



UNIMORE

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI
MODENA E REGGIO EMILIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA “ENZO FERRARI”

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria del Veicolo

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Progettazione e Simulazione di Bandelle Deformabili

Relatori:

Prof. Stefano Fontanesi

Prof. Andrea Cimorelli

Candidato:

Lorenzo Giacomelli

Matricola 196191

Indice

Indice	i
Elenco delle figure	iv
1 Introduzione	1
2 Ricerca Smart Materials	2
2.1 Introduzione	2
2.2 Proprietà Smart Materials	3
2.3 Materiali Piezoelettrici	4
2.4 Polimeri Elettroattivi	5
2.5 Materiali Magnetostrittivi	7
2.6 Materiali a Memoria di Forma	9
2.6.1 Polimeri a Memoria di Forma	11
2.6.2 Leghe a Memoria di Forma	12
2.7 Durata a Fatica e Fattori di influenza	15
2.7.1 Fatica degli Smart Materials	15
2.7.2 Shape Memory Alloys (SMA)	16
2.7.3 Shape Memory Polymers (SMP)	17
2.7.4 Materiali Magnetostrittivi	18
2.7.5 Ceramiche Piezoelettrici	18
2.7.6 Compositi Piezoelettrici	19
2.7.7 Polimeri Elettroattivi	20
2.8 Criteri di Scelta Materiale	21
2.9 Costo e Fattori di Influenza	22
2.10 Valutazione Materiali	23
2.11 Considerazioni conclusive	23
3 Tipologie di Applicazioni Smart Materials	25
3.1 Esempi Applicativi	26
3.1.1 Esempio 1: Profilo alare con attuatori a filo in SMA	26

3.1.2	Esempio 2: Profilo alare con attuatore a molla in SMA . . .	28
3.1.3	Esempio 3: Profilo alare in composito con attuatore a filo in SMA	30
3.1.4	Esempio 4: Composito multistrato con filo in SMA	31
3.1.5	Esempio 5: Ala d'aereo con attuatore in SMA	32
3.1.6	Esempio 6: Profilo alare con superficie in SMP	33
3.1.7	Esempio 7: Profilo alare con rivestimento in SMPC	34
3.1.8	Esempio 8: Profilo Alare con attuatore in composito Piezoe- lettrico	35
3.1.9	Esempio 9: Attuatore Magnetostrittivo con Terfenol-D . . .	36
3.1.10	Esempio 10: Attuatore Lineare Magnetostrittivo	38
4	Simulazioni Fluidodinamiche - CFD	39
4.1	Introduzione	39
4.2	Geometria CAD	39
4.3	Surface Preparation	41
4.3.1	Surface Wrapper	41
4.3.2	Surface Repair	42
4.4	Bounding Box	43
4.5	Mesh	44
4.5.1	Mesh Definitiva	46
4.6	Modelli e Probe Point	48
4.6.1	Modelli	48
4.6.2	Modelli Alternativi di Turbolenza	49
4.7	Simulazioni	50
4.8	Calcolo Momento Generato dal Fluido sulla Bandella	51
4.9	Risultati	53
4.9.1	Coefficienti aerodinamici	53
4.9.2	Forze Bandelle Fondo	54
4.9.3	Analisi Campo di Moto	55
4.9.4	Simulazioni con velocità Terreno e Ruote	57
4.9.5	Conclusione	58
5	Soluzioni Schematiche	60
5.1	Soluzione Schematica 1	61
5.2	Soluzione Schematica 2	62
5.3	Soluzione Schematica 3	64
5.4	Soluzione Schematica 4	65
5.5	Soluzione Schematica 5	67
5.6	Soluzione Schematica 6	68

6	Soluzione con fili in SMA (Nitinol)	70
6.1	Geometria CAD	70
7	Analisi agli Elementi Finiti - FEM	73
7.1	Introduzione	73
7.2	Mesh	73
7.3	Carichi e Vincoli	74
7.4	Simulazioni	76
8	Soluzioni Schematiche Alternative	79
8.1	Soluzione Schematica 1	79
8.2	Soluzione Schematica 2	80
8.3	Soluzioni Schematiche 3 e 4	81
9	Meccanismo a Filo Bandella	85
9.1	Schema Dettagliato Meccanismo	85
9.1.1	CAD Bandella Semplificata	87
9.1.2	CAD Bandella con curvatura	88
9.1.3	Fune	90
9.1.4	Motoriduttore MRT62-31	92
9.1.5	Guida per la parte mobile della Bandella	95
9.1.6	Perno con Pattino Guida ed Asola di collegamento	97
9.1.7	Battuta per Bandella Mobile	98
9.1.8	Rocchetto Avvolgifune	99
9.1.9	Molla di Richiamo	100
9.1.10	Fissaggio Puleggia al Fondo Vettura	101
9.1.11	Pulegge di Rinvio	102
9.1.12	Dado Autobloccante per Perno Motoriduttore	103
9.1.13	Manicotto a Pressione	104
9.1.14	Fondo Vettura	107
10	Assieme Bandella Deformabile	109
	Bibliografia	115

Elenco delle figure

2.1	Materiali Piezoelettrici più comuni[11]	4
2.2	Polimeri Elettroattivi[12]	5
2.3	Elastomeri Dielettrici[29]	6
2.4	Polimeri Ionomerici Metallici Compositi (IPCM)[23]	7
2.5	Orientamento Dipoli Materiali Magnetostrittivi[6]	8
2.6	Terfenol-D, lega di Terbio, Disprosio e Ferro[35]	8
2.7	Processo trasformazione di fase delle leghe a memoria di forma[10]	9
2.8	Processo trasformazione di fase nei polimeri a memoria di forma[18]	10
2.9	Shape Memory Effect[1]	10
2.10	Superelasticità o Pseudoelasticità[36]	11
2.11	Trasformazioni di Fase SMA[32]	13
2.12	Effetto Memoria di Forma Unidirezionale (One-Way)[36]	14
2.13	Effetto Memoria di Forma Bidirezionale (Two-Way)[36]	14
2.14	Esempi di configurazioni e applicazioni delle leghe SMA[21]	15
3.1	Tipologie di Applicazioni Smart Materials[34]	25
3.2	Profilo Alare con attuatori a filo in SMA[2]	26
3.3	Attuatore a doppia molla SMA in un'ala d'aereo—Configurazione 1[27]	28
3.4	2 Configurazioni di Profilo Alare con attuatore bistabile in SMA[27]	29
3.5	Profilo Alare in composito con attuatore a filo in SMA[7]	30
3.6	Composito Multistrato con attuatori a filo in SMA[28]	31
3.7	Curvatura Composito Multistrato con attuatori a filo in SMA[28]	31
3.8	Attuatore SMA in matrice polimerica in un'ala d'aereo[20]	32
3.9	Profilo Alare con superficie in SMP[7]	33
3.10	Profilo Alare con rivestimento in SMPC[7]	34
3.11	Profilo Alare con attuatore in composito Piezoelettrico[31]	35
3.12	Attuatore Magnetostrittivo con Terfenol-D[24]	36
3.13	Attuatore Lineare Magnetostrittivo[24]	38
4.1	CAD Vettura	40
4.2	CAD Fondo Vettura	40

4.3	CAD Vettura dopo Surface Wrapper	42
4.4	Bounding Box	43
4.5	Parametri Mesh	44
4.6	Parametri Mesh refinement	45
4.7	Parametri Prism Layer	46
4.8	Mesh Vettura Anteriore e Posteriore	46
4.9	Mesh Vettura Fondo Vettura	47
4.10	Mesh Scia Vettura	47
4.11	Modelli Simulazione	48
4.12	Casi Simulazioni	51
4.13	Report Center of Loads	52
4.14	Report Momento	52
4.15	Risultati Coefficienti Simulazioni	53
4.16	Forze su Bandelle	54
4.17	Campo di Moto con Bandelle	55
4.18	Campo di Moto con Variazione Curvatura Bandella Anteriore 2 . .	56
4.19	Campo di Moto senza Bandelle	56
4.20	Velocità Terreno	57
4.21	Velocità Ruote Vettura	58
5.1	Soluzioni schematica 1	61
5.2	Soluzioni schematica 2	62
5.3	Soluzioni schematica 3	64
5.4	Soluzioni schematica 4	65
5.5	Soluzioni schematica 5	67
5.6	Soluzioni schematica 6	68
6.1	CAD Bandella con fili Nitinol	71
6.2	CAD Perno Bandella con fili Nitinol	71
7.1	Parametri Mesh	74
7.2	Caricamento Parte Mobile Bandella	75
7.3	Caricamento Perno Bandella	76
7.4	Simulazioni Resistenza Parte Mobile Bandella	77
7.5	Simulazioni Resistenza Perno Bandella	77
8.1	Soluzioni schematica 1	79
8.2	Soluzioni schematica 2	81
8.3	Soluzioni schematica 3	82
8.4	Soluzioni schematica 4	83
9.1	Disegno Meccanismo Bandella	85

9.2	Disegni Perno Meccanismo Bandella	86
9.3	Cad Parte Fissa Bandella Semplificata per soluzione con filo	87
9.4	Cad Parte Mobile Bandella Semplificata per soluzione con filo . . .	88
9.5	Cad Parte Fissa Bandella reale per soluzione con filo	89
9.6	Cad Parte Mobile Bandella reale per soluzione con filo	89
9.7	Fune	90
9.8	Motoriduttore Movimentazione Bandella[25]	92
9.9	CAD Motoriduttore Movimentazione Bandella	93
9.10	CAD Perno Motoriduttore Movimentazione Bandella	94
9.11	Guida con Estrusione a Forma di Cilindro	95
9.12	Lato Guida Bandella	96
9.13	Foro di Aggancio per la Molla	96
9.14	Alloggiamento Guida per Puleggia di Rinvio	97
9.15	Perno con Pattino Guida	97
9.16	CAD Battuta Bandella	98
9.17	CAD Rocchetto	99
9.18	CAD Rocchetto	100
9.19	CAD Molla	101
9.20	CAD Fissaggio Puleggia di Rinvio	101
9.21	CAD Puleggia di Rinvio	102
9.22	CAD Puleggia di Rinvio vista laterale	103
9.23	CAD Dado Autobloccante	103
9.24	Catalogo Manicotto a Pressione [33]	104
9.25	CAD Manicotto a Pressione	105
9.26	Manicotto a Pressione da catalogo[15]	105
9.27	CAD Capicorda Montato	106
9.28	CAD Manicotto Montato	106
9.29	CAD Fondo Vettura	107
10.1	Assieme Completo dall'Alto	109
10.2	Assieme Completo dal Basso	110
10.3	Assieme Bandella	110
10.4	Assieme Perno,Molla e Fune	111
10.5	Assieme Guida e Puleggia	111
10.6	Assieme Fissaggio e Puleggia su Fondo	112
10.7	Assieme Bandella e Battuta	112
10.8	Assieme Motoriduttore, Rocchetto, Dado e Manicotto	113

Capitolo 1

Introduzione

L'obiettivo della presente attività di ricerca consiste nello sviluppo di bandelle deformabili, la cui forma possa variare in funzione delle condizioni di guida, con lo scopo di ridurre la resistenza aerodinamica della vettura. A tale fine, sono state considerate due tipologie di attuazione delle bandelle:

- Fase di Accelerazione e Marcia in Rettilineo → **Bandelle Dritte**
- Fase di Decelerazione/Frenata e Percorrenza in Curva → **Bandelle Curve**

Prima di procedere alla fase di progettazione del sistema di movimentazione è stata svolta un'attività di ricerca sugli Smart Materials, ossia materiali intelligenti, il cui impiego risulta sempre più diffuso in numerosi settori dell'ingegneria. Successivamente sono state sviluppate diverse soluzioni progettuali, scegliendo inizialmente quella che prevede l'utilizzo del Nitinol come attuatore, posizionato in corrispondenza del perno di movimentazione. Tale soluzione è stata abbandonata a causa delle criticità emerse durante lo sviluppo, optando per un sistema di attuazione convenzionale costituito da una fune, pulegge ed un motoriduttore dotato di rocchetto. L'intero progetto è stato sviluppato mediante la piattaforma 3DExperience, utilizzata sia per la modellazione CAD dei componenti attraverso CATIA sia per le analisi agli elementi finiti (FEM) tramite SIMULIA Abaqus. In una fase preliminare, sono state inoltre eseguite delle simulazioni fluidodinamiche tridimensionali, mediante il software Star-CCM+, con l'obiettivo di analizzare gli effetti della variazione di curvatura delle bandelle sulle prestazioni aerodinamiche della vettura. In particolare, sono stati analizzati i coefficienti di resistenza aerodinamica (Drag) e Portanza/Deportanza (Lift), oltre alle forze agenti sulle singole bandelle, confrontando la configurazione iniziale con diverse configurazioni caratterizzate dalle stesse parzialmente o completamente rettilinee. I risultati ottenuti hanno evidenziato come non sia necessario modificare la curvatura di tutte le bandelle per ottenere una riduzione significativa della resistenza aerodinamica, soprattutto alle elevate velocità.

Capitolo 2

Ricerca Smart Materials

2.1 Introduzione

Negli ultimi anni la ricerca e l'impiego degli Smart Materials hanno assunto un ruolo sempre più rilevante in numerosi settori dell'ingegneria, grazie alla loro capacità di modificare una o più proprietà in risposta a stimoli esterni, quali temperatura, sollecitazioni meccaniche, campi elettrici o campi magnetici. In base al principio di funzionamento, questi materiali intelligenti possono essere classificati nelle seguenti categorie:

- **Materiali a Memoria di Forma:**

- Shape Memory Alloys (SMA) - Leghe a Memoria di Forma
- Shape Memory Polymers (SMP) - Polimeri a Memoria di Forma

- **Materiali Piezoelettrici:**

- Ceramici Piezoelettrici
- Compositi Piezoelettrici

- **Polimeri Elettroattivi**

- **Materiali Magnetostrittivi**

Nei paragrafi successivi vengono analizzate le principali caratteristiche, le proprietà e i possibili ambiti applicativi di ciascuna categoria di materiali, con particolare attenzione agli aspetti di interesse per lo sviluppo del presente progetto.

2.2 Proprietà Smart Materials

Gli Smart Materials sono materiali in grado di modificare una o più proprietà fisiche o meccaniche in risposta a uno stimolo esterno. Tale caratteristica consente loro di svolgere contemporaneamente la funzione di sensore, attuatore oppure entrambe, rendendoli particolarmente adatti allo sviluppo di sistemi adattivi. Gli stimoli che possono attivare questi materiali comprendono variazioni di temperatura, campi elettrici o magnetici, sollecitazioni meccaniche, pressione, umidità e altri fattori ambientali. In risposta a tali sollecitazioni, il materiale può modificare forma, dimensioni, rigidità, proprietà elettriche oppure magnetiche, ritornando generalmente alle condizioni iniziali una volta rimosso lo stimolo.

Le principali caratteristiche che rendono gli Smart Materials particolarmente interessanti nelle applicazioni ingegneristiche sono:

- capacità di adattarsi alle variazioni delle condizioni operative;
- elevato rapporto prestazioni/peso;
- integrazione delle funzioni di attuazione e sensorizzazione all'interno dello stesso componente;
- riduzione della complessità dei sistemi meccanici tradizionali;
- possibilità di realizzare strutture adattive e riconfigurabili.

La tabella di seguito contiene tutte le proprietà degli Smart Materials prima citati.

Materiale	Densità	Sollecitazione Carico Max	Deformazione Max	Frequenza di Attuazione
Shape Memory Alloys (SMA)	5,2 - 6,5 g/cm^3	500 - 1000 MPa	< 8 %	Lenta
Shape Memory Polymers (SMP)	0,9 - 1,2 g/cm^3	2 - 11 MPa	> 800 %	Lenta
Ceramici Piezoelettrici	5,5 - 8 g/cm^3	20 - 100 MPa	0,1 - 0,5 %	Veloce
Compositi Piezoelettrici	3 - 6 g/cm^3	30 - 70 MPa	20 - 50 %	Veloce
Polimeri Elettroattivi	< 1,5 g/cm^3	8 - 30 MPa	< 380 %	Veloce
Materiali Magnetostrittivi	7,8 - 9,2 g/cm^3	100 MPa	0,15 - 0,2 %	Veloce

Di seguito vengono descritti i singoli materiali e le loro principali caratteristiche.

2.3 Materiali Piezoelettrici

La **piezoelettricità** è la proprietà di alcuni materiali cristallini di convertire una sollecitazione meccanica in un segnale elettrico (**effetto piezoelettrico diretto**) e, viceversa, di trasformare un campo elettrico applicato in una deformazione meccanica (**effetto piezoelettrico inverso**).

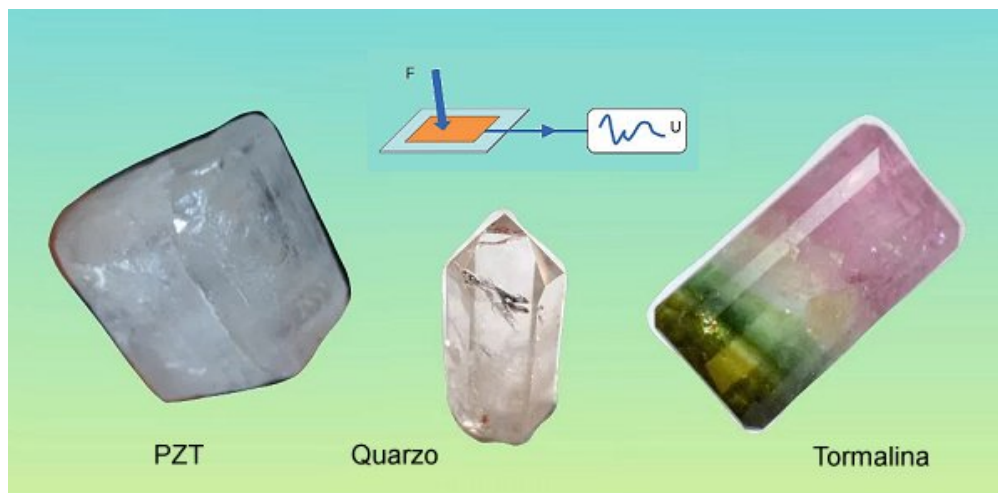


Figura 2.1: Materiali Piezoelettrici più comuni[11]

Tra i materiali appartenenti a questa categoria, i più diffusi sono il **Titanato Zirconato di Piombo (PZT)**, il **Quarzo** e la **Tormalina**, riportati in Figura 2.1. Le principali caratteristiche di questi materiali sono:

- Risposta molto rapida;
- Elevata capacità di generare forza;
- Deformazioni contenute allo stato ceramico (fino allo 0,5%) e più elevate nei materiali compositi (fino al 50%);
- Densità medio-alta, che comporta un peso relativamente elevato;
- Sollecitazioni massime dell'ordine di 100 MPa per i materiali ceramici e di circa 70 MPa per i compositi.

2.4 Polimeri Elettroattivi

I **polimeri elettroattivi** (**Electroactive Polymers, EAP**) sono materiali in grado di sviluppare una deformazione meccanica quando sottoposti a uno stimolo elettrico, generato mediante l'applicazione di una corrente o di un campo elettrico, come riportato nella figura 2.2.

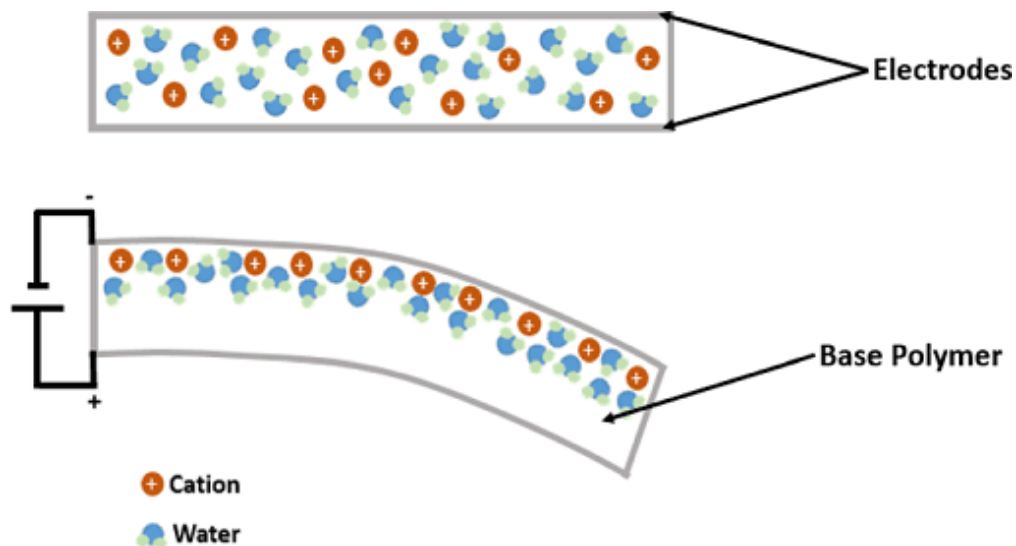


Figura 2.2: Polimeri Elettroattivi[12]

Si suddividono principalmente in due categorie:

- **Elastomeri Dielettrici (Dielectric Elastomers, DE):** sono caratterizzati da elevate deformazioni e da tempi di risposta particolarmente ridotti. Tuttavia, richiedono tensioni di alimentazione molto elevate, generalmente dell'ordine dei kV, per poter essere attivati. Per questo motivo il loro impiego nel settore automobilistico risulta limitato, poiché la tensione fornita dalle batterie è significativamente inferiore. La Figura 2.3 mostra il principio di funzionamento di un elastomero dielettrico, costituito da una membrana elastomerica interposta tra due elettrodi conduttivi, evidenziandone sia la configurazione di riposo sia quella attivata.

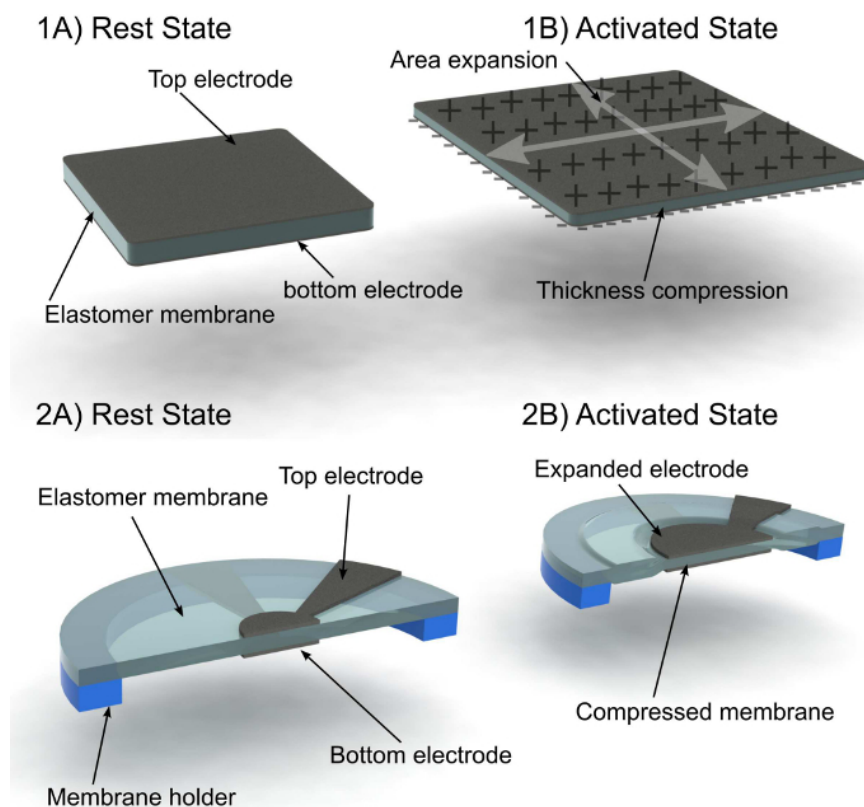


Figura 2.3: Elastomeri Dielettrici[29]

- Polimeri Ionomerici Metallici Compositi (IPCM):** sono costituiti da una membrana polimerica idratata rivestita su entrambe le superfici da elettrodi realizzati con metalli nobili, generalmente oro o platino. All'interno della membrana sono presenti molecole d'acqua e ioni positivi e negativi in equilibrio elettrostatico. Nello stato di riposo, le molecole d'acqua risultano associate prevalentemente agli ioni positivi. Quando viene applicata una differenza di potenziale, gli ioni positivi migrano verso il catodo trascinando con sé le molecole d'acqua, mentre gli ioni negativi si spostano verso l'anodo. L'accumulo di acqua in prossimità del catodo provoca un aumento locale di volume, mentre sul lato anodico si verifica una contrazione. Tale distribuzione non uniforme determina la flessione del dispositivo. Gli elettrodi in oro o platino svolgono inoltre una duplice funzione: incrementano la conducibilità elettrica del sistema e limitano l'evaporazione dell'acqua durante il funzionamento.

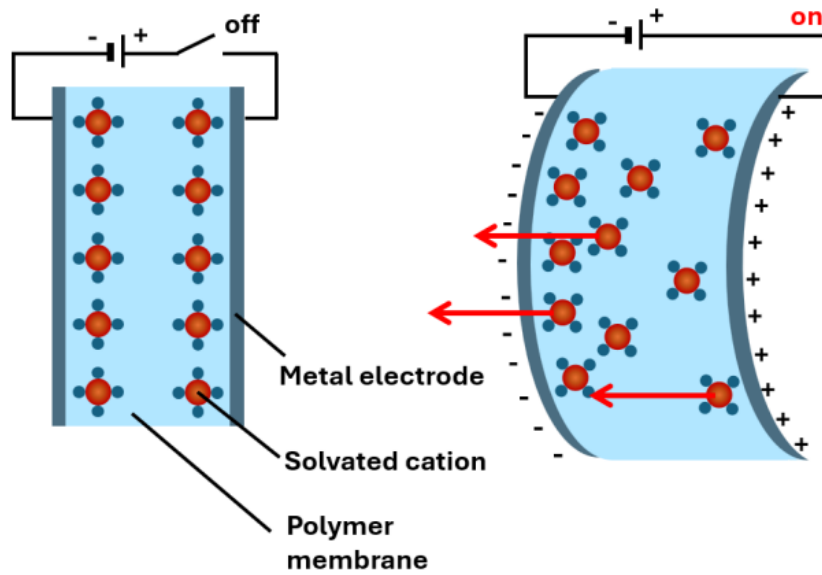


Figura 2.4: Polimeri Ionomerici Metallici Compositi (IPCM)[23]

Le principali caratteristiche di questi materiali sono:

- Elevata velocità di risposta;
- Peso ridotto ed elevata flessibilità;
- Deformazioni molto elevate, fino al 380% della lunghezza iniziale;
- Sollecitazioni massime contenute, dell'ordine dei 30 MPa;
- Possibilità di incrementare rigidità e resistenza mediante l'aggiunta di particelle o nanoparticelle al carbonio.

2.5 Materiali Magnetostrittivi

La **magnetostrizione** è la proprietà di alcuni materiali ferromagnetici di subire una deformazione quando sono sottoposti a un campo magnetico. Tale fenomeno è dovuto al diverso orientamento dei domini magnetici associati ai dipoli presenti all'interno del materiale, i quali tendono ad allinearsi con le linee del campo magnetico applicato. La Figura 2.5 illustra schematicamente questo processo.

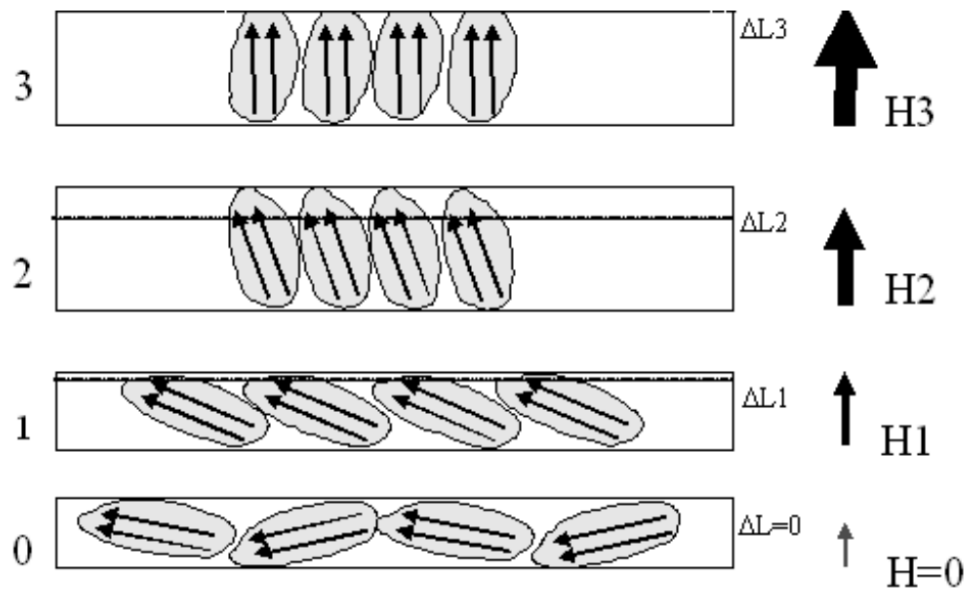


Figura 2.5: Orientamento Dipoli Materiali Magnetostrittivi[6]

Il materiale magnetostrittivo maggiormente impiegato nelle applicazioni ingegneristiche è il **Terfenol-D**, una lega composta principalmente da **Terbio (Tb)**, **Disprosio (Dy)** e **Ferro (Fe)**, apprezzata per l'elevata deformazione magnetostrittiva e per le ottime prestazioni come attuatore.

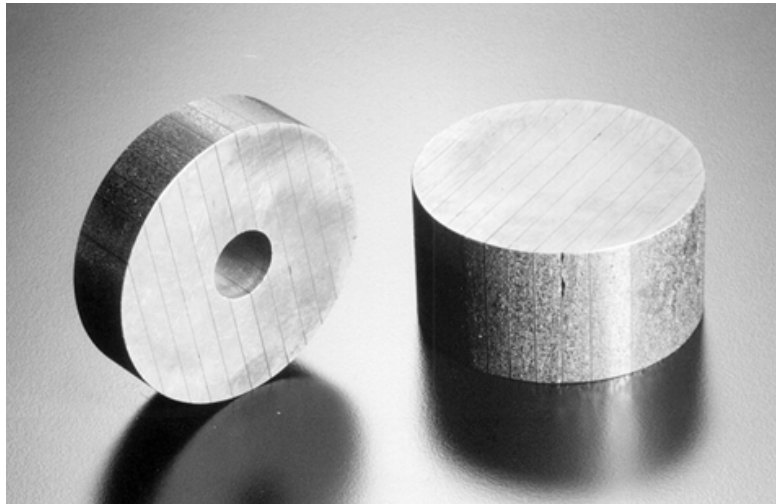


Figura 2.6: Terfenol-D, lega di Terbio, Disprosio e Ferro[35]

Le loro caratteristiche principali sono:

- Tempi di risposta molto ridotti;
- Densità elevata, che comporta un peso relativamente elevato;
- Deformazioni massime pari a circa lo 0,2%;
- Sollecitazioni massime dell'ordine di 100 MPa, confrontabili con quelle dei materiali piezoelettrici.

2.6 Materiali a Memoria di Forma

I **materiali a memoria di forma** sono una classe di materiali intelligenti in grado di recuperare la geometria originaria dopo essere stati deformati, quando vengono sottoposti a uno specifico stimolo esterno, la cui natura dipende dalla tipologia di materiale considerata. Questa categoria comprende due principali famiglie:

- **Shape Memory Alloys (SMA)** - Leghe a Memoria di Forma

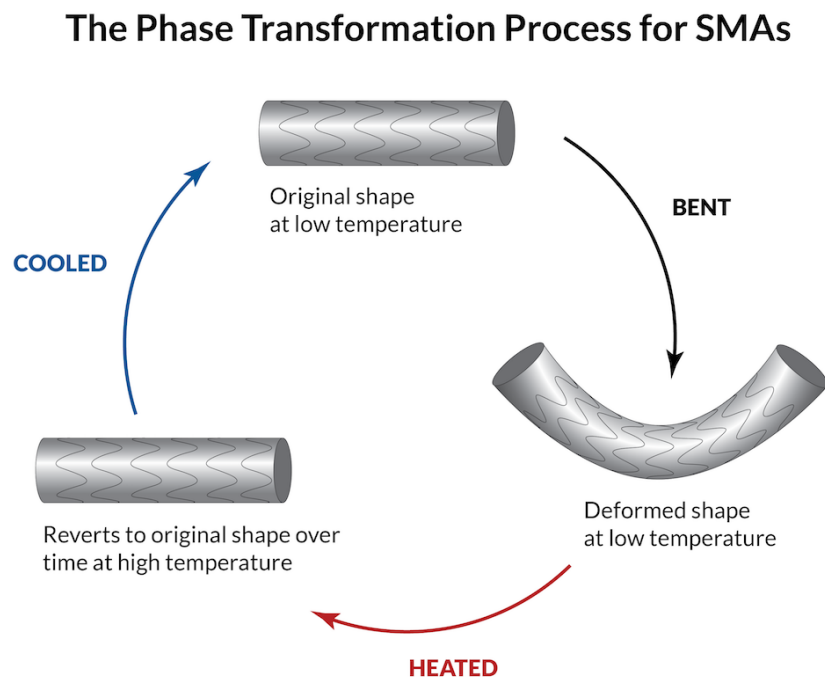


Figura 2.7: Processo trasformazione di fase delle leghe a memoria di forma[10]

- **Shape Memory Polymers (SMP)** - Polimeri a Memoria di Forma

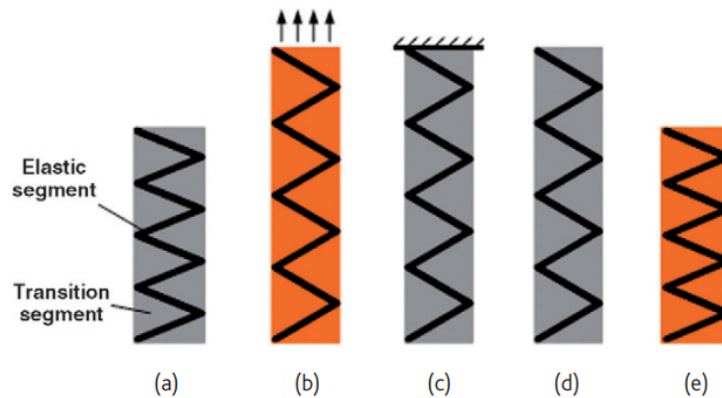


Figura 2.8: Processo trasformazione di fase nei polimeri a memoria di forma[18]

Entrambe le famiglie presentano due proprietà fondamentali:

- **Shape Memory Effect (SME) - Effetto Memoria di Forma:** consiste nella capacità del materiale di recuperare la forma precedentemente memorizzata mediante riscaldamento, dopo essere stato deformato allo stato martensitico.

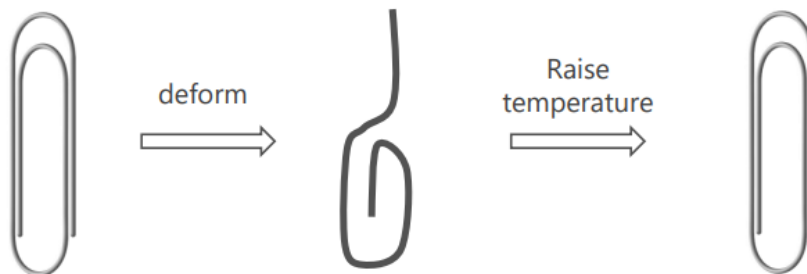


Figura 2.9: Shape Memory Effect[1]

- **Superelasticità o Pseudoelasticità:** rappresenta la capacità del materiale di subire deformazioni elevate e recuperarle completamente una volta rimosso il carico applicato, senza la necessità di riscaldamento. Tale comportamento è legato alla formazione di fasi strutturali indotte dallo stress.

