenere al gruppo degli *wall attached branches* per il caso *straight* mentre i rami appartenenti a questo gruppo per il caso *wavy* risultano essere il 79% del totale. La maggioranza dei rami primari analizzati risulta quindi appartenente al gruppo degli *wall attached branches* così come già sottolineato nell'analisi precedente.

In figura 6.11 viene riportato lo studio della distribuzione della tipologia dei *paths* in numero, espressa come percentuale sul totale dei rami primari individuati. È possibile apprezzare come il caso *wavy* presenti una percentuale di *paths* di tipo *ejection* inferiore rispetto al caso *straight*, mentre risulta essere superiore la percentuale di

paths di tipo *sweep* rispetto al caso *straight*. Come già sottolineato durante l'analisi della distribuzione della tipologia delle strutture coerenti identificate con il *Metodo 1*, questo comportamento indica che nel caso *wavy* la "comunicazione" tra gli strati di fluido è superiore rispetto a quanto avviene nel caso *straight*. Una riduzione percentuale a parete dei *paths* di tipo *ejection* sarebbe coerente con le migliori prestazioni in termini di *drag reduction* riscontrate per le *riblets* sinusoidali rispetto a quelle longitudinali.

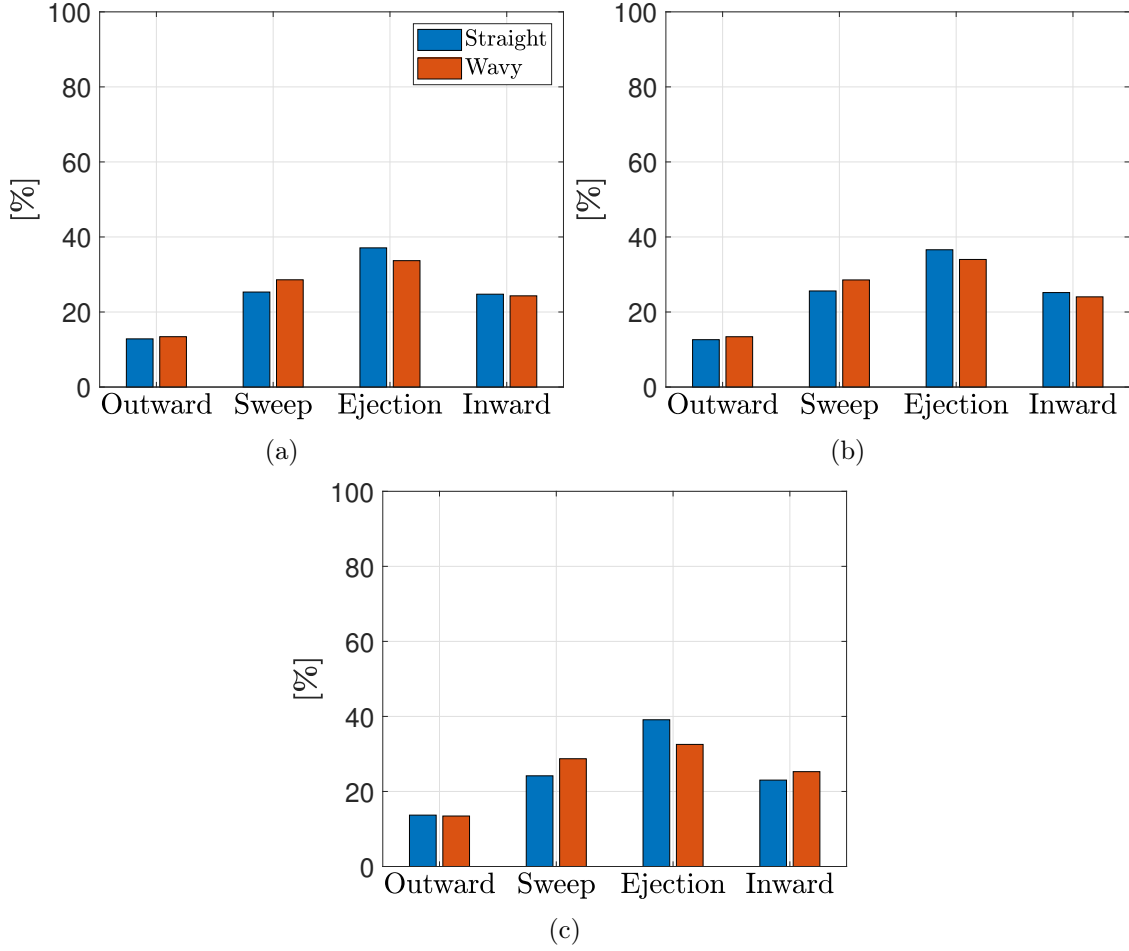


Figura 6.11: Distribuzione della tipologia in numero *all branches* (a), *wall attached branches* (b), *wall detached branches* (c), *Metodo 2*.

