



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

“Autovettura di formula SAE: analisi e costificazione di sistema di sterzo e sistema frenante”

“Formula SAE car: analysis and costing of steering system and braking system”

Relatore:

Chiar.mo Prof. Michele Germani

Tesi di Laurea di:

Alessandro Moscardi

Anno Accademico 2022/2023

Indice

Introduzione	5
La Formula SAE	6
1.1 La competizione.....	6
1.2 Prove statiche	7
1.3 Prove dinamiche	9
Costificazione	11
2.1 Obiettivi	11
2.2 Procedura secondo il regolamento	11
2.2.1 BOM	11
2.2.2 DBOM	11
2.2.3 CBOM.....	12
La Metodologia	13
3.1 Fase 1.....	13
3.1.1 LeanCOST®	13
3.2 Fase 2.....	14
3.2.1 Stipendio degli operai	15
3.3 Fase 3.....	16
3.3.1 Assemblaggi.....	16
Sistema di sterzo	Errore. Il segnalibro non è definito.
4.1 BOM.....	18
4.2 Volante	21
4.2.1 Guscio del volante.....	22
4.2.2 Imbottiture del volante	23
4.3 Colonna di sterzo	24
4.3.1 Adattatore dello sgancio rapido	26
4.3.2 Supporto della coppia conica.....	26
4.4 Cremagliera di sterzo.....	27
Sistema Frenante	30
5.1 Anteriore.....	31
5.1.1 Pinze freno	33
5.2 Posteriore	34
5.3 Barra di bilanciamento	35
Processi manifatturieri analizzati	37
6.1 Materiali compositi.....	37

6.2 Fibra di Carbonio	37
6.2.1 Le Fibre.....	37
6.2.2 Le Matrici.....	39
6.2.3 Disposizione delle Fibre.....	39
6.2.4 Formatura e resinatura	41
6.2.5 Stampaggio in autoclave	42
6.3 Stampa 3D	44
6.3.1 FDM	45
6.3.2 SLM	48
Conclusioni	51

Introduzione

Il seguente elaborato fa riferimento ad un periodo di tirocinio svolto, tra marzo e giugno 2023, presso il "Polimarche", squadra studentesca partecipante alla competizione della Formula SAE. Questo specifico anno è stato di transizione in quanto si è passati dalla Peacock 4, con motore termico (il monocilindrico 690cc di produzione KTM), alla Peacock 5 alimentata da un motore elettrico. Questo cambiamento ha portato ad uno stravolgimento del progetto di tutto il mezzo, sia in termini di adattamento del nuovo motore, sia in termini di distribuzione dei pesi come conseguenza delle pesanti batterie.

Dei vari reparti sono stato assegnato a quello "Static", in particolare il mio lavoro è stato incentrato nel processo della costificazione, di cui nei capitoli successivi verranno mostrati i dettagli. Per quanto avrei voluto far parte della progettazione, forse più adatta ad un ingegnere meccanico, l'esperienza è stata sicuramente molto interessante in quanto mi ha dato modo di analizzare in dettaglio tutte le voci di costo nella produzione di componenti meccanici, dalle lavorazioni affidate a macchine agli assemblaggi manuali. Questa esperienza, inoltre, mi ha dato modo per la prima volta di lavorare in un gruppo ampio, ed in un contesto in cui la chiave del successo è la comunicazione tra i vari reparti, proprio come accade nella realtà lavorativa in cui mi troverò tra qualche anno, terminati gli studi.