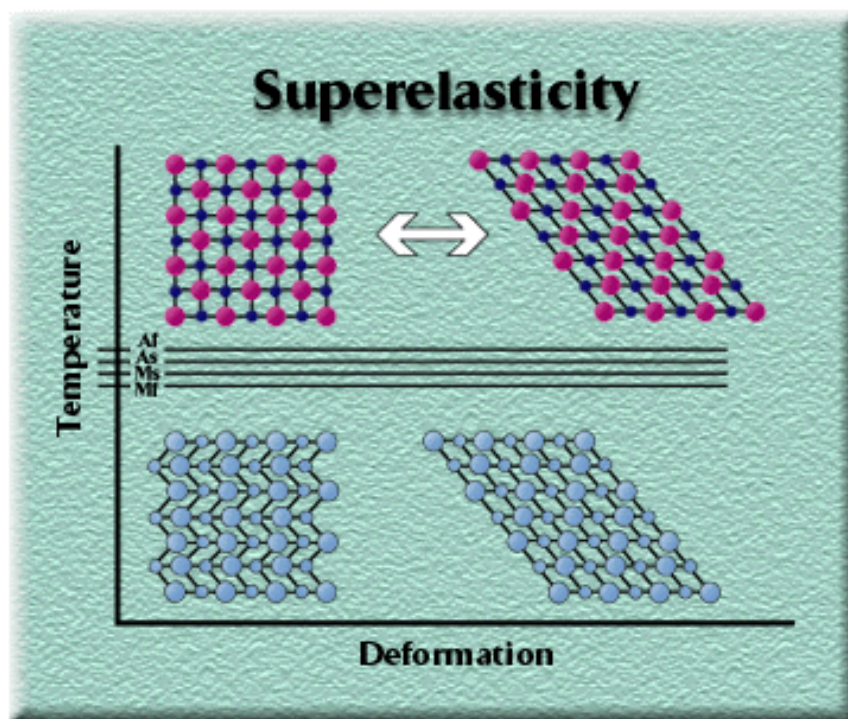


Figura 2.10: Superelasticità o Pseudoelasticità[36]

Tra le due famiglie di materiali a memoria di forma, le leghe SMA rappresentano la soluzione maggiormente adottata nelle applicazioni aerospaziali e automobilistiche, grazie all'elevata forza sviluppabile e alla buona affidabilità ciclica. Per questo motivo saranno analizzate più approfonditamente nel paragrafo successivo.

2.6.1 Polimeri a Memoria di Forma

I **polimeri a memoria di forma (Shape Memory Polymers, SMP)** recuperano la forma precedentemente memorizzata quando vengono sottoposti a uno specifico stimolo esterno, che può essere di natura termica, elettrica, magnetica oppure meccanica. Le proprietà meccaniche degli SMP variano sensibilmente con la temperatura. A basse temperature il materiale si trova nello stato vetroso, caratterizzato da elevata rigidità, comportamento prevalentemente elastico e un modulo di Young superiore a 3 GPa. Al di sopra della temperatura di transizione, invece, assume uno stato gommoso viscoelastico, con un modulo di Young compreso indicativamente tra 1 e 10 MPa. La significativa riduzione della rigidità è dovuta alla diversa configurazione assunta dalle catene polimeriche al variare della

temperatura, fenomeno che consente al materiale di essere deformato e successivamente di recuperare la forma originaria. Le principali caratteristiche degli SMP sono:

- Densità tra le più basse della categoria degli Smart Materials;
- Bassa resistenza meccanica e limitata forza di recupero;
- Deformazioni molto elevate, fino all'800% della lunghezza iniziale;
- Possibilità di migliorare le prestazioni meccaniche mediante l'impiego di **Materiali Compositi a Matrice Polimerica (SMPC)**.

Una soluzione comunemente adottata per incrementare rigidità e resistenza consiste nell'utilizzo di **Shape Memory Polymer Composites (SMPC)**. Nel dettaglio, sono composti da fibre e una matrice. La funzionalità delle fibre è quella di mantenere i carichi strutturali, mentre quella della matrice è di fornire legami variabili tra le precedenti. A seconda dello scopo, quando è richiesta integrità strutturale, la matrice è a bassa temperatura (così da collegare rigidamente le fibre), mentre nella modalità cosiddetta di "morphing" o trasformazione, l'aumento della viscosità della matrice ad alte temperature rende disconnessi gli elementi a rigidità costante che traslano, se sottoposti a grandi spostamenti. In funzione delle fibre aggiunte, è inoltre possibile conferire ulteriori proprietà funzionali, quali una maggiore conducibilità termica o elettrica.

2.6.2 Leghe a Memoria di Forma

Le **leghe a memoria di forma (Shape Memory Alloys, SMA)** sono materiali intelligenti in grado di recuperare la geometria originariamente memorizzata quando vengono sottoposti a uno stimolo, generalmente di natura termica oppure elettrica. La lega maggiormente impiegata è il Nitinol (Nichel-Titanio, Ni-Ti), sebbene siano disponibili anche leghe a base di rame (Cu). Le principali caratteristiche delle SMA sono:

- Elevata resistenza meccanica, con sollecitazioni massime comprese tra 500 e 1000 MPa;
- Densità medio-alta;
- Deformazioni recuperabili fino all'8% della lunghezza iniziale;
- Tempi di risposta relativamente elevati rispetto agli altri Smart Materials.

Le SMA possono trovarsi in due differenti fasi cristallografiche: **Martensite**, stabile alle basse temperature, e **Austenite**, stabile alle temperature più elevate. Per memorizzare una determinata geometria, il componente viene modellato nella configurazione desiderata e successivamente vincolato. Il trattamento termico viene quindi eseguito a temperature generalmente superiori a 500 °C, al fine di stabilizzare la struttura austenitica. Al termine del processo, il componente viene raffreddato rapidamente per fissare la forma memorizzata. Nella fase martensitica è possibile distinguere due differenti configurazioni strutturali per gli SMA:

- **Martensite Twinned (Geminata):** si forma spontaneamente durante il raffreddamento dell'austenite in assenza di carichi esterni. In questa configurazione il materiale mantiene inalterata la propria geometria macroscopica, poiché le varianti di martensite risultano orientate in modo tale da compensare reciprocamente le deformazioni.
- **Martensite Detwinned (Degeminata):** si ottiene in seguito all'applicazione di un carico meccanico, che induce il ri-orientamento delle varianti martensitiche. La deformazione così ottenuta può essere completamente recuperata mediante il successivo riscaldamento del materiale.

La Figura 2.11 mostra il ciclo di isteresi associato alle trasformazioni di fase che caratterizzano il comportamento delle leghe a memoria di forma.

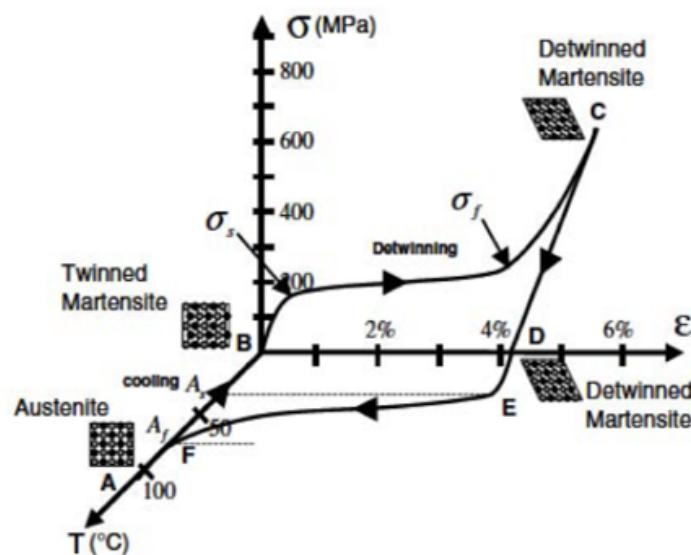


Figura 2.11: Trasformazioni di Fase SMA[32]

Le leghe a memoria di forma possono inoltre operare secondo due differenti modalità di funzionamento:

- **Effetto Unidirezionale (One-Way):** il recupero della forma memorizzata avviene esclusivamente durante il riscaldamento, mentre il ritorno alla configurazione deformata richiede l'applicazione di un carico esterno.

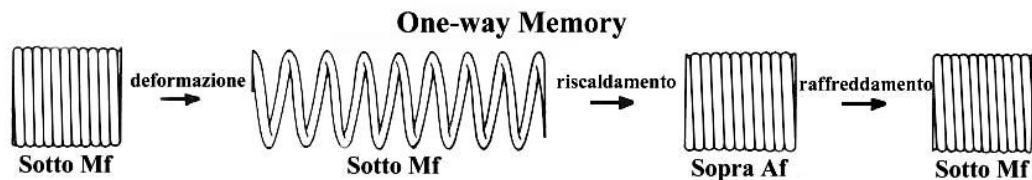


Figura 2.12: Effetto Memoria di Forma Unidirezionale (One-Way)[36]

- **Effetto Bidirezionale (Two-Way):** il materiale è in grado di alternare automaticamente due configurazioni memorizzate durante le fasi di riscaldamento e raffreddamento, senza la necessità di applicare un carico meccanico esterno.

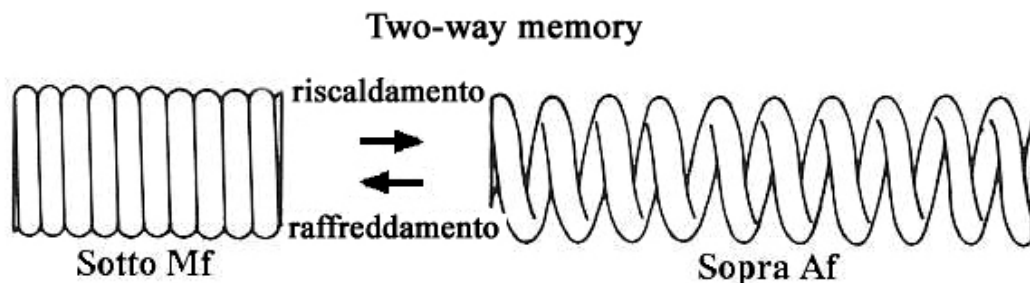


Figura 2.13: Effetto Memoria di Forma Bidirezionale (Two-Way)[36]

La Figura 2.14 riporta alcuni esempi applicativi delle configurazioni unidirezionali e bidirezionali, sia in forma di filo sia di molla, caratterizzate da spostamenti lineari, rotazioni, piegature, torsioni e configurazioni geometriche più complesse.

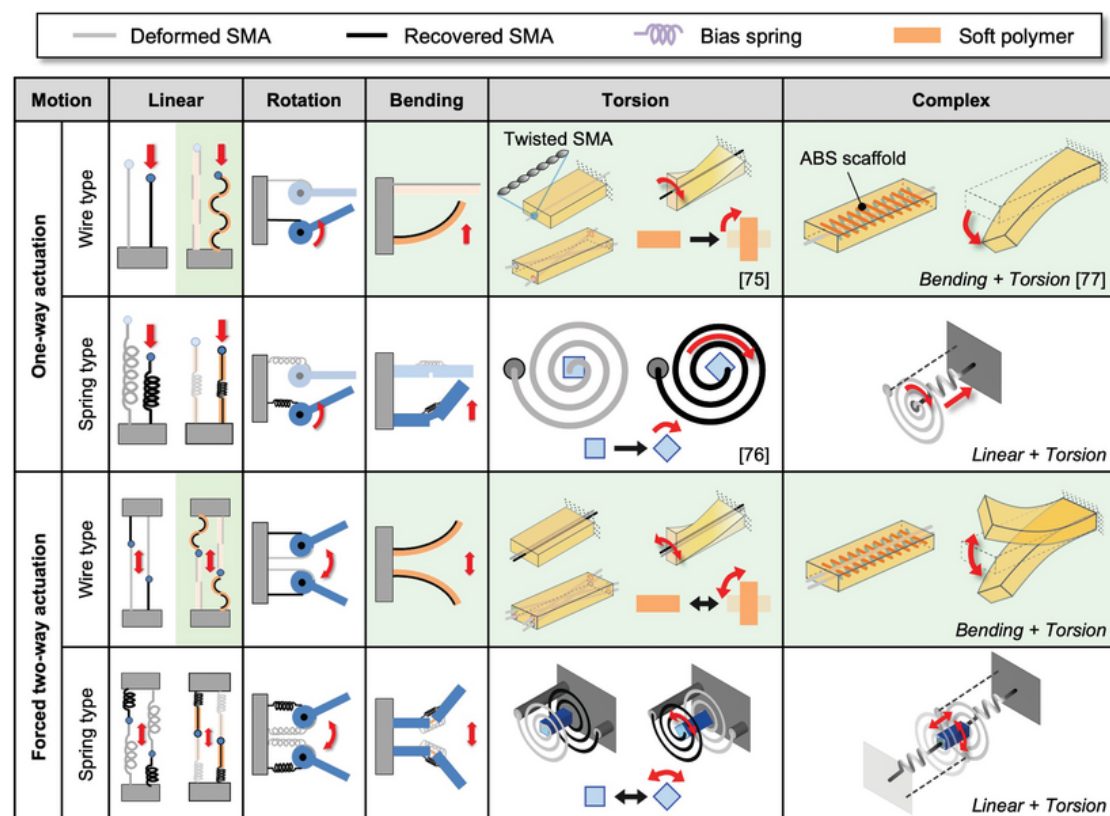


Figura 2.14: Esempi di configurazioni e applicazioni delle leghe SMA[21]

2.7 Durata a Fatica e Fattori di influenza

2.7.1 Fatica degli Smart Materials

Per gli Smart Materials è possibile distinguere due principali tipologie di fatica:

- **Fatica Strutturale:** fenomeno di degrado meccanico in cui sollecitazioni cicliche o variabili, anche inferiori al limite di resistenza statica del materiale, determinano l'innesco e la propagazione di cricche, fino a provocarne la rottura.
- **Fatica Funzionale:** consiste nella progressiva riduzione delle proprietà funzionali caratteristiche del materiale in seguito a cicli di carico di natura termica, meccanica, elettrica o magnetica. Pur non determinando necessariamente

un cedimento strutturale, tale fenomeno comporta una progressiva diminuzione delle prestazioni del materiale, limitandone l'efficacia nelle applicazioni previste.

La Tabella seguente riporta, per ciascuna categoria di Smart Materials, l'intervallo tipico di vita a fatica espresso in numero di cicli e i principali fattori che ne influenzano la durata.

Materiale	Vita a fatica [cicli]	Principali fattori di influenza
Shape Memory Alloys (SMA)	$10^4 - 10^6$	Fatica Termo-Meccanica
Shape Memory Polymers (SMP)	$10^2 - 10^4$	Creep, Degradazione Termomeccanica
Ceramici Piezoelettrici	$10^4 - 10^5$	Fragilità, Fatica Elettrica
Compositi Piezoelettrici	$10^6 - 10^8$	Fatica Elettrica, Delaminazione
Polimeri Elettroattivi	$10^3 - 10^5$	Creep, Invecchiamento, Delaminazione
Materiali Magnetostrittivi	$10^3 - 10^5$	Fragilità, Trazione

2.7.2 Shape Memory Alloys (SMA)

La vita a fatica delle Shape Memory Alloys (SMA) è influenzata da numerosi fattori, che determinano sia la durata strutturale sia il decadimento delle prestazioni funzionali. I principali sono:

- **Ampiezza della deformazione (Strain Level):** deformazioni elevate riducono significativamente il numero di cicli sopportabili prima della rottura.
- **Deformazione residua accumulata:** con l'aumentare del numero di cicli, il materiale tende a non recuperare completamente la forma memorizzata, accumulando deformazioni permanenti (*strain drift*) che compromettono progressivamente la capacità di attuazione.
- **Incompatibilità Strutturali:** le ripetute trasformazioni di fase tra austenite e martensite generano incompatibilità microstrutturali che favoriscono l'innesco e la propagazione di microcricche.
- **Qualità Superficiale e Difetti:** difetti superficiali, derivanti da lavorazioni meccaniche o processi di produzione additiva, agiscono come concentratori di tensione, facilitando la formazione delle cricche.

- **Temperatura di Esercizio:** le proprietà delle leghe a memoria di forma dipendono fortemente dalla temperatura. Variazioni termiche modificano la stabilità delle fasi austenitica e martensitica, influenzando l'efficienza della trasformazione.
- **Accoppiamento Termo-Meccanico:** le variazioni di temperatura inducono sollecitazioni meccaniche e viceversa, le deformazioni meccaniche modificano la distribuzione della temperatura e il comportamento termico del materiale. Tale interazione influisce in modo significativo sulla durata a fatica delle SMA.

2.7.3 Shape Memory Polymers (SMP)

La durata a fatica degli Shape Memory Polymers (SMP) è influenzata da diversi fenomeni di degrado, sia di natura strutturale sia funzionale. I principali fattori sono:

- **Degradazione della Fase Permanente:** La capacità di recupero della forma dipende dalla struttura del polimero («fase permanente»). I ripetuti cicli termomeccanici danneggiano i vari nodi fisici, portando ad una perdita permanente della forma memorizzata.
- **Invecchiamento Termomeccanico:** L'esposizione ripetuta a temperature elevate e a stress meccanici causano invecchiamento del materiale, scissione delle catene polimeriche o ulteriori reticolazioni non desiderate, alterando le proprietà di memoria.
- **Stress Meccanici:** Tensioni elevate durante la fase di deformazione possono causare microcricche o cedimenti strutturali, riducendo la vita utile del materiale.
- **Accumulo di Deformazione Residua:** con l'aumentare dei cicli il materiale accumula deformazioni permanenti, riducendo progressivamente la capacità di recuperare la configurazione originaria.
- **Limitazione della Fase Reversibile:** Con l'aumentare dei cicli di fatica, la capacità dei "soft segments" di riposizionarsi perfettamente si riduce, portando ad una perdita parziale della memoria di forma o a deformazioni permanenti residue.
- **Creep:** Se il carico applicato per deformare il polimero è mantenuto troppo a lungo o a una temperatura non ottimale, il materiale può subire uno scorrimento viscoso, alterando la forma memorizzata.

É opportuno sottolineare che la **Fase Reversibile** è rappresentata da segmenti flessibili (*soft segments*) responsabili della deformazione e del recupero della forma (*permanente*) oltre la temperatura di transizione e da segmenti rigidi (*hard segments*) che conservano la memoria della forma permanente.

2.7.4 Materiali Magnetostrittivi

La vita a fatica dei materiali magnetostrittivi e le loro prestazioni nel lungo periodo sono influenzate da fattori di natura strutturale, meccanica e ambientale. I principali meccanismi di degrado sono:

- **Fragilità del Materiale:** la natura fragile di questi materiali li rende particolarmente suscettibili alla formazione di cricche e alla rottura quando sottoposti a carichi ciclici elevati.
- **Affaticamento Meccanico:** sollecitazioni cicliche caratterizzate da elevate frequenze o ampiezze di deformazione favoriscono l'innesco e la propagazione di microcricche, riducendo progressivamente la vita utile del materiale.
- **Stress di Trazione:** I dispositivi devono essere progettati per lavorare in compressione per evitarne la rottura prematura, data la loro resistenza alla trazione limitata.
- **Vibrazioni ed Urti:** Shock meccanici o vibrazioni estreme durante l'applicazione possono danneggiare la microstruttura del materiale, riducendone la vita utile.
- **Ossidazione e Corrosione:** Quando sottoposti ad ambienti umidi o corrosivi, sono soggetti a corrosione, subendo una degradazione delle loro proprietà magnetiche e strutturali nel tempo.
- **Temperatura:** Alte temperature possono causarne la smagnetizzazione (quando ci si avvicina al punto di Curie), influenzando in modo negativo le prestazioni.
- **Campo Magnetico Inverso:** L'applicazione di un campo magnetico di polarità inversa può ridurre il grado di magnetizzazione e, di conseguenza, le prestazioni.

2.7.5 Ceramiche Piezoelettrici

La vita a fatica dei materiali ceramici piezoelettrici, quali il Titanato Zirconato di Piombo (PZT), è limitata principalmente dalla loro elevata fragilità e dai fenomeni

di degrado indotti dai cicli meccanici ed elettrici. I principali fattori di influenza sono:

- **Fragilità del Materiale:** A causa della loro natura fragile, le ceramiche sono soggette a rotture sotto stress meccanico ciclico. Le cricche esistenti all'interno del materiale, possono espandersi portando al cedimento strutturale.
- **Switching dei Domini Ferroelettrici (Fatica Elettrica):** I cicli continui di campo elettrico causano il riorientamento dei domini ferroelettrici/ferroelastici. Questo crea stress interni e deformazioni irreversibili, riducendo le proprietà piezoelettriche nel tempo.
- **Umidità:** La combinazione di elevata umidità e campi elettrici applicati è critica, perché può causare processi di migrazione elettrochimica degli elettrodi all'interno della ceramica, portando a cortocircuiti e danni irreparabili.
- **Depolarizzazione:** Con il passare dei cicli, i dipoli elettrici all'interno del materiale si riorientano riducendo l'effetto elettro-meccanico.
- **Sovratensione e Campi Elettrici Elevati:** L'intensità del campo elettrico influenza direttamente la vita utile. Voltaggi elevati ne accelerano la degradazione.
- **Stress Termico:** Alte temperature e shock termici possono innescare il degrado del materiale.
- **Delaminazione:** Si verifica nei dispositivi multistrato o in quelli accoppiati con altri materiali, a causa di umidità, calore, stress meccanici o difetti di fabbricazione.

2.7.6 Compositi Piezoelettrici

I compositi piezoelettrici, pur offrendo il vantaggio di combinare la flessibilità dei polimeri con l'elevata risposta piezoelettrica delle ceramiche (come il PZT), sono soggetti a una durata ciclica limitata a causa di diversi meccanismi di degrado strutturale ed elettrico. I fattori limitanti sono:

- **Fatica del Materiale e Cricche:** Quando sottoposti a carichi ciclici, questi materiali sviluppano micro-cricche e difetti che si propagano fino alla rottura o a una significativa perdita di prestazioni.
- **Delaminazione:** Nei materiali compositi stratificati, la separazione degli strati è un meccanismo di rottura comune, dovuto alle sollecitazioni cicliche, in particolare all'interfaccia tra la matrice polimerica e la fibra ceramica.

- **Rottura della Matrice:** La matrice polimerica può cedere a causa di carichi meccanici ripetuti, portando a una riduzione della capacità di carico del composito.
- **Depolarizzazione:** Con il passare dei cicli, i dipoli elettrici all'interno del materiale si riorientano, riducendo il flusso di polarizzazione e, di conseguenza, la risposta meccanica (*effetto elettro-meccanico*).
- **Switching dei Domini Ferroelettrici:** L'inversione dei domini ferroelettrici produce stress interni e deformazioni meccaniche interne irreversibili, che influenzano le proprietà del materiale, e favoriscono la formazione di cricche interne.
- **Danno Indotto dal Campo Elettrico:** I campi elettrici alternati intensi causano espansione/contrazione del reticolo, creando stress interni che favoriscono le crepe.
- **Concentrazioni di Stress:** le disomogeneità microstrutturali, come pori, inclusioni o i bordi di grano, agiscono da concentratori di stress, facilitando l'inizio di crepe.
- **Scarsa Trasmissione di Deformazione:** Deriva da un'interfaccia debole tra la matrice polimerica e le fibre piezoelettriche, o da una matrice troppo rigida che riduce la risposta piezoelettrica e limita la vita utile.
- **Degradazione dell'Elettrodo:** Lo snervamento o rottura degli elettrodi a causa dei cicli riduce la capacità del materiale di generare o trasportare carica.
- **Temperatura e Umidità:** Fattori ambientali come variazioni di temperatura e umidità possono accelerare la degradazione dei materiali piezoelettrici.
- **Frequenza di Carico:** Alte frequenze di lavoro possono accelerare i fenomeni di affaticamento dovuti al calore generato internamente.

2.7.7 Polimeri Elettroattivi

La vita a fatica dei polimeri elettroattivi (EAP) è influenzata sia da fenomeni meccanici sia da processi di degrado elettrico e ambientale. I principali fattori di influenza sono:

- **Degradazione dell'Elettrolita:** La perdita di solvente (o evaporazione) o la decomposizione dell'elettrolita, specialmente in ambienti aperti, riduce drasticamente la capacità di conduzione ionica.

- **Fatica Meccanica e Stress:** L'espansione e contrazione ripetuta portano alla formazione di microfratture all'interno della matrice polimerica, riducendo la forza e la deformazione massima.
- **Delaminazione degli Elettrodi:** Gli elettrodi conduttivi (polimeri conduttori o carbonio) possono separarsi dal polimero di base a causa delle deformazioni cicliche.
- **Self-Degradation (Autodegradazione):** Fenomeno in cui l'elettrolita stesso corrode i componenti interni del polimero nel tempo, indipendentemente dall'uso.
- **Deriva a Bassa Frequenza:** Nei sensori/attuatori, si riscontra una deriva del segnale (*corrente di cortocircuito*), che altera la risposta del materiale nel tempo.
- **Temperatura e Umidità:** L'instabilità termica e l'assorbimento di umidità possono causare reazioni di idrolisi o degradazione ossidativa, riducendo i cicli di vita del polimero.
- **Ampiezza e Frequenza del Segnale:** Cicli di attuazione continui e ad alta ampiezza accelerano la degradazione rispetto ad un uso meno frequente.

2.8 Criteri di Scelta Materiale

La selezione del materiale più idoneo per la realizzazione delle bandelle e del relativo meccanismo di attuazione richiede la definizione di specifici criteri progettuali, al fine di individuare la soluzione che garantisca il miglior compromesso tra prestazioni, affidabilità e fattibilità realizzativa. I principali criteri di scelta sono i seguenti:

- **Conformità al regolamento di omologazione:** il materiale e il sistema di attuazione devono rispettare i requisiti imposti dal regolamento relativo al fondo vettura, in particolare per quanto riguarda l'altezza minima da terra.
- **Proprietà meccaniche e termiche:** devono essere compatibili con le condizioni di esercizio previste, considerando parametri quali resistenza meccanica, deformazione massima, durata a fatica e temperatura massima di funzionamento.
- **Condizioni ambientali di esercizio:** è necessario valutare l'influenza di temperatura, umidità, vibrazioni e altri fattori ambientali che potrebbero compromettere le prestazioni del materiale nel tempo.

- **Compatibilità con il meccanismo di attuazione:** il materiale deve integrarsi efficacemente con il sistema di attuazione scelto, garantendone il corretto funzionamento e l'affidabilità.
- **Tempo di risposta:** il sistema deve assicurare tempi di attuazione compatibili con i requisiti funzionali dell'applicazione.
- **Costo complessivo:** la scelta deve tenere conto sia del costo del materiale sia dei processi di produzione e di integrazione.

2.9 Costo e Fattori di Influenza

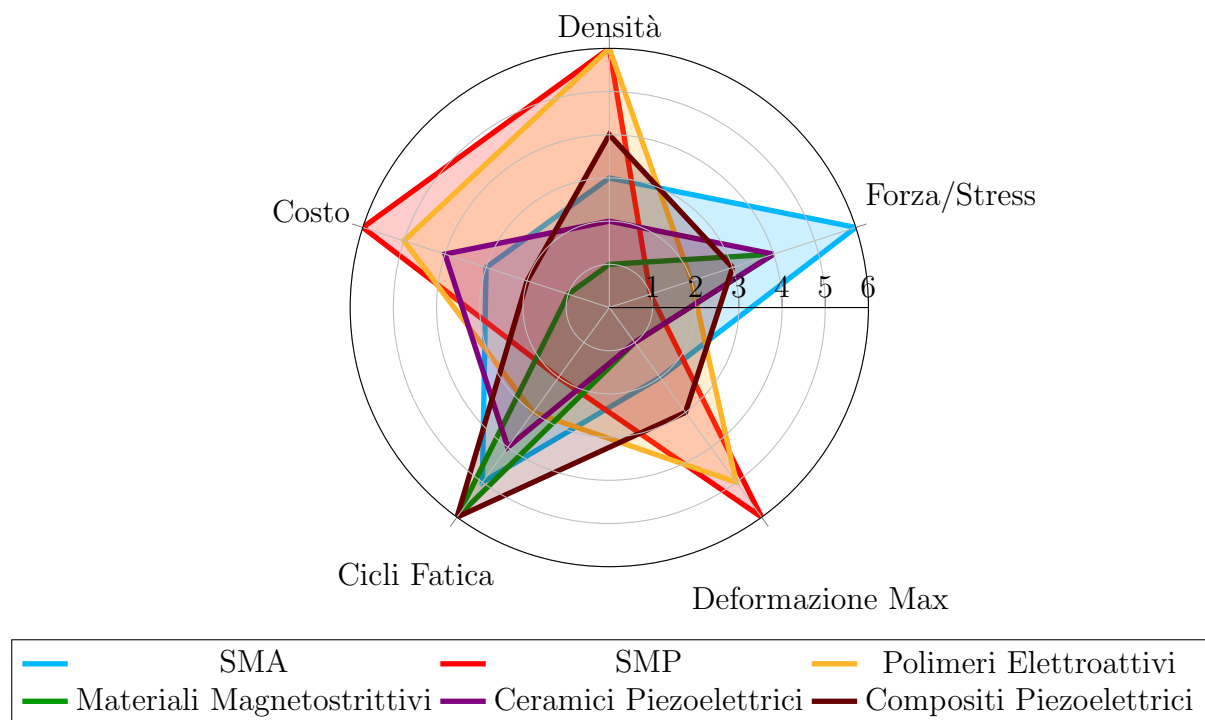
La tabella seguente riporta un confronto indicativo dei costi associati agli Smart Materials, evidenziando i fattori che incidono maggiormente sul loro costo.

Materiale	Costo	Fattori con maggiore influenza
Shape Memory Alloys (SMA)	Alto	Materie Prime e Processo di Produzione e di Training della Forma
Shape Memory Polymers (SMP)	Basso	Complessità Processi di Sintesi e di Lavorazione
Ceramici Piezoelettrici	Medio - Alto	Sinterizzazione ad alte temperature, scarti elevati a causa della loro fragilità
Compositi Piezoelettrici	Alto - Molto Alto	Ceramici e Polimeri uniti in strutture complesse, assemblaggio laborioso
Polimeri Elettroattivi	Medio	Sintesi chimica precisa, configurazioni multistrato
Materiali Magnetostrittivi	Molto Alto	Utilizzo di Materiali Rari (ad esempio Terbio, Disprosio...)

Dall'analisi riportata emerge come le leghe a memoria di forma e i materiali magnetostrittivi siano generalmente le soluzioni più costose, principalmente a causa dell'impiego di materie prime ad elevato valore commerciale e della complessità dei processi produttivi. Al contrario, i polimeri a memoria di forma presentano costi significativamente inferiori, risultando particolarmente interessanti per applicazioni in cui il contenimento dei costi rappresenta un requisito progettuale rilevante.

2.10 Valutazione Materiali

Al fine di confrontare le principali famiglie di Smart Materials considerate nel presente studio, è stato realizzato il diagramma radar riportato di seguito. Il grafico riporta le proprietà ritenute maggiormente significative per l'applicazione in esame, consentendo una valutazione qualitativa delle diverse soluzioni sulla base dei criteri di selezione precedentemente definiti.



Come si evince dal grafico, che permette di confrontare le proprietà di questi materiali, quello che presenta le proprietà più adatte allo sviluppo di questo progetto è la lega a memoria di forma (SMA), anche se in parte si potrebbe puntare sull'utilizzo dei polimeri a memoria di forma (SMP), in quanto hanno un funzionamento simile alle leghe e permettono di ricoprire intere superfici rendendole completamente trasformabili.

2.11 Considerazioni Conclusive

Dall'analisi comparativa condotta emerge come ciascuna famiglia di Smart Materials presenti specifici vantaggi e limitazioni, che ne determinano l'idoneità in funzione dell'applicazione considerata. I **materiali piezoelettrici** si distinguono

per gli elevati tempi di risposta e per la capacità di sviluppare forze considerevoli, ma risultano limitati dalle ridotte deformazioni ottenibili. I **polimeri elettroattivi**, al contrario, consentono di raggiungere deformazioni molto elevate e presentano una notevole flessibilità, sebbene richiedano, in alcuni casi, tensioni di alimentazione elevate o particolari condizioni operative. I **materiali magnetostrittivi** offrono tempi di risposta estremamente ridotti e una buona capacità di generare forza, ma sono caratterizzati da costi elevati e da deformazioni relativamente contenute. I **polimeri a memoria di forma (SMP)** rappresentano una soluzione economica e leggera, tuttavia la loro limitata resistenza meccanica e la ridotta forza di recupero ne restringono il campo di impiego nelle applicazioni strutturali. Le **leghe a memoria di forma (SMA)** costituiscono invece un buon compromesso tra capacità di attuazione, forza sviluppabile, deformazione recuperabile e affidabilità. Pur presentando tempi di risposta superiori rispetto ad altri Smart Materials, esse risultano particolarmente adatte ad applicazioni in cui siano richieste compattezza e semplicità costruttiva. Alla luce delle caratteristiche analizzate, le leghe a memoria di forma rappresentano la soluzione più idonea per l'applicazione oggetto di questa tesi.

Capitolo 3

Tipologie di Applicazioni Smart Materials

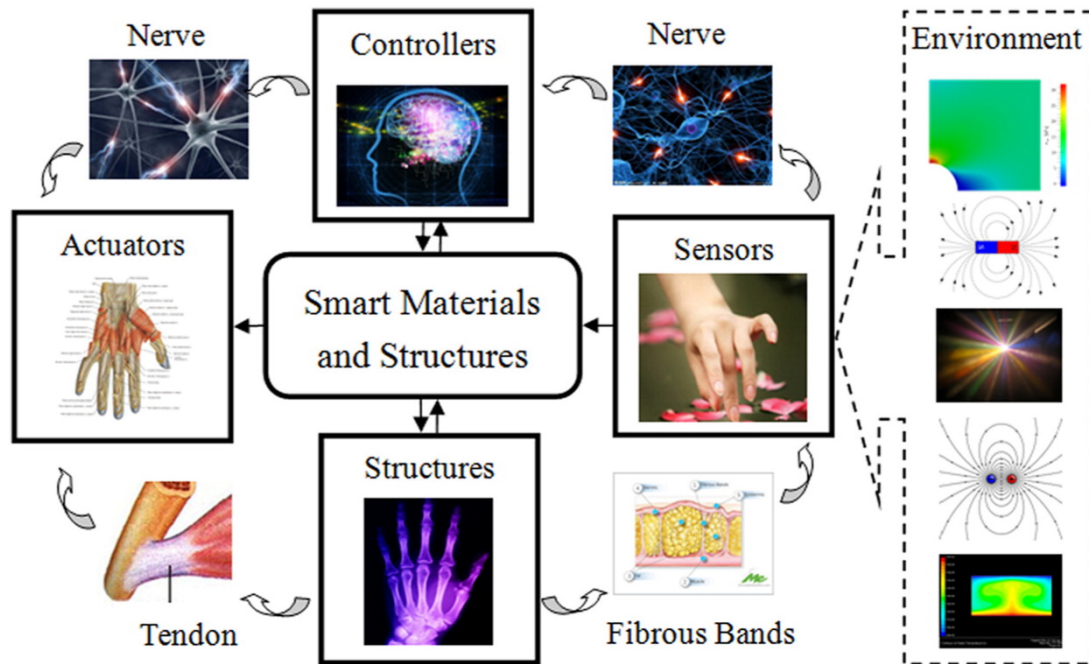


Figura 3.1: Tipologie di Applicazioni Smart Materials[34]

Gli Smart Materials precedentemente trattati possono essere applicati in due modalità differenti:

- **Attuatori:** gli Smart Materials vengono utilizzati come elementi attivi all'interno di un sistema di attuazione. In questa configurazione, la superficie

esterna della bandella è realizzata con un materiale elastico convenzionale, mentre il movimento è generato dall'attuatore integrato, costituito da uno Smart Material opportunamente dimensionato.

- **Morphing Skins o Pelli "Trasformabili"**: questa soluzione prevede la realizzazione parziale o totale della bandella mediante Smart Materials, consentendo una variazione diretta della geometria della superficie. Sebbene tale configurazione offra un elevato livello di integrazione e una maggiore libertà progettuale, comporta costi di realizzazione superiori rispetto all'impiego di un attuatore dedicato.

In questo caso, la scelta del materiale assume un ruolo determinante: è infatti necessario privilegiare materiali caratterizzati da una bassa densità, così da limitare l'incremento di massa del veicolo e ridurre l'impatto sulle performance.

3.1 Esempi Applicativi

Di seguito sono riportati alcuni esempi di applicazione degli Smart Materials nel settore aerodinamico, con particolare riferimento a sistemi di superfici adattive e dispositivi di attuazione.