6.2.2 Analisi statistica del *tracking* delle strutture

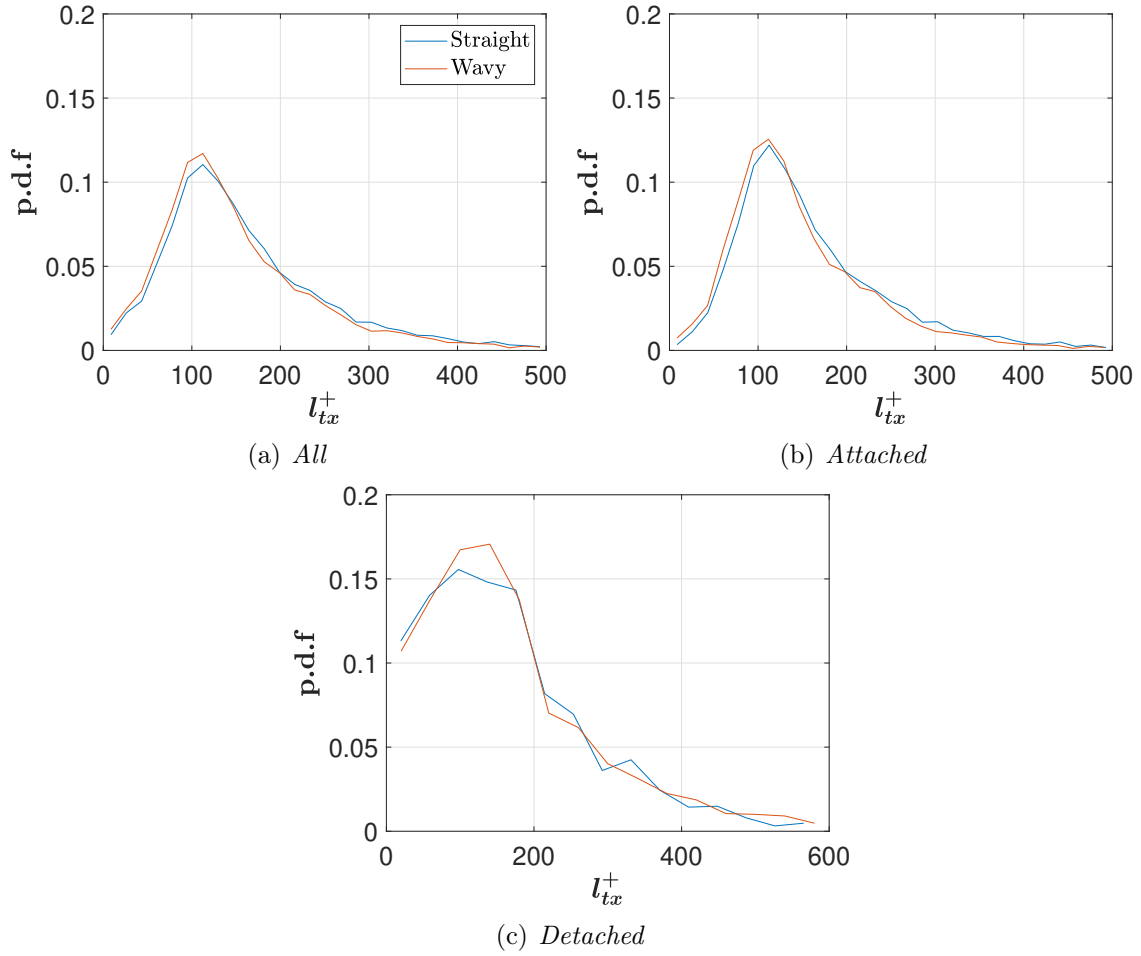


Figura 6.12: P.d.f. della dimensione *streamwise*, in valore assoluto, della traiettoria.

In figura 6.12 è riportata la p.d.f. della dimensione *streamwise*, in valore assoluto, della traiettoria. Nonostante le differenze riscontrate tra le due distribuzioni siano di lieve entità, è possibile notare come la distribuzione del caso *wavy* risulti essere leggermente spostata verso l_{tx}^+ minori rispetto a quella del caso *straight* anche se i picchi delle due distribuzioni sono situati allo stesso valore di l_{tx}^+ . I comportamenti appena evidenziati sono visibili per il gruppo degli *wall attached branches* mentre, per quello dei *wall detached branches*, le lievi differenze tra i due casi risultano svanire.

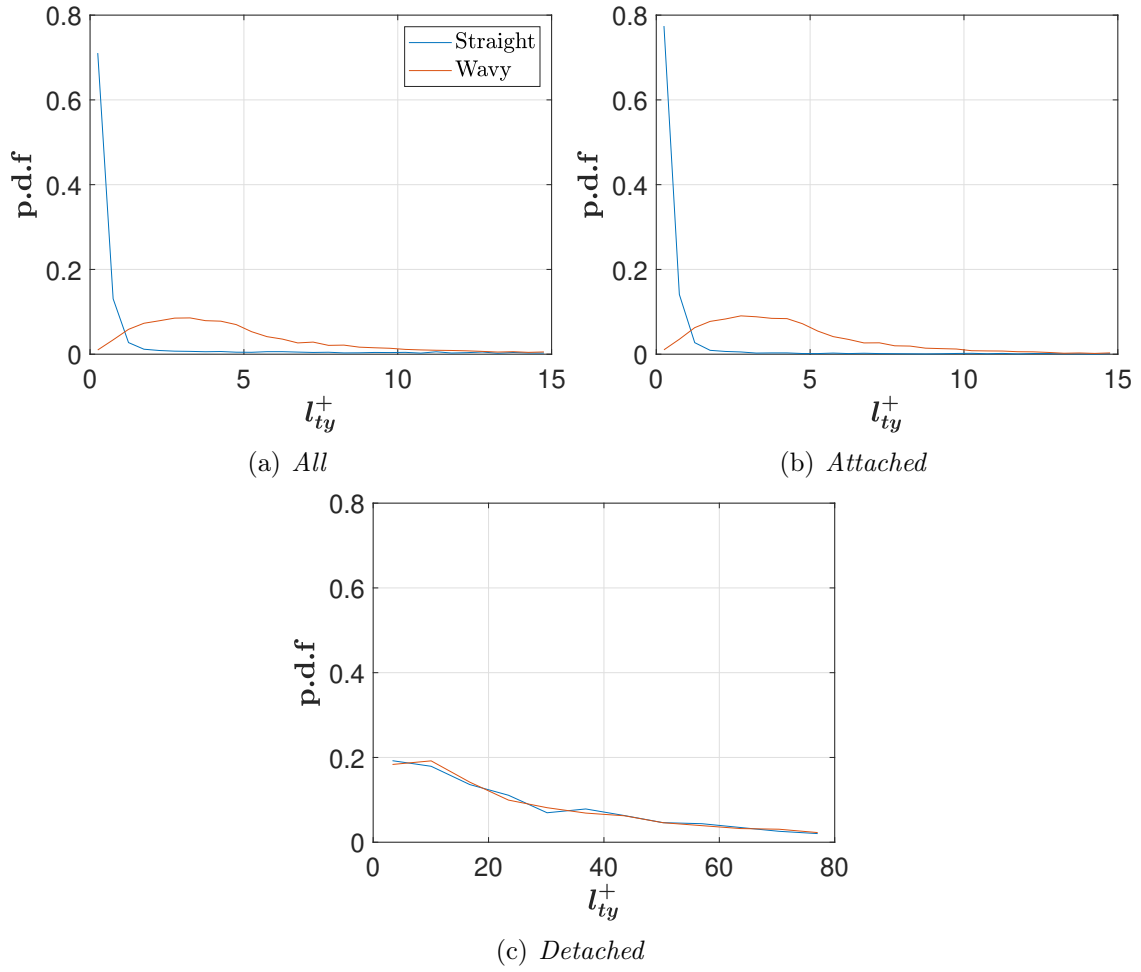


Figura 6.13: P.d.f. della dimensione *spanwise*, in valore assoluto, della traiettoria.

La p.d.f. della dimensione *spanwise*, in valore assoluto, della traiettoria, riportata in figura 6.13 mostra come la distribuzione del caso *straight* si presenti molto più stretta rispetto a quella del caso *wavy* con un picco situato a un valore di circa $2.5l_\tau$ più basso. Il comportamento osservato risulta visibile per il gruppo degli *wall attached branches* mentre per quello dei *wall detached branches* le due distribuzioni risultano sovrapposte.