La Formula SAE

1.1 La competizione

La Formula SAE (o Formula Student) è una competizione universitaria internazionale di design ingegneristico, proposta inizialmente dalla Society of Automotive Engineers (SAE). Istituita nel 1981 negli stati uniti, si è diffusa in Europa nei primi anni 2000', con svariati eventi annuali, organizzati direttamente dalla SAE o dalle varie associazioni nazionali di ingegneri e tecnici dell'automobile, con lo scopo di dare agli studenti universitari la possibilità di confrontarsi in una competizione che dia loro l'opportunità di mettere in pratica quanto appreso durante il proprio percorso di studi e che risulti quanto più appetibile e interessante. La Formula SAE crea un evento universitario regolamentato, che porta benefici sia per gli studenti che per le aziende: insegna a lavorare in gruppo, ed a rispettare i tempi di progettazione; prepara gli studenti alla reale vita lavorativa; incoraggia la ricerca e l'innovazione guardando anche ai costi; ed aumenta le possibilità di lavoro.



Figura 1-1 Panoramica con tutti i teams della Formula Student East

Il concetto alla base della Formula SAE è che un'azienda

manifatturiera fittizia incarichi un team di progettazione di studenti di sviluppare una piccola auto da corsa in stile Formula. Il prototipo dell'auto da corsa deve essere valutato per il suo potenziale come prodotto di serie. Il target di mercato per l'auto da corsa sono i piloti amatori di autocross, una forma di competizione in cui le auto vengono guidate su un percorso a ostacoli, in genere delimitato da coni in un parcheggio vuoto. Ogni squadra di studenti progetta, costruisce e testa un prototipo in base a una serie di regole, il cui scopo è sia garantire la sicurezza in pista (le auto sono guidate dagli stessi studenti) sia promuovere la soluzione intelligente dei problemi. Esistono due divisioni: la CV (combustion vehicle) dedicata alle vetture con motore termico; e la EV (electric vehicle) dedicata alle macchine alimentate da motore elettrico, queste si differenziano solo per le regole relative ai propulsori. Il prototipo dell'auto da corsa viene giudicato in una serie di eventi diversi: questi si distinguono in prove dinamiche e prove statiche.

1.2 Prove statiche

Le prove statiche hanno come obiettivo quello di mostrare le modalità che ha adottato il team per realizzare il prototipo, valutandone il design, il business plan, ed i costi:

-Il "Engineering Design Event", ossia la presentazione del progetto della vettura, ha lo scopo di valutare le scelte e gli sforzi progettuali per mezzo di una serie di domande poste dai commissari, alle quali andrà risposto giustificando ogni scelta e mostrando test, dati e validazioni tecniche.



Figura 1-2 presentazione del progetto della vettura

-Nel “Business plan presentation event” il team deve mostrare l’abilità di sviluppo e di scrittura di un business plan ampio ed esaustivo che mostri il potenziale di investimento per gli sponsor. L’evento è giudicato da esperti del mondo dell’automotive impegnati in diversi settori, bisogna quindi prepararsi a domande da parte di ingegneri ma anche da membri dell’esecutivo rappresentante le varie aree di una società, inclusi manager di produzione, marketing e finanza.



Figura 1-3 presentazione del business plan

-Nel “Cost and manufacturing event” l’obiettivo è quello di valutare non solo il costo del prototipo ma anche la capacità del team di motivare le scelte le scelte di progettazione in base al budget a disposizione. È quindi compito del team capire quali sono le tecniche manifatturiere più adatte in base ai costi e alla qualità, e di scegliere

quali componenti vale la pena progettare internamente o acquistare già fatti.



Figura 1-3 presentazione dei costi

L'ultimo punto è stato il fulcro del mio lavoro, quindi il tema principale di questo elaborato.

1.3 Prove dinamiche

Queste hanno lo scopo di valutare le prestazioni della vettura e comprendono prove di accelerazione, slalom tra ostacoli ed una prova di durata su un percorso di 22km. Purtroppo quest'anno, a causa delle difficoltà legate al passaggio al motore elettrico, il Team non è riuscito a completare il mezzo in tempo per portarlo alle varie competizioni per cui ha concentrato tutti i suoi sforzi nelle prove statiche.