3.1.1 Esempio 1: Profilo alare con attuatori a filo in SMA

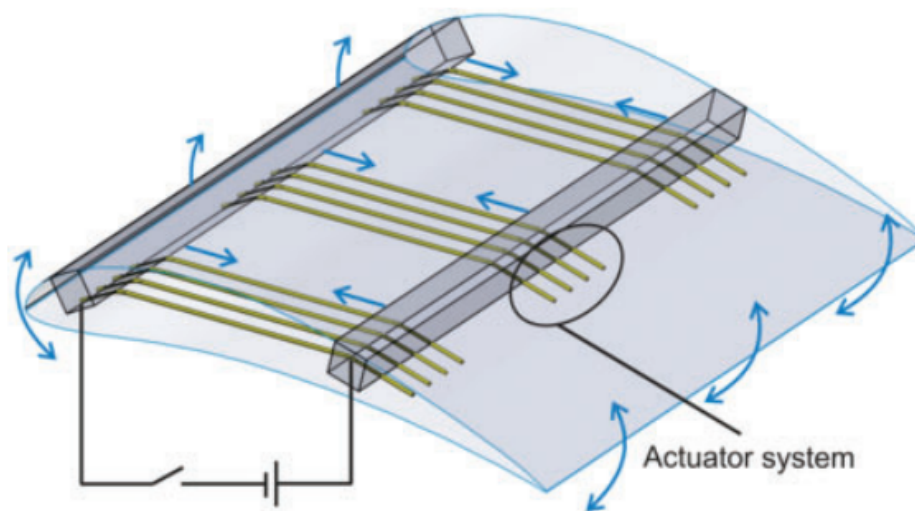


Figura 3.2: Profilo Alare con attuatori a filo in SMA[2]

L'applicazione prevede l'impiego di un profilo alare cavo, all'interno del quale sono installati attuatori costituiti da fili in Shape Memory Alloy (SMA). Poiché il corretto funzionamento delle leghe a memoria di forma non deve essere influenzato direttamente dal flusso aerodinamico, gli attuatori vengono completamente integrati nella struttura dell'ala, realizzata in Fiber Reinforced Plastic (FRP). La configurazione cava del profilo consente di alloggiare gli attuatori, che vengono intrecciati con il rivestimento superiore dell'ala e ne controllano la deformazione durante l'attivazione. Per incrementare la densità di potenza del sistema sono stati impiegati tre gruppi di quattro fili in Nitinol, in grado di generare la deformazione necessaria alla modifica della geometria del profilo alare. Nella configurazione illustrata in Figura 3.2 è stato utilizzato un composito costituito da fibre di vetro e polipropilene, con una composizione pari al 70% di fibra di vetro (GF) e 30% di polipropilene (PP), comunemente indicato con la sigla GF-PP. La realizzazione della struttura è stata effettuata mediante un processo di **infusione sottovuoto** con matrice termoindurente, una tecnica di stampaggio a circuito chiuso nella quale le fibre di rinforzo vengono inizialmente posizionate a secco all'interno dello stampo e successivamente impregnate con la resina sfruttando la depressione generata da un sacco a vuoto sigillato. La resina e l'indurente vengono miscelati prima dell'infusione, mentre al termine del processo viene applicata una schiuma strutturale con la funzione di stabilizzare la geometria e mantenere la configurazione dell'ala adattiva. I principali materiali utilizzabili per questa tipologia di applicazione sono:

- Fiber Reinforced Plastics (FRP) + SMA
- Glass Fiber-Reinforced Elastomers + SMA
- Glass Fiber Polypropylene (GF-PP) + SMA

3.1.2 Esempio 2: Profilo alare con attuatore a molla in SMA

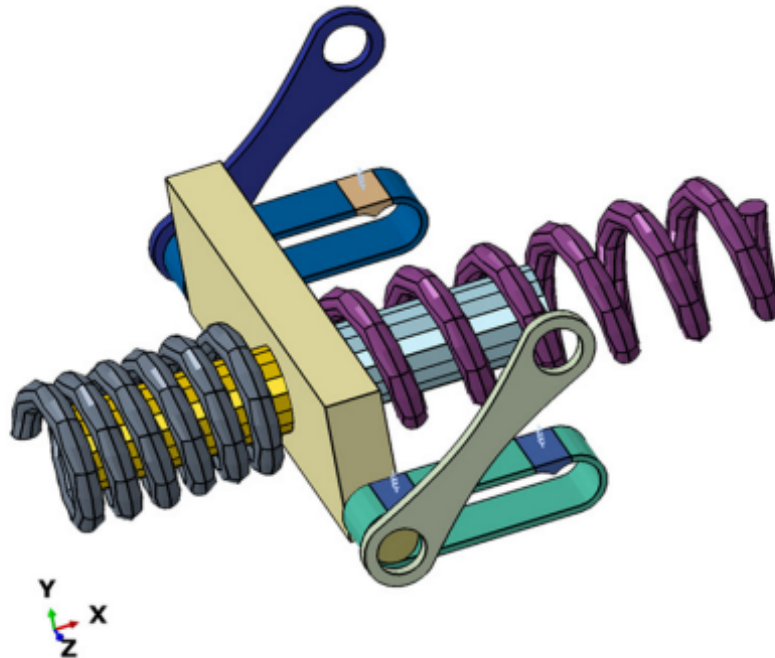


Figura 3.3: Attuatore a doppia molla SMA in un'ala d'aereo—Configurazione 1[27]

L'applicazione illustrata in Figura 3.3 prevede un attuatore bistabile, in grado di consentire il passaggio tra due configurazioni di equilibrio stabili. La bistabilità è ottenuta mediante la combinazione di molle in Shape Memory Alloy (SMA) e di un opportuno sistema di bloccaggio. Ciascuna molla fornisce l'energia necessaria per superare la configurazione instabile intermedia; una volta oltrepassata tale condizione, il sistema evolve spontaneamente verso la seconda configurazione stabile, dove rimane bloccato senza richiedere un apporto energetico continuo. Il sistema di bloccaggio riveste pertanto un ruolo fondamentale nel garantire la stabilità del meccanismo in entrambe le posizioni di equilibrio. Nella configurazione proposta vengono impiegate due molle in SMA operanti in modo alternato. Tuttavia, una delle due può essere sostituita da una tradizionale molla in acciaio, poiché il passaggio tra le due configurazioni può essere ottenuto anche mediante l'attivazione di un solo elemento in lega a memoria di forma. Di seguito sono riportate due possibili configurazioni del sistema.

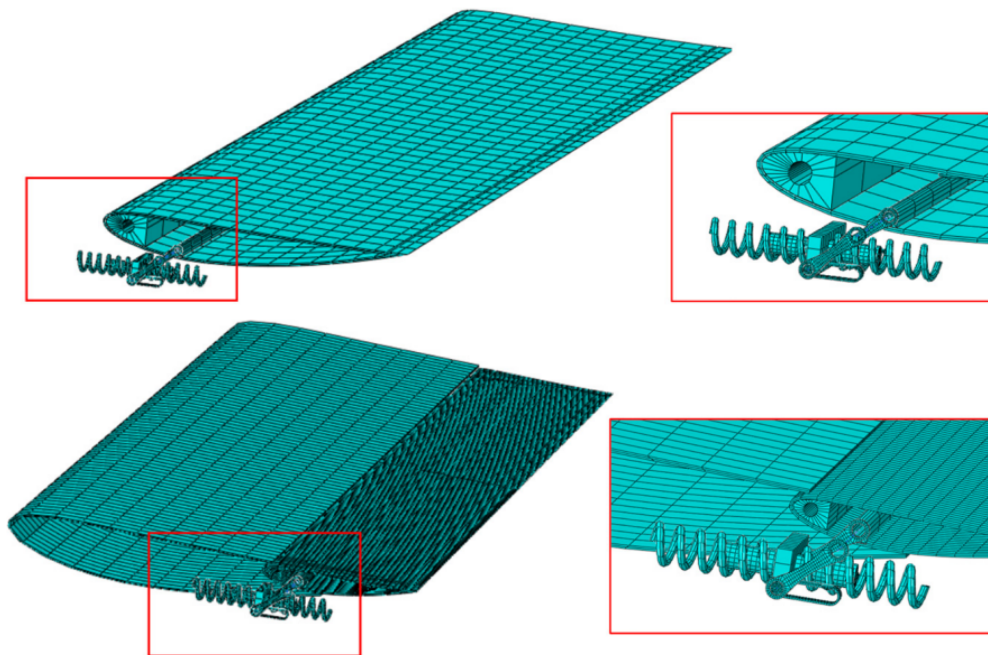


Figura 3.4: 2 Configurazioni di Profilo Alare con attuatore bistabile in SMA[27]

Le configurazioni illustrate presentano differenti modalità di funzionamento:

- **Configurazione superiore:** l'intero profilo alare ruota attorno a un punto fisso che svolge la funzione di perno.
- **Configurazione inferiore:** il sistema è costituito da un semiprofilo fisso e da un elemento mobile corrispondente al bordo di uscita dell'ala. L'attivazione alternata delle molle consente di modificare la posizione del bordo di uscita, realizzando il passaggio tra le due configurazioni stabili del meccanismo.

Per questa applicazione viene utilizzata la seguente combinazione di materiali:

- Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) + SMA

In particolare, il **Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)** costituisce il rivestimento strutturale esterno del profilo alare, mentre le **Shape Memory Alloys (SMA)** sono impiegate come elementi attivi del sistema di attuazione.

3.1.3 Esempio 3: Profilo alare in composito con attuatore a filo in SMA

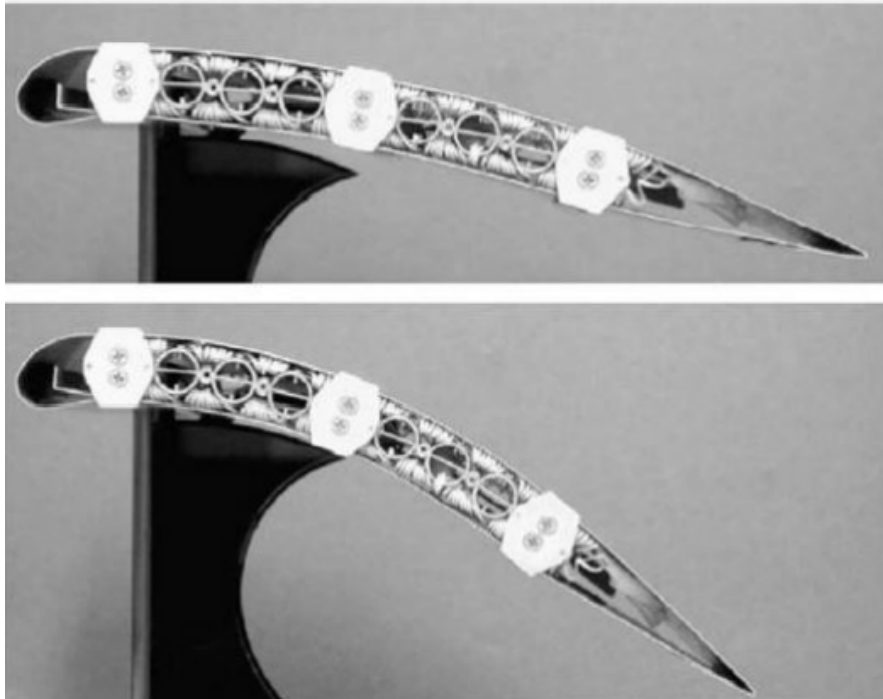


Figura 3.5: Profilo Alare in composito con attuatore a filo in SMA[7]

La Figura 3.5 mostra un prototipo di ala laminare a geometria trasformabile, la cui deformazione è ottenuta mediante strisce in Shape Memory Alloy (SMA) integrate all'interno di un composito intelligente. Il materiale composito è costituito da fili in SMA e fibre di vetro inglobati in una matrice polimerica, combinazione che consente di coniugare le proprietà strutturali del composito con la capacità di attuazione delle leghe a memoria di forma. Nella parte superiore della figura è riportata la configurazione iniziale del profilo alare, mentre nella parte inferiore è mostrata la configurazione deformata ottenuta a seguito dell'attivazione degli attuatori. Questa soluzione consente di modificare in modo continuo la curvatura del profilo alare, migliorandone l'adattabilità alle diverse condizioni operative e permettendo una regolazione più efficiente delle prestazioni aerodinamiche.

3.1.4 Esempio 4: Composito multistrato con filo in SMA

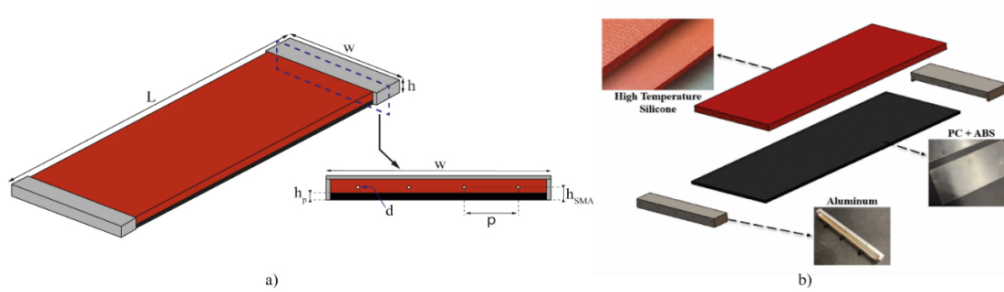


Figura 3.6: Composito Multistrato con attuatori a filo in SMA[28]

La Figura 3.6 mostra una piastra realizzata mediante un composito multistrato nel quale sono incorporati fili in Shape Memory Alloy (SMA), impiegati come elementi attivi del sistema di attuazione. La struttura è costituita da diversi materiali:

- **Policarbonato (PC)**, fornisce rigidità strutturale;
- **Acrilonitrile Butadiene Stirene (ABS)**, migliora la lavorabilità del componente;
- **Strato flessibile in silicone per alte temperature**, garantisce la flessibilità necessaria alla deformazione indotta dagli attuatori SMA.

La combinazione di tali materiali consente di coniugare la capacità di deformazione indotta dalle leghe a memoria di forma con un'adeguata resistenza meccanica, preservando al contempo l'integrità strutturale del composito durante il funzionamento.

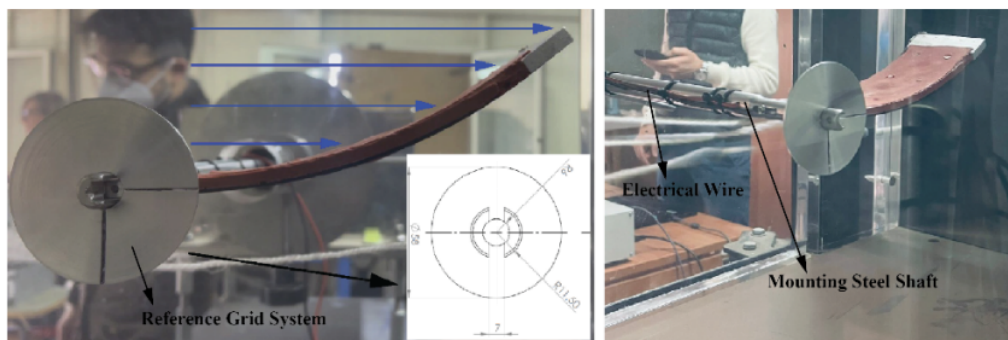


Figura 3.7: Curvatura Composito Multistrato con attuatori a filo in SMA[28]

La Figura 3.7 illustra il comportamento del sistema durante l'attivazione. In particolare, è possibile osservare la variazione della curvatura della piastra in seguito all'applicazione di uno stimolo elettrico ai fili in SMA, responsabili della deformazione controllata della struttura.

3.1.5 Esempio 5: Ala d'aereo con attuatore in SMA

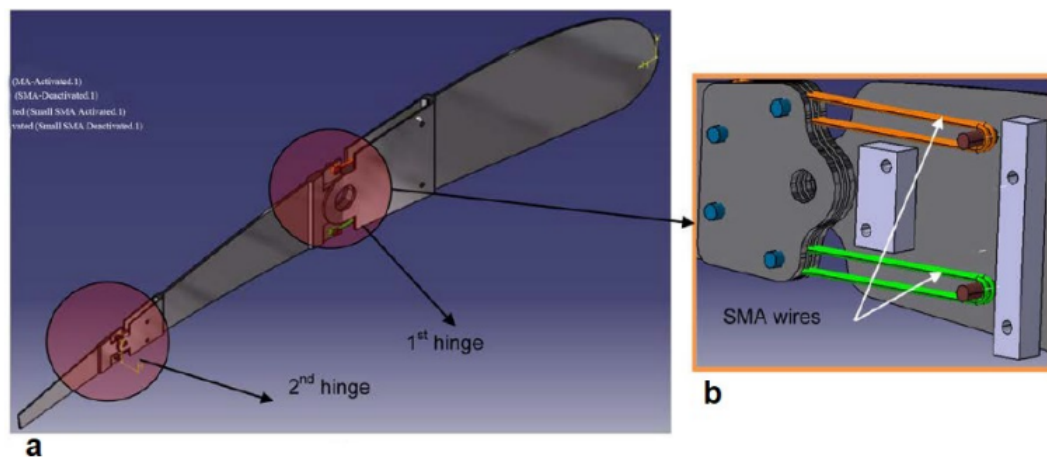


Figura 3.8: Attuatore SMA in matrice polimerica in un'ala d'aereo[20]

La Figura 3.8 mostra un profilo alare articolato mediante una serie di cerniere, in corrispondenza delle quali sono installati due fili di Nitinol. L'attivazione delle leghe a memoria di forma consente di comandare la deformazione del profilo, permettendo di modificarne la curvatura e di ottenere l'apertura o la chiusura della superficie mobile in funzione delle condizioni operative. Poiché i fili in Nitinol operano prevalentemente a trazione durante la fase di attuazione e si contraggono quando vengono riscaldati, il ritorno alla configurazione iniziale può essere affidato a una molla in acciaio. Tale soluzione consente di realizzare un sistema antagonista semplice ed efficace, riducendo il numero di elementi attivi necessari. Questa configurazione rappresenta una valida alternativa ai tradizionali sistemi di movimentazione dei flap aeronautici, in quanto consente di ridurre la complessità meccanica del sistema, il numero di componenti e le esigenze di manutenzione, garantendo al tempo stesso un controllo continuo della geometria del profilo alare.

3.1.6 Esempio 6: Profilo alare con superficie in SMP



Figura 3.9: Profilo Alare con superficie in SMP[7]

La Figura 3.9 mostra una pelle deformabile per un profilo alare, basata su Shape Memory Polymers (SMP). La struttura integra un elettrodo elastico che consente l'allungamento della superficie lungo la direzione della corda del profilo, permettendone la variazione controllata della geometria. Dal punto di vista del comportamento meccanico, i polimeri a memoria di forma presentano un'elevata rigidità nello stato vetroso, mentre assumono un comportamento morbido ed elastico quando vengono portati al di sopra della temperatura di transizione o sottoposti ad altri opportuni stimoli esterni, acquisendo la capacità di deformarsi e recuperare successivamente la forma memorizzata. In questa applicazione gli SMP non sono impiegati come elementi di attuazione, bensì come materiale costituente della superficie trasformabile. La deformazione della pelle è infatti resa possibile dalle proprietà del polimero, che consente di ottenere superfici continue prive dei tradizionali meccanismi articolati. L'impiego degli SMP offre inoltre il vantaggio di realizzare strutture leggere e altamente integrate, riducendo la massa complessiva del sistema e migliorandone l'efficienza aerodinamica. Tuttavia, rispetto ai materiali convenzionali, tale soluzione comporta costi di produzione più elevati, dovuti alla natura funzionale del materiale e alla maggiore complessità dei processi di realizzazione.

3.1.7 Esempio 7: Profilo alare con rivestimento in SMPC

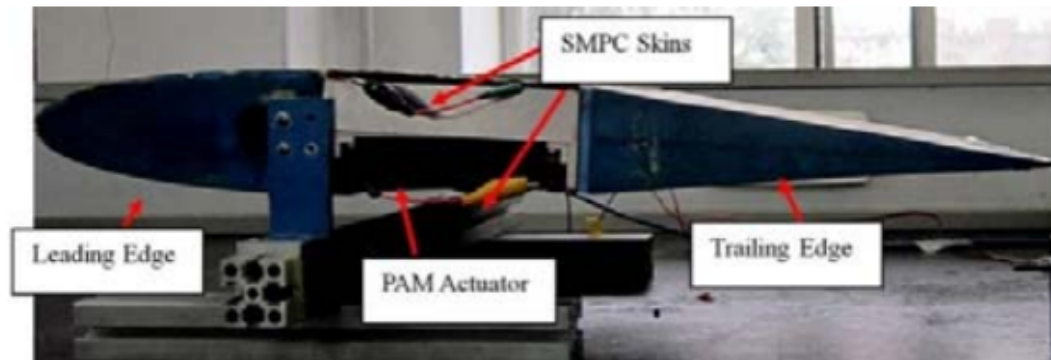


Figura 3.10: Profilo Alare con rivestimento in SMPC[7]

La Figura 3.10 mostra un profilo alare adattivo dotato di un rivestimento in Shape Memory Polymer Composites (SMPC), costituito da una matrice polimerica a base di stirene a rigidità variabile, rinforzata con fibre di carbonio e integrata in una pellicola flessibile in gomma siliconica. La struttura è composta da un bordo d'attacco fisso, un bordo d'uscita mobile, una lamiera metallica, un attuatore a muscolo pneumatico (Pneumatic Artificial Muscle, PAM) e dal rivestimento in SMPC. L'attuatore PAM è installato nella parte inferiore del profilo. Quando viene alimentato con aria compressa, si contrae inducendo una variazione della curvatura dell'ala. Il rivestimento in SMPC, applicato sia sulla superficie superiore sia su quella inferiore, consente di mantenere una superficie aerodinamicamente continua (smooth) durante la deformazione, evitando discontinuità geometriche che potrebbero compromettere le prestazioni aerodinamiche. Analogamente agli Shape Memory Polymers (SMP), anche gli SMPC presentano proprietà termo-responsive. Quando vengono riscaldati oltre la temperatura di transizione vetrosa, il materiale assume un comportamento gommoso caratterizzato da una riduzione del modulo elastico, che ne facilita la deformazione. Durante il successivo raffreddamento, il composito ritorna progressivamente allo stato vetroso, recuperando un'elevata rigidità e mantenendo la configurazione assunta. Questa combinazione di elevata rigidità durante il funzionamento e di buona deformabilità nella fase di attuazione rende gli SMPC particolarmente adatti alla realizzazione di superfici aerodinamiche adattive, capaci di modificare la propria geometria senza compromettere la continuità del rivestimento esterno.

3.1.8 Esempio 8: Profilo Alare con attuatore in composito Piezoelettrico

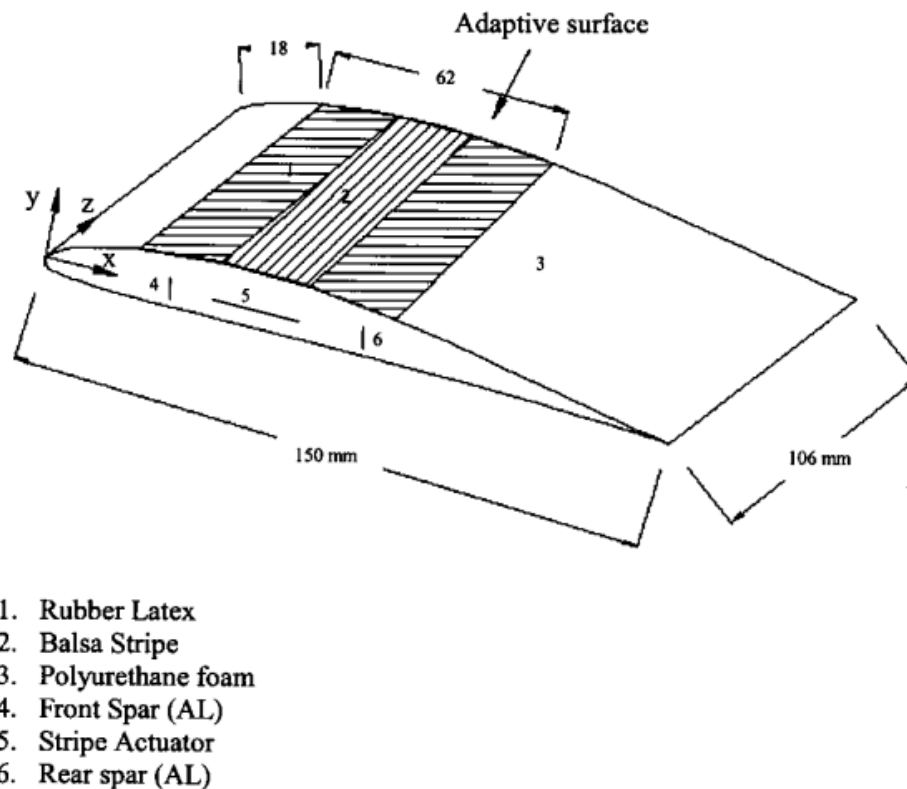


Figura 3.11: Profilo Alare con attuatore in composito Piezoelettrico[31]

La Figura 3.11 mostra un profilo alare adattivo costituito dai seguenti elementi:

- **pelle esterna in lattice di gomma;**
- **attuatore in composito piezoelettrico**, costituito da elementi in PZT (Titanato di Zirconato di Piombo) incollati o integrati all'interno di laminati compositi rinforzati con fibre.

La deformazione della superficie superiore del profilo è ottenuta mediante un attuatore piezoelettrico bimorfo di tipo flessibile, costituito da due strisce piezoelettriche accoppiate. L'applicazione di una differenza di potenziale induce la flessione dell'attuatore, consentendo di modificare localmente la geometria del profilo alare. Questa modalità di attuazione può essere impiegata sia per deflettere attivamente

una porzione della superficie alare, sia per generare vibrazioni periodiche finalizzate al controllo del flusso aerodinamico. Il principio progettuale si basa sul concetto di struttura intelligente a spessore variabile, nel quale la variazione della geometria viene ottenuta attraverso la deformazione o la vibrazione controllata della superficie. Per garantire una distribuzione uniforme della deformazione su entrambi i lati del profilo viene utilizzata una pellicola in lattice di gomma, che assicura continuità aerodinamica e adeguata flessibilità durante il funzionamento.

3.1.9 Esempio 9: Attuatore Magnetostrittivo con Terfenol-D

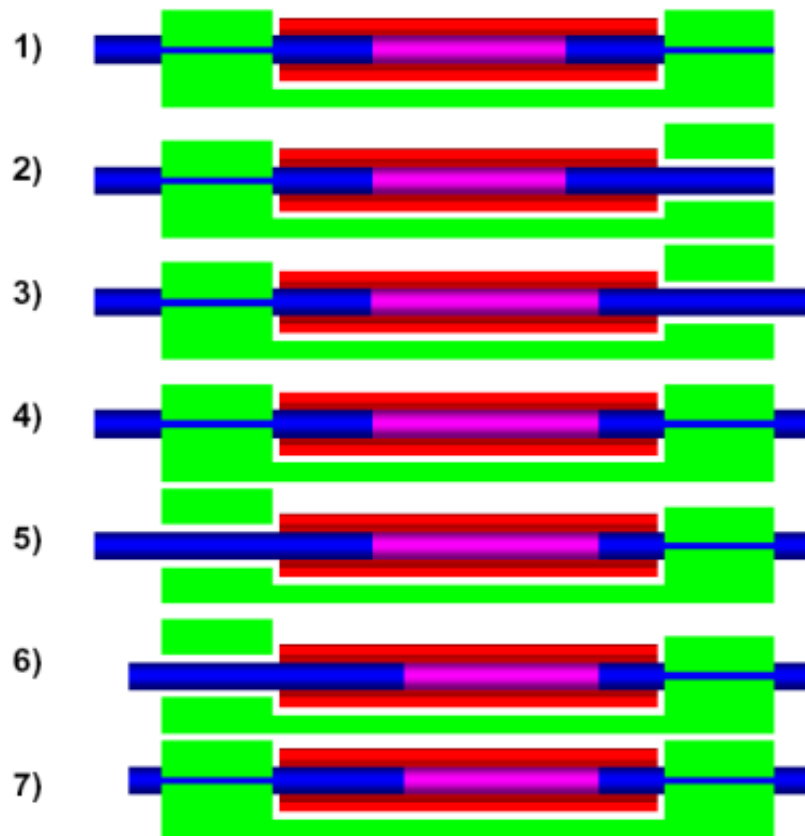


Figura 3.12: Attuatore Magnetostrittivo con Terfenol-D[24]

L'attuatore illustrato nella Figura 3.12 sfrutta l'elongazione di un'asta in Terfenol-D per generare il movimento della superficie alla quale è collegato. L'elemento principale del dispositivo è costituito dall'asta magnetostrittiva, avvolta da una bobina elettrica che, quando alimentata, genera un campo magnetico in grado di provocarne l'allungamento. L'attuatore è installato tra due morsetti di bloccaggio. Attraverso una corretta sequenza di eccitazione della bobina e di apertura e chiusura dei morsetti, l'asta può avanzare o arretrare, consentendo di ottenere un movimento lineare controllato.

Il principio di funzionamento può essere descritto attraverso la seguente sequenza operativa:

1. Nella configurazione iniziale l'alimentazione della bobina è disattivata ed entrambe le estremità dell'asta sono bloccate dai morsetti.
2. Uno dei due morsetti viene rilasciato mediante la sua eccitazione, consentendo il movimento dell'asta.
3. La bobina viene quindi alimentata, generando il campo magnetico che provoca l'allungamento del Terfenol-D e lo spostamento in avanti dell'estremità libera dell'asta.
4. Una volta raggiunta la nuova posizione, il morsetto anteriore viene chiuso per bloccare l'avanzamento ottenuto.
5. Successivamente viene rilasciato il morsetto posteriore.
6. Disattivando la bobina, l'asta ritorna alla lunghezza iniziale e l'estremità posteriore avanza fino alla nuova posizione.
7. Infine, il morsetto posteriore viene nuovamente chiuso, completando il ciclo di avanzamento. Nella configurazione illustrata il sistema è in grado di sviluppare una forza di tenuta fino a 3000 N, con una corsa massima di 20 mm.

Nonostante le elevate prestazioni in termini di forza sviluppabile e precisione di posizionamento, questa tipologia di attuatore presenta alcuni svantaggi significativi per applicazioni aeronautiche e automobilistiche. In particolare, i materiali magnetostrittivi sono caratterizzati da una densità elevata, che comporta un incremento della massa del sistema, e da costi di produzione particolarmente elevati, dovuti all'impiego di terre rare quali Terbio e Disprosio.

3.1.10 Esempio 10: Attuatore Lineare Magnetostrittivo

La Figura 3.13 mostra un attuatore lineare magnetostrittivo costituito da un'asta attiva, una bobina elettrica, magneti permanenti, una molla precaricata e un'asta di uscita. I magneti permanenti generano un campo magnetico di polarizzazione, mentre la corrente che attraversa la bobina produce un ulteriore campo magnetico, responsabile dell'attivazione del materiale magnetostrittivo. L'interazione tra i due campi provoca l'allungamento dell'asta in Terfenol-D, trasformando l'energia elettrica in uno spostamento meccanico lineare. L'allungamento dell'asta viene trasmesso all'asta guida, che si sposta verso destra comprimendo la molla precaricata. Il movimento viene quindi trasferito all'asta di uscita, consentendo l'azionamento del componente collegato. Il principio di funzionamento risulta analogo a quello di un attuatore lineare tradizionale, ma sfrutta la deformazione magnetostrittiva come elemento attivo.

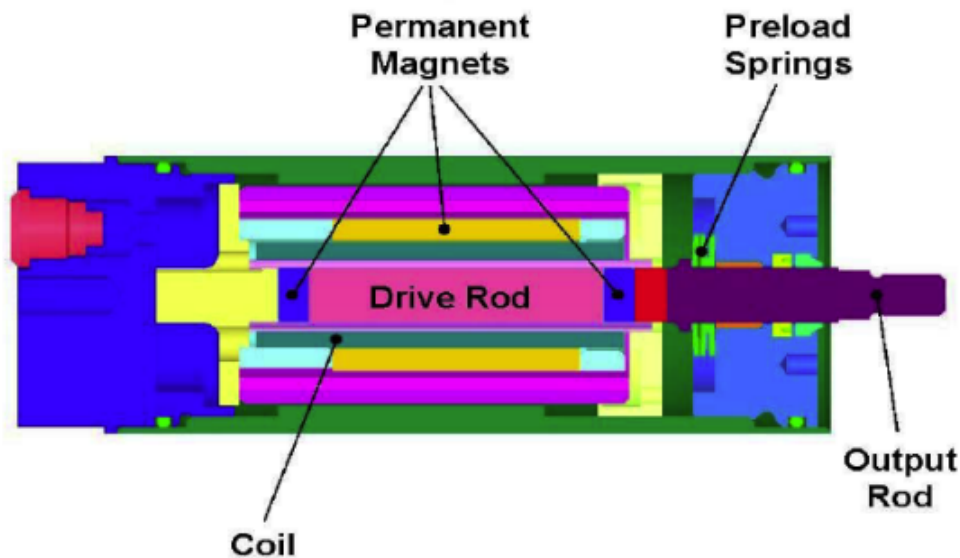


Figura 3.13: Attuatore Lineare Magnetostrittivo[24]

Analogamente all'esempio precedente, questa tipologia di attuatore offre elevate prestazioni in termini di precisione e forza sviluppabile, ma presenta gli stessi limiti legati all'elevata densità dei materiali magnetostrittivi e ai costi di produzione, dovuti principalmente all'impiego di leghe contenenti elementi appartenenti al gruppo delle terre rare.

Capitolo 4

Simulazioni Fluidodinamiche - CFD

4.1 Introduzione

In questo capitolo viene illustrato il processo di simulazione fluidodinamica computazionale (Computational Fluid Dynamics - CFD) svolto mediante il software Simcenter STAR-CCM+, utilizzato sia per la preparazione del modello geometrico sia per l'analisi numerica del campo di moto. In particolare, il software è stato impiegato per la pulizia e la semplificazione della geometria CAD fornita, per la generazione della mesh computazionale e per l'impostazione delle simulazioni numeriche. L'obiettivo principale consiste nel confrontare le prestazioni di differenti modelli di turbolenza, al fine di individuare la configurazione numerica più idonea alla successiva analisi aerodinamica del veicolo. A tal fine, verranno descritte le principali fasi del processo di simulazione, dalla preparazione della geometria fino all'analisi e al confronto dei risultati ottenuti.

4.2 Geometria CAD

La geometria CAD inizialmente disponibile non risultava completamente water-tight, ovvero non presentava un volume perfettamente chiuso, a causa della conversione tra differenti software di modellazione. Tale condizione avrebbe impedito la corretta generazione della mesh e, di conseguenza, l'esecuzione delle simulazioni fluidodinamiche. Per questo motivo è stato necessario eseguire una fase preliminare di pulizia e riparazione della geometria mediante gli strumenti messi a disposizione da Simcenter STAR-CCM+, che saranno descritti nei paragrafi successivi. In particolare, sono stati eliminati piccoli difetti geometrici, chiusi i fori presenti sulla superficie e corrette le zone critiche che avrebbero potuto compromettere la qualità

della mesh. La geometria completa del veicolo, utilizzata come punto di partenza per le successive analisi CFD, è riportata nella Figura 4.1.

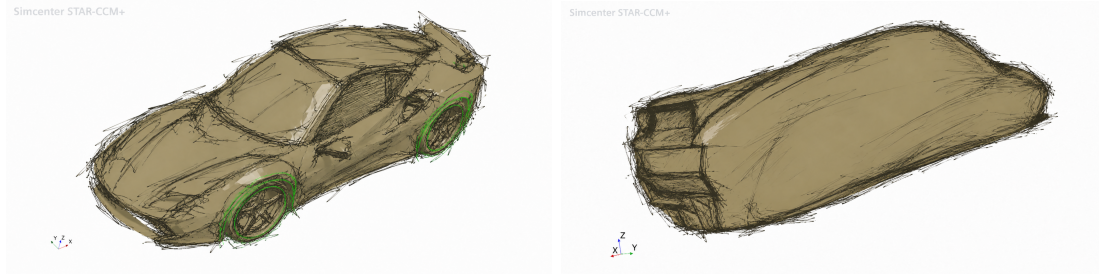


Figura 4.1: CAD Vettura

In una fase iniziale dello studio è stata presa in considerazione la possibilità di analizzare esclusivamente il fondo vettura, con e senza la presenza delle ruote, al fine di ridurre i tempi di calcolo e valutare preliminarmente il comportamento del flusso nella regione di interesse. A tale scopo è stato realizzato un modello comprendente la sola porzione inferiore della vettura, ottenuto mediante una sezione in corrispondenza del fondo. Successivamente, tale approccio è stato abbandonato a favore dell'analisi dell'intero veicolo. L'utilizzo della geometria completa consente infatti di rappresentare in modo più realistico le interazioni tra il flusso e i diversi componenti della vettura, migliorando l'accuratezza della distribuzione delle pressioni, della formazione dei vortici e, più in generale, dei risultati aerodinamici ottenuti. Il modello CAD del solo fondo vettura, sviluppato nella fase preliminare dello studio, è riportato nella Figura 4.2.