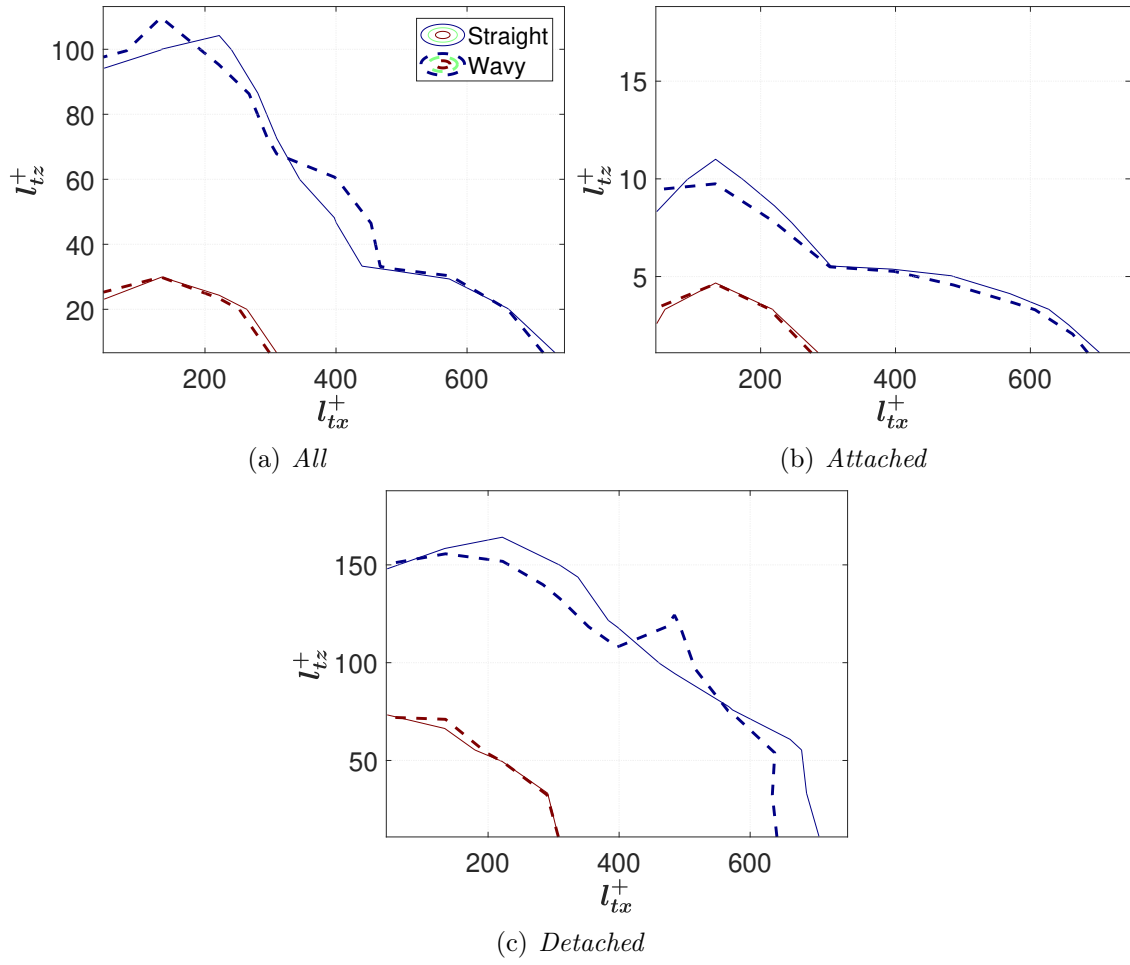


Figura 6.14: J.p.d.f. della dimensione *streamwise* e *wall-normal*, in valore assoluto, della traiettoria.

La figura 6.14 mostra la j.p.d.f. della dimensione *streamwise* e *wall-normal*, in valore assoluto, della traiettoria. Da questa è possibile notare come vi sia un'elevata probabilità che i *paths* del caso *straight* presentino una traiettoria più lunga sia nella direzione del flusso sia in direzione *wall-normal* rispetto a quelle del caso *wavy*. Le lievi differenze tra i due casi risultano più marcate osservando il gruppo degli *wall attached branches* rispetto a quello dei degli *wall detached branches* per cui non sembrano esserci evidenti differenze tra le distribuzioni dei due casi analizzati.

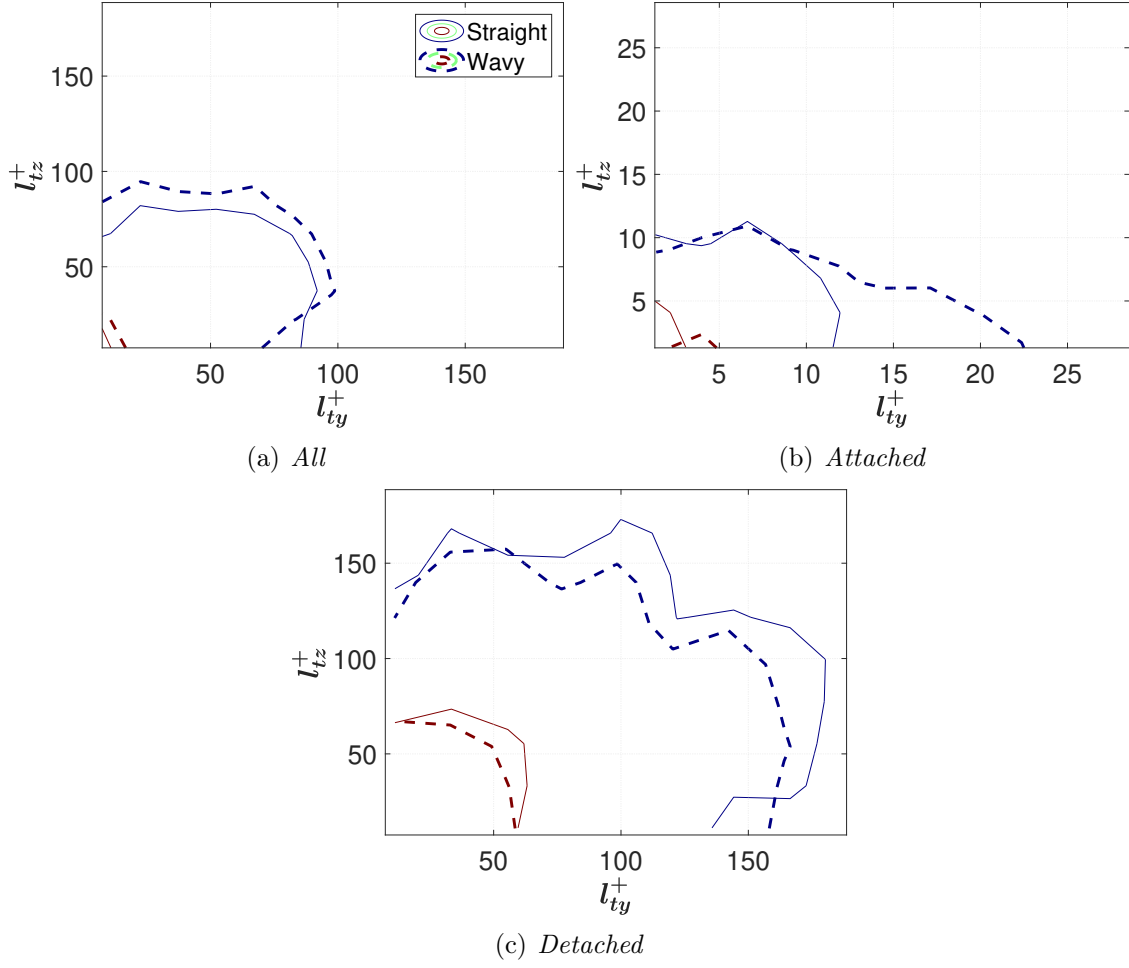


Figura 6.15: J.p.d.f. della dimensione *spanwise* e *wall-normal*, in valore assoluto, della traiettoria.

La j.p.d.f. della dimensione *spanwise* e *wall-normal*, in valore assoluto, della traiettoria, riportata in figura 6.15, evidenzia come vi sia un'elevata probabilità che i *paths*, appartenenti al gruppo degli *wall attached branches*, del caso *wavy* si presentino più lunghi in direzione *spanwise* rispetto a quelli del caso *straight*. Per quanto riguarda la dimensione *wall-normal* non è possibile sottolineare invece alcuna differenza tra i due casi. Osservando il comportamento del gruppo dei *wall detached branches* si può notare come, al contrario di quanto osservato per gli *wall attached branches*, vi sia un'elevata probabilità che i *paths* del caso *straight* si presentino più lunghi in direzione *spanwise* rispetto a quelli del caso *wavy*. È inoltre possibile notare come vi sia un'elevata probabilità che i *paths* del caso *straight* si presentino più lunghi anche in direzione *wall-normal* rispetto a quelli del caso *wavy*.