Figura 1-4 prove dinamiche, slalom tra i coni

Costificazione

2.1 Obiettivi

L'obiettivo della Presentazione della costificazione è dimostrare la comprensione acquisita riguardo il processo di produzione ed i costi associati alla costruzione di un prototipo di macchina da corsa. Questo richiede di scegliere tra economicità e complessità, produzione o acquisto di componenti commerciali, e richiede di capire la differenza tra la produzione in serie e quella prototipale.

2.2 Procedura secondo il regolamento

Da regolamento bisogna produrre tre documenti per esporre il lavoro di costificazione:

2.2.1 BOM

(bill of material)

Trattasi di un elenco di tutte le parti componenti il veicolo nel suo intero. Questo deve essere diviso in "sistemi" predefiniti (sistema frenante, gruppo elettrico, sistema motore, sistema di sterzo, etc...), quindi in "insiemi" di parti, anch'essi definiti dal regolamento. Da ultimo gli insiemi vanno scomposti nelle loro parti, la definizione delle quali è a carico del Team.

2.2.2 DBOM

(detailed bill of material)

Questo è un elenco maggiormente dettagliato che deve riportare tutti i processi meccanici di produzione che sono stati svolti per la realizzazione del componente. Il documento deve includere gli strumenti e/o i macchinari utilizzati ma non i costi relativi. Per ogni componente devono essere riportati i materiali necessari e tutti i processi produttivi, i quali a loro volta sono da dividere in “lavorazioni” ed “assemblaggi”. Nel caso di componenti commerciali acquistati è necessario specificare solo il processo di assemblaggio. Il DBOM deve essere prodotto solamente per due specifici sistemi, che quest’anno sono stati il sistema di sterzo ed il sistema frenante.

2.2.3 CBOM

(costed bill of material)

In questo documento vanno riportate, per ogni componente progettato dal team, quindi individuato dalla dicitura “make”, tutte le voci di costo relative all’acquisto dei materiali, alle lavorazioni e agli assemblaggi, includendo le spese di mantenimento dei macchinari e quindi delle utenze necessarie al loro funzionamento. Nel caso di componenti commerciali acquistati, individuati dalla dicitura “buy”, basta specificare il prezzo di vendita e quello per il montaggio. Vanno invece escluse dalle voci di costo tutte le spese di ricerca e sviluppo, nonché le spese degli affitti degli spazi di lavoro. Inoltre, non vanno considerati costi di acquisto degli attrezzi e dei macchinari, né le spese di ammortamenti degli stessi. Anche il CBOM va prodotto solamente per il sistema di sterzo ed il sistema frenante.

La Metodologia

3.1 Fase 1

Dai progetti fatti sono stati raccolti i materiali necessari alla produzione dei pezzi e sono stati segnati i prezzi indicati dai fornitori. Poi, tramite il software “LeanCOST”, sono state individuate le lavorazioni più convenienti per ottenere le geometrie dei componenti.