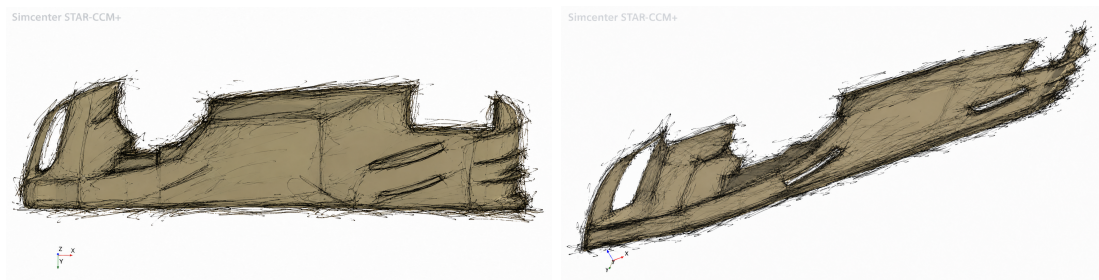


Figura 4.2: CAD Fondo Vettura

4.3 Surface Preparation

Prima di procedere alla generazione della mesh è necessario eseguire una fase di preparazione della superficie della geometria, con l'obiettivo di eliminare eventuali difetti geometrici e garantire la creazione di un modello conforme ai requisiti richiesti dalle simulazioni CFD. A tale scopo, Simcenter STAR-CCM+ fornisce due strumenti principali per la preparazione della geometria:

- **Surface Wrapper;**
- **Surface Repair.**

Nei paragrafi seguenti verranno descritte le funzionalità di ciascun strumento e il loro impiego nel processo di preparazione della geometria per la successiva generazione della mesh.

4.3.1 Surface Wrapper

La prima procedura adottata per la preparazione della geometria è stata l'applicazione del **Surface Wrapper**, uno strumento di Simcenter STAR-CCM+ progettato per la gestione di geometrie particolarmente complesse o non completamente conformi. Il Surface Wrapper genera una nuova superficie chiusa che avvolge l'intera geometria originale, eliminando piccole discontinuità, fori e imperfezioni. Il risultato è una geometria watertight, idonea alla successiva generazione della mesh e in grado di preservare le principali caratteristiche geometriche del modello. L'algoritmo impiegato si basa su una discretizzazione di tipo octree, nella quale il dominio viene inizialmente suddiviso in celle cubiche (ottanti) aventi dimensione pari alla Target Size. Successivamente, il reticolo viene raffinato localmente fino al raggiungimento della Minimum Size, consentendo di rappresentare con maggiore accuratezza le zone caratterizzate da dettagli geometrici più complessi. Tra le principali funzionalità offerte dal Surface Wrapper si possono evidenziare:

- **Raffinamento di Prossimità:** identifica superfici molto vicine tra loro e controlla il numero minimo di celle presenti nello spazio che le separa.
- **Raffinamento di Curvatura:** aumenta localmente la risoluzione della discretizzazione nelle zone caratterizzate da elevata curvatura, attraverso il parametro "Points per Circle".
- **Prevenzione dei Contatti:** evita la fusione accidentale di superfici molto ravvicinate durante la generazione della nuova superficie.

La Figura 4.3 mostra la geometria della vettura dopo l'applicazione del Surface Wrapper.

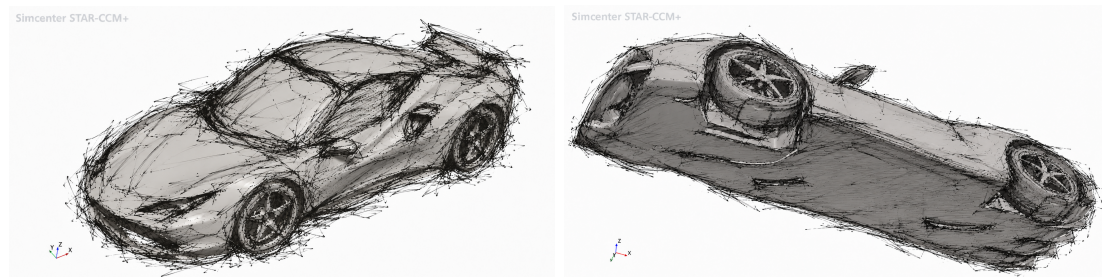


Figura 4.3: CAD Vettura dopo Surface Wrapper

Sebbene il risultato ottenuto apparisse soddisfacente dal punto di vista geometrico, le successive prove di generazione della mesh hanno evidenziato la presenza di criticità localizzate che compromettevano la qualità della mesh. Tali difetti avrebbero potuto influenzare negativamente la stabilità numerica della simulazione, rallentandone la convergenza o, nei casi peggiori, impedendone il completamento. Per questo motivo si è deciso di non utilizzare la geometria ottenuta esclusivamente mediante il Surface Wrapper e di procedere con un intervento di riparazione manuale attraverso lo strumento **Surface Repair**, correggendo progressivamente le superfici nelle zone maggiormente critiche.

4.3.2 Surface Repair

Lo strumento Surface Repair consente di intervenire manualmente sulla geometria per correggere le anomalie che potrebbero compromettere la generazione della mesh o la stabilità della simulazione numerica. La prima fase consiste nell'analisi automatica della superficie, che permette di individuare le principali tipologie di errori geometrici. Le anomalie più comuni sono le seguenti:

- **Pierced Faces (Facce Perforate):** rappresentano le auto-intersezioni della geometria, ovvero sono superfici che si intersecano o si sovrappongono in modo errato. Generalmente sono dovute a errori nella modellazione CAD oppure alla presenza di superfici complanari non opportunamente unite o convertite in contatti.
- **Free-Edges (Bordi Liberi):** sono bordi appartenenti a una sola faccia e non condivisi con superfici adiacenti. La loro presenza indica che la geometria non è completamente chiusa (watertight).

- **Non-manifold Edges and Vertices (Bordi e Vertici non-manifold):** identificano configurazioni topologiche non valide, nelle quali un bordo o un vertice è condiviso da un numero di superfici incompatibile con la generazione di una mesh conforme.
- **Face Quality (Qualità della Faccia):** evidenzia superfici con elementi geometrici fortemente distorti o con proporzioni sfavorevoli, che possono influenzare negativamente la qualità della mesh.
- **Face Proximity (Prossimità delle Facce):** individua superfici molto ravvicinate tra loro, che potrebbero generare elementi di mesh eccessivamente piccoli o di scarsa qualità.

Le prime tre tipologie rappresentano errori critici e devono essere completamente eliminate prima della fase di meshatura, poiché potrebbero impedire la generazione della mesh o compromettere la stabilità della simulazione CFD. Le ultime due, invece, sono generalmente considerate meno critiche, in quanto possono essere corrette automaticamente durante la generazione della mesh mediante il Surface Remesher, purché rientrino nei limiti di tolleranza impostati. Completata la fase di riparazione della geometria e verificata l'assenza di errori critici, il modello risulta pronto per la successiva generazione della mesh computazionale.

4.4 Bounding Box

Prima di procedere alla generazione della mesh è stato definito il dominio computazionale, rappresentato da una Bounding Box, ovvero il volume di fluido all'interno del quale è collocata la vettura e nel quale vengono risolte le equazioni della dinamica dei fluidi. Le dimensioni del dominio sono state scelte in modo da limitare l'influenza delle condizioni al contorno sul campo di moto circostante il veicolo, garantendo una rappresentazione quanto più realistica possibile del flusso esterno.

Simcenter STAR-CCM+

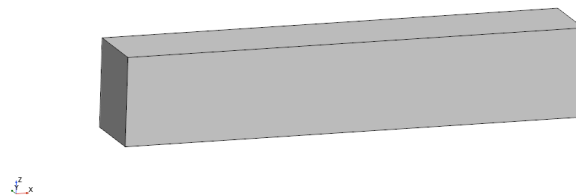


Figura 4.4: Bounding Box

Il dominio è costituito dalle seguenti superfici di contorno (boundaries):

- **Frontale** → Piano di Simmetria;
- **Posteriore** → Piano di Simmetria;
- **Inferiore** → Parete (Wall), rappresentativa del piano stradale;
- **Superiore** → Parete (Wall);
- **Ingresso** → Ingresso a velocità assegnata (Velocity Inlet);
- **Uscita** → Uscita a pressione assegnata (Pressure Outlet).

L'assegnazione di tali condizioni al contorno consente di riprodurre le condizioni tipiche di un'analisi di aerodinamica esterna, simulando il moto relativo tra la vettura e l'aria circostante e permettendo la corretta valutazione delle grandezze aerodinamiche di interesse.

4.5 Mesh

Una volta completata la preparazione della geometria e definito il dominio computazionale, si è proceduto alla generazione della mesh dell'intero modello. Dopo una fase preliminare di calibrazione dei parametri di discretizzazione, sono state individuate le impostazioni riportate nella Figura 4.5, che hanno consentito di ottenere una mesh sufficientemente raffinata da rappresentare le principali caratteristiche geometriche del veicolo.

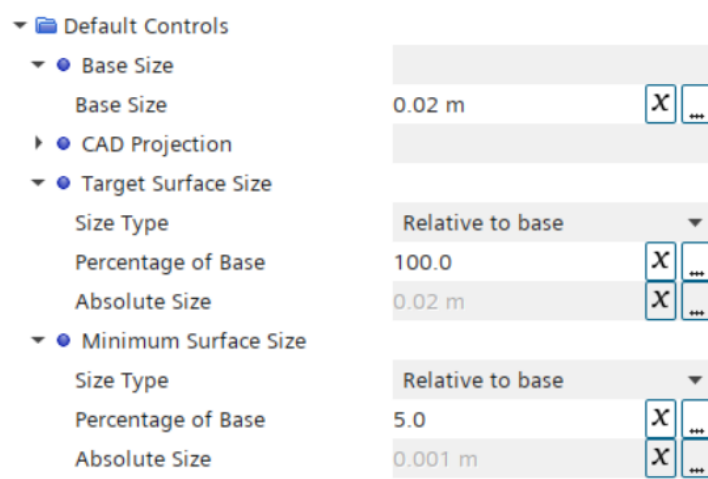


Figura 4.5: Parametri Mesh

Particolare attenzione è stata dedicata all'introduzione di raffinamenti locali (Mesh Refinement) nelle zone caratterizzate da elevati gradienti di velocità o da geometrie particolarmente complesse, così da migliorare l'accuratezza della soluzione numerica senza incrementare eccessivamente il numero complessivo di celle. I parametri di raffinamento sono riportati nella Figura 4.6.

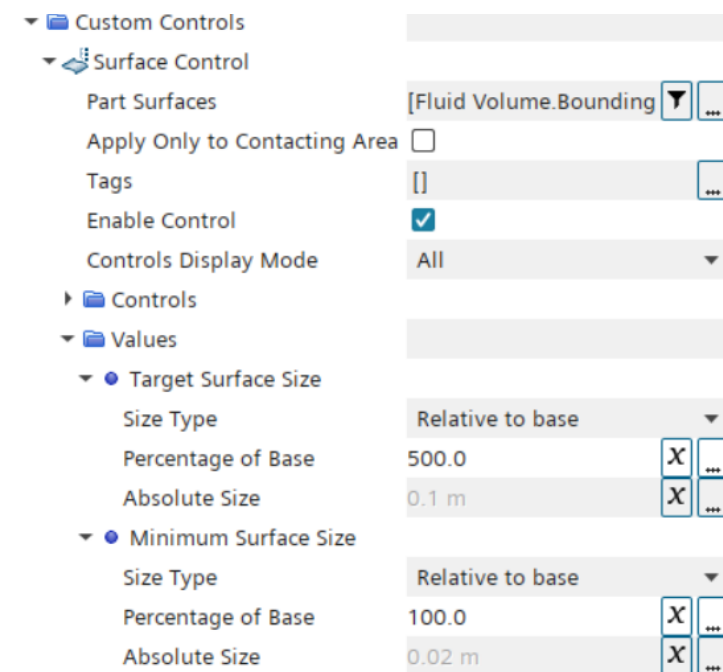


Figura 4.6: Parametri Mesh refinement

Durante la fase di meshatura è stato inoltre attivato il Prism Layer Mesher, che genera una serie di strati prismatici adiacenti alle superfici solide. Questi elementi consentono di descrivere correttamente lo strato limite, ossia la regione di fluido immediatamente adiacente alle pareti, nella quale la velocità varia dal valore nullo imposto dalla condizione di no-slip fino alla velocità del flusso indisturbato. Una rappresentazione accurata dello strato limite risulta fondamentale per il calcolo dei gradienti di velocità a parete, degli sforzi tangenziali e delle grandezze aerodinamiche, quali la resistenza viscosa e la distribuzione delle pressioni, migliorando complessivamente l'affidabilità dei risultati numerici. I principali parametri adottati per il Prism Layer sono riportati nella Figura 4.7.



Figura 4.7: Parametri Prism Layer

4.5.1 Mesh Definitiva

Le prime mesh generate hanno evidenziato alcuni problemi di qualità degli elementi, in particolare valori elevati di warpage, indice della distorsione geometrica delle celle. Tali criticità sono state progressivamente eliminate mediante l'introduzione di raffinamenti locali (Mesh Refinement) nelle zone maggiormente critiche, utilizzando i parametri descritti nella sezione precedente. Il risultato finale è una mesh di elevata qualità, in grado di rappresentare accuratamente la geometria della vettura e di garantire una buona stabilità numerica durante le simulazioni CFD.

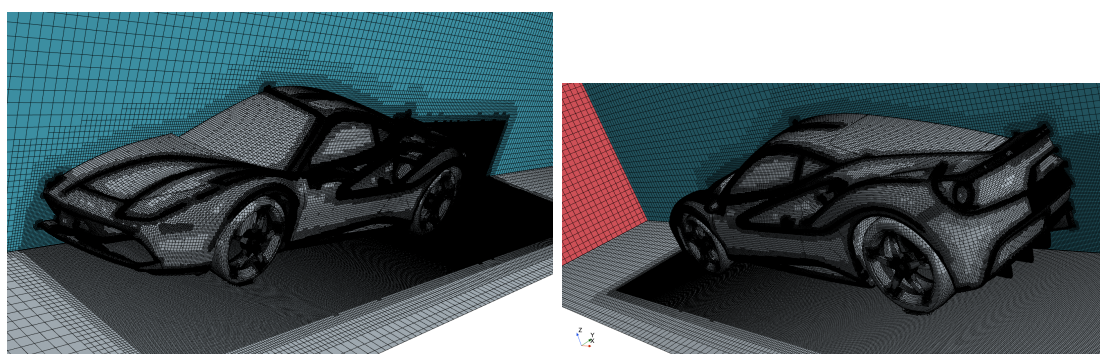


Figura 4.8: Mesh Vettura Anteriore e Posteriore

La Figura 4.9 mostra invece la mesh nella regione del fondo vettura, dove è stato applicato un raffinamento locale in corrispondenza delle bandelle, elemento oggetto del presente studio. Tale scelta consente di descrivere con maggiore accuratezza il campo di moto nelle zone in cui si prevedono elevati gradienti di pressione e velocità.

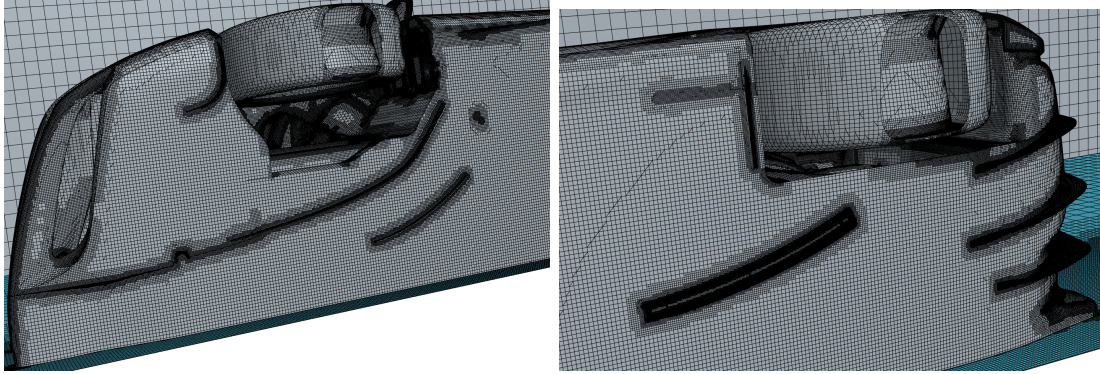


Figura 4.9: Mesh Vettura Fondo Vettura

Infine, è stato creato un blocco posteriormente alla vettura con successivo refinement volumetrico, necessario per catturare i dettagli della scia ed effettuare un'analisi del flusso separato, migliorando l'accuratezza della previsione delle grandezze aerodinamiche.

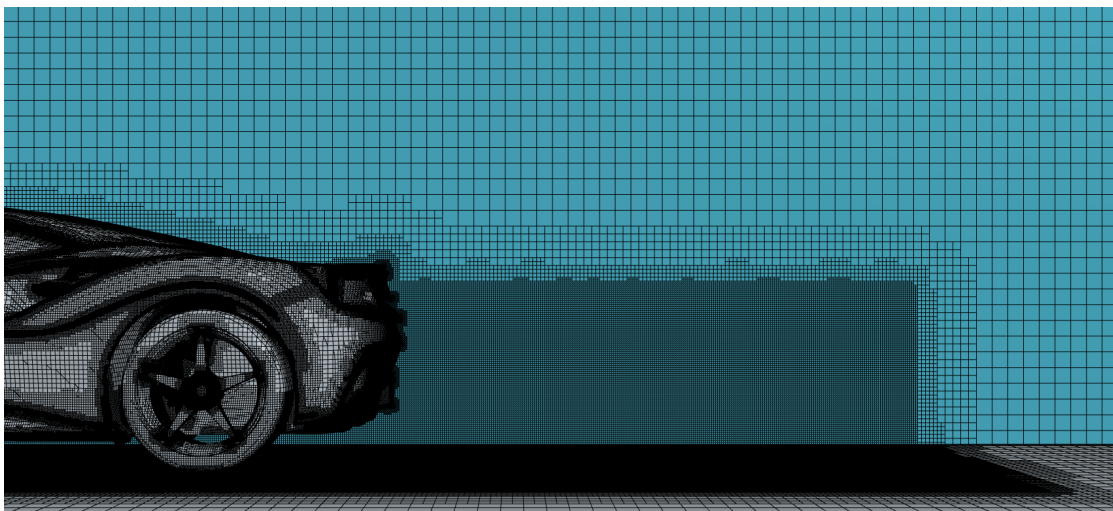


Figura 4.10: Mesh Scia Vettura

4.6 Modelli e Probe Point

Prima di eseguire le simulazioni CFD è necessario definire sia i modelli fisici che descrivono il comportamento del flusso, sia gli strumenti utilizzati per monitorare il calcolo.

- **Modelli:** rappresentano l'insieme dei modelli fisici e numerici impiegati dal solver per descrivere il comportamento del fluido. Essi consentono di risolvere, in ogni cella della mesh, le equazioni che governano il moto del fluido, la turbolenza e gli altri fenomeni fisici considerati nella simulazione.
- **Probe Point:** sono punti di monitoraggio definiti all'interno del dominio computazionale nei quali vengono registrate, durante l'esecuzione della simulazione, grandezze fisiche quali velocità, pressione, energia turbolenta e altre variabili di interesse. L'analisi dell'andamento temporale di tali grandezze consente di verificare la stabilità della soluzione e di valutare il raggiungimento della convergenza numerica.

Nel prossimo paragrafo verranno analizzati i modelli fisici adottati.

4.6.1 Modelli

I modelli fisici e numerici impiegati nella simulazione sono riportati nella Figura 4.11.

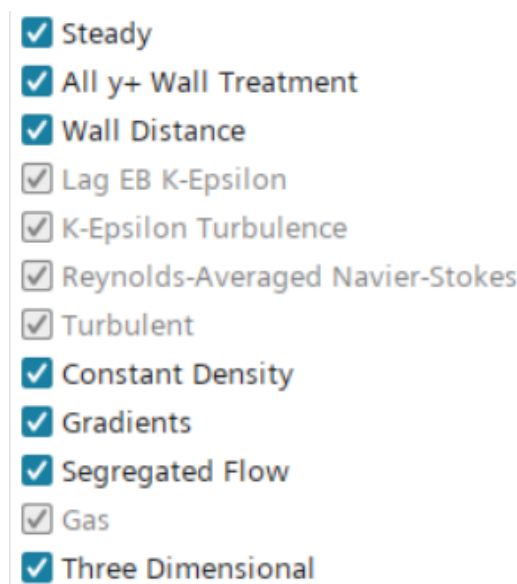


Figura 4.11: Modelli Simulazione

Tra i modelli selezionati, i più significativi sono i seguenti:

- **Lag Elliptic Blending K-Epsilon:** è un modello di turbolenza RANS avanzato che estende il modello K-Epsilon tradizionale introducendo un'equazione ellittica per la corretta rappresentazione degli effetti della parete e un'ulteriore equazione di trasporto per descrivere il ritardo (*lag*) tra il campo degli sforzi turbolenti e quello delle deformazioni del flusso. Tale formulazione migliora la previsione dei fenomeni di separazione e dei flussi caratterizzati da forti gradienti di pressione.
- **All y^+ wall treatment:** rappresenta un trattamento di parete ibrido che combina automaticamente gli approcci Low- y^+ e High- y^+ , adattandosi alla risoluzione della mesh nelle regioni prossime alle pareti. Ciò consente di ottenere risultati affidabili anche in presenza di valori di y^+ non uniformi all'interno del dominio.
- **Wall Distance:** calcola la distanza minima di ciascuna cella dalla parete più vicina. Tale informazione è utilizzata dai modelli di turbolenza e dai trattamenti di parete per valutare correttamente gli effetti viscosi nello strato limite.
- **Segregated Flow:** è un algoritmo di soluzione nel quale le equazioni di conservazione vengono risolte separatamente. In particolare, ciascuna variabile del problema (pressione, componenti della velocità e altre grandezze trasportate) viene calcolata iterativamente su tutte le celle della mesh prima di passare alla successiva. Questo approccio garantisce una buona efficienza computazionale ed è particolarmente indicato per simulazioni di flussi incomprimibili o debolmente comprimibili a bassi numeri di Mach.

Gli altri modelli riportati nella Figura 4.11 riguardano la definizione delle proprietà del fluido, il tipo di analisi numerica e le opzioni necessarie al corretto funzionamento del solver, concorrendo complessivamente alla configurazione della simulazione CFD.

4.6.2 Modelli Alternativi di Turbolenza

Oltre alla configurazione illustrata nella sezione precedente, sono state eseguite ulteriori simulazioni utilizzando due differenti modelli di turbolenza, entrambi associati a una mesh maggiormente raffinata. Lo scopo è stato quello di valutare l'influenza del modello di turbolenza e della risoluzione della mesh sull'accuratezza dei risultati ottenuti. I modelli considerati sono i seguenti:

- **Lag Elliptic Blending K-Epsilon Low y^+** : si tratta dello stesso modello di turbolenza adottato nella configurazione di riferimento, ma impiegato con una mesh più fine e con una migliore risoluzione dello strato limite. Tale configurazione permette di valutare la sensibilità della soluzione rispetto al livello di discretizzazione e di confrontarne l'accuratezza con quella ottenuta mediante la mesh iniziale.
- **K-Omega SST**: è un modello di turbolenza a due equazioni che combina il comportamento K-Omega vicino alla parete con un modello K-Epsilon trasformato nel resto del dominio. Richiede anche esso una mesh più fine e presenta il termine di diffusione incrociata, responsabile del comportamento K-Omega vicino alla parete e K-Epsilon nel bulk del flusso. Questo termine è proporzionale ai gradienti sia della SDR (Specific Dissipation Rate) che della TKE (Turbulent Kinetic Energy), rendendolo sensibile alla qualità della mesh. Modello molto adatto a simulare flussi con componenti di vorticità e rispetto al K-Omega standard è meno sensibile alle condizioni di turbolenza del flusso libero.

Per entrambe le configurazioni è stata utilizzata una mesh più fine rispetto a quella di riferimento, incrementando il numero degli strati prismatici del Prism Layer fino a 10, mantenendo invariati lo spessore totale e del primo strato. Tale scelta ha consentito di migliorare la risoluzione dello strato limite senza modificare significativamente la distribuzione della mesh nel resto del dominio.

4.7 Simulazioni

Prima di presentare i risultati delle simulazioni CFD, è opportuno descrivere le diverse configurazioni geometriche analizzate. Lo studio è stato condotto valutando l'influenza della geometria delle bandelle laterali sul comportamento aerodinamico della vettura, attraverso le seguenti configurazioni:

- **Configurazione con Bandelle Curve (Configurazione di riferimento)**: rappresenta la geometria originale della vettura ed è stata assunta come caso base per il confronto con le altre configurazioni.
- **Configurazione con Bandelle Dritte**: ottenuta rimuovendo completamente le bandelle. Tale scelta è stata adottata poiché, in una configurazione completamente rettilinea, il loro contributo aerodinamico risulterebbe trascurabile e assimilabile all'assenza delle stesse.
- **Configurazione con variazione curvatura bandella anteriore 2 (1° Caso)**

- **Configurazione con variazione curvatura bandella anteriore 3 (2° Caso):** a partire dalla configurazione precedente è stata modificata anche la curvatura della bandella anteriore 3.
- **Configurazione con variazione curvatura bandelle anteriori 2 e 3 (3° Caso):** in questa configurazione entrambe le bandelle sono state ulteriormente raddrizzate rispetto al secondo caso, mantenendo la continuità geometrica con la parte fissa del fondo vettura.

Le tre configurazioni modificate sono riportate nella Figura 4.12.

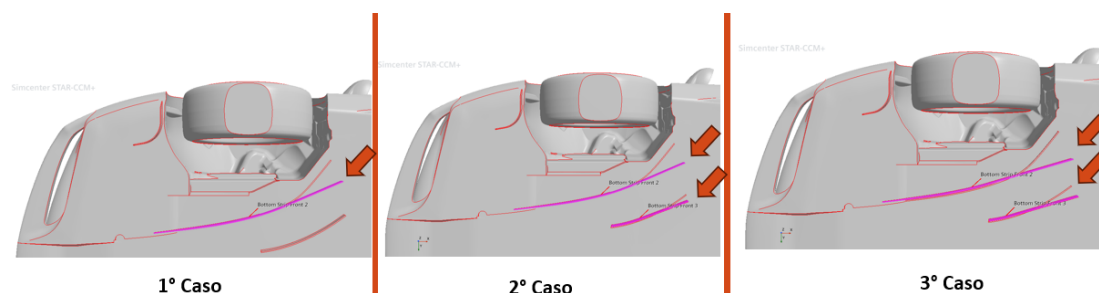


Figura 4.12: Casi Simulazioni

In tutti i casi è stata modificata la curvatura delle bandelle, garantendo in ogni caso la continuità geometrica e la tangenza con la sua parte fissa, così da evitare discontinuità che avrebbero potuto alterare il comportamento del flusso. La bandella posteriore, invece, non è stata oggetto di modifiche, poiché la sua geometria risulta già pressoché rettilinea e sostanzialmente parallela al piano stradale. Di conseguenza, una sua variazione avrebbe presumibilmente prodotto effetti aerodinamici trascurabili rispetto alle configurazioni considerate.

4.8 Calcolo Momento Generato dal Fluido sulla Bandella

Per determinare il momento aerodinamico esercitato dal fluido su ciascuna bandella è stato innanzitutto necessario individuare il punto di applicazione della risultante delle forze aerodinamiche agenti sulla superficie.

A tale scopo è stato utilizzato il report integrato di Simcenter STAR-CCM+ denominato Center of Loads, mostrato nella Figura 4.13.

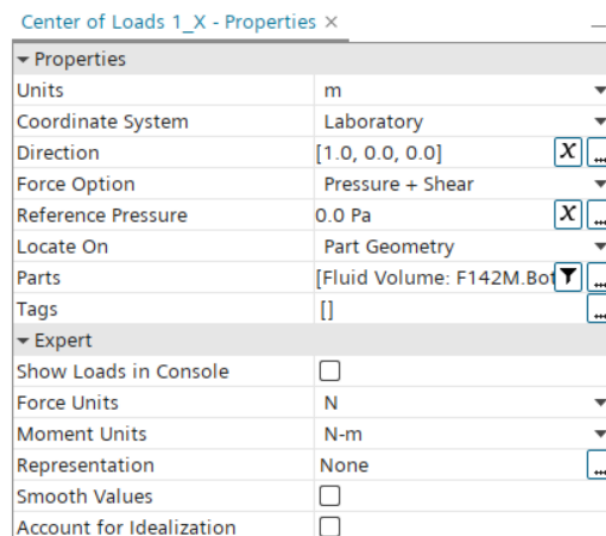


Figura 4.13: Report Center of Loads

Questo report consente di determinare le coordinate del centro dei carichi, ossia il punto equivalente in cui può essere applicata la risultante delle forze di pressione e viscose agenti sulla superficie della bandella. Il calcolo può essere eseguito separatamente per ciascuna coordinata spaziale (x , y e z), ottenendo così la posizione completa del punto di applicazione della forza risultante. Una volta individuato il centro del carico, è stato utilizzato il report Moment di STAR-CCM+, illustrato nella Figura 4.14, per calcolare il momento aerodinamico generato dal fluido rispetto al punto di rotazione della bandella.

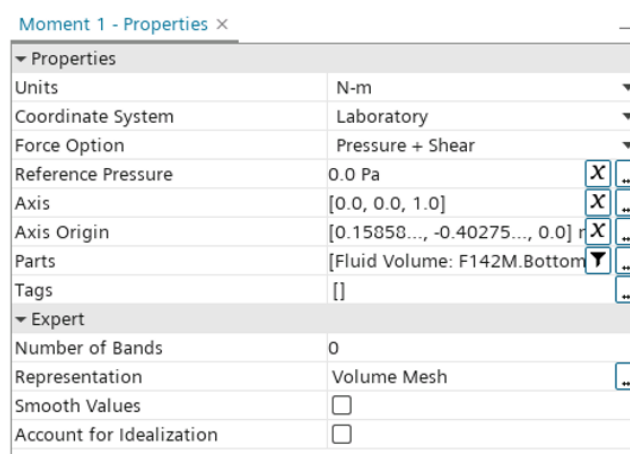


Figura 4.14: Report Momento

4.9 Risultati

L'obiettivo principale delle simulazioni CFD è valutare l'influenza della geometria delle bandelle sulle prestazioni aerodinamiche della vettura, con particolare riferimento alla riduzione della resistenza all'avanzamento. A tal fine sono stati analizzati sia i coefficienti aerodinamici globali, ossia il coefficiente di resistenza (C_x) e il coefficiente di portanza/deportanza (C_z), sia le forze aerodinamiche agenti sulle singole bandelle. Queste ultime costituiscono un'informazione fondamentale per il successivo dimensionamento del sistema di attuazione, in quanto consentono di determinare i carichi che il meccanismo dovrà vincere durante il movimento delle superfici mobili.

4.9.1 Coefficienti aerodinamici

I risultati ottenuti dalle simulazioni, espressi in termini di coefficiente di resistenza (C_x) e coefficiente di portanza/deportanza (C_z), sono riportati nella Figura 4.15.

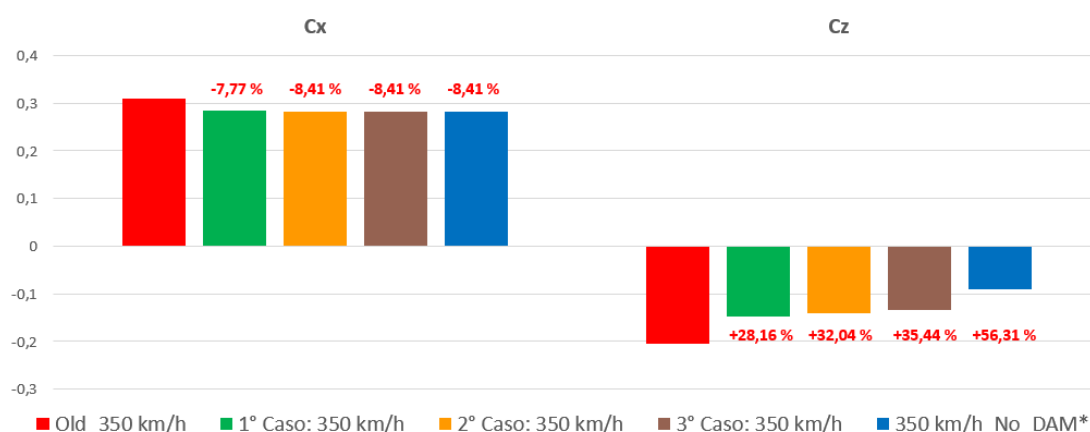


Figura 4.15: Risultati Coefficienti Simulazioni

*La configurazione *No_DAM* (assenza delle bandelle) può essere assimilata al caso limite in cui le bandelle risultano completamente allineate al flusso d'aria.

Dall'analisi del grafico si osserva che la modifica della curvatura delle bandelle determina una progressiva riduzione sia del coefficiente di resistenza (C_x) sia del coefficiente di portanza/deportanza (C_z), avvicinando le prestazioni aerodinamiche a quelle della configurazione limite *No_DAM*. In particolare, già il primo caso, ottenuto modificando esclusivamente la curvatura della bandella anteriore 2, mostra un miglioramento significativo rispetto alla configurazione di riferimento. Le

successive modifiche delle bandelle anteriori consentono un ulteriore affinamento delle prestazioni, sebbene con incrementi progressivamente più contenuti. Questo risultato evidenzia come anche variazioni geometriche localizzate siano in grado di influenzare sensibilmente il comportamento aerodinamico del fondo vettura, rappresentando un'interessante soluzione per ridurre la resistenza all'avanzamento senza alterare in modo sostanziale la geometria complessiva del veicolo.

4.9.2 Forze Bandelle Fondo

Oltre ai coefficienti aerodinamici globali, un ulteriore risultato di interesse è rappresentato dalle forze aerodinamiche agenti sulle singole bandelle del fondo vettura. Tali forze costituiscono il dato di ingresso per il dimensionamento del sistema di attuazione, poiché determinano il carico che il meccanismo dovrà vincere durante il movimento delle superfici mobili. La Figura 4.16 mostra la distribuzione delle forze aerodinamiche agenti sulle bandelle.

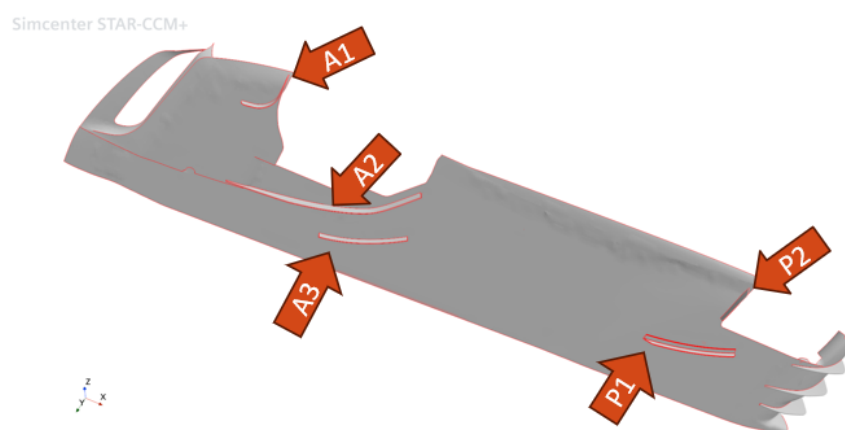


Figura 4.16: Forze su Bandelle

Nella tabella seguente, vengono riportati i valori ottenuti dalle simulazioni.