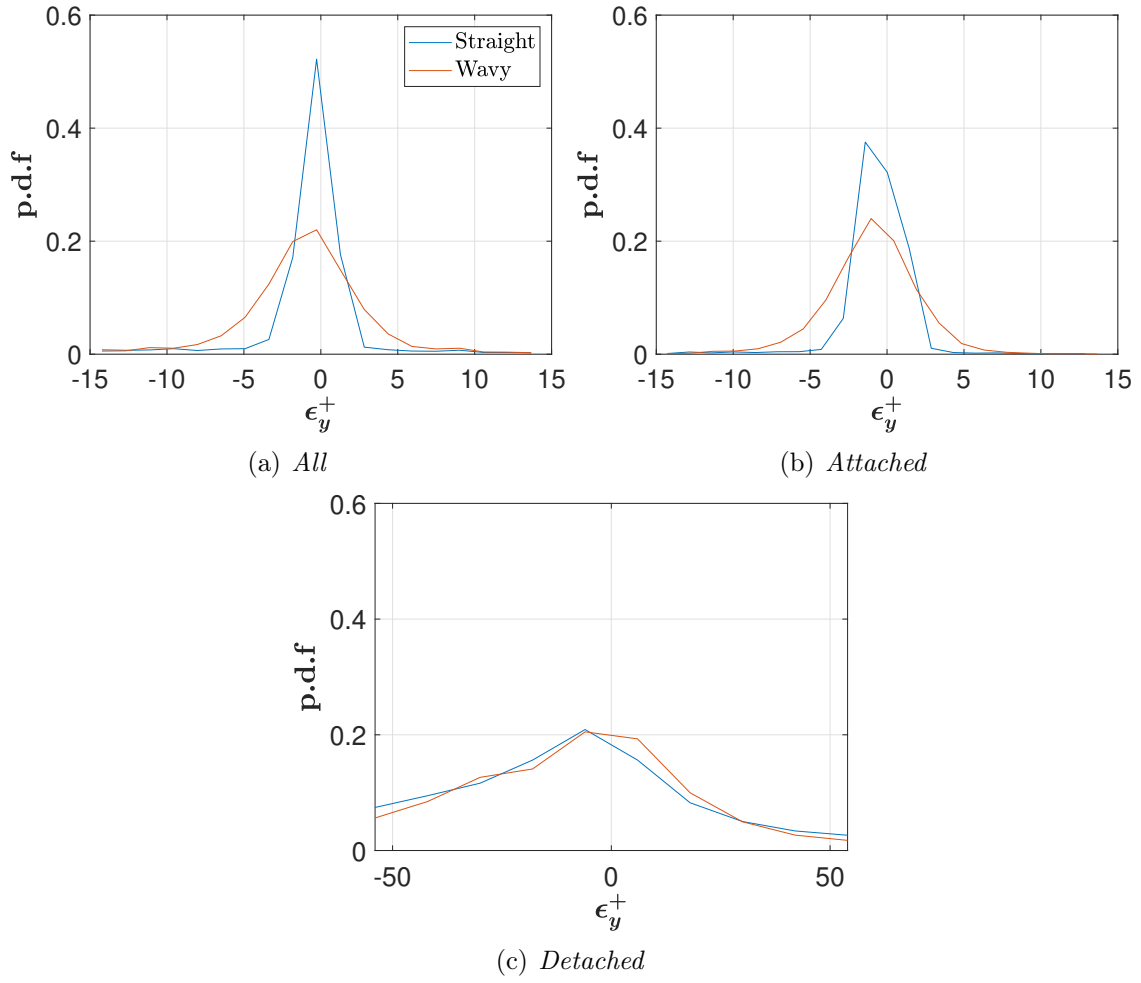


Figura 6.16: P.d.f. della somma delle deformazioni parziali in direzione *spawise* lungo la traiettoria.

La figura 6.16 mostra la p.d.f. della somma delle deformazioni parziali in direzione *spawise* lungo la traiettoria. Osservando le distribuzioni è possibile osservare come entrambe mostrino un picco posizionato a un valore inferiore allo zero indipendentemente dal gruppo di appartenenza dei *paths*. La distribuzione del caso *wavy* risulta meno stretta rispetto a quella del caso *straight* e più spostata verso valori negativi di ϵ_y^+ . Questa differenza tra i due casi risulta visibile per il gruppo degli *wall attached branches* mentre le distribuzioni, nel caso dei *wall detached branches* risultano sovrapposte.

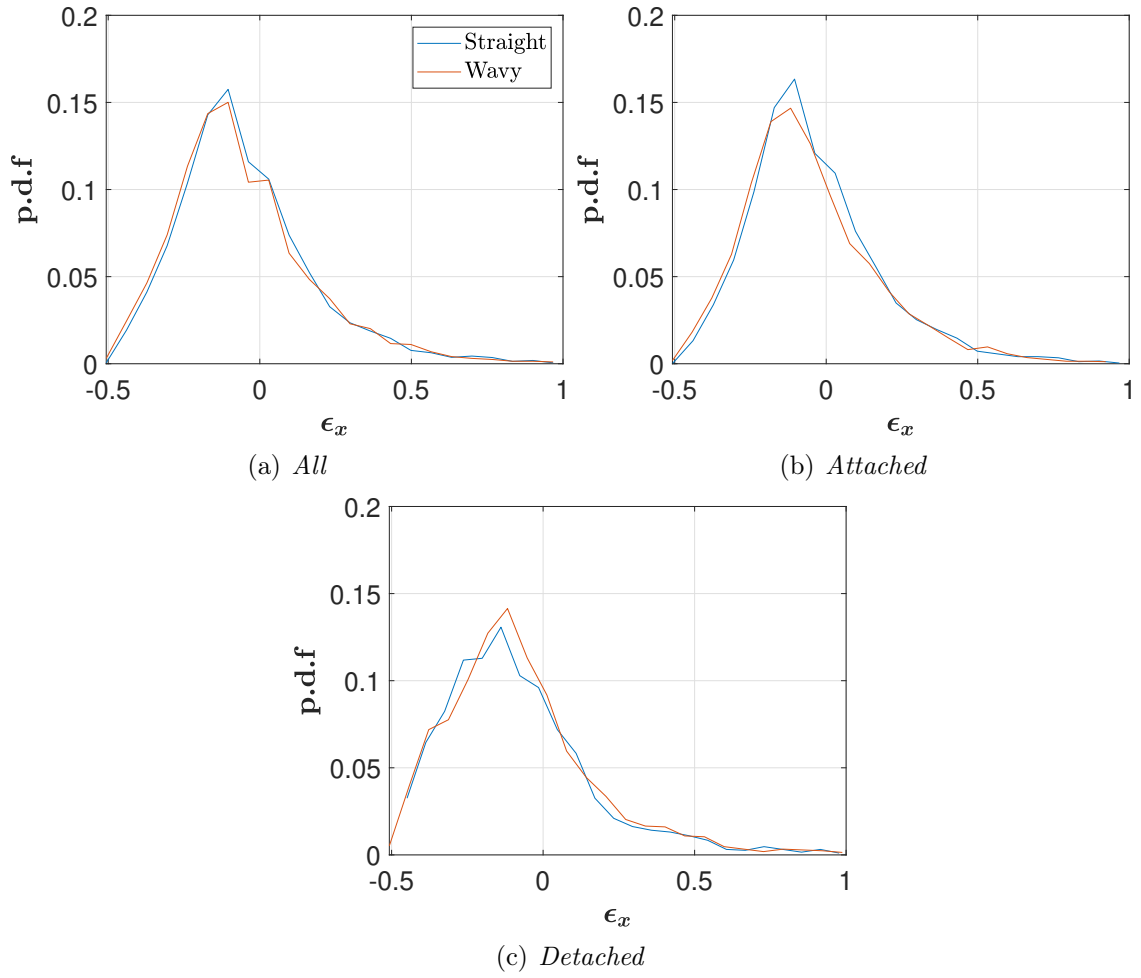


Figura 6.17: P.d.f. della deformazione media in direzione *streamwise* lungo la traiettoria normalizzata con la dimensione della struttura di partenza del ramo.