3.1.1 LeanCOST®

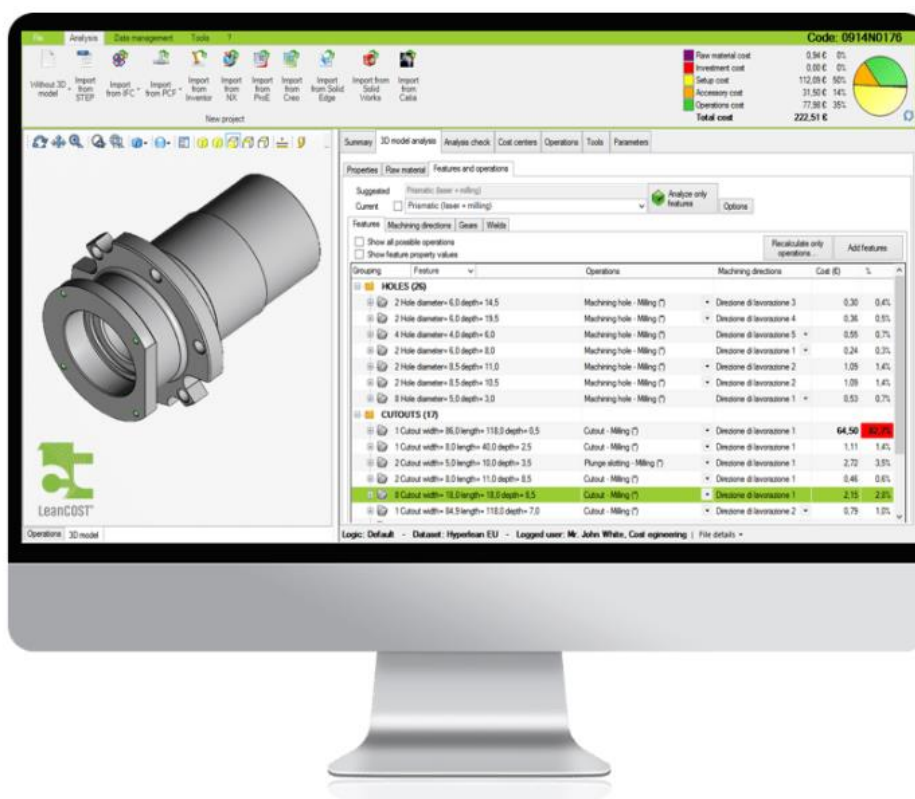


Figura 3-1 interfaccia di LeanCOST

LeanCOST è un software per la costificazione dei prodotti e per la generazione automatica dei preventivi, sviluppato dal dipartimento di

Meccanica dell'Università Politecnica delle Marche. Il programma calcola i costi di componenti meccaniche, come somma dei costi della materia prima, delle lavorazioni e del setup. Supporta i più noti sistemi CAD 3D in commercio, ed è quindi in grado di analizzare ed estrarre automaticamente le caratteristiche geometriche del modello ed associare un ciclo di lavorazione fornendo come output una stima dei tempi e dei costi di produzione. Ricevuto il file CAD, il programma procede con un'analisi automatica della geometria del prodotto, dalla quale è capace di effettuare un riconoscimento intelligente della tecnologia produttiva del componente quali macchine da utilizzare e operazioni da svolgere. Inoltre, permette di simulare i tempi ed i costi produttivi di scenari alternativi in funzione delle quantità, delle macchine a disposizione e della fattibilità. Questi risultati permettono anche di ricavare la quantità ideale di pezzi da produrre per minimizzare i costi delle lavorazioni a seconda del macchinario utilizzato. Il software, mostrato in figura 3-1, è uno strumento molto utile per la costificazione ma è stato necessario cambiare i valori di diverse voci per adattarle alla nostra realtà produttiva. In particolare, nella scelta dei macchinari da utilizzare, sono state favorite lavorazioni più economiche e comuni a discapito di altre molto precise ma dal costo ben più elevato, cercando il più possibile di utilizzare sempre gli stessi macchinari per non esagerare nella varietà.

3.2 Fase 2

Il software lavora calcolando i costi dei macchinari in funzione del costo dell'energia, del numero di operai per macchina, e quindi del costo degli operai, ebbene tutti questi dati sono stati ricercati e verificati. In particolare, si è ipotizzato un operaio per macchina, coerente con l'ipotesi di una produzione prototipale in analisi, e si è assunto uno stipendio medio unico, come mostrato nella tabella di figura 3-2.