Bandella	Old	1° Caso	2° Caso	3° Caso	No DAM
Anteriore 1	20,75 N	20,98 N	21,04 N	21,07 N	21,54 N
Anteriore 2	101,65 N	32,18 N	32,32 N	18,42 N	/
Anteriore 3	29,45 N	28,44 N	14,32 N	9,68 N	/
Posteriore 1	10,05 N	10,45 N	10,33 N	10,29 N	/
Posteriore 2	20,83 N	26,48 N	27,96 N	24,17 N	19,45 N

Dall'analisi dei risultati emerge come la modifica della curvatura delle bandelle influenzi in maniera significativa le forze aerodinamiche agenti sulle superfici direttamente interessate. In particolare, la bandella anteriore 2 e la 3 mostrano una variazione più marcata, mentre le restanti mostrano una variazione più contenuta. Dal punto di vista progettuale, tale risultato risulta particolarmente rilevante, poichè ci permette di valutare la coppia richiesta al sistema di attuazione.

4.9.3 Analisi Campo di Moto

A completamento dell'analisi quantitativa dei coefficienti aerodinamici e delle forze agenti sulle bandelle, è stata eseguita un'analisi qualitativa del campo di moto, al fine di comprendere come le diverse configurazioni influenzino il comportamento del flusso attorno alla vettura. In particolare, vengono confrontate tre configurazioni:

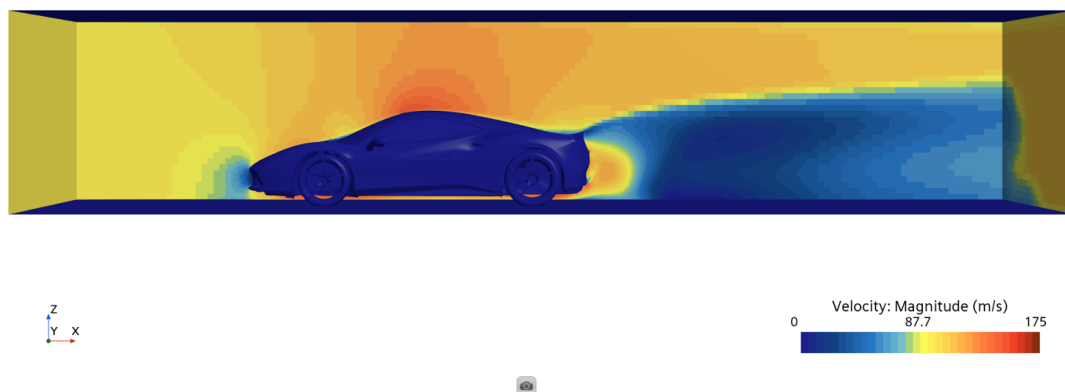


Figura 4.17: Campo di Moto con Bandelle

Nel caso della configurazione di riferimento (Figura 4.17) si osserva una scia estesa, caratterizzata da un'elevata turbolenza e da una marcata separazione del flusso nella regione posteriore della vettura. Sotto il fondo, invece, il flusso subisce una significativa accelerazione, con conseguente diminuzione della pressione e incremento della deportanza aerodinamica.

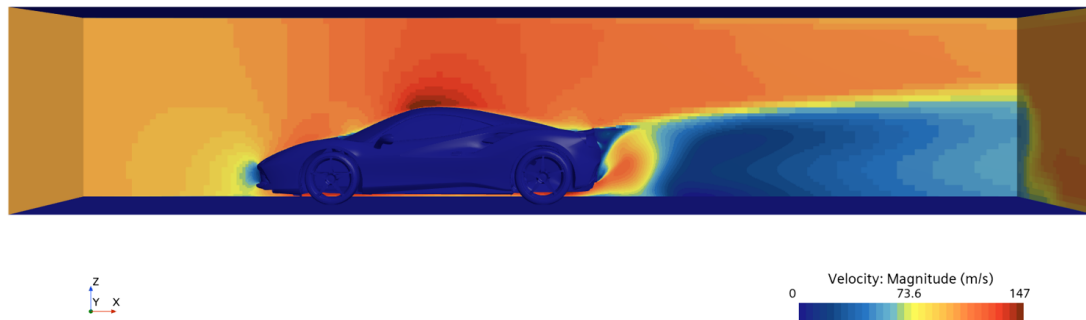


Figura 4.18: Campo di Moto con Variazione Curvatura Bandella Anteriore 2

Modificando la curvatura della sola bandella anteriore 2 (Figura 4.18), la scia risulta più compatta e il distacco del flusso appare maggiormente controllato. Si osserva inoltre un migliore recupero di pressione nella regione di valle, fenomeno che giustifica la riduzione del coefficiente di resistenza (C_x) ottenuto nelle simulazioni. Anche il flusso sotto il fondo vettura risulta più uniforme rispetto alla configurazione di riferimento, con una distribuzione della velocità meno accentuata che comporta una lieve riduzione della deportanza.

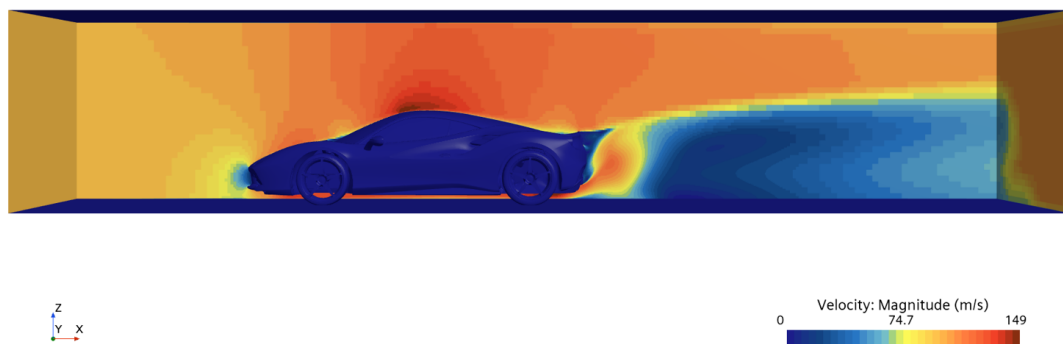


Figura 4.19: Campo di Moto senza Bandelle

Infine, nella configurazione priva di bandelle (Figura 4.19), la scia presenta un'estensione ancora più contenuta rispetto al caso di riferimento e un recupero di pressione più efficace nella regione posteriore della vettura. Tali caratteristiche determinano una riduzione della resistenza aerodinamica, in accordo con i valori

del coefficiente di resistenza ottenuti dalle simulazioni. Parallelamente, il flusso al di sotto del fondo vettura risulta meno accelerato, con valori di pressione mediamente più elevati. Questo determina una diminuzione della deportanza rispetto alla configurazione con bandelle curve, confermando il compromesso esistente tra riduzione della resistenza all'avanzamento e generazione del carico aerodinamico. Nel complesso, l'analisi del campo di moto conferma quanto evidenziato dai risultati quantitativi: la progressiva riduzione della curvatura delle bandelle favorisce un flusso maggiormente regolare, limita la separazione della corrente e migliora il recupero di pressione nella scia, determinando una diminuzione della resistenza aerodinamica. Al tempo stesso, tale modifica comporta una riduzione della deportanza, evidenziando il compromesso progettuale tra efficienza aerodinamica e capacità di generare carico verticale.

4.9.4 Simulazioni con velocità Terreno e Ruote

Al fine di rendere l'analisi CFD maggiormente rappresentativa delle reali condizioni di marcia della vettura, sono state eseguite ulteriori simulazioni introducendo il movimento del terreno e la rotazione delle ruote. In particolare, alla parete inferiore del dominio computazionale, rappresentativa del piano stradale, è stata assegnata una velocità pari a quella del flusso incidente, così da simulare la condizione di moving ground, comunemente adottata nelle simulazioni di aerodinamica di vetture. Le impostazioni utilizzate per il terreno sono riportate nella Figura 4.20.

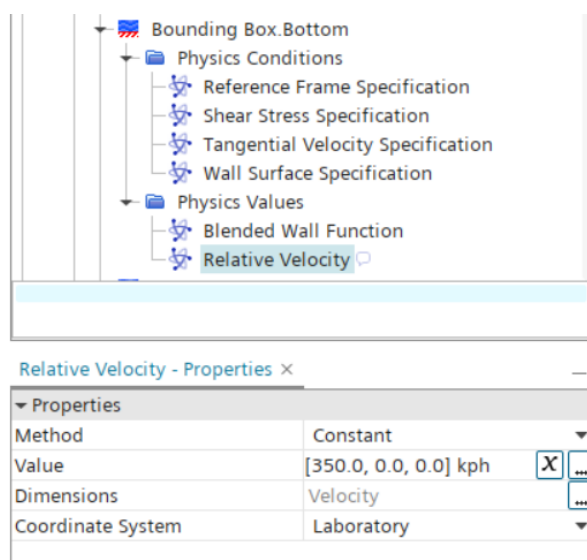


Figura 4.20: Velocità Terreno

Analogamente, agli pneumatici è stata assegnata una velocità di rotazione coerente con la velocità di avanzamento della vettura, come mostrato nella Figura 4.21.

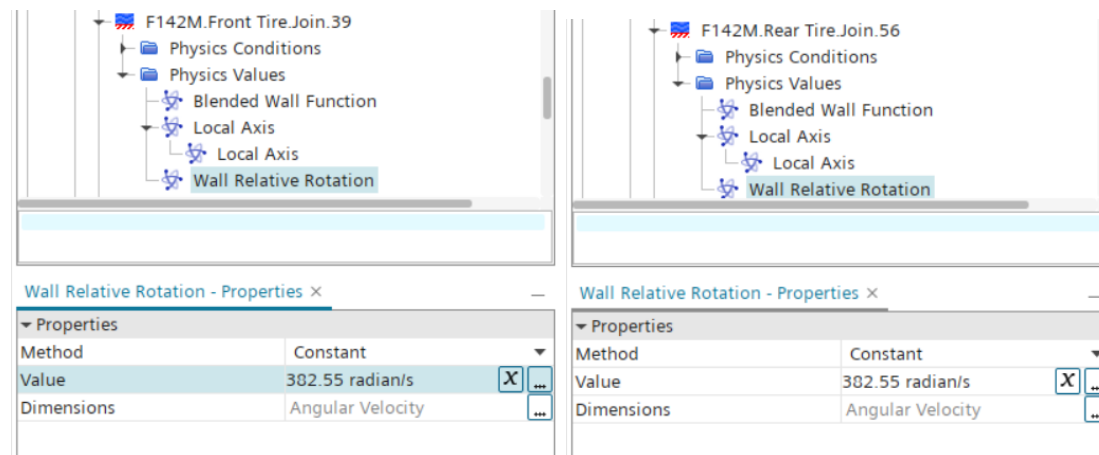


Figura 4.21: Velocità Ruote Vettura

Anche per questa configurazione sono stati valutati il coefficiente di resistenza (C_x), il coefficiente di portanza/deportanza (C_z) e le forze aerodinamiche agenti sulle bandelle, confrontando i risultati con quelli ottenuti nelle simulazioni precedenti, eseguite con terreno fisso e ruote non rotanti. Dal confronto è emerso che, pur variando leggermente i valori assoluti delle grandezze aerodinamiche, il comportamento relativo delle diverse configurazioni rimane sostanzialmente invariato. In particolare, le variazioni percentuali tra i vari casi analizzati risultano coerenti con quelle ottenute nelle simulazioni precedenti. Tale risultato conferma la robustezza del modello numerico adottato e dimostra che le conclusioni tratte in merito all'influenza della curvatura delle bandelle non dipendono dalle ipotesi semplificative inizialmente utilizzate, ma risultano valide anche in condizioni di simulazione più realistiche, caratterizzate dalla presenza del terreno mobile e della rotazione delle ruote.

4.9.5 Conclusione

Dalle simulazioni CFD effettuate, tutte condotte alla velocità di 350 km/h, è stato possibile confrontare le diverse configurazioni geometriche delle bandelle del fondo vettura e valutarne l'influenza sulle prestazioni aerodinamiche. Si specifica inoltre che, le simulazioni effettuate utilizzando i modelli di turbolenza che richiedono una mesh più fine in corrispondenza della parete, ci hanno fornito soluzioni

molto vicine a quelle ottenute con una mesh più lasca, permettendo così di procedere con quest'ultima, la quale richiede quindi un minor costo computazionale. L'analisi dei risultati ha evidenziato che la modifica della sola bandella anteriore 2, che rappresenta anche l'elemento di maggiore estensione, consente di ottenere la riduzione più significativa del coefficiente di resistenza aerodinamica (C_x), con una conseguente diminuzione della resistenza all'avanzamento della vettura. Tale configurazione permette inoltre di mantenere un coefficiente di deportanza (C_z) sufficientemente elevato, rappresentando quindi un buon compromesso tra riduzione del drag e mantenimento del carico aerodinamico. I risultati ottenuti mostrano inoltre che i valori di C_x e C_z si avvicinano sensibilmente a quelli della configurazione limite NO.DAM, nella quale le bandelle risultano completamente allineate al flusso, pur senza rinunciare completamente all'effetto aerodinamico generato dalle stesse. Dal punto di vista strutturale, la variazione di curvatura della bandella anteriore 2 comporta anche una sensibile diminuzione della forza aerodinamica agente su di essa. Le ulteriori simulazioni, ottenute modificando anche la curvatura delle altre bandelle anteriori, non hanno evidenziato miglioramenti tali da giustificare una maggiore complessità del sistema di movimentazione. Per questo motivo, la soluzione progettuale scelta consiste nell'attuazione della sola bandella anteriore 2, che rappresenta il miglior compromesso tra incremento delle prestazioni aerodinamiche, riduzione dei carichi meccanici e semplicità costruttiva del sistema.

Capitolo 5

Soluzioni Schematiche

A seguito dell'analisi fluidodinamica e della scelta della bandella anteriore 2 come elemento da rendere adattivo, si è passati alla fase di ideazione del sistema di attuazione. In questa fase sono state sviluppate diverse soluzioni schematiche, con l'obiettivo di individuare il meccanismo più adatto dal punto di vista funzionale, costruttivo e di integrazione all'interno del fondo vettura. Per semplificare il processo di progettazione, lo studio è stato suddiviso in due differenti approcci:

- **Soluzioni con Bandella Semplificata:** la bandella viene schematizzata mediante due tratti rettilinei collegati da una cerniera. Questa configurazione consente di studiare il principio di funzionamento del meccanismo di attuazione riducendo la complessità geometrica e i costi di realizzazione dei prototipi.
- **Soluzioni con Bandella Complessa:** la geometria reale viene divisa in due tratti curvilinei collegati da una cerniera, permettendo una valutazione più realistica del comportamento del sistema.

In entrambe le configurazioni la bandella è costituita da una porzione fissa, solidale al fondo vettura, e da una porzione mobile, la cui rotazione consente la variazione della curvatura del componente. L'approccio progettuale adottato prevede una fase iniziale di sviluppo e validazione del meccanismo sulla configurazione semplificata, caratterizzata da costi contenuti e da una maggiore facilità di realizzazione. Una volta verificata la funzionalità del sistema di attuazione, sarà possibile trasferire il medesimo principio alla configurazione con geometria reale, procedendo successivamente alla realizzazione del prototipo e alla sua validazione sperimentale, sia mediante prove su strada sia in galleria del vento. Durante la progettazione del sistema dovranno inoltre essere considerati numerosi aspetti costruttivi, tra cui la progettazione delle guide di scorrimento, la scelta dei materiali, il dimensionamento dei singoli componenti, l'integrazione dell'attuatore e la facilità di assemblaggio.

Nei paragrafi seguenti vengono presentate le diverse soluzioni schematiche sviluppate per il sistema di attuazione della bandella, evidenziandone il principio di funzionamento, i principali vantaggi e le relative criticità.

5.1 Soluzione Schematica 1

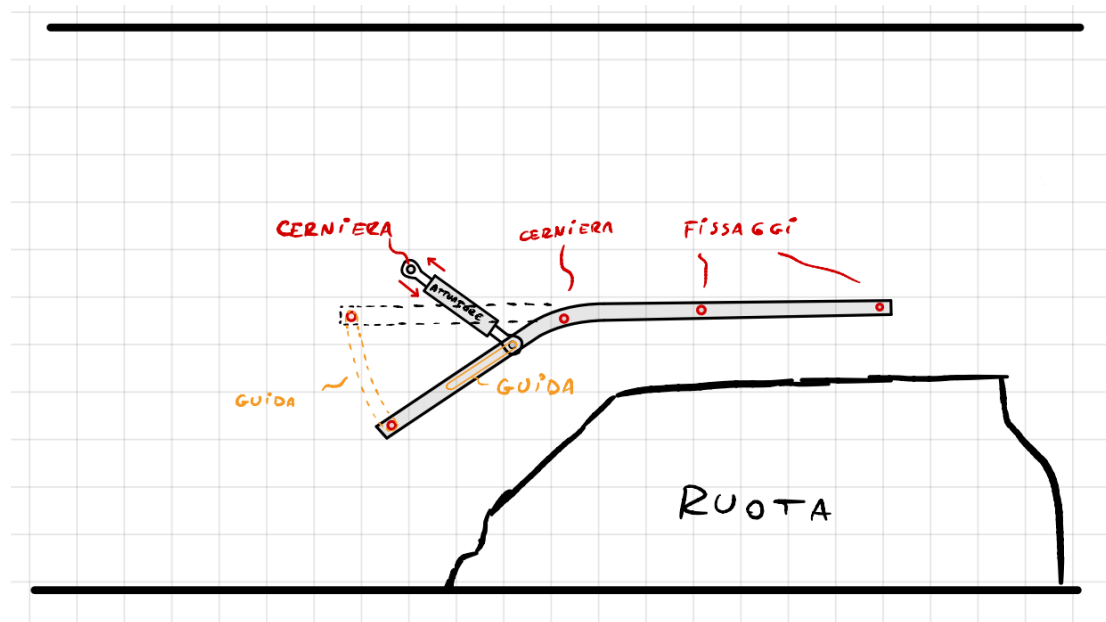


Figura 5.1: Soluzioni schematica 1

La prima soluzione proposta prevede che la bandella sia vincolata al fondo vettura mediante due punti di fissaggio, mentre l'estremità della parte mobile è collegata a una guida lineare. L'attuatore viene utilizzato come elemento di spinta e trazione e svolge contemporaneamente la funzione di braccio di comando del meccanismo. Durante l'attuazione, l'estremità dell'attuatore scorre all'interno della guida ricavata nella porzione mobile della bandella. Tale cinematismo consente di trasformare il moto lineare dell'attuatore nella rotazione della parte mobile attorno alla cerniera, modificando così la curvatura della bandella. La soluzione risulta particolarmente semplice dal punto di vista costruttivo e richiede un numero limitato di componenti meccanici, rendendo agevole sia la realizzazione del prototipo sia il suo assemblaggio. Tuttavia, la presenza dell'attuatore disposto lungo la direzione di movimento comporta un ingombro longitudinale significativo, che potrebbe rendere difficoltosa l'integrazione del sistema all'interno degli

spazi disponibili del fondo vettura. Di seguito sono riportati i principali vantaggi e svantaggi della soluzione proposta.

- **Vantaggi:**

- Meccanismo semplice e di facile progettazione;
- Numero ridotto di componenti;
- Costi di realizzazione contenuti;
- Facilità di assemblaggio e manutenzione.

- **Svantaggi:**

- Elevato ingombro dell'attuatore lungo il fondo vettura;
- Limitata flessibilità nell'integrazione con gli altri componenti del veicolo;
- Necessità di uno spazio sufficiente per la corsa dell'attuatore.

5.2 Soluzione Schematica 2

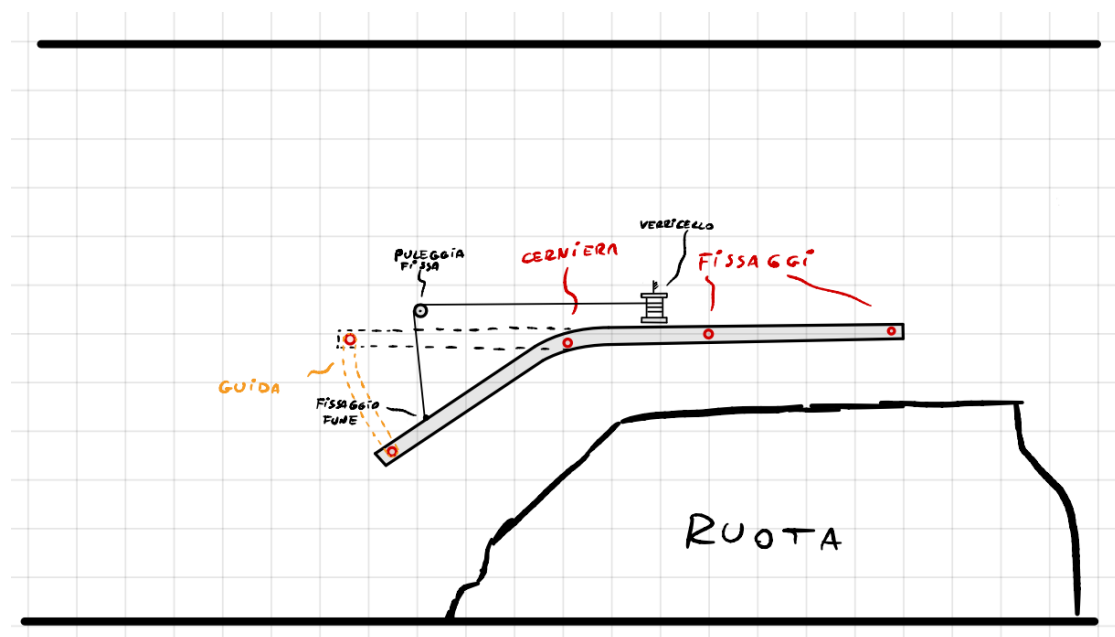


Figura 5.2: Soluzioni schematica 2

La seconda soluzione mantiene gli stessi punti di vincolamento della bandella adottati nella configurazione precedente, ma sostituisce l'attuatore lineare con un sistema di movimentazione costituito da un verricello, una fune e una puleggia fissa. Il principio di funzionamento prevede che il verricello avvolga o svolga la fune, generando il movimento della porzione mobile della bandella. La puleggia ha il compito di guidare la fune lungo la direzione desiderata, consentendo di trasmettere il moto al punto di attacco sulla parte mobile. Per il collegamento della fune alla bandella sono state considerate due possibili soluzioni: la prima consiste nel collegamento ad un perno che scorre all'interno della guida della parte mobile, mentre la seconda prevede un collegamento diretto della fune alla bandella mediante un apposito punto di fissaggio. Entrambe le configurazioni consentono la rotazione della parte mobile e la conseguente variazione della curvatura della bandella. Rispetto alla soluzione precedente, questo schema permette di separare l'attuatore dalla zona di movimentazione, offrendo una maggiore libertà nel posizionamento del sistema di comando. Tuttavia, l'insieme costituito da verricello, puleggia e fune introduce un maggiore ingombro e richiede particolare attenzione nella progettazione dei punti di fissaggio e nel corretto tensionamento della fune. Di seguito sono riportati i principali vantaggi e svantaggi della soluzione proposta.

- **Vantaggi:**

- Meccanismo semplice e robusto;
- Possibilità di posizionare l'attuatore lontano dalla bandella;
- Buona capacità di trasmissione del moto mediante fune.

- **Svantaggi:**

- Maggiore ingombro del sistema di movimentazione;
- Necessità di mantenere la corretta tensione della fune;
- Maggiore complessità di assemblaggio rispetto alla soluzione con attuatore diretto.

5.3 Soluzione Schematica 3

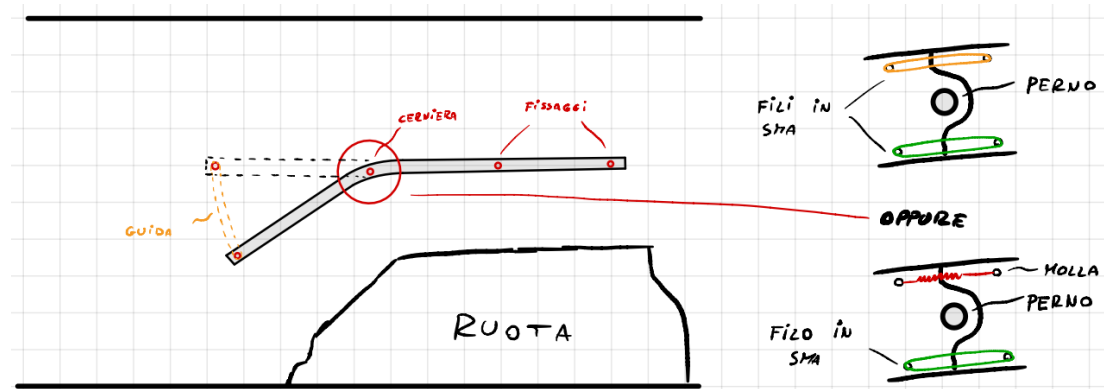


Figura 5.3: Soluzioni schematica 3

La terza soluzione prevede l'impiego di fili in Lega a Memoria di Forma (Shape Memory Alloy, SMA), in particolare in Nitinol (Ni-Ti), come sistema di attuazione della parte mobile della bandella. Il principio di funzionamento sfrutta la capacità delle leghe SMA di recuperare la forma memorizzata quando vengono riscaldate mediante effetto Joule, generando la forza necessaria alla movimentazione del meccanismo. Dal punto di vista progettuale, questa soluzione presenta il vantaggio di eliminare gran parte dei componenti meccanici tradizionali, consentendo di ottenere un sistema estremamente compatto e leggero, caratteristica particolarmente interessante in ambito automobilistico e aeronautico. Sono state inoltre considerate due possibili configurazioni di funzionamento:

- **Configurazione a doppio filo:** vengono impiegati due fili in SMA, disposti in modo da lavorare in opposizione. Attivando alternativamente uno dei due fili è possibile ruotare la parte mobile della bandella nelle due direzioni, consentendo il passaggio tra le diverse configurazioni di curvatura.
- **Configurazione filo e molla:** il movimento attivo è affidato a un singolo filo in SMA, mentre il ritorno alla configurazione iniziale è garantito da una molla meccanica, che sostituisce il secondo filo riducendo il numero di attuatori necessari.

Nonostante gli evidenti vantaggi in termini di compattezza e peso, questa soluzione presenta alcune criticità. Il costo del Nitinol risulta infatti superiore rispetto ai materiali tradizionali e la velocità di attuazione è limitata dal tempo necessario

al raffreddamento della lega, che dipende da diversi fattori, tra cui il diametro del filo, la temperatura ambiente, le condizioni di ventilazione e la corrente di alimentazione. Di seguito sono riportati i principali vantaggi e svantaggi della soluzione proposta.

- **Vantaggi:**

- Sistema estremamente compatto;
- Peso ridotto;
- Numero limitato di componenti meccanici;
- Facilità di integrazione all'interno del fondo vettura.

- **Svantaggi:**

- Costo elevato del materiale;
- Tempo di raffreddamento relativamente lungo;
- Necessità di un adeguato sistema di alimentazione e controllo;
- Prestazioni influenzate dalle condizioni termiche di funzionamento.

5.4 Soluzione Schematica 4

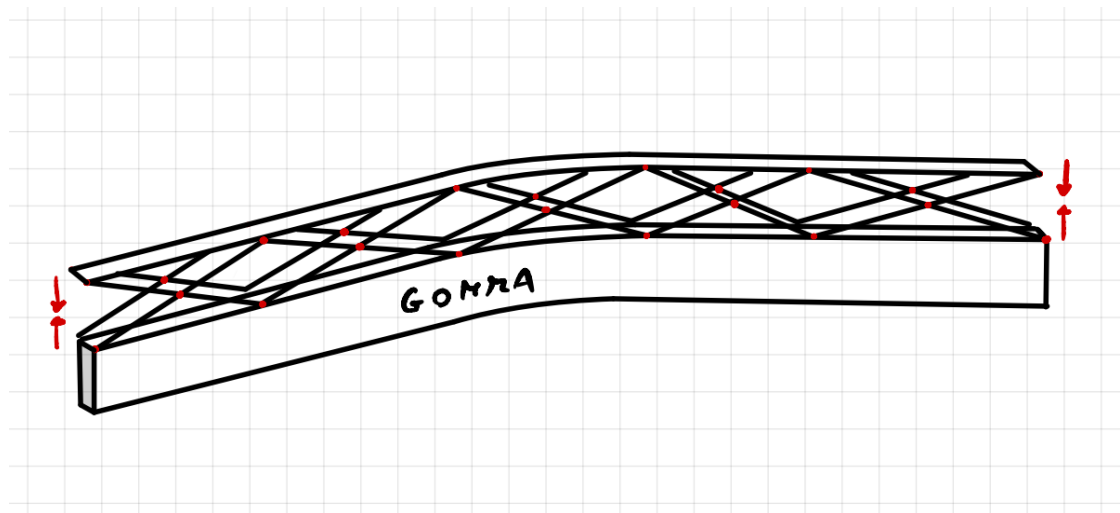


Figura 5.4: Soluzioni schematica 4

La quarta soluzione si differenzia sostanzialmente dalle precedenti, poiché non prevede la variazione della curvatura della bandella, bensì una modifica della sua posizione lungo la direzione verticale (Z). In questo caso, infatti, la bandella mantiene inalterata la propria geometria e viene traslata verso il basso, riducendo l'altezza da terra e modificando di conseguenza il comportamento aerodinamico del fondo vettura. Il sistema di movimentazione è basato su un meccanismo a leve incrociate, realizzato in acciaio, che garantisce uno spostamento pressoché verticale della bandella mantenendone l'orientamento durante il moto. Per l'attuazione del meccanismo sono state considerate due possibili configurazioni:

- l'impiego di due fili in Lega a Memoria di Forma (SMA), posizionati alle estremità del meccanismo e comandati alternativamente;
- l'utilizzo di un attuatore elettrico lineare collocato nella zona centrale del meccanismo e integrato all'interno della bandella.

Dal punto di vista fluidodinamico, questa soluzione ha mostrato prestazioni comparabili a quelle ottenute mediante la variazione della curvatura della bandella. Tuttavia, è stata successivamente scartata in quanto presenta una maggiore complessità costruttiva e di assemblaggio. Inoltre, la variazione dell'altezza della bandella modifica direttamente la distanza dal suolo, introducendo una maggiore sensibilità alle variazioni del flusso sotto il fondo vettura e rendendo più complesso il controllo del comportamento aerodinamico nelle diverse condizioni di funzionamento. Di seguito sono riportati i principali vantaggi e svantaggi della soluzione proposta.

- **Vantaggi:**

- Sistema di controllo semplice e rapido;
- Ridotto ingombro della bandella sul fondo vettura;
- Possibilità di mantenere invariata la geometria della bandella durante il movimento.

- **Svantaggi:**

- Maggiore complessità costruttiva del meccanismo;
- Maggiore sensibilità del flusso aerodinamico alle variazioni dell'altezza da terra;
- La bandella mantiene la curvatura originale e non consente una reale modifica del suo profilo aerodinamico.

5.5 Soluzione Schematica 5

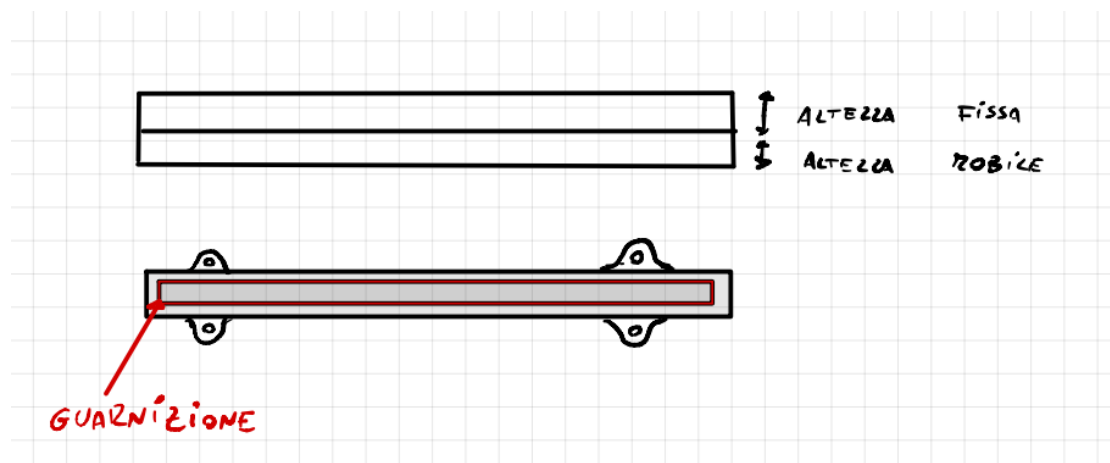


Figura 5.5: Soluzioni schematica 5

La quinta soluzione, analogamente alla precedente, non prevede una variazione della curvatura della bandella, ma una modifica della sua altezza rispetto al fondo vettura. In questo caso la bandella può essere realizzata come una struttura cava in lamiera, opportunamente dimensionata per resistere ai carichi aerodinamici mantenendo al contempo un peso contenuto. Il principio di funzionamento consiste nello spostamento verticale della bandella mediante un attuatore elettrico lineare integrato al suo interno. Tale configurazione permette di mantenere il sistema di movimentazione completamente alloggiato nella bandella, evitando l'introduzione di elementi sporgenti che potrebbero alterare il flusso d'aria al di sotto del fondo vettura. Per garantire la continuità aerodinamica tra il fondo e la bandella nelle diverse configurazioni, è previsto un bordo inferiore sul quale viene installata una guarnizione di tenuta. Quest'ultima consente di limitare la formazione di discontinuità geometriche sia nella posizione rialzata sia in quella abbassata, contribuendo a preservare l'efficienza aerodinamica del sistema. Anche questa soluzione consente di ottenere una riduzione del coefficiente di resistenza aerodinamica (C_x), grazie alla diminuzione dell'altezza della bandella rispetto al suolo. Tuttavia, la presenza di un attuatore completamente integrato all'interno del componente richiede una progettazione più complessa, sia dal punto di vista strutturale sia per quanto riguarda gli aspetti di assemblaggio e manutenzione. Di seguito sono riportati i principali vantaggi e svantaggi della soluzione proposta.

- **Vantaggi**

- Sistema di controllo semplice e rapido;
- Ridotto ingombro della bandella sul fondo vettura;
- Attuatore completamente integrato, con limitata influenza sul flusso aerodinamico.

- **Svantaggi:**

- La bandella mantiene la curvatura originale;
- Maggiore complessità costruttiva e di assemblaggio;
- Necessità di garantire la tenuta della guarnizione durante l'intera corsa del meccanismo.