In figura 6.17 è riportata la p.d.f. della deformazione media in direzione *streamwise* lungo la traiettoria normalizzata con la dimensione della struttura di partenza del ramo. Entrambe le distribuzioni mostrano il picco posizionato a un valore inferiore allo zero ed è possibile notare, per gli *wall attached branches* come la distribuzione del caso *wavy* risulti leggermente spostata verso valori negativi di ϵ_x . La lieve differenza riscontrata tra le distribuzioni dei due casi non è osservabile per il gruppo dei *wall detached branches*.

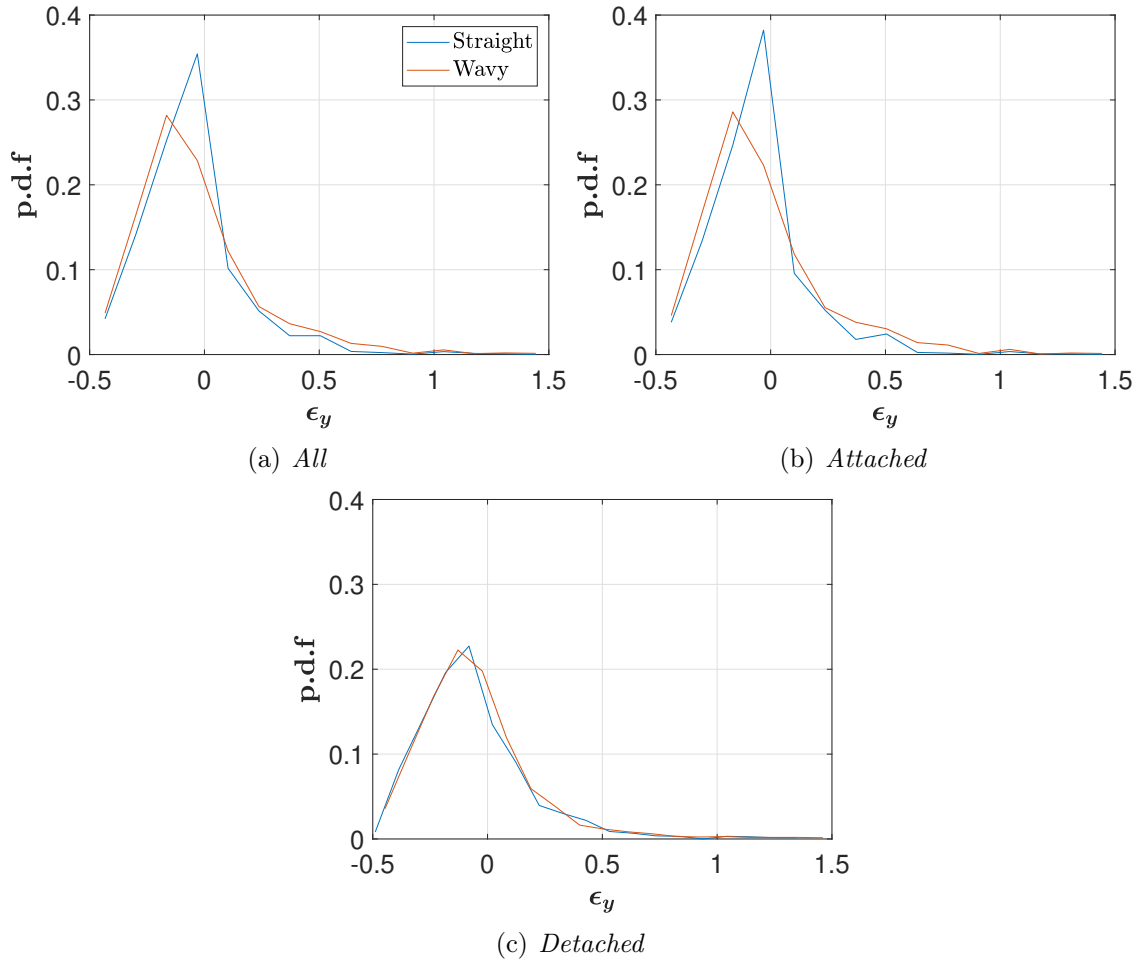


Figura 6.18: P.d.f. della deformazione media in direzione *spanwise* lungo la traiettoria normalizzata con la dimensione della struttura di partenza del ramo.

La p.d.f. della deformazione media in direzione *spanwise* lungo la traiettoria normalizzata con la dimensione della struttura di partenza del ramo, riportata in figura 6.18, permette di osservare nuovamente come, considerando gli *wall attached branches*, non solo entrambe le distribuzioni presentino il picco posizionato a un valore inferiore allo zero, ma quello della distribuzione relativa al caso *wavy* sia spostato verso valori inferiori di ϵ_y rispetto a quello del caso *straight*. È inoltre possibile notare come la distribuzione del caso *wavy* risulti lievemente più spostata verso valori negativi di ϵ_y rispetto a quella del caso *straight*. Osservando le distribuzioni relative al gruppo dei *wall detached branches* si nota come non siano visibili le differenze tra i due casi appena descritte.

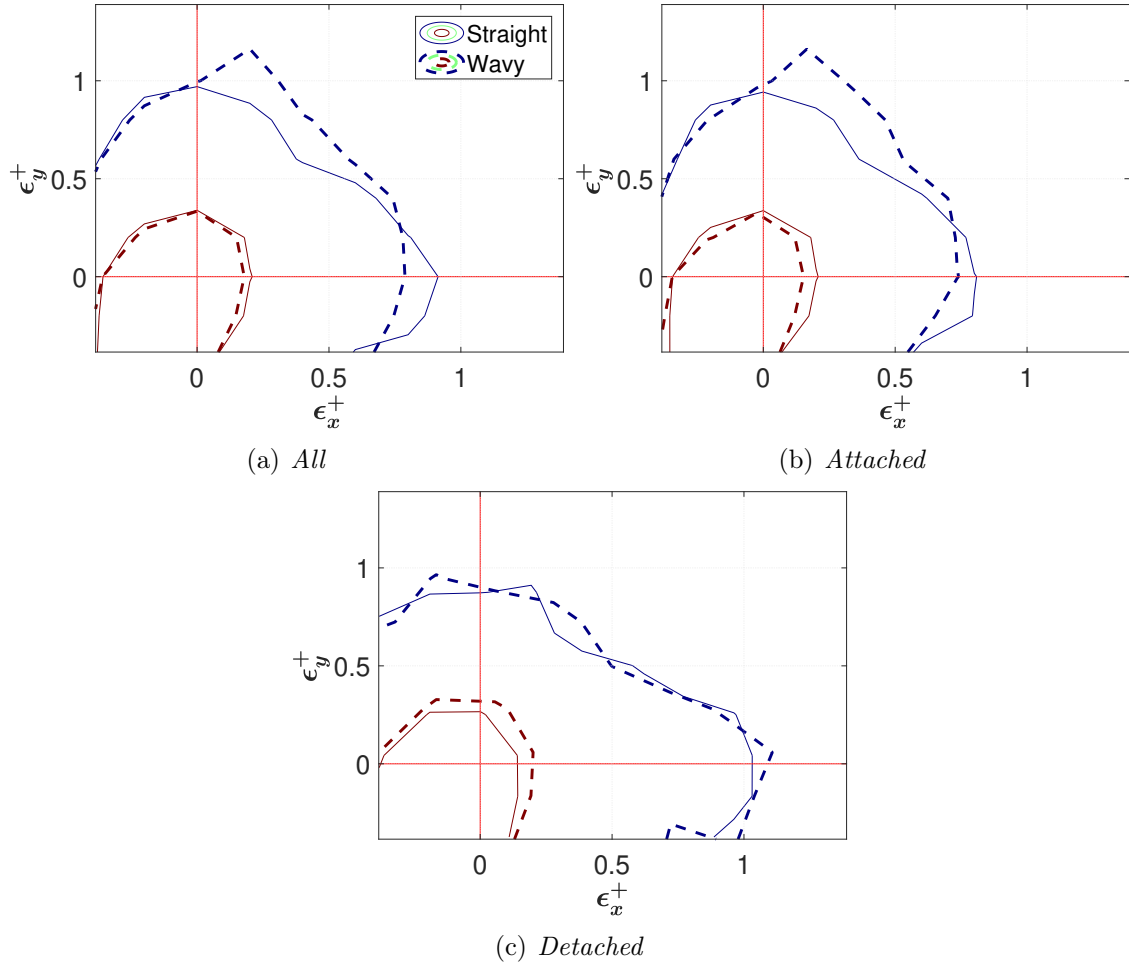


Figura 6.19: J.p.d.f. della deformazione media in direzione *streamwise* e *spanwise* lungo la traiettoria normalizzate con la dimensione della struttura di partenza del ramo.

La figura 6.19 mostra la j.p.d.f. della deformazione media in direzione *streamwise* e *spanwise* lungo la traiettoria normalizzate con la dimensione della struttura di partenza del ramo. Questa permette di evidenziare come vi sia una maggiore probabilità che le strutture appartenenti a i *paths* del caso *wavy* subiscano una deformazione isotropa lungo la traiettoria rispetto a quelli appartenenti ai *paths* del caso *straight*. Al contrario vi è una maggiore probabilità che i *paths* del caso *straight* subiscano una deformazione anisotropa lungo la traiettoria rispetto a quelli appartenenti ai *paths* del caso *wavy*. Il comportamento appena evidenziato risulta visibile solamente per il gruppo degli *wall attached branches* mentre non lo è per il gruppo dei *wall detached branches*.

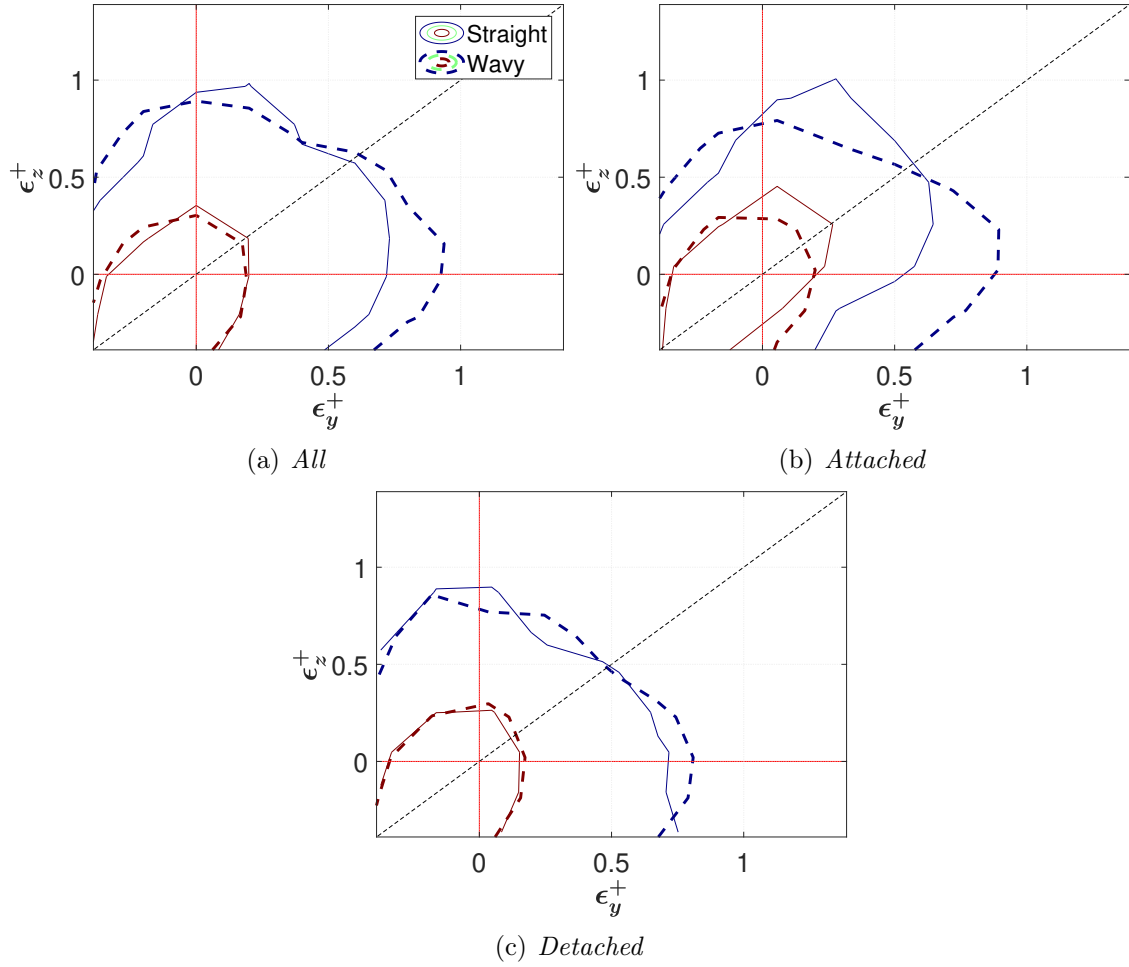


Figura 6.20: J.p.d.f. della deformazione media in direzione *spanwise* e *wall-normal* lungo la traiettoria normalizzate con la dimensione della struttura di partenza del ramo.