5.6 Soluzione Schematica 6

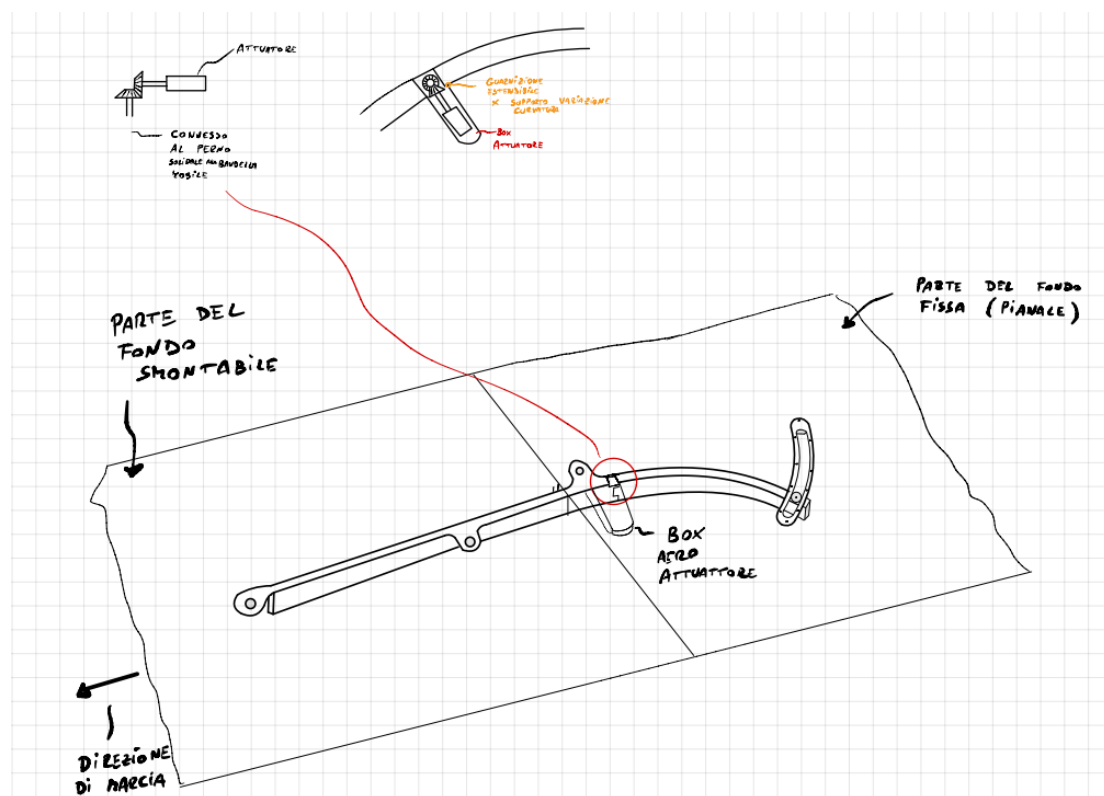


Figura 5.6: Soluzioni schematica 6

L'ultima soluzione proposta riguarda nuovamente la variazione della curvatura della bandella, ma mediante un sistema di trasmissione meccanica differente rispetto alle configurazioni precedenti. Il meccanismo è costituito da un albero di trasmissione collegato a una coppia conica posizionata in corrispondenza della cerniera che unisce la parte fissa e quella mobile della bandella. La rotazione trasmessa dall'albero viene quindi convertita dalla coppia conica nel movimento di rotazione della parte mobile, consentendo la variazione della curvatura del componente. Affinché il sistema possa funzionare correttamente, il perno della cerniera deve essere solidale alla parte mobile della bandella, in modo da trasmettere direttamente la coppia applicata ed evitare rotazioni a vuoto. L'albero di trasmissione può essere collegato direttamente ad un motore elettrico oppure, qualora sia necessario incrementare la coppia disponibile, mediante un riduttore meccanico. Per questa applicazione si è ipotizzato l'impiego di un motore elettrico compatto di derivazione aeronautica, analogo a quelli utilizzati negli attuatori aerodinamici presenti in Formula 1, caratterizzati da dimensioni ridotte e da un'elevata densità di potenza. Questa soluzione consente un controllo preciso e rapido della posizione della bandella, grazie ad una trasmissione diretta della coppia. Tuttavia, occorre considerare le inevitabili perdite meccaniche dovute agli attriti tra gli organi di trasmissione, che riducono il rendimento complessivo del sistema. Dal punto di vista progettuale, l'integrazione dell'albero, della coppia conica e del motore all'interno del fondo vettura risulta particolarmente complessa, sia per gli ingombri disponibili sia per la necessità di garantire affidabilità e resistenza alle elevate sollecitazioni aerodinamiche e vibrazionali. Per tali motivi questa soluzione non è stata successivamente approfondita, principalmente a causa della complessità costruttiva, degli ingombri e dei costi elevati del sistema di attuazione. Di seguito sono riportati i principali vantaggi e svantaggi della soluzione proposta.

- **Vantaggi:**

- Controllo rapido e preciso della curvatura della bandella;
- Elevata precisione di posizionamento;
- Possibilità di utilizzare motori elettrici compatti ad alta densità di potenza.

- **Svantaggi:**

- Elevato ingombro di albero, coppia conica e motore all'interno del fondo vettura;
- Maggiore complessità costruttiva e di assemblaggio;
- Perdite meccaniche dovute agli organi di trasmissione;
- Costo elevato del sistema.

Capitolo 6

Soluzione con fili in SMA (Nitinol)

Tra le diverse soluzioni schematiche analizzate, la prima ad essere approfondita è stata quella basata sull'impiego di due fili in Lega a Memoria di Forma (Shape Memory Alloy - SMA), nello specifico in Nitinol (Ni-Ti), scelto per le sue elevate capacità di attuazione, il ridotto ingombro e il peso contenuto. Il principio di funzionamento prevede l'utilizzo di due fili disposti in configurazione antagonista. L'attivazione elettrica di uno dei due fili provoca la trasformazione della lega dalla fase martensitica a quella austenitica, determinandone l'accorciamento e, di conseguenza, la rotazione della parte mobile della bandella. L'attivazione del secondo filo consente invece di ottenere il movimento opposto, permettendo di riportare la bandella nella configurazione iniziale oppure di aumentarne nuovamente la curvatura. Questa configurazione consente un controllo diretto della posizione della bandella senza la necessità di complessi organi di trasmissione meccanica, riducendo sensibilmente peso, ingombri e numero di componenti. Il principale limite di questa soluzione è tuttavia rappresentato dalla fase di raffreddamento dei fili. Infatti, il ritorno alla fase martensitica richiede tempi generalmente superiori rispetto a quelli di riscaldamento e dipende da numerosi fattori, quali il diametro del filo, la temperatura ambiente, le condizioni di ventilazione e la temperatura di esercizio.

6.1 Geometria CAD

Per valutare la fattibilità della soluzione proposta è stato realizzato un modello CAD semplificato mediante il software CATIA, rappresentativo della struttura interna della bandella e del relativo sistema di attuazione.



Figura 6.1: CAD Bandella con fili Nitinol

Come si può osservare dalla figura, la bandella è stata schematizzata mediante due tratti rettilinei, uno fisso e uno mobile, collegati tra loro tramite una cerniera che rappresenta il punto di rotazione del sistema. In corrispondenza della cerniera sono stati previsti quattro perni di collegamento, due per ciascun lato, destinati al fissaggio dei due fili in Nitinol che realizzano l'attuazione antagonista della parte mobile. Tale configurazione consente di ottenere la variazione della curvatura della bandella mediante l'attivazione alternata dei due fili.

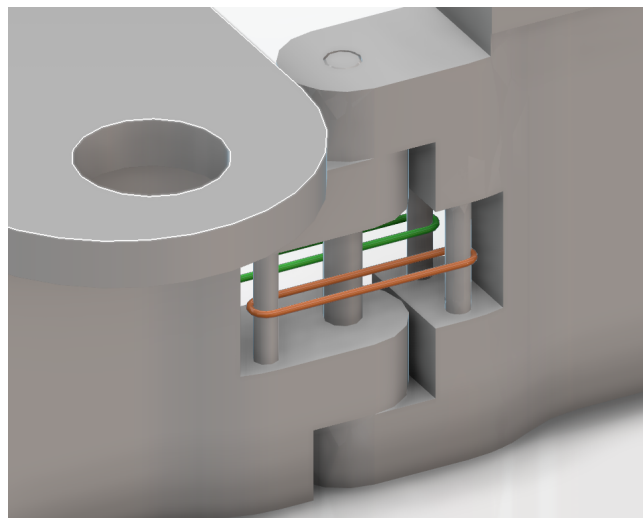


Figura 6.2: CAD Perno Bandella con fili Nitinol

La parte fissa della bandella presenta inoltre sei fori di fissaggio, utilizzati per il collegamento al telaio della vettura. Lungo tutta la sua estensione sono state ricavate apposite asole, progettate per favorire il costampaggio del rivestimento in gomma. L'impiego del rivestimento elastomerico consente di ottenere una superficie esterna continua e priva di discontinuità geometriche durante il movimento della bandella, preservando la regolarità del profilo aerodinamico e limitando le perturbazioni del flusso d'aria al di sotto del fondo vettura. Il modello CAD realizzato costituisce la base per le successive verifiche strutturali mediante analisi agli elementi finiti (FEM), finalizzate alla valutazione delle deformazioni, delle tensioni e del corretto funzionamento del sistema di attuazione.

Capitolo 7

Analisi agli Elementi Finiti - FEM

7.1 Introduzione

Dopo aver definito la geometria del sistema di attuazione, è stata eseguita un'analisi agli elementi finiti (Finite Element Method, FEM) con l'obiettivo di verificarne il comportamento strutturale nelle condizioni di carico previste. L'analisi FEM rappresenta una delle principali tecniche numeriche impiegate nella progettazione meccanica per prevedere il comportamento di componenti e strutture sottoposti a carichi meccanici. Il metodo consiste nella discretizzazione della geometria in un elevato numero di elementi di dimensioni ridotte, all'interno dei quali vengono risolte le equazioni dell'equilibrio. In questo modo è possibile determinare la distribuzione degli spostamenti, delle deformazioni e delle tensioni, individuando le zone maggiormente sollecitate e verificando la resistenza del componente prima della realizzazione di prototipi fisici. Nel presente lavoro l'analisi FEM è stata utilizzata per verificare la resistenza della struttura della bandella e valutare gli effetti dei carichi aerodinamici ottenuti dalle simulazioni CFD, oltre a fornire indicazioni utili per l'eventuale ottimizzazione geometrica del componente.

7.2 Mesh

La qualità della mesh rappresenta uno degli aspetti fondamentali per ottenere risultati accurati e numericamente stabili. Per questo motivo è stata effettuata un'attenta scelta dei parametri di discretizzazione, ricercando un compromesso tra accuratezza della soluzione e tempi di calcolo. La geometria è stata discretizzata mediante una mesh tridimensionale costituita da elementi tetraedrici, particolarmente adatti a componenti con geometrie complesse come quella in esame. I principali parametri utilizzati per la generazione della mesh sono riportati nella Figura 7.1.

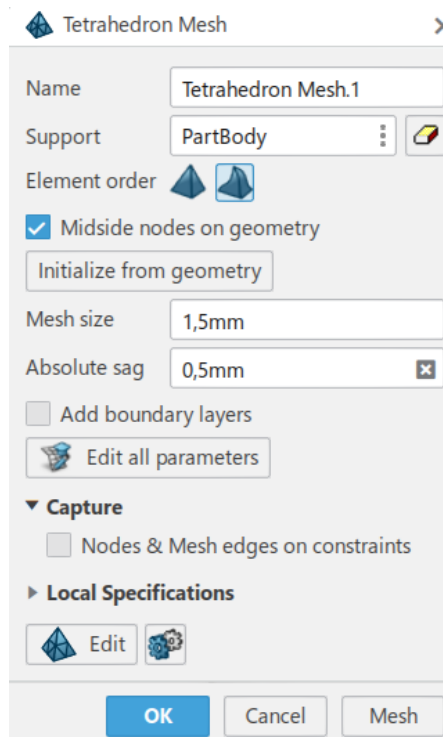


Figura 7.1: Parametri Mesh

La discretizzazione ottenuta è risultata sufficientemente fine nelle zone caratterizzate da maggiori concentrazioni di tensione, mantenendo al tempo stesso un numero di elementi compatibile con tempi di calcolo contenuti. Tale approccio ha consentito di ottenere una rappresentazione affidabile del comportamento strutturale della bandella senza introdurre un eccessivo costo computazionale.

7.3 Carichi e Vincoli

Per la verifica strutturale della bandella sono state considerate due differenti configurazioni di carico:

- **Configurazione 1:** bandella nella posizione di lavoro, soggetta esclusivamente al carico aerodinamico.
- **Configurazione 2:** bandella sottoposta contemporaneamente al carico aerodinamico e alla forza di attuazione esercitata dal filo in Nitinol durante il ripristino della configurazione curva.

Le forze aerodinamiche agenti sulla parte mobile della bandella sono state ricavate dalle simulazioni CFD descritte nel capitolo precedente. Le componenti risultano pari a:

$$\mathbf{F}_x = 102N \quad \mathbf{F}_y = 160N \quad (7.1)$$

Al fine di introdurre un opportuno margine di sicurezza, è stato adottato un coefficiente pari a 1,5, arrotondando successivamente i valori per eccesso. Le componenti di progetto risultano pertanto:

$$\mathbf{F}_x = 160N \quad \mathbf{F}_y = 240N \quad (7.2)$$

La risultante del carico aerodinamico è quindi:

$$\mathbf{F}_{\text{Aero}} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{160^2 + 240^2} = 288N \quad (7.3)$$

Dalle simulazioni CFD è stato inoltre ricavato il punto di applicazione della risultante aerodinamica, posto ad una distanza di 112,25 mm dal perno di rotazione della bandella. Il momento flettente agente sulla cerniera risulta quindi:

$$\mathbf{M}_{\text{Aero}} = F_{\text{Aero}} * b_{\text{Aero}} = 288 * 112,25 = 32328Nmm = 32,33Nm \quad (7.4)$$

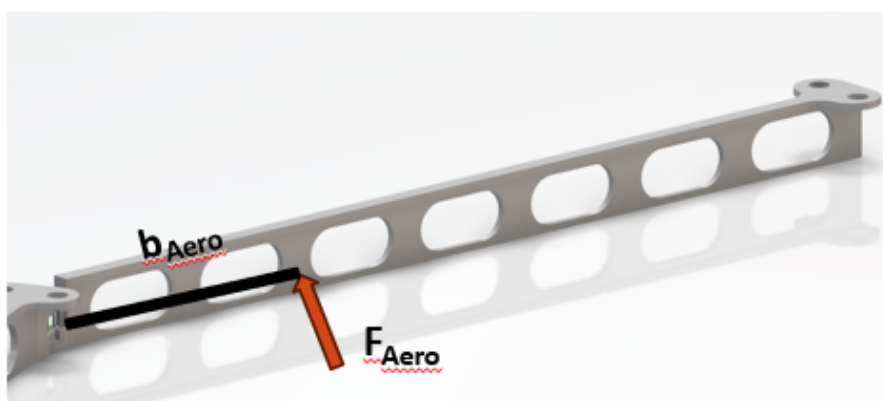


Figura 7.2: Caricamento Parte Mobile Bandella

Per quanto riguarda il sistema di attuazione, è stata inizialmente ipotizzata una forza massima sviluppata dal filo in Nitinol pari a:

$$\mathbf{F}_{\text{Nitinol}} = 400N \quad (7.5)$$

Poiché il punto di applicazione della forza si trova ad una distanza di 1,5 mm dal perno di rotazione, il momento generato dal filo risulta:

$$\mathbf{M}_{\text{Nitinol}} = F_{\text{Nitinol}} * b_{\text{Nitinol}} = 400 * 1,5 = 600Nmm = 0,6Nm \quad (7.6)$$

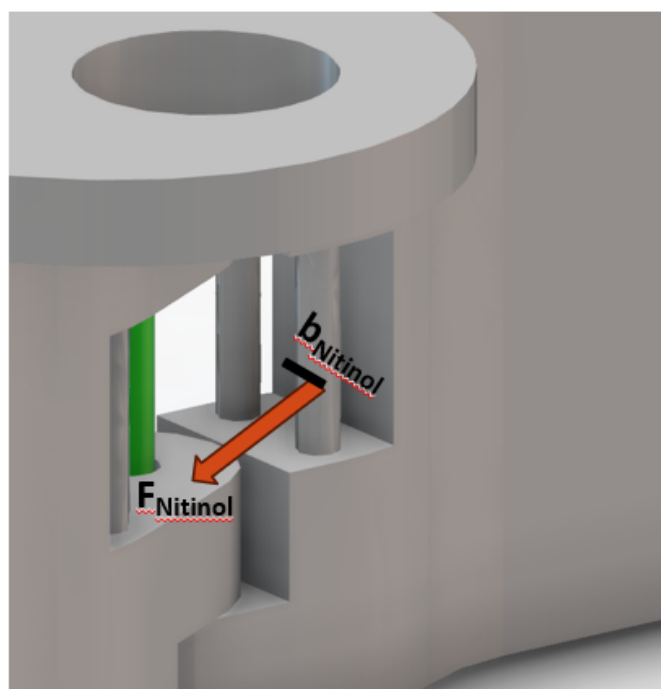


Figura 7.3: Caricamento Perno Bandella

Il confronto tra il momento aerodinamico e quello generato dal filo evidenzia immediatamente come quest'ultimo risulti di oltre un ordine di grandezza inferiore rispetto al valore richiesto per vincere il carico agente sulla bandella. Per eguagliare il momento aerodinamico sarebbe infatti necessaria una forza teorica di circa 21552 N, valore irrealizzabile per un filo in Nitinol di dimensioni compatibili con l'applicazione. Questo risultato dimostra che una configurazione basata esclusivamente sull'azione diretta dei fili SMA non è in grado di movimentare la bandella nelle condizioni di esercizio considerate e rende necessario l'impiego di un'opportuna trasmissione meccanica oppure di una diversa soluzione di attuazione. Nel paragrafo successivo viene verificata la resistenza strutturale della bandella sottoposta ai carichi precedentemente definiti.

7.4 Simulazioni

Le simulazioni agli elementi finiti sono state eseguite sulle due configurazioni di carico descritte nel paragrafo precedente, con l'obiettivo di verificare la resistenza strutturale sia della parte mobile della bandella sia del sistema di collegamento con i fili in Nitinol.

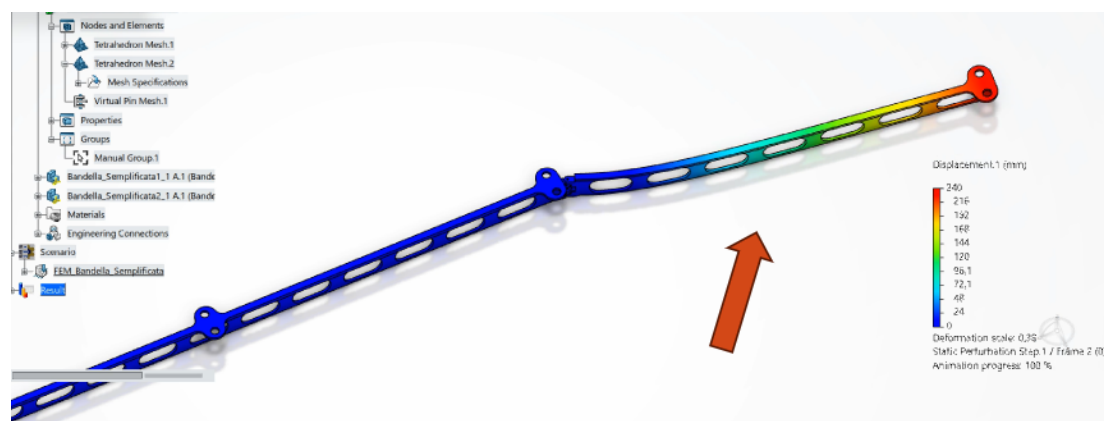


Figura 7.4: Simulazioni Resistenza Parte Mobile Bandella

I risultati mostrano come la parte mobile della bandella, sottoposta al solo carico aerodinamico di progetto, sviluppi tensioni e deformazioni superiori ai limiti ammissibili del materiale. In particolare, la struttura realizzata in lega di alluminio EN AW-6060 evidenzia una rigidità insufficiente a sostenere le sollecitazioni aerodinamiche, con deformazioni tali da compromettere il corretto funzionamento del componente e da condurre al cedimento strutturale.

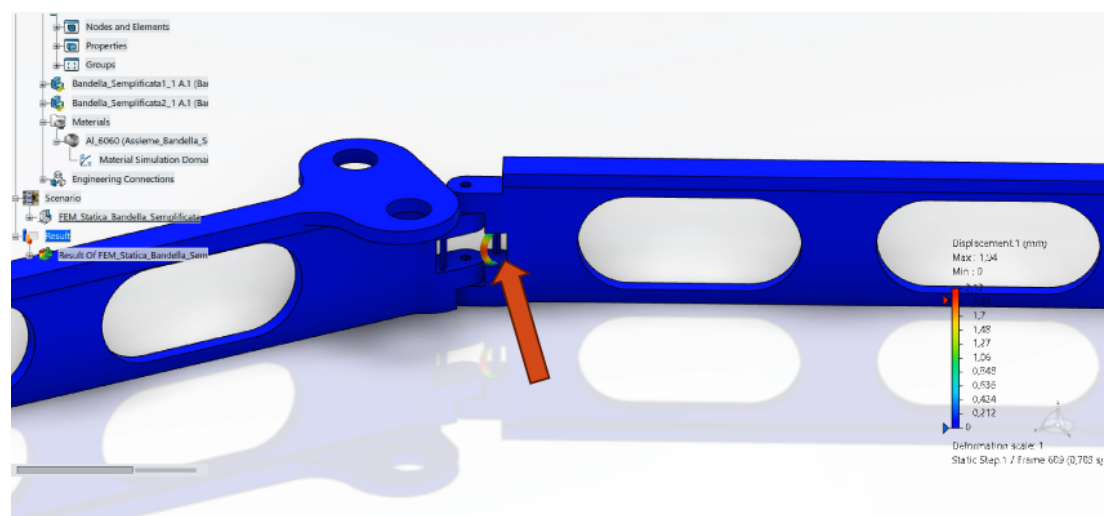


Figura 7.5: Simulazioni Resistenza Perno Bandella

La seconda simulazione riguarda invece il perno di collegamento dei fili in Nitinol. Anche in questo caso l'analisi evidenzia che il componente non è in grado

di sopportare la forza di attuazione ipotizzata, pari a 400 N, sviluppando livelli di tensione incompatibili con il materiale impiegato. Le verifiche strutturali confermano quindi quanto già emerso dall'analisi dei momenti riportata nel paragrafo precedente. Da un lato, la struttura della bandella non possiede una rigidità sufficiente per sostenere i carichi aerodinamici previsti; dall'altro, il sistema di attuazione mediante fili in Nitinol non è in grado di generare il momento necessario per vincere il momento aerodinamico agente sulla bandella. **Alla luce di tali risultati, la soluzione basata sull'impiego diretto di fili in SMA è stata ritenuta non idonea per l'applicazione in esame e pertanto non è stata ulteriormente sviluppata nelle successive fasi progettuali.**

Capitolo 8

Soluzioni Schematiche Alternative

A seguito delle considerazioni riportate al termine del capitolo precedente, è stato deciso di abbandonare la soluzione basata sull'impiego di fili in Nitinol. Si è quindi orientata la progettazione verso un sistema di movimentazione costituito da un verricello, una fune e una puleggia fissa. Tale configurazione offre un rapporto forza/corsa più favorevole e una maggiore affidabilità. Da questa idea sono state sviluppate quattro differenti soluzioni schematiche complesse, illustrate di seguito.

8.1 Soluzione Schematica 1

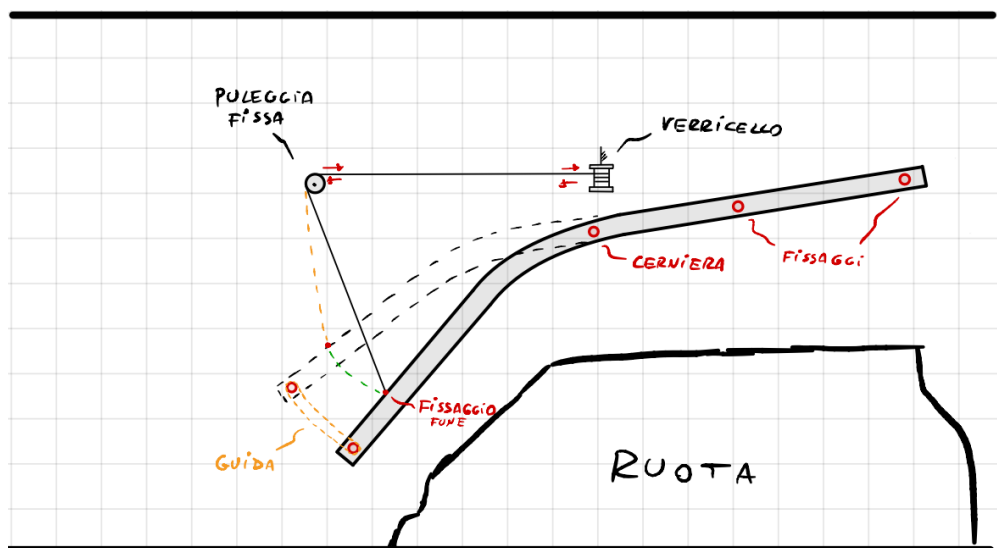


Figura 8.1: Soluzioni schematica 1

La prima soluzione rappresenta l'evoluzione diretta dello schema precedentemente introdotto nel capitolo dedicato alle soluzioni concettuali. Il sistema è costituito da un verricello che, mediante una fune guidata da una puleggia fissa, trasmette il moto alla parte mobile della bandella, consentendone la variazione di curvatura. La semplicità costruttiva del meccanismo rappresenta uno dei principali vantaggi della soluzione, che richiede un numero limitato di componenti e permette un controllo diretto dello spostamento della bandella. Tuttavia, l'ingombro del sistema di azionamento e la necessità di integrare il percorso della fune all'interno degli spazi disponibili rendono necessarie ulteriori valutazioni progettuali.

- **Vantaggi:**

- Architettura semplice e facilmente realizzabile.
- Buona robustezza del sistema.
- Facilità di manutenzione.

- **Svantaggi:**

- Ingombro del sistema di movimentazione.
- Necessità di guidare correttamente la fune durante il funzionamento.

8.2 Soluzione Schematica 2

La seconda soluzione rappresenta un'evoluzione della precedente e prevede l'introduzione di una puleggia mobile, solidale alla parte mobile della bandella. Grazie a questa configurazione viene realizzato un sistema di rinvio che consente di ottenere un vantaggio meccanico, riducendo la forza richiesta al sistema di attuazione. In particolare, a parità di carico applicato, la presenza della puleggia mobile consente di dimezzare la forza che il verricello deve esercitare per movimentare la bandella, a fronte di un incremento della corsa della fune. Tale soluzione permette quindi di impiegare un attuatore di dimensioni inferiori o con minore capacità di forza, migliorando l'efficienza del sistema di movimentazione. Di contro, l'aggiunta della puleggia comporta un aumento dell'ingombro complessivo del meccanismo e una maggiore complessità costruttiva.

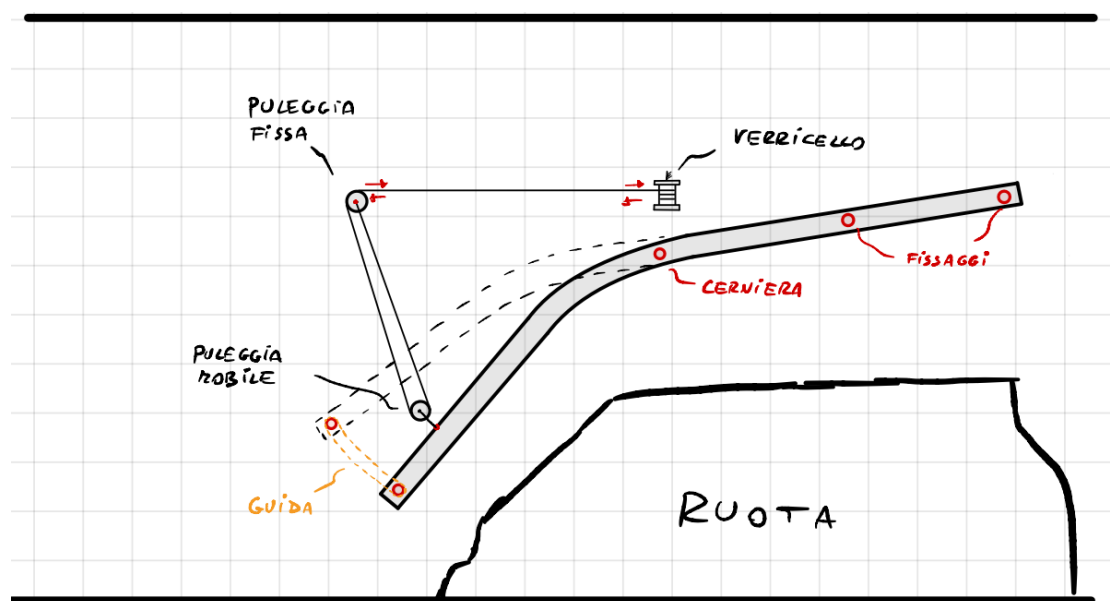


Figura 8.2: Soluzioni schematica 2

Si riportano di seguito i principali vantaggi e svantaggi della soluzione proposta.

- **Vantaggi:**

- Riduzione della forza richiesta all'attuatore, pari a circa il 50%.
- Possibilità di impiegare un attuatore di dimensioni e potenza inferiori.

- **Svantaggi:**

- Maggiore ingombro dovuto all'introduzione della puleggia mobile.
- Incremento della complessità costruttiva e del numero di componenti.

8.3 Soluzioni Schematiche 3 e 4

La soluzione illustrata nella figura 8.4, insieme a quella presentata nel paragrafo successivo, rappresenta il concetto progettuale più vicino alla configurazione finale sviluppata. Le due soluzioni condividono infatti la medesima architettura meccanica e differiscono esclusivamente per il sistema di attuazione impiegato. Nel caso della presente configurazione, il movimento della bandella è ottenuto mediante un verricello azionato da un motore elettrico, che consente l'avvolgimento e lo svolgimento della fune collegata alla parte mobile della bandella. Tale soluzione permette

un controllo preciso della posizione e della velocità di movimentazione, rendendo possibile l'integrazione con un sistema di controllo elettronico per la gestione automatica dell'attuazione. L'impiego del motore elettrico garantisce inoltre tempi di risposta contenuti e un'elevata ripetibilità del movimento. Tuttavia, la presenza sia del motore sia del verricello comporta un incremento dell'ingombro complessivo e della massa del sistema, aspetti che devono essere attentamente considerati durante la progettazione.

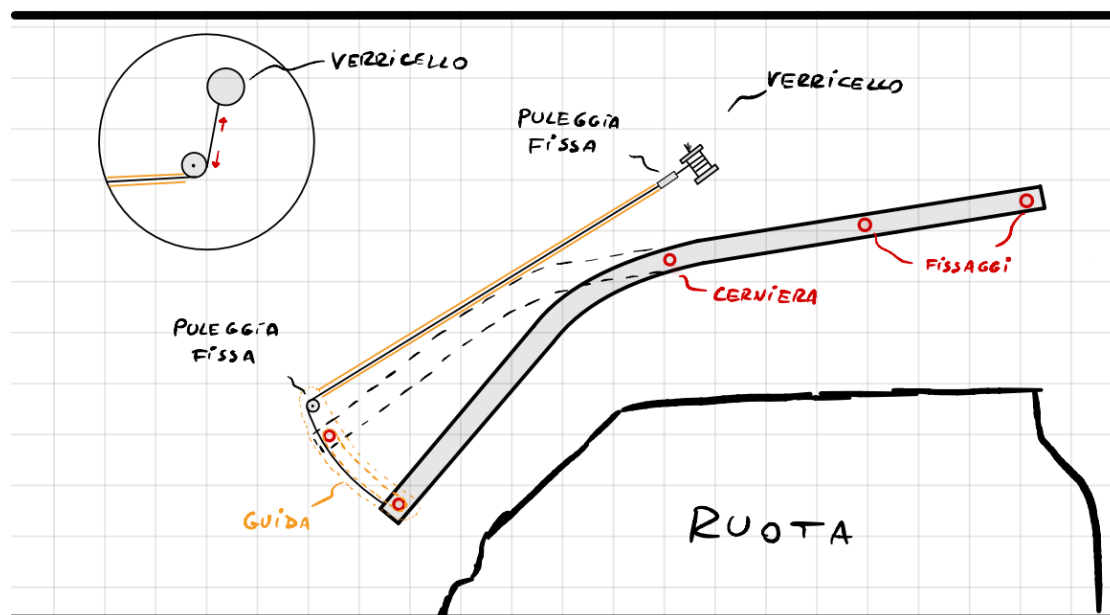


Figura 8.3: Soluzioni schematica 3

Di seguito sono riportati i principali vantaggi e svantaggi della soluzione proposta.

- **Vantaggi:**

- Tempi di risposta ridotti.
- Controllo completo e preciso della movimentazione della bandella.
- Elevata ripetibilità del sistema di attuazione.

- **Svantaggi:**

- Maggiore ingombro dovuto alla presenza del motore elettrico e del verricello.

- Controllo completo e preciso della movimentazione della bandella.
- Cinematismo semplice.

- **Svantaggi:**

- Ingombro dell'attuatore lineare.
- Necessità di prevedere uno spazio sufficiente per la sua corsa.

Capitolo 9

Meccanismo a Filo Bandella

Partendo dalle ultime due soluzioni schematiche presentate nel capitolo precedente, è stato sviluppato il sistema di movimentazione definitivo della bandella. Il processo progettuale ha previsto una prima fase di definizione dello schema funzionale del meccanismo, seguita dalla realizzazione di un modello CAD preliminare e, successivamente, di un modello CAD completo, nel quale la bandella presenta la medesima curvatura della configurazione originale.

9.1 Schema Dettagliato Meccanismo

La figura 9.1 illustra il meccanismo sviluppato per movimentare la bandella.

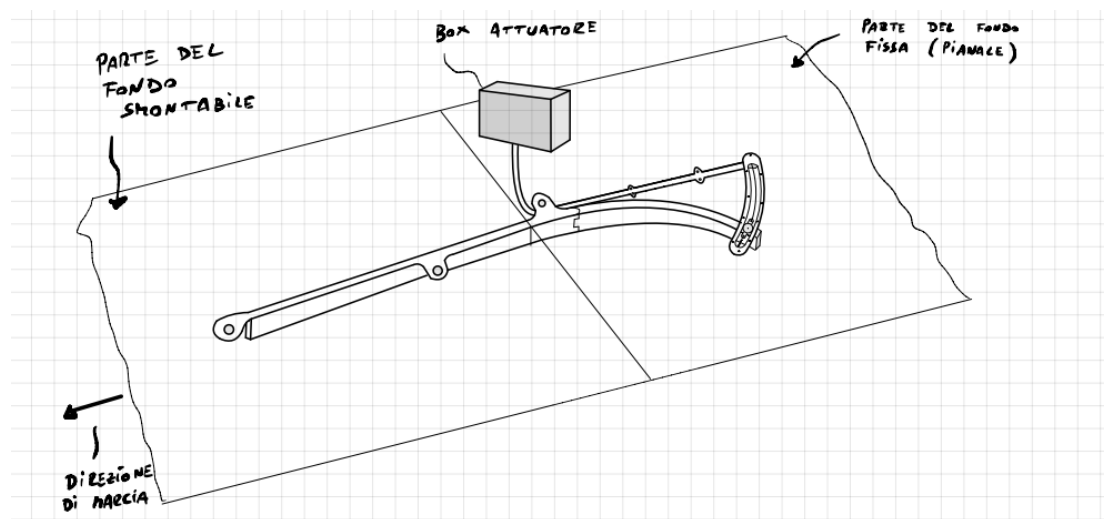


Figura 9.1: Disegno Meccanismo Bandella

Invece, nella figura 9.2 sono riportati i disegni costruttivi del perno di movimentazione, rispettivamente in vista laterale e in vista dall'alto.

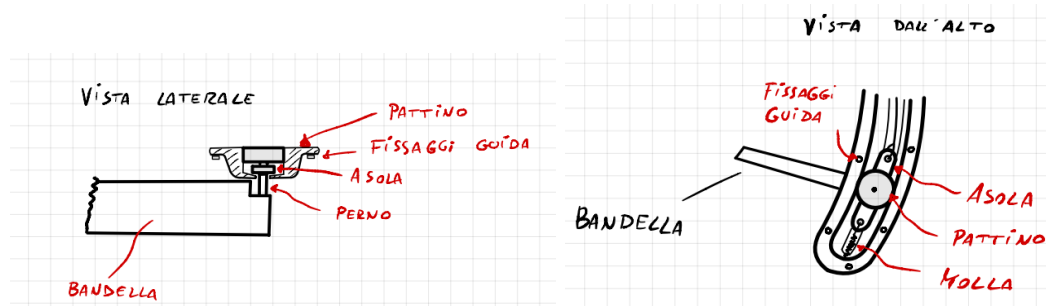


Figura 9.2: Disegni Perno Meccanismo Bandella

Il sistema di movimentazione è costituito dai seguenti componenti:

- Fune in acciaio;
- Guida per la parte mobile della bandella;
- Motoriduttore MRT62-31;
- Perno con Pattino di Guida ed Asola di collegamento;
- Rocchetto avvolgifune;
- Due Pulegge di Rinvio;
- Supporto di Fissaggio Puleggia al Fondo Vettura;
- Molla di richiamo;
- Battuta per Bandella Mobile;
- Dado Autobloccante per fissaggio del rocchetto all'albero del Motoriduttore;
- Manicotto a Pressione per il bloccaggio della fune.

Nel dettaglio, la parte fissa della bandella è vincolata al fondo vettura mediante tre punti di fissaggio, due connessi alla parte smontabile del fondo vettura e uno connesso al pianale, mentre la parte mobile è collegata alla precedente tramite una cerniera. Sul lato opposto è installato un perno dotato di pattino di guida e di un'asola con doppio foro, alla quale viene collegata la fune di movimentazione. Il pattino scorre all'interno della guida lineare, imponendo la corretta traiettoria

della parte mobile durante l'attuazione. La movimentazione della fune è affidata al motoriduttore, che trasmette il moto al rocchetto avvolgifune. Quest'ultimo presenta un foro dedicato al fissaggio della fune mediante un manicotto a pressione e risulta accoppiato all'albero del motoriduttore tramite un collegamento scanalato, così da garantire un'efficace trasmissione della coppia. Il bloccaggio assiale del rocchetto è infine assicurato mediante un dado autobloccante. Le due pulegge di rinvio consentono di guidare il percorso della fune, ottimizzandone la direzione e permettendo una corretta integrazione del sistema all'interno degli spazi disponibili nel fondo vettura. La molla di richiamo contribuisce al mantenimento della tensione della fune e garantisce il corretto ritorno del meccanismo nella configurazione iniziale, mentre la battuta limita la corsa della parte mobile evitando sollecitazioni eccessive sui componenti. Nei paragrafi successivi verranno presentati dapprima i modelli CAD della bandella completa e, successivamente, quelli dei singoli componenti che costituiscono il sistema di movimentazione.

9.1.1 CAD Bandella Semplificata

Di seguito è riportato il modello CAD della bandella semplificata, progettata sulla base del nuovo sistema di movimentazione a fune. Analogamente alla soluzione precedente, la bandella è costituita da due componenti principali: una parte fissa e una parte mobile, entrambe opportunamente riprogettate rispetto alla configurazione con fili in Nitinol. Nella figura seguente è illustrato il modello CAD della parte fissa, ovvero il componente che rimane solidale al fondo vettura.

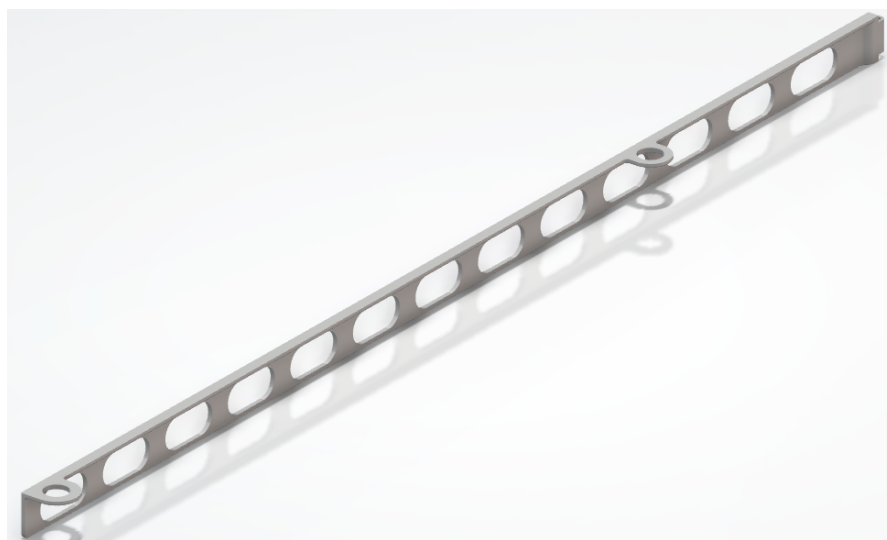


Figura 9.3: Cad Parte Fissa Bandella Semplificata per soluzione con filo

Rispetto alla configurazione precedente, la geometria della parte fissa è stata modificata ripristinando il profilo ad L, al posto della sezione a T adottata per la soluzione con fili in Nitinol. Inoltre, sono stati eliminati i supporti destinati all'alloggiamento dei perni utilizzati per il collegamento dei fili in SMA, non più necessari nella nuova configurazione. La figura successiva mostra invece il modello CAD della parte mobile, che costituisce l'elemento direttamente movimentato dal sistema di attuazione mediante fune. Il moto è trasmesso dal verricello attraverso il sistema di pulegge e guida descritto nella sezione precedente, consentendo il parziale raddrizzamento della bandella durante il funzionamento.

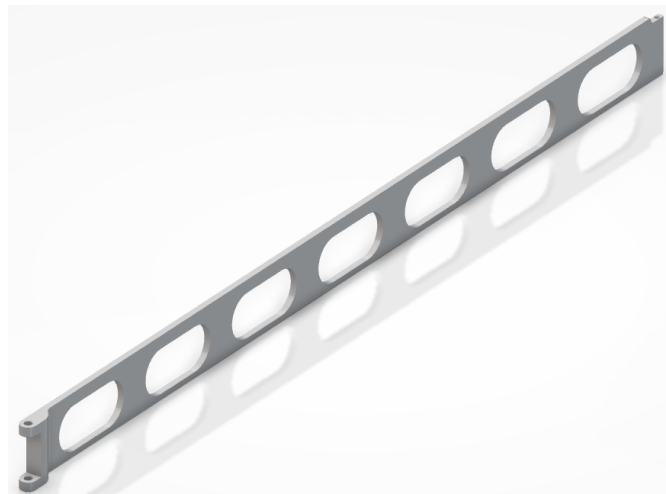


Figura 9.4: Cad Parte Mobile Bandella Semplificata per soluzione con filo

Nel paragrafo successivo verrà presentato il modello CAD della bandella completa, caratterizzato dalla geometria definitiva, che mantiene la curvatura della configurazione originale della vettura.

9.1.2 CAD Bandella con curvatura

Successivamente è stato sviluppato il modello CAD definitivo della bandella, caratterizzato dalla geometria reale del componente e dalla curvatura presente sulla vettura attuale. Anche in questo caso la bandella è costituita da due elementi distinti, una parte fissa e una parte mobile, mantenendo la medesima architettura del modello semplificato ma riproducendo fedelmente la geometria finale. Nella figura seguente è riportato il modello CAD della parte fissa.

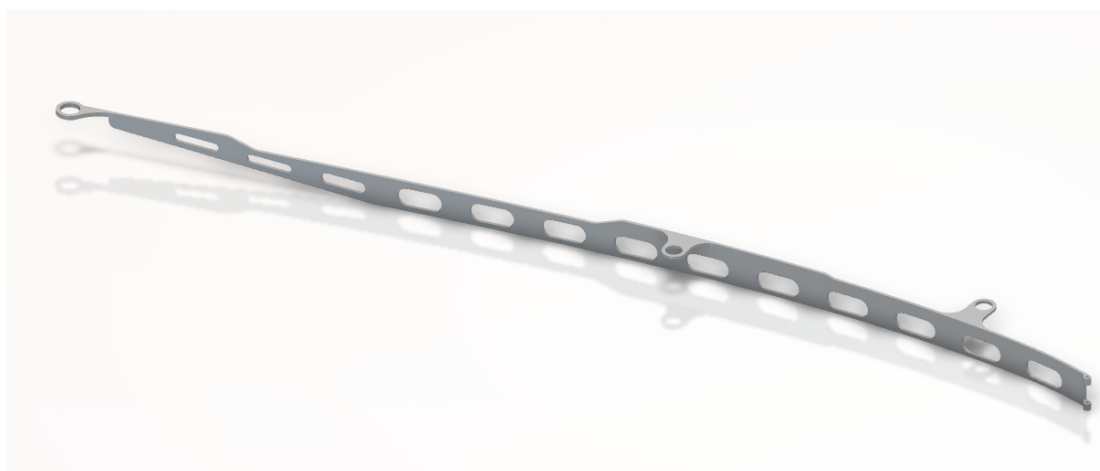


Figura 9.5: Cad Parte Fissa Bandella reale per soluzione con filo

La figura successiva mostra invece il modello CAD della parte mobile, progettata per essere movimentata dal sistema di attuazione descritto nelle sezioni precedenti.

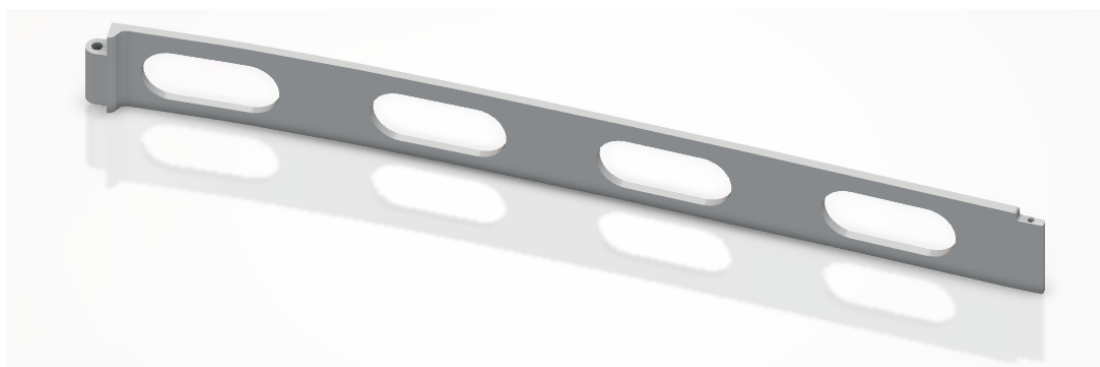


Figura 9.6: Cad Parte Mobile Bandella reale per soluzione con filo

Osservando il modello della parte mobile, è possibile notare come l'estremità sia stata opportunamente lavorata mediante un taglio e un foro di fissaggio, predisposti per l'installazione del perno dotato di pattino guida che realizza il collegamento con il sistema di movimentazione. Analogamente alla parte fissa, sono inoltre presenti una serie di asole distribuite lungo tutta la lunghezza del componente, progettate per favorire il costampaggio del rivestimento in gomma. Tale soluzione consente di ottenere una superficie esterna continua e regolare, preser-

vando le caratteristiche aerodinamiche della bandella e limitando le perturbazioni del flusso d'aria. Si prevede la realizzazione di entrambe le parti in Alluminio 7020.

9.1.3 Fune

Per la trasmissione del moto è stata scelta una fune di tipo Bowden, costituita da un cavo in acciaio di diametro pari a 1,5 mm, rivestito da una guaina protettiva, analoga a quella comunemente impiegata nei sistemi frenanti delle biciclette. Questa soluzione garantisce elevata flessibilità di installazione, affidabilità e semplicità costruttiva. Di seguito è riportato il modello CAD della fune.



Figura 9.7: Fune

Per il dimensionamento della fune è stata determinata la forza necessaria a contrastare il momento esercitato dalla molla, assunto pari al momento aerodinamico agente sulla bandella. Riprendendo i risultati ottenuti dalle simulazioni CFD, le

componenti della forza aerodinamica risultano:

$$\mathbf{F}_x = 102N \quad \mathbf{F}_y = 160N \quad (9.1)$$

La risultante della forza aerodinamica è quindi:

$$\mathbf{F}_{\text{Aero}} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{102^2 + 160^2} = 189,75N \quad (9.2)$$

A differenza della precedente soluzione con fili in Nitinol, in questo caso non è stato introdotto un coefficiente di sicurezza pari a 1,5, poiché il sistema di movimentazione risulta meccanicamente più robusto e in grado di trasmettere forze significativamente maggiori. Si è quindi scelto di utilizzare direttamente il valore della risultante aerodinamica. I bracci delle forze, misurati rispetto al perno di rotazione della bandella, sono:

$$b_{\text{Aero}} = 112,25mm \quad b_{\text{Fune}} = b_{\text{Molla}} = 316mm \quad (9.3)$$

Imponendo l'equilibrio dei momenti rispetto al perno di rotazione, la forza che la fune deve esercitare risulta coincidente con quella della molla:

$$\mathbf{F}_{\text{Fune}} = \mathbf{F}_{\text{Molla}} = \frac{F_{\text{Aero}}}{b_{\text{Fune}}} * b_{\text{Aero}} = 67,4N \quad (9.4)$$

Per garantire un adeguato margine di sicurezza necessario per la movimentazione è stato adottato per la forza della fune un valore di progetto pari a:

$$\mathbf{F}_{\text{Fune}_s} = 75N \quad (9.5)$$

Poiché un unico motoriduttore aziona contemporaneamente entrambe le bandelle anteriori, la forza complessivamente richiesta al sistema di attuazione diventa:

$$\mathbf{F}_{\text{Fune}} = 75 * 2 = 150N \quad (9.6)$$

Il momento generato dalla singola fune rispetto al perno di rotazione risulta quindi:

$$\mathbf{M}_{\text{Fune}} = F_{\text{Fune}_s} * b_{\text{Fune}} = 23700Nmm = 23,7Nm \quad (9.7)$$

Il momento aerodinamico agente sulla bandella, pari a quello esercitato dalla molla, risulta invece:

$$\mathbf{M}_{\text{Molla}} = \mathbf{M}_{\text{Aero}} = F_{\text{Aero}} * b_{\text{Aero}} = 21278Nmm = 21,3Nm \quad (9.8)$$

Dal confronto tra i due valori si osserva che il momento trasmesso dalla fune è superiore al momento esercitato dalla molla sulla bandella. Il sistema di movimentazione risulta pertanto in grado di equilibrare il carico aerodinamico e di comandare correttamente la rotazione della parte mobile della bandella. È inoltre importante sottolineare che il dimensionamento è stato effettuato considerando il momento generato dalla singola fune, mentre il motoriduttore è stato scelto per azionare simultaneamente entrambe le bandelle, garantendo quindi un adeguato margine operativo.

9.1.4 Motoriduttore MRT62-31

Per l'azionamento della fune, mediante la quale viene movimentata la bandella, è stato selezionato un motoriduttore in corrente continua a magneti permanenti, appartenente alla stessa categoria dei motori comunemente impiegati nei sistemi tergicristallo e alzacristalli delle autovetture. Questa tipologia di motore rappresenta una soluzione compatta ed economica, in grado di fornire la coppia necessaria a fronte di dimensioni e peso contenuti. Il modello scelto è il motoriduttore **MRT62-31**.



Figura 9.8: Motoriduttore Movimentazione Bandella[25]

Le principali caratteristiche tecniche sono:

- Tensione di Alimentazione: 12-24 V
- Corrente Nominale: 1,5 - 2 A (Max - 10 - 12 A)
- Velocità Nominale: 35 RPM
- Coppia Nominale: 4 Nm
- Coppia di Spunto: 25 - 28 Nm
- Peso: 0,9 kg
- Rapporto di Riduzione: 1/55

Come illustrato nel capitolo precedente, il momento necessario per movimentare entrambe le bandelle rientra nelle capacità del motoriduttore selezionato. In particolare, la coppia di spunto disponibile risulta superiore a quella richiesta durante

la fase di attuazione, garantendo un adeguato margine di sicurezza e assicurando il corretto funzionamento del sistema anche nelle condizioni di carico più gravose. Per consentire l'integrazione del componente all'interno dell'assieme CAD, è stato inoltre realizzato un modello tridimensionale semplificato del motoriduttore, riportato nella figura seguente.



Figura 9.9: CAD Motoriduttore Movimentazione Bandella

Analizzando nel dettaglio l'albero di uscita del motoriduttore, si osserva la

presenza di una superficie scanalata con profilo conico, progettata per garantire il corretto accoppiamento con il rocchetto di avvolgimento della fune. L'estremità dell'albero è invece filettata e consente il bloccaggio assiale del rocchetto mediante un dado autobloccante, assicurando una trasmissione affidabile della coppia ed evitando lo sfilamento del componente durante il funzionamento.

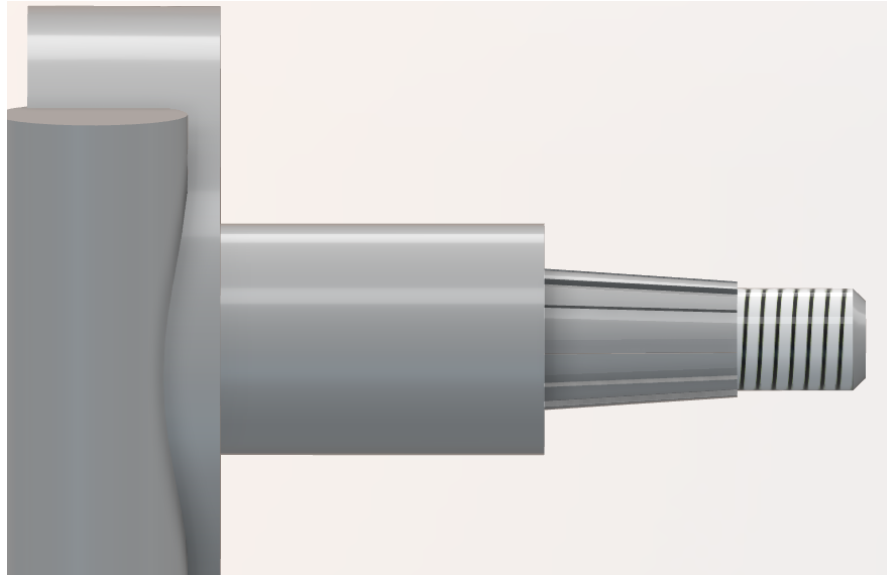


Figura 9.10: CAD Perno Motoriduttore Movimentazione Bandella

Per la scelta del motoriduttore è necessario considerare la forza di trazione richiesta alla fune per movimentare entrambe le bandelle, calcolata nella sezione dedicata alla progettazione della guida:

$$\mathbf{F_{Fune}} = 150N \quad (9.9)$$

Il braccio della forza coincide con il raggio effettivo del rocchetto. Esso è dato dalla somma del raggio del rocchetto (6,5 mm) e del raggio della fune (0,75 mm), assumendo un singolo avvolgimento della fune sul rocchetto. Si ottiene pertanto:

$$\mathbf{b_{Rocchetto}} = 6,5 + 0,75 = 7,25mm = 0,00725m \quad (9.10)$$

La coppia minima richiesta al motoriduttore risulta quindi:

$$\mathbf{M_{Motoriduttore}} = F_{Fune} * b_{Rocchetto} = 1,09Nm \quad (9.11)$$

Il motoriduttore selezionato risulta opportunamente sovradimensionato rispetto alle esigenze del caso in esame. Nel calcolo precedente, infatti, non sono state

considerate le perdite dovute agli attriti, in particolare quelli generati dallo scorrimento della fune sulle pulegge, né il rendimento complessivo del sistema di trasmissione. Il margine di coppia disponibile consente inoltre di prevedere eventuali sviluppi futuri del progetto, quali l'impiego dello stesso sistema per la movimentazione di un numero maggiore di bandelle, senza richiedere la sostituzione del gruppo di azionamento.

9.1.5 Guida per la parte mobile della Bandella

Successivamente è stata progettata la guida destinata alla movimentazione della parte mobile della bandella. Essa svolge una duplice funzione: da un lato ospita il perno con pattino guida (descritto nella sezione successiva), consentendone lo scorrimento controllato, e dall'altro integra una puleggia di rinvio che devia la fune verso una seconda puleggia collegata al sistema di attuazione. Per la protezione della fune è stata inoltre realizzata un'estrusione cilindrica longitudinale, dotata di opportuni elementi di fissaggio al fondo vettura. Tale componente consente di alloggiare la fune Bowden lungo tutto il suo percorso, proteggendola dall'esposizione a sporco, detriti e agenti atmosferici, che potrebbero comprometterne il corretto funzionamento e ridurne la durata nel tempo. Il materiale con il quale viene realizzata è anche in questo caso un alluminio ad alte prestazioni, ovvero il 7020. Di seguito è riportato il modello CAD della guida con l'estrusione cilindrica all'interno della quale scorre la fune rivestita.



Figura 9.11: Guida con Estrusione a Forma di Cilindro

Nella figura seguente è invece illustrata la guida vera e propria, progettata per consentire lo scorrimento del perno dotato di pattino guida, garantendo un movimento lineare della parte mobile della bandella durante l'attuazione.



Figura 9.12: Lato Guida Bandella

La guida integra inoltre un foro dedicato all'ancoraggio della molla di richiamo. La geometria del foro è stata progettata in modo da impedire lo sganciamento accidentale della molla durante il funzionamento del meccanismo.

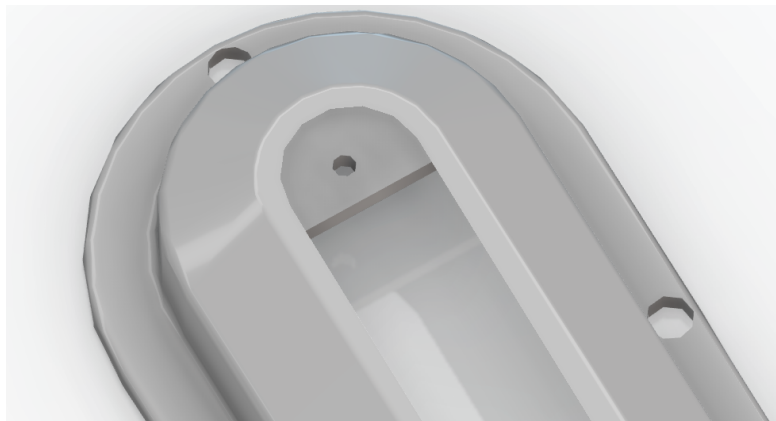


Figura 9.13: Foro di Aggancio per la Molla

Infine, nella parte terminale della guida è stata ricavata una sede opportunamente sagomata per l'alloggiamento della puleggia di rinvio. Quest'ultima ha il compito di modificare la direzione della fune e indirizzarla verso il motoriduttore,

garantendo al tempo stesso uno scorrimento regolare e riducendo gli attriti durante il funzionamento.

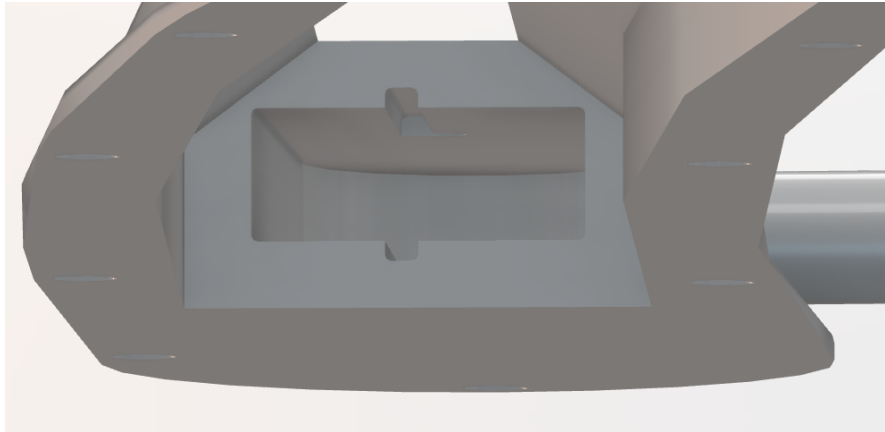


Figura 9.14: Alloggiamento Guida per Puleggia di Rinvio

9.1.6 Perno con Pattino Guida ed Asola di collegamento

Di seguito è riportato il modello CAD del perno progettato per il sistema di movimentazione della bandella:

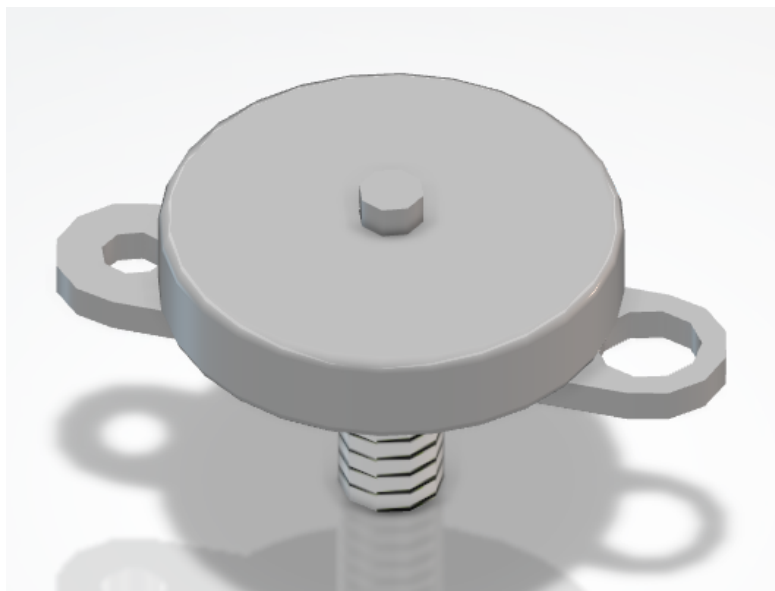


Figura 9.15: Perno con Pattino Guida

Il componente svolge una funzione fondamentale all'interno del meccanismo di attuazione, in quanto collega la parte mobile della bandella al sistema di movimentazione, consentendone lo scorrimento lungo la guida e il mantenimento della corretta posizione durante il funzionamento. Il perno è costituito da un pattino guida, progettato per scorrere con ridotto attrito all'interno della guida lineare, e da una parte filettata che permette il fissaggio diretto alla parte mobile della bandella mediante il foro filettato appositamente realizzato. Il componente integra inoltre un'asola di collegamento dotata di due fori di differente diametro, collocati alle estremità. Il primo foro è destinato al collegamento della fune Bowden, responsabile della movimentazione della bandella, mentre il secondo consente l'aggancio della molla di richiamo. Durante il funzionamento, la fune esercita la forza necessaria a raddrizzare la parte mobile della bandella, mentre la molla genera la forza opposta, aiutando a riportarla nella configurazione iniziale quando vi è la necessità. In questo modo si realizza un equilibrio delle forze agenti sul perno, garantendo il corretto posizionamento della bandella, la continuità del contatto tra i componenti e la stabilità dell'intero meccanismo.

9.1.7 Battuta per Bandella Mobile

Nella figura successiva è riportato il modello CAD della battuta progettata per la parte mobile della bandella.



Figura 9.16: CAD Battuta Bandella

La battuta è stata progettata con una duplice funzione. Da un lato agisce come finecorsa meccanico, limitando la corsa della parte mobile della bandella e garantendo il raggiungimento della configurazione iniziale. Dall'altro lato, contribuisce a rendere il profilo aerodinamico più continuo, sigillando il dislivello che si verrebbe

a creare tra la bandella e il fondo vettura quando la bandella si trova nella posizione di default, ossia in configurazione curva. Per questo motivo il componente è stato modellato riproducendo il profilo della parte mobile della bandella, così da ottenere una superficie quanto più possibile continua e ridurre le perturbazioni del flusso d'aria. Inoltre, la battuta è dotata di due fori di fissaggio che ne consentono l'ancoraggio al fondo vettura in modo semplice e robusto.

9.1.8 Rocchetto Avvolgifune

Il rocchetto costituisce il componente responsabile dell'avvolgimento e dello svolgimento della fune Bowden, trasformando il moto rotatorio fornito dal motoriduttore nel moto lineare necessario alla movimentazione della bandella. Inoltre, integra il sistema di fissaggio della fune mediante un foro inclinato appositamente realizzato, che ne garantisce il corretto ancoraggio durante il funzionamento. Di seguito è riportato il modello CAD del rocchetto progettato.

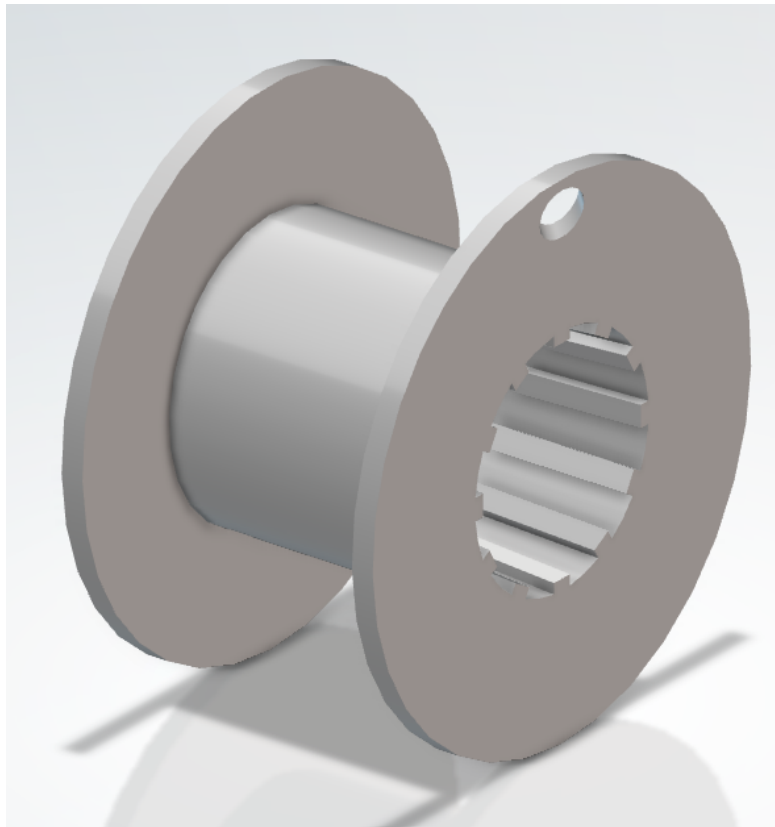


Figura 9.17: CAD Rocchetto

Analizzando il componente in vista laterale, è possibile osservare l'accoppiamento scanalato conico, progettato per essere compatibile con l'albero di uscita del motoriduttore MRT62-31. Tale accoppiamento consente una trasmissione affidabile della coppia, impedendo slittamenti tra i due componenti e garantendo il corretto funzionamento del sistema di movimentazione.

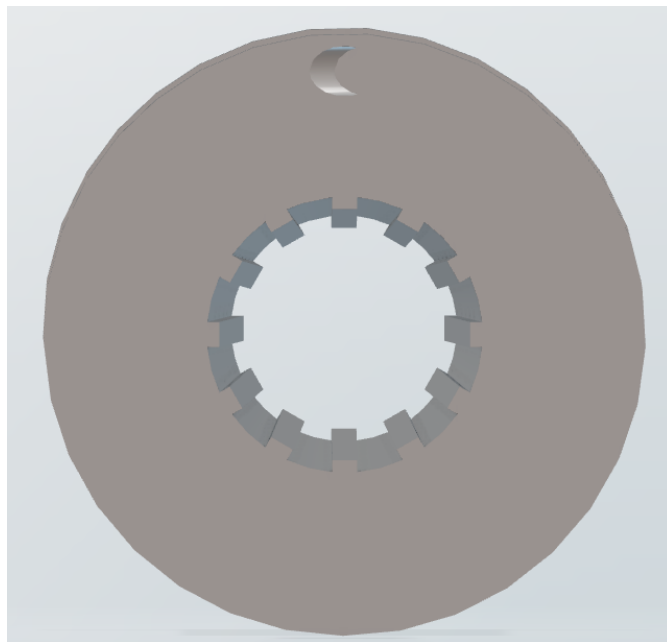


Figura 9.18: CAD Rocchetto

Il rocchetto viene infine montato sull'albero del motoriduttore e bloccato assialmente mediante un dado autobloccante, come verrà illustrato nel prossimo capitolo. Questa soluzione costruttiva permette di trasmettere integralmente la coppia motrice alla fune, garantendo al contempo semplicità di assemblaggio, affidabilità del collegamento e facilità di manutenzione.

9.1.9 Molla di Richiamo

Per il sistema di richiamo della bandella è stata progettata una molla elicoidale di trazione, realizzata in acciaio e dimensionata appositamente per il meccanismo sviluppato. La sua funzione è quella di riportare automaticamente la parte mobile nella configurazione iniziale quando il motoriduttore rilascia la fune, garantendo al tempo stesso il mantenimento della corretta tensione del sistema durante tutte le fasi di funzionamento. Il dimensionamento definitivo della molla andrà eseguito con il fornitore e dovrà essere effettuato tenendo conto dei carichi aerodinamici

agenti sulla bandella e delle caratteristiche cinematiche del meccanismo, in modo da garantire un adeguato equilibrio tra la forza di richiamo e quella esercitata dalla fune, evitando fenomeni di instabilità o movimenti indesiderati. Di seguito è riportato il modello CAD della molla.

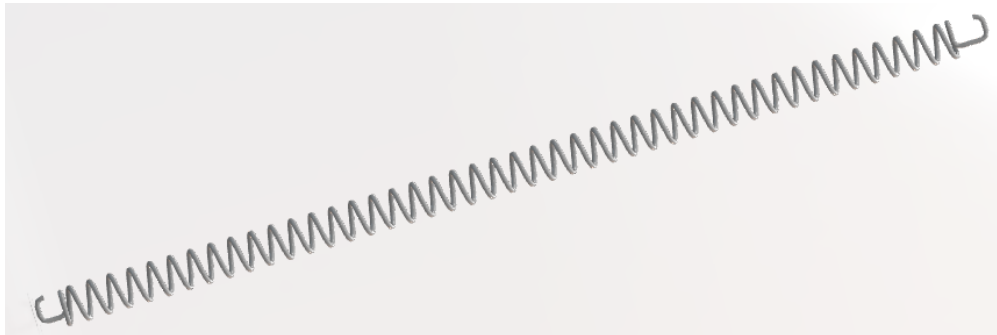


Figura 9.19: CAD Molla

9.1.10 Fissaggio Puleggia al Fondo Vettura

Nella figura seguente è riportato il CAD del componente progettato per il fissaggio della puleggia di rinvio al fondo vettura.

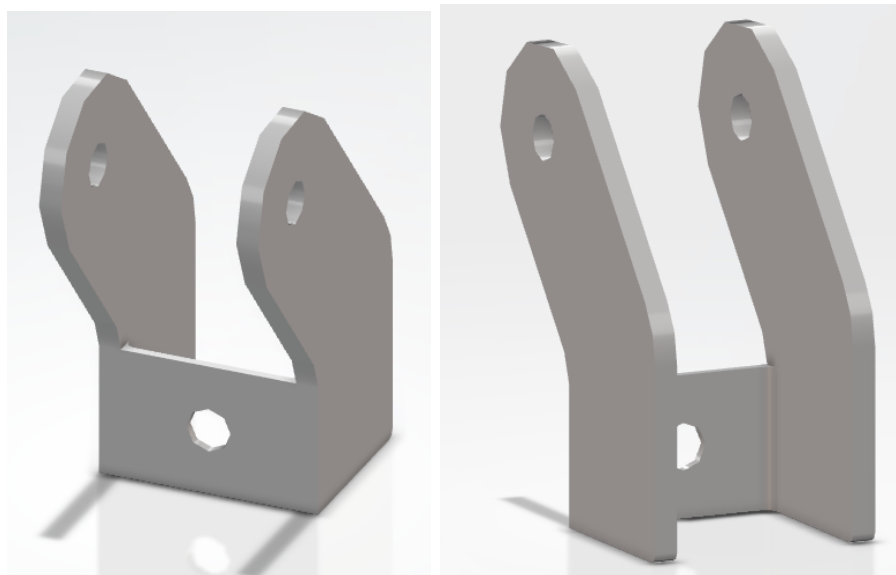


Figura 9.20: CAD Fissaggio Puleggia di Rinvio

Il supporto è stato progettato per consentire il montaggio della puleggia di rinvio in una posizione prestabilita del fondo vettura. Esso viene installato e fissato in prossimità del foro realizzato sul fondo, in modo da guidare la fune verso l'interno del vano che ospita il sistema di attuazione. Tale soluzione garantisce il corretto allineamento della fune durante il funzionamento del meccanismo e contribuisce a ridurre gli attriti e le sollecitazioni localizzate.

9.1.11 Pulegge di Rinvio

Per consentire il corretto instradamento della fune Bowden lungo il sistema di movimentazione sono state progettate due pulegge di rinvio, dimensionate in funzione del diametro della fune pari a 1,5 mm. La loro funzione è quella di modificare la direzione del cavo riducendo gli attriti durante lo scorrimento e garantendo una trasmissione regolare della forza dal motoriduttore alla bandella. La gola della puleggia è stata opportunamente sagomata per alloggiare la fune ed evitarne lo sfilamento durante il funzionamento, contribuendo inoltre a limitare l'usura sia della fune sia della puleggia stessa. Di seguito è riportato il modello CAD della puleggia progettata.

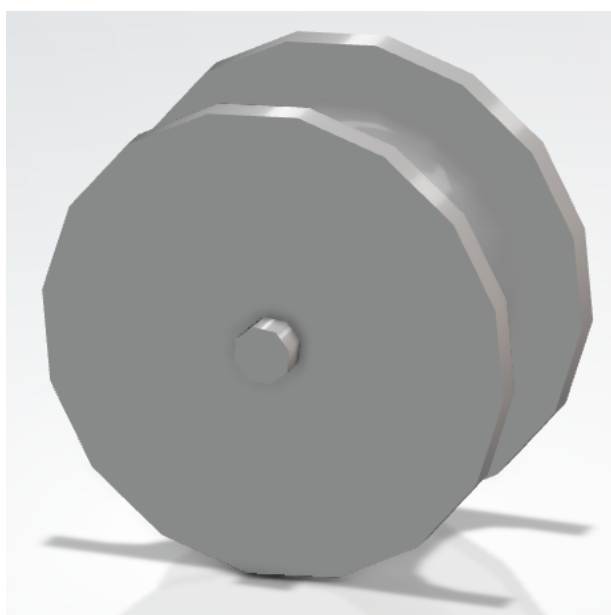


Figura 9.21: CAD Puleggia di Rinvio

Nella figura seguente è invece mostrata la vista laterale della puleggia, dalla quale è possibile osservare il profilo della gola destinata allo scorrimento della fune.