In figura 6.20 è riportata la j.p.d.f. della deformazione media in direzione *spanwise* e *wall-normal* lungo la traiettoria normalizzate con la dimensione della struttura di partenza del ramo. Questa permette di osservare come, considerando il piano *spanwise/wall-normal*, siano le strutture appartenenti ai *paths* del caso *straight* ad avere una maggiore probabilità, rispetto a quelle appartenenti ai *paths* del caso *wavy*, di subire lungo la traiettoria una deformazione isotropa. Al contrario vi è una maggiore probabilità che i *paths* del caso *wavy* subiscano una deformazione anisotropa lungo la traiettoria rispetto a quelli appartenenti ai *paths* del caso *straight*. È inoltre possibile notare come, prendendo in considerazione le strutture che subiscono una deformazione isotropa lungo la traiettoria, vi sia una maggiore probabilità che le strutture appartenenti ai *paths* del caso *straight*, rispetto a quelle appartenenti ai

paths del caso *wavy*, subiscano una deformazione in direzione *wall-normal* maggiore di quella che subiscono in direzione *spanwise*. Il comportamento appena evidenziato risulta visibile solamente per il gruppo degli *wall attached branches* mentre non lo è per il gruppo dei *wall detached branches*.

Gli andamenti delle p.d.f. e delle j.p.d.f. appena analizzati permettono di confermare le considerazioni sugli effetti della manipolazione sull'evoluzione spazio-temporale delle strutture coerenti effettuate durante l'analisi dei *paths* delle strutture identificate con il *Metodo 1*. Anche durante l'analisi relativa al *Metodo 2* è stato possibile evidenziare alcune sottili differenze tra il caso *wavy* e il caso *straight*, queste sono state osservate per lo più per i *paths* appartenenti al gruppo degli *wall attached branches*. suddividendo nuovamente i comportamenti osservati tra quelli riguardanti la traiettoria delle strutture coerenti e quelli riguardanti la loro deformazione lungo quest'ultima; si nota come le differenze tra le distribuzioni nelle figure 6.12 e 6.13 mostri come vi sia più probabilità che le strutture appartenenti al caso *wavy* percorrano più spazio in direzione *spanwise* e meno in direzione *streamwise* rispetto a quelle del caso *straight*. Il comportamento appena descritto trova riscontro nelle j.p.d.f. di figura 6.14 e 6.15. Trattando invece il differente effetto delle due manipolazioni sulla deformazione delle strutture coerenti lungo la traiettoria, si nota come le distribuzioni del caso *wavy*, nelle figure 6.16, 6.17 e 6.18, risultino meno strette rispetto a quelle del caso *straight*, spostate verso valori inferiori delle rispettive grandezze e con importanti differenze sulla posizione del picco. Questo permette di affermare che vi è una maggiore probabilità che le strutture del caso *wavy* subiscano, lungo la traiettoria, una maggiore riduzione delle dimensioni *spanwise* e *streamwise* rispetto a quelle del caso *straight*. Così come osservato nell'analisi precedente, risulta curioso il comportamento osservato nelle j.p.d.f. di figura 6.19 e 6.20 per cui sembrerebbe esserci una maggiore probabilità che le strutture del caso *wavy* subiscano una deformazione isotropa nel piano *streamwise/spanwise* e anisotropa nel piano *spanwise/wall-normal*.

Capitolo 7

Conclusioni

L'obiettivo del seguente elaborato è quello di fornire un nuovo approccio allo studio degli effetti che la manipolazione mediante *riblets* ha sul campo di moto di un flusso turbolento. Si è deciso di procedere, per via numerica, all'analisi della morfologia e dell'evoluzione spazio-temporale delle strutture coerenti, sfruttando i potenti mezzi della simulazione numerica diretta. Le strutture coerenti sono state identificate con due differenti metodologie: ciò ha permesso sia di confermare i risultati ottenuti sia di sottolineare il differente comportamento dei due metodi in determinate situazioni. Prima di procedere con l'analisi statistica, è stata effettuata la validazione del *dataset* confrontando alcuni risultati ottenuti con quelli riportati da Lozano-Durán *et al.* [19]. Nonostante le importanti differenze in termini di numero di *snapshots* presi in considerazione e in termini di numero di Reynolds di attrito a cui sono state condotte le simulazioni, il confronto ha sottolineato una buona aderenza tra i risultati e ha permesso di confermare l'indipendenza, dal numero di Reynolds, di alcune relazioni che legano le dimensioni delle strutture coerenti, già riportate da Álamo *et al.* [23]. La validazione del *dataset* ha quindi permesso di considerare il processo di identificazione delle strutture coerenti come avvenuto con successo.

L'analisi statistica della morfologia delle strutture coerenti ha permesso di evidenziare notevoli differenze tra le strutture coerenti nel caso di parete liscia e quelle nel caso di pareti manipolate con *riblets* longitudinali e sinusoidali, mentre tra questi due casi non è stata individuata alcuna differenza rilevante. Il campo di moto, nel caso di pareti manipolate, risulta popolato da un più elevato numero di strutture coerenti per unità di volume rispetto al caso di pareti lisce: ciò avvalorava l'idea, già riportata da Cafiero e Iuso [11], che uno degli effetti della manipolazione con *riblets* sia quello di disgregare le strutture coerenti del campo di moto. La distribuzione statistica del volume delle strutture coerenti rafforza anch'essa questa teoria in quanto la distribuzione dei casi manipolati si presenta più deterministica e con il picco posizionato ad un valore più basso rispetto a quanto accade per il caso di parete liscia. La distribuzione statistica della distanza del baricentro delle strutture

coerenti dalla parete mostra invece come nei casi manipolati le strutture siano staticamente situate a una distanza da parete leggermente superiore rispetto a quella riscontrabile nel caso di parete liscia. Le strutture, inoltre, occupano la zona del flusso compresa tra la parete e le creste delle *riblets*, mentre le strutture nel caso di parete liscia tendono a distribuirsi più uniformemente. Quest'osservazione rafforza l'idea di Bechert *et al.* [4] che vedono l'allontanamento delle strutture coerenti dalla parete come uno degli effetti della manipolazione e quindi come una possibile spiegazione della *drag reduction* riscontrata per via sperimentale. Rifacendosi alla divisione delle strutture coerenti per tipologia proposta da Corino e Brodkey [17], è stata riscontrata una notevole differenza tra la distribuzione delle strutture dei casi manipolati e quella delle strutture del caso di parete liscia. Nei pressi della parete, infatti, la percentuale di volume occupata dalle strutture di tipo *ejection* risulta inferiore nei casi manipolati rispetto al caso di parete liscia, mentre risulta essere superiore la percentuale di volume occupata da strutture di tipo *sweep*. Questo rappresenta un comportamento coerente con i vantaggi in termini di *drag reduction* misurata sperimentalmente nei casi manipolati, essendo che gli sforzi di Reynolds, generati dalle strutture di tipo *ejection* nei pressi della parete, risultano essere di maggiore entità rispetto a quelli generati dalle strutture di tipo *sweep* [19]. Effettuando l'analisi della morfologia delle strutture per tipologia non è però emersa alcuna differenza rilevante tra gli effetti della manipolazione sulle differenti tipologie di strutture. I risultati ottenuti per le due differenti metodologie di identificazione delle strutture risultano coerenti uno all'altro senza sostanziali discrepanze a meno della distribuzione statistica della distanza del baricentro delle strutture coerenti. In questo caso le differenze osservate tra le distribuzioni relative alle due metodologie trovano spiegazione nell'intrinseca diversità dei principi su cui queste si basano.