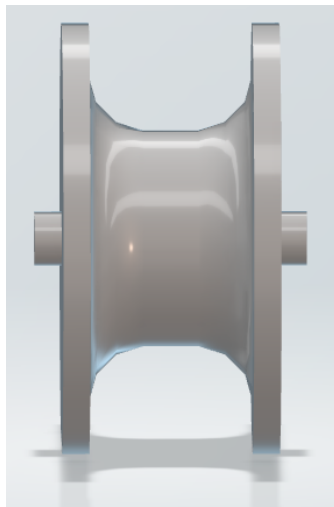


Figura 9.22: CAD Puleggia di Rinvio vista laterale

9.1.12 Dado Autobloccante per Perno Motoriduttore

Il dado autobloccante è stato realizzato, scegliendo dal catalogo Würth, quello più adatto per il perno del motoriduttore selezionato. In particolare, è stato adottato il dado DIN934 BILOC di dimensione M8, avente la funzione di impedire lo svitamento durante il funzionamento del sistema e, di conseguenza, evitare lo sfilamento del rocchetto nel corso delle operazioni di attuazione. Di seguito è riportato il modello CAD del componente.

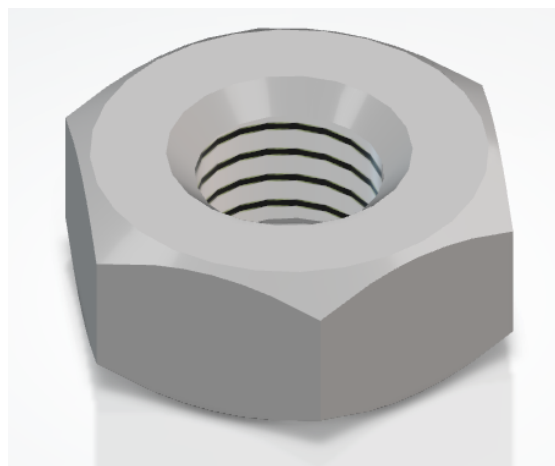


Figura 9.23: CAD Dado Autobloccante

9.1.13 Manicotto a Pressione

Il manicotto a pressione è stato scelto per realizzare il collegamento permanente tra la fune e il rocchetto, impedendone lo sfilamento durante il funzionamento del sistema e garantendo il mantenimento della tensione necessaria alle operazioni di attuazione. Il componente è stato selezionato da catalogo in funzione del diametro della fune utilizzata, pari a 1,5 mm. Nella figura seguente è riportato il relativo estratto del catalogo tecnico.

MANICOTTI DA PRESSARE SU FUNI DI ACCIAIO				
RAME Ovali				
Ø	A	B	C	D
	mm	mm	mm	mm
1	5	2,4	0,65	1,2
1,5	6	3,4	0,75	1,7
2	7	4,4	0,85	2,2
2,5	9	5,4	1,05	2,7
3	11	6,6	1,25	3,3
3,5	13	7,6	1,5	3,8
4	14	8,8	1,7	4,4
4,5	16	9,8	1,9	4,9
5	18	11	2,1	5,5
6	21	13,2	2,5	6,6
6,5	23	14,4	2,7	7,2
7	25	15,6	2,9	7,8
8	28	17,6	3,3	8,8
9	32	19,8	3,7	9,9
10	35	21,8	4,1	10,9
11	39	24,2	4,5	12,1
12	42	26,4	4,9	13,2
13	46	28,4	5,4	14,2
14	49	30,6	5,8	15,3
16	56	35	6,7	17,5
18	63	39,2	7,6	19,6
20	70	43,4	8,4	21,7
22	77	48,6	9,2	24,3
24	84	52,8	10	26,4

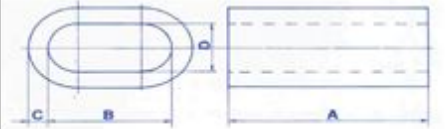


Figura 9.24: Catalogo Manicotto a Pressione [33]

Successivamente è stato realizzato il modello CAD del componente.

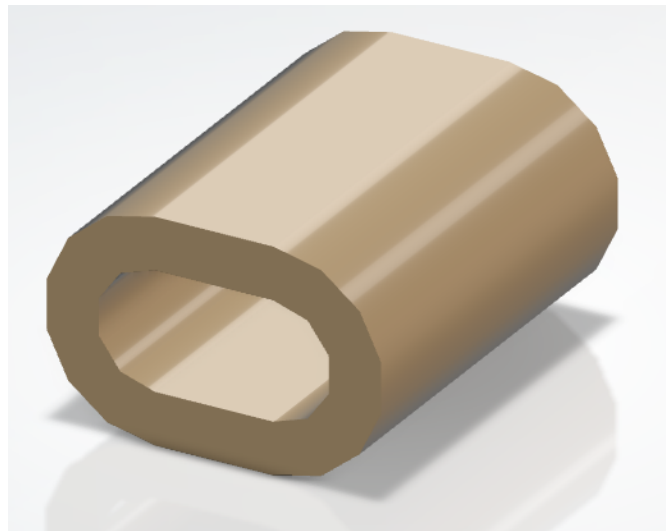


Figura 9.25: CAD Manicotto a Pressione

In una fase preliminare della progettazione era stata valutata anche l'adozione di un capicorda in sostituzione del manicotto a pressione. Tale soluzione avrebbe consentito di bloccare e sbloccare la fune in modo semplice, rendendo possibile lo smontaggio del sistema senza dover sostituire il componente, a differenza del manicotto, che una volta crimpato non può essere riutilizzato. Di seguito è riportata l'immagine del componente tratta dal catalogo.

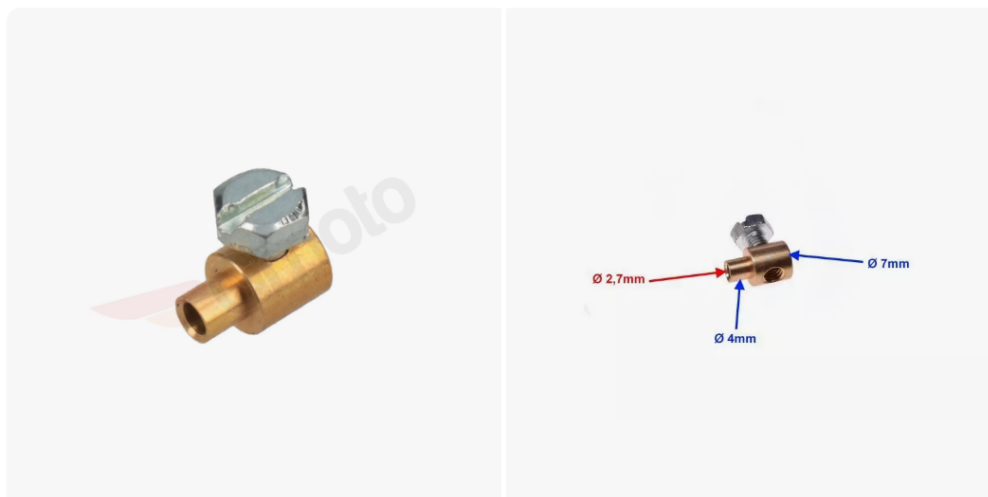


Figura 9.26: Manicotto a Pressione da catalogo[15]

Successivamente è stato realizzato anche il relativo modello CAD e verificato il suo montaggio all'interno del sistema.

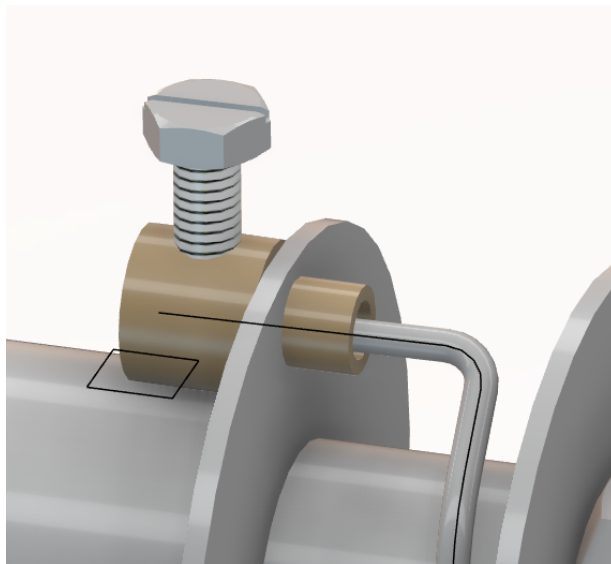


Figura 9.27: CAD Capicorda Montato

Per completezza, si riporta anche il montaggio del manicotto a pressione sul rocchetto.

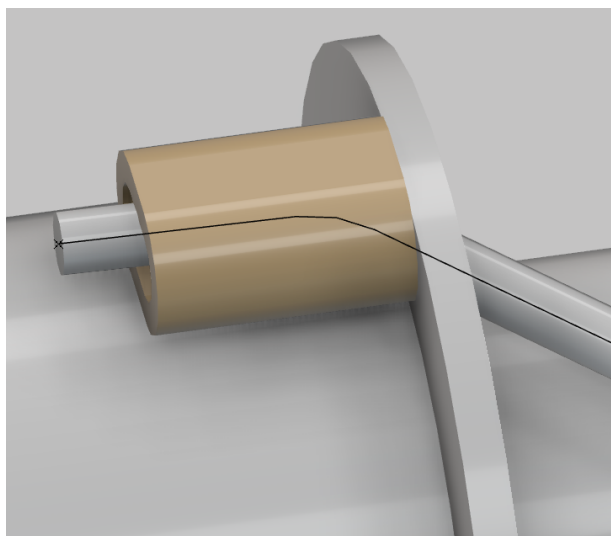


Figura 9.28: CAD Manicotto Montato

Nonostante il capicorda presenti il vantaggio di poter essere smontato e riutilizzato, questa soluzione è stata scartata per le seguenti motivazioni:

- La fune dovrebbe essere piegata secondo la configurazione mostrata in Figura 9.27, con conseguente riduzione della sua vita a fatica;
- Non risulta possibile ricavare una superficie di appoggio piana sul rocchetto mantenendo il foro inclinato, come mostrato in Figura 9.18, rendendo difficoltoso il corretto fissaggio del capicorda;
- Sarebbe necessario aumentare le dimensioni delle flange del rocchetto per ospitare il capicorda, con conseguente incremento dell'ingombro complessivo del sistema.

Alla luce di queste considerazioni, è stata ritenuta più idonea l'adozione del manicotto a pressione, che garantisce un collegamento più compatto, affidabile e maggiormente integrabile con la geometria del rocchetto progettato.

9.1.14 Fondo Vettura

Infine, è stato realizzato un modello CAD semplificato del fondo vettura, con lo scopo di verificare il corretto posizionamento e l'integrazione dei componenti progettati all'interno del sistema di movimentazione della bandella. Di seguito è riportata l'immagine del modello CAD realizzato.

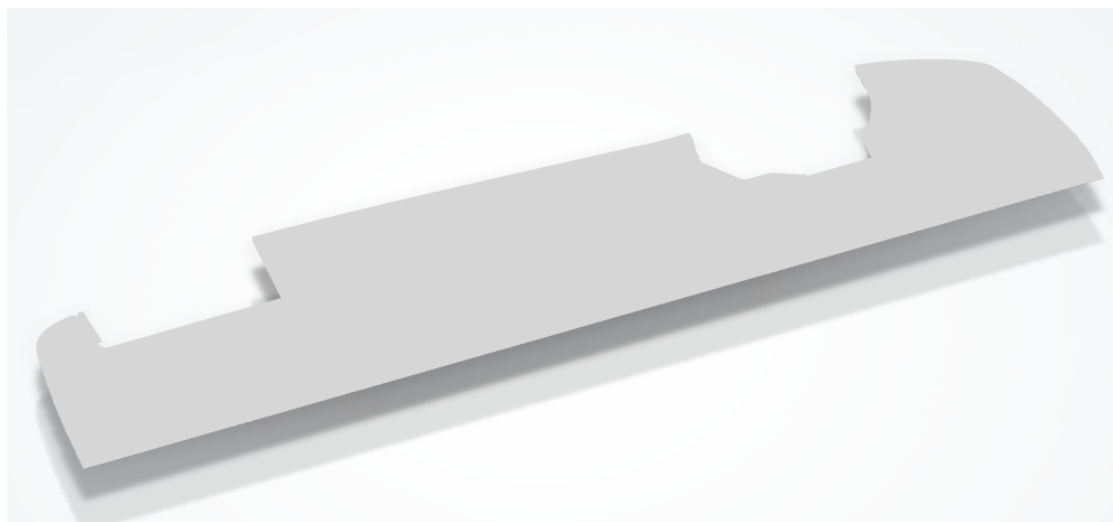


Figura 9.29: CAD Fondo Vettura

Il modello è stato volutamente semplificato, mantenendo esclusivamente le caratteristiche geometriche necessarie alla verifica degli ingombri e dei punti di fissaggio dei componenti progettati. Inoltre, è stato realizzato un apposito foro passante che consente il passaggio della fune dal lato inferiore del fondo vettura al vano destinato ad ospitare il sistema di attuazione. Tale soluzione permette di rinviare la fune verso il box dell'attuatore mediante il sistema di pulegge progettato, garantendo un percorso ordinato e protetto e riducendo al minimo l'esposizione della fune all'ambiente esterno.

Capitolo 10

Assieme Bandella Deformabile

A conclusione della fase di progettazione, vengono riportate di seguito alcune viste dell'assieme CAD completo, ottenuto mediante l'assemblaggio di tutti i componenti descritti nei capitoli precedenti. La Figura 10.1 mostra una vista dall'alto dell'assieme, nella quale è possibile osservare il posizionamento del motoriduttore e del sistema di avvolgimento e svolgimento della fune.

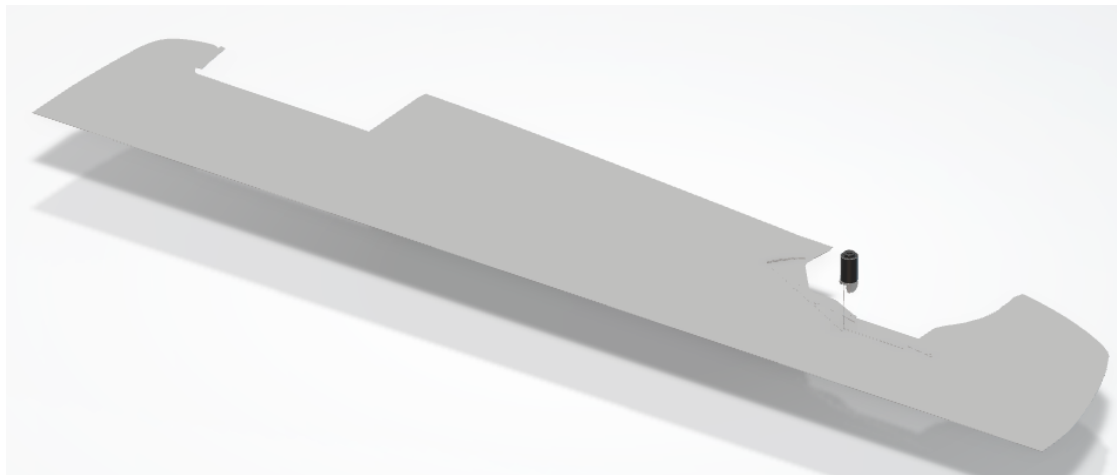


Figura 10.1: Assieme Completo dall'Alto

Nella Figura 10.2 è invece riportata una vista dal basso, che permette di osservare il corretto posizionamento del sistema di movimentazione rispetto al fondo vettura.

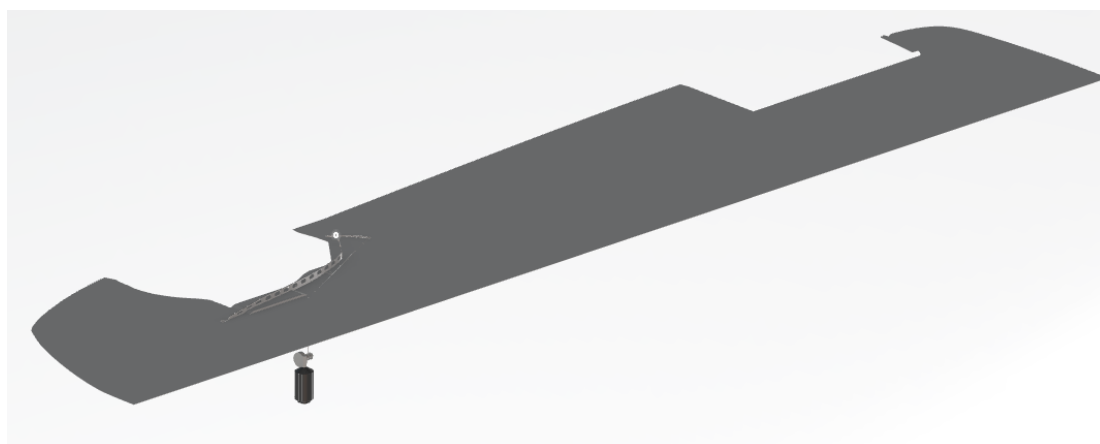


Figura 10.2: Assieme Completo dal Basso

Analizzando più nel dettaglio il sistema, la Figura 10.3 mostra un ingrandimento della bandella deformabile. Come anticipato nei capitoli precedenti, essa è posizionata in corrispondenza della giunzione tra la parte fissa e quella smontabile del fondo vettura, consentendo l'integrazione del sistema senza modificare in modo significativo l'architettura del componente originale.

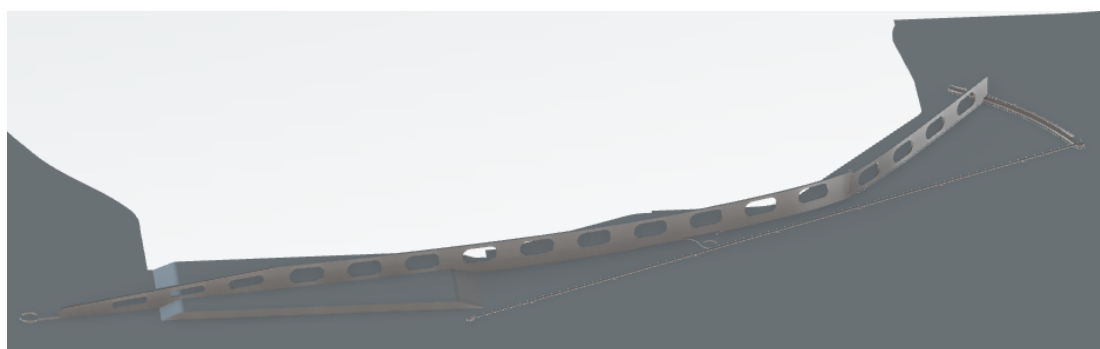


Figura 10.3: Assieme Bandella

La Figura 10.4 evidenzia la parte terminale della bandella, dove è installato il perno con pattino guida. Quest'ultimo scorre all'interno della guida mantenendo il corretto allineamento della parte mobile durante l'attuazione. Si specifica che la bandella non percorrerà l'intera guida, in quanto non risulta necessario per ottenere le due curvature desiderate. Nei due fori presenti alle estremità del perno vengono invece collegati la fune e la molla: la prima fornisce la forza necessaria alla movimentazione della bandella, mentre la seconda favorisce il ritorno nella

configurazione di riposo e il mantenimento dell'equilibrio statico del sistema. La molla viene opportunamente dimensionata e tarata in modo da bilanciare il carico aerodinamico agente sulla bandella nella configurazione di default (idle). Di conseguenza, durante la fase di attuazione il motoriduttore deve vincere la forza elastica sviluppata dalla molla.

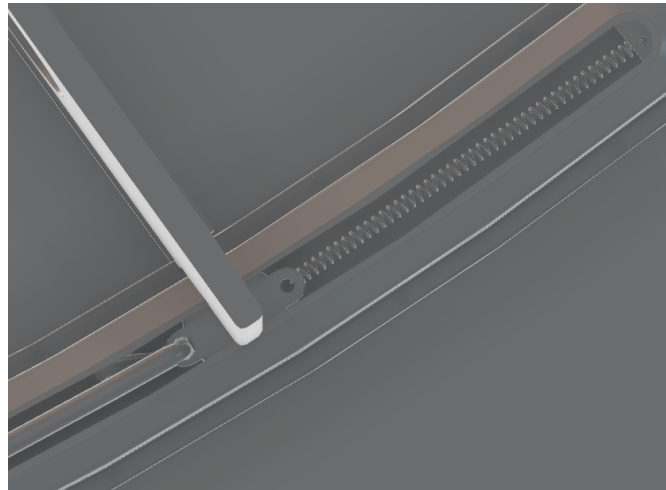


Figura 10.4: Assieme Perno, Molla e Fune

Nella Figura 10.5 è riportato un dettaglio della guida, all'interno della quale è stata ricavata una sede dedicata all'alloggiamento della puleggia di rinvio. Tale componente permette di reindirizzare la fune all'interno del canale ricavato nella guida, assicurandone un corretto instradamento e riducendo gli attriti durante il funzionamento.

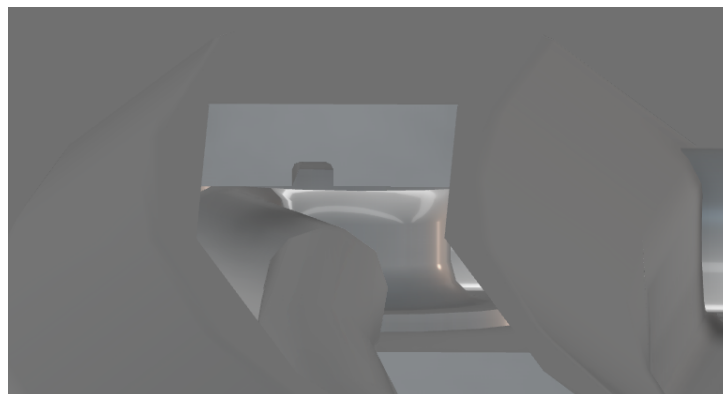


Figura 10.5: Assieme Guida e Puleggia

Successivamente, la fune viene rinviata verso una seconda puleggia, mostrata nella Figura 10.6. Quest'ultima è montata sul relativo supporto di fissaggio, solidale al fondo vettura, e consente di convogliare la fune verso il box contenente il sistema di attuazione, previsto nel vano motore, in prossimità del paraframma. Il passaggio della fune avviene attraverso il foro realizzato nel fondo vettura.

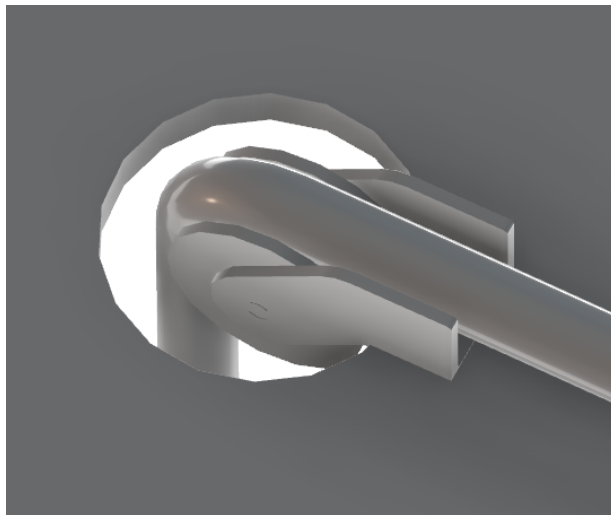


Figura 10.6: Assieme Fissaggio e Puleggia su Fondo

La Figura 10.7 mostra invece la battuta della bandella, fissata al fondo vettura mediante due elementi di collegamento. Tale componente svolge due funzioni fondamentali: agisce come finecorsa meccanico della parte mobile e consente di ricreare un profilo aerodinamico continuo quando la bandella si trova nella configurazione curva, riducendo il dislivello tra la bandella stessa e il fondo vettura.

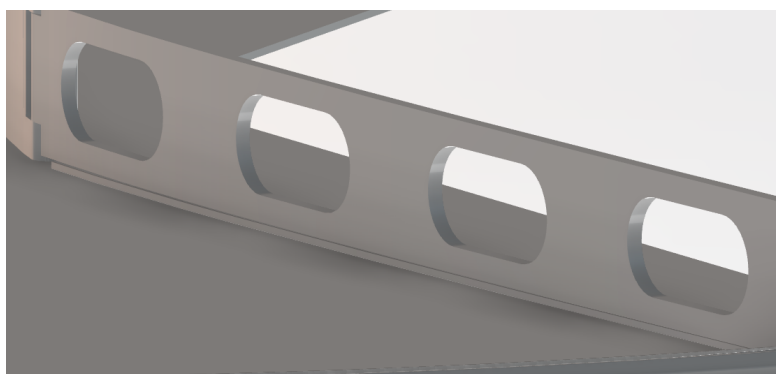


Figura 10.7: Assieme Bandella e Battuta

Infine, la Figura 10.8 riporta il dettaglio del collegamento tra la fune e il motoriduttore. Il rocchetto viene accoppiato all'albero del motoriduttore mediante un accoppiamento scanalato e successivamente bloccato tramite il dado autobloccante preso da catalogo Würth e realizzato. La fune viene fatta passare attraverso il foro inclinato ricavato sul rocchetto, orientato secondo il verso di avvolgimento, così da limitare le sollecitazioni di flessione e preservarne la durata nel tempo. Il fissaggio definitivo viene realizzato mediante il manicotto a pressione, selezionato da catalogo e integrato nel progetto. Quest'ultimo rimane appoggiato sulla superficie esterna del rocchetto, evitando interferenze con gli altri componenti durante il funzionamento del meccanismo.

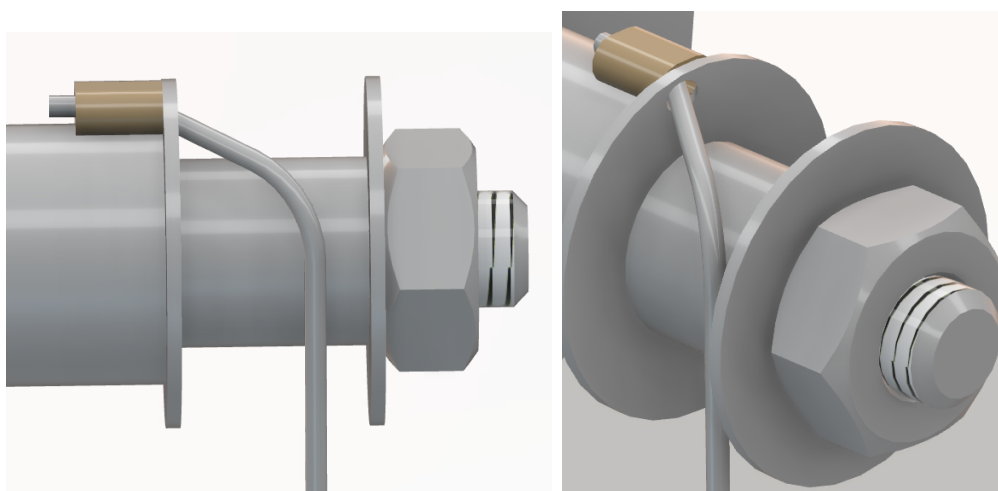


Figura 10.8: Assieme Motoriduttore, Rocchetto, Dado e Manicotto

In conclusione, il sistema progettato risulta tecnicamente realizzabile e facilmente adattabile a differenti configurazioni di vettura. Il meccanismo consente infatti un controllo completo della curvatura della bandella, permettendo di modificare il comportamento aerodinamico del fondo in funzione delle condizioni di guida. In particolare, durante la percorrenza dei rettilinei è possibile ridurre la resistenza aerodinamica mediante il parziale raddrizzamento della bandella, ottenendo un miglioramento delle prestazioni e della velocità massima. Al contrario, nelle fasi di percorrenza in curva e durante la frenata, la bandella può essere riportata nella configurazione curva, incrementando la deportanza e migliorando rispettivamente la stabilità laterale e l'efficacia della frenata.

Ringraziamenti

A chi ha reso possibile questo percorso, contribuendo in modo silenzioso ma decisivo alla sua realizzazione.

Alla mia famiglia, che ha rappresentato il punto fermo in ogni fase di questo cammino. La vostra capacità di sostenere senza invadere, di incoraggiare senza forzare e di credere senza condizioni ha creato lo spazio necessario per crescere, imparare e superare ostacoli che sembravano insormontabili. Ogni pagina di questo lavoro porta con sé la traccia della vostra presenza discreta ma fondamentale.

Agli amici, che hanno saputo trasformare la fatica in condivisione e l'incertezza in dialogo. Grazie per aver accompagnato questo viaggio con ascolto, ironia e vicinanza autentica. Nei momenti più complessi siete stati la prova che la leggerezza non è superficialità, ma una forma preziosa di sostegno. Avete reso più umano un percorso che spesso richiede solitudine e concentrazione.

Ai professori che hanno guidato la mia formazione con rigore e sensibilità. La vostra capacità di trasmettere conoscenza, di stimolare domande e di aprire prospettive nuove ha dato direzione e profondità a questo lavoro. Ogni confronto, ogni suggerimento e ogni critica costruttiva ha contribuito a rendere questo risultato più consapevole e più solido.

A tutti coloro che, in modi diversi, hanno incrociato questo cammino e lo hanno arricchito con gesti, parole o semplici presenze. Questa tesi è il frutto di un percorso individuale, ma non solitario: è la somma di relazioni, esperienze e influenze che hanno accompagnato la mia crescita personale e accademica.

Bibliografia

- [1] Ansys. Nitinol characteristics, 2020. <https://innovationspace.ansys.com/certifications/wp-content/uploads/sites/6/2021/07/Section-2.3-Nitinol-Characteristics-new-template.pdf>.
- [2] M. Ashir, J. Hindahl, A. Nocke, and C. Cherif. Development of an adaptive morphing wing based on fiber-reinforced plastics and shape memory alloys. *Articolo*, 2020.
- [3] J. F. Bartolomé, L. E. Fuentes-Cobas, Álvaro García, A. Jacas, and L. Pardo. Cyclic mechanical fatigue lifetime of bi0.5na0.5tio3-based eco-piezoceramics. *Articolo*, 2021.
- [4] M. Bashir, P. Rajendran, C. Sharma, and D. Smrutiranjana. Investigation of smart material actuators and aerodynamic optimization of morphing wing. *Articolo*, 2016.
- [5] M. Bashir, S. Merryisha, P. Rajendran, and M. S. Z. Abidin. Magnetostrictive smart materials review for morphing aircraft. *Articolo*, 2019.
- [6] M. Bashir, S. Merryisha, P. Rajendran, and M. S. Z. Abidin. Magnetostrictive smart materials review for morphing aircraft. *Articolo*, 2019.
- [7] M. Bashir, C. F. Lee, and P. Rajendran. Shape memory materials and their applications in aircraft morphing: an introspective study. *Articolo*, 2024.
- [8] M. Battaglia, A. Sellitto, A. Giamundo, M. Visone, and A. Riccio. Shape memory alloys applied to automotive adaptive aerodynamics. *Articolo*, 2023.
- [9] B. Berton. Shape memory alloys application: Trailing edge shape control. *Articolo*, 2006.
- [10] C. Blog. The elephants of materials science: Smas never forget their shape, 2018. <https://www.comsol.it/blogs/the-elephants-of-materials-science-smas-never-forget-their-shape>.

- [11] Chimica-online. Piezoelettricità e materiali piezoelettrici, 2026. <https://www.chimica-online.it/download/piezoelettricit.htm>.
- [12] Chemicamo. Polimeri elettroattivi, 2025. <https://www.chimicamo.org/chimica/polimeri-elettroattivi/>.
- [13] G. Costanza and M. E. Tata. Shape memory alloys for aerospace, recent developments, and new applications: A short review. *Articolo*, 2020.
- [14] G. Eggeler, E. Hornbogen, A. Yawny1, A. Heckmann, and M. Wagner. Structural and functional fatigue of niti shape memory alloys. *Articolo*, 2003.
- [15] Gmoto. Gancio di emergenza per cavo frizione e acceleratore 7 mm - 135934, 2026. <https://gmotoshop.it/gancio-di-emergenza-per-cavo-frizione-e-acceleratore-7-mm,135934.html>.
- [16] T. L. Grigorie and R. M. Botez. A self tuning intelligent controller for a smart actuation mechanism of a morphing wing based on shape memory alloys. *Articolo*, 2023.
- [17] O.-V. Grosu, L.-D. Milici, C. Bejenar, and M. Pavăl. Development results of a nitinol (niti) angular actuator. *Articolo*, 2025.
- [18] W. M. Huang, Z. Ding, C. C. Wang, J. Wei, Y. Zhao, and H. Purnawali. Shape memory materials. *Rivista*, 13, 2010.
- [19] W.-R. Kang, E.-H. Kim, M.-S. Jeong, I. Lee, and S.-M. Ahn. Morphing wing mechanism using an sma wire actuator. *Articolo*, 2012.
- [20] D. Karagiannis. Airfoil morphing based on sma actuation technology. *Articolo*, 2014.
- [21] M.-S. Kim, J.-K. Heo, H. Rodrigue, H.-T. Lee, S. Pané, M.-W. Han, and S.-H. Ahn. Shape memory alloy (sma) actuators: The role of material, form, and scaling effects. *Articolo*, 2023.
- [22] MatWeb. Nitinol - niti shape memory alloy; high-temperature phase, 2026. <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=de9dd08433714f698d513766dccea437>.
- [23] D. Narvaez and B. Newell. *A Review of Electroactive Polymers in Sensing and Actuator Applications*. Shuxiang Dong, 2025.

- [24] A. G. Olabi and A. Grunwald. Design and application of magnetostrictive “ms” materials. *Articolo*, 2008.
- [25] OSLV. Motoriduttore per tergicristallo mrt62-31, 2026. <https://www.oslv.com/prodotti/motoriduttore-per-tergicristallo-mrt62-31/24-22.html>.
- [26] Z. PingWu and H. Wang. Investigation of fatigue life and active vibration control via piezoelectric elements in vehicle suspension. *Articolo*, 2025.
- [27] A. Riccio, A. Sellitto, and M. Battaglia. Morphing spoiler for adaptive aerodynamics by shape memory alloys. *Articolo*, 2024.
- [28] S. Rodinò, E. M. Curcio, D. Perrone, T. Castiglione, and C. Maletta. Experimental performance evaluation of shape memory alloybased active composites under aerodynamic loading. *Articolo*, 2024.
- [29] S. Rosset, O. A. Araromi, S. Schlatter, and H. R. Shea. Fabrication process of silicone-based dielectric elastomer actuators. *Rivista*, 14, 2016.
- [30] Saes. Shape memory alloys, 2026. <https://www.saesgetters.com/advanced-materials/shape-memory-alloys/>.
- [31] S. Sathyamoorthy, S. Raja, and A. J. Stanley. Piezoelectric based adaptive wing for flow control. *Articolo*, 2006.
- [32] N. Simone. Studio di una compliant morphing wing attuata tramite shape memory alloys, 2019-2020. https://thesis.unipd.it/retrieve/b6dc6dc9-354d-4341-8f29-6b5bcadc86bf/Nordera_Simone_1179103.pdf.
- [33] A. s.r.l. Manicotti da pressare su funi d'acciaio in rame, 2026. https://www.anca-srl.it/2_manicotti_ovale_rame.html.
- [34] J. Sun, Q. Guan, Y. Liu, and J. Leng. Morphing aircraft based on smart materials and structures: A state-of-the-art review. *Articolo*, 27, 2016.
- [35] TdVIB. Terfenol-d, 2026. <http://tdvib.com/terfenol-d/>.
- [36] D. M. Venturi. Le leghe in nichel-titanio (ni-ti), 2026. <https://www.endodonziamauventuri.it/Le%20leghe%20in%20nichel-titanio.htm>.
- [37] S.-C. Woo and N. S. Goo. Effect of electric cyclic loading on fatigue cracking of a bending piezoelectric hybrid composite actuator. *Articolo*, 2008.

- [38] Würth. Dado autobloccante din34 biloc, 2026. <https://eshop.wuerth.it/Categorie-di-prodotti/DIN-934-BILOC-acciaio-zincato/31143512122836.cyid/3114.cgid/it/IT/EUR/>.