L'analisi statistica del *tracking* delle strutture coerenti, effettuato solamente per i casi manipolati, ha permesso di evidenziare lievi ma interessanti differenze tra il caso *straight* e il caso *wavy*. La distribuzione statistica della dimensione *spanwise* della traiettoria delle strutture coerenti si presenta, per il caso *wavy*, più deterministica e con il picco posizionato a un valore più elevato rispetto a quanto accade per il caso *straight*. Tale comportamento è coerente con la tesi riportata da Peet e Sargaut [13] secondo cui una possibile spiegazione delle migliori prestazioni delle *riblets* sinusoidali rispetto a quelle longitudinali sarebbe quella per cui le oscillazioni *spanwise* indotte dalla manipolazione della parete rompono la coerenza spaziale delle strutture vorticosi, inibendo il fenomeno di *bursting* e riducendo di conseguenza la generazione degli sforzi di taglio turbolenti. Le distribuzioni statistiche riguardanti la deformazione delle strutture coerenti mostrano come vi sia una maggiore probabilità che le strutture coerenti del caso *straight* subiscano contemporaneamente un allungamento in direzione *streamwise* e un assottigliamento in direzione *spanwise*, rispetto a quelle del caso *wavy*. Ciò avvalorare l'ipotesi proposta da Choi *et al.* [24]

secondo cui la manipolazione con *riblets* sinusoidali, esattamente come l'imposizione di oscillazioni *spanwise* della parete, comporterebbe una limitazione del *vortex stretching* delle strutture turbolente, riducendone così la vorticità *streamwise*. L'effetto di quanto appena descritto sarebbe ancora una volta l'inibizione del *bursting* e quindi della generazione degli sforzi di taglio. Così come per l'analisi della morfologia delle strutture coerenti anche i risultati dell'analisi del *tracking* risultano coerenti tra le due differenti metodologie di identificazione delle strutture.

L'applicazione dell'approccio numerico allo studio sulle strutture coerenti in un flusso manipolato con *riblets* ha permesso di ottenere risultati coerenti con quanto riportato in letteratura, confermando diverse teorie sugli effetti della manipolazione della parete mediante *riblets* e, in particolar modo, sui meccanismi di funzionamento delle *riblets* sinusoidali. Tuttavia, l'utilizzo di una griglia non particolarmente fitta e di un *dataset* ridotto ha limitato la capacità di distinguere in modo netto le differenze tra i due casi manipolati analizzati. Ciononostante, l'approccio si è dimostrato valido e promettente, ponendo le basi per studi futuri più approfonditi. Un possibile sviluppo potrà consistere nell'utilizzo di griglie più raffinate e di un *dataset* più esteso, che permettano di analizzare con maggiore dettaglio il differente comportamento delle *riblets* longitudinali e sinusoidali, contribuendo così a una comprensione più dettagliata dei meccanismi di riduzione della resistenza aerodinamica mediante *riblets* e, in generale, delle strategie di *flow control*.

Bibliografia

- [1] IATA. *Global Outlook for Air Transport Deep Change*. Rapp. tecn. International Air Transport Association, giu. 2024.
- [2] Matej Pajdlhausera Miriam Jarošováa. “Aviation and Climate Change”. In: *Transportation Research Procedia* 65 (2022), pp. 216–221.
- [3] Stephen B. Pope. *Turbulent Flows*. Cambridge University Press, 2000.
- [4] M. Bechert D. W. & Bartenwerfer. “The viscous flow on surfaces with longitudinal ribs”. In: *J. Fluid Mech.* 206 (1989), pp. 105–129.
- [5] Ricardo Garccia-Mayoral e Javier Jiménez. “Drag reduction by riblets”. In: *Phil. Trans. R. Soc.* 369.1412-1427 (2011).
- [6] A. Luchini P. Manzo F. & Pozzi. “Resistance of a grooved surface to parallel flow and cross-flow”. In: *J. Fluid Mech.* 228 (1991), pp. 87–109.
- [7] J. Jiménez. “On the structure and control of near wall turbulence”. In: *Physics of Fluids* 6 (1994), pp. 944–953.
- [8] T. C. Goldstein D. B. & Tuan. “Secondary flow induced by riblets”. In: *J. Fluid Mech.* 363 (1998), pp. 115–151.
- [9] Moin P. & Kim J. Choi H. “Direct numerical simulation of turbulent flow over riblets”. In: *J. Fluid Mech.* 255 (1993), pp. 503–539.
- [10] M. J. Walsh. “Effect of detailed surface geometry on riblet drag reduction performance”. In: *J. Aircr.* 27 (1990), pp. 572–573.
- [11] Gaetano Iuso Gioacchino Cafiero Enrico Amico. “Manipulation of a turbulent boundary layer using sinusoidal riblets”. In: *J. Fluid Mech.* 984 (lug. 2024).
- [12] Gaetano Iuso Gioacchino Cafiero. “Drag reduction in a turbulent boundary layer with sinusoidal riblets”. In: *Experimental Thermal and Fluid Science* 139.110723 (2022).
- [13] P. Sagaut Y. Peet. “Theoretical prediction of turbulent skin friction on geometrically complex surfaces”. In: *Physics of Fluids* 21.10 (2009).

- [14] F. A. Schraub S. J. Kline W. C. Reynolds e P. W. Runstadler. “The structure of turbulent boundary layers”. In: *J. Fluid Mech.* 30 (1967), pp. 741–773.
- [15] Ronald J. Adrian. “Hairpin vortex organization in wall turbulence”. In: *Physics of Fluids* 19.041301 (2007).
- [16] James M. Wallace. “Quadrant Analysis in Turbulence Research: History and Evolution”. In: *Annu. Rev. Fluid Mech.* 48 (2016), pp. 131–158.
- [17] R.S. Brodkey E.R. Corino. “A visualization of the wall region in turbulent flow”. In: *J. Fluid Mech.* 37 (1969), pp. 1–30.
- [18] H. Eckelmann J.M. Wallace R.S. Brodkey. “The wall region in turbulent shear flow”. In: *J. Fluid Mech.* 54 (1972), pp. 39–48.
- [19] Javier Jiménez Adrián Lozano-Durán Oscar Flores. “The three-dimensional structure of momentum transfer in turbulent channels”. In: *J. Fluid Mech.* 694 (2012), pp. 100–130.
- [20] W.W. Willmarth & S.S. Lu. “Structure of the Reynolds shear stress near the wall”. In: *J. Fluid Mech.* 55 (1972), pp. 65–92.
- [21] Hunt J. C. R. Wray A. A. Moin P. “Eddies, stream, and convergence zones in turbulent flows”. In: *Center for Turbulence Research Report* 193 (1988).
- [22] Javier Jiménez Adrián Lozano-Durán. “Time-resolved evolution of coherent structures in turbulent channels: characterization of eddies and cascades”. In: *J. Fluid Mech.* 759 (2014), pp. 423–471.
- [23] Del Alamo J. C. Jimenez J. Zandonade P. Moser R. D. “Self-similar vortex clusters in the turbulent logarithmic region”. In: *J. Fluid Mech.* 58 (2006), pp. 581–593.
- [24] Brian R. Clayton Kwing-So Choi. “The mechanism of turbulent drag reduction with wall oscillation”. In: *International Journal of Heat and Fluid Flow* 22 (2000), pp. 1–9.