Item	Additive manufacturing	Precision lathe	3 axis machine	5 axis machine	Low power water cut machine	External grinding machine	Vertical honing machine	Beam cutting machine	Bending machine	Manual milling machine	
Labour	140,64 €				134,80 €			121,60 €			
Number of shifts per day						1					
Working hours per shift						8					
Number of machine operators per machine						1					
Hourly rate class 4 worker	17,58 €				16,85 €			15,20 €			
Energy	19,501 €	32,333 €	88,915 €	78,811 €	90,936 €	46,478 €	78,811 €	10,104 €	10,104 €	24,250 €	
Rated power	9,65 kWh	16 kWh	44 kWh	39 kWh	45 kWh	23 kWh	39 kWh	5 kWh	5 kWh	12 kWh	
Cost per kWh	0,421 €	0,421 €	0,421 €	0,421 €	0,421 €	0,421 €	0,421 €	0,421 €	0,421 €	0,421 €	
Performance capacity utilization	60%										
Maintenance	12,08 €	4,12 €	1,32 €	9,88 €	2,40 €	5,49 €	1,04 €	0,55 €	0,00 €	0,44 €	
Maintenance costs	23.191,9 €	7906,3 €	2530,0 €	18975,2 €	4612,0 €	10541,7 €	2002 €	1054,7 €	4,099 €	843,3 €	
Other overhead	20,83 €				13,02 €			20,83 €		1,30 €	2,60 €
Other overhead costs	40.000,0 €				25000 €			40.000,0 €	2500 €	5000 €	5000 €
Machine efficiency	85%										
Total	164,10 €	183,18 €	228,89 €	227,59 €	225,95 €	184,14 €	214,49 €	225,95 €	127,084 €	139,48 €	

Figura 3-2 costo orario macchinari

3.2.1 Stipendio degli operai

Svolgendo una ricerca si è risaliti ad un documento, mostrato in figura 3-3, dal sito del Ministero del Lavoro e delle Politiche Sociali che indica il costo medio orario per il personale dipendente da imprese dell'industria metalmeccanica privata e della installazione di impianti.

	IMPIEGATI							GIUGNO 2022	
	D1	D2	C1	C2	C3	B1	B2	B3	A1
A-Elementi retributivi annuali									
Ribattuzione tabellare	18.108,84	20.081,40	20.515,20	20.940,00	22.405,68	24.047,88	25.799,40	28.002,64	29.402,64
scatti biennali (3 scatti)	777,24	901,80	901,80	963,00	1.067,04	1.167,48	1.310,76	1.474,56	1.474,56
Elemento perequativo	485,00	485,00	485,00	485,00	485,00	485,00	485,00	485,00	485,00
TOTALE "A"	19.371,08	21.468,20	21.902,00	22.397,00	23.957,72	25.700,36	27.595,56	30.762,20	31.452,20
B-Oneri aggiuntivi									
Festività retribuite (n.3)	181,76	201,95	206,12	210,89	226,20	242,68	260,92	291,40	298,04
Tredicesima mensilità*	1.573,84	1.748,60	1.784,75	1.826,00	1.958,56	2.101,28	2.259,18	2.523,10	2.580,60
TOTALE "B"	1.755,60	1.950,55	1.990,87	2.036,89	2.184,76	2.343,96	2.520,10	2.814,50	2.878,64
C-Oneri previd. e assist.									
Inps (20,30%)	6.302,79	6.875,74	7.024,95	7.173,79	7.684,24	8.233,81	8.814,94	9.838,12	10.079,53
Inail (0,417%)	933,13	1.034,34	1.055,39	1.079,18	1.155,07	1.238,64	1.330,11	1.482,99	1.516,30
TOTALE "C"	7.235,90	7.910,09	8.079,23	8.252,97	8.840,21	9.472,45	10.171,95	11.341,11	11.595,83
D-Altri Oneri									
Trattamento fine rapporto	1.520,01	1.698,80	1.733,92	1.773,99	1.902,78	2.041,43	2.194,83	2.451,24	2.507,10
Rivalutazione T.F.R.(4,3592%)	239,95	266,60	272,11	278,40	298,61	320,37	344,44	384,68	393,45
Fondo COMETA (adesione al 40%)	156,94	174,04	177,80	181,56	194,44	208,41	223,59	249,62	255,60
Contributo di solidarietà L.166/91 (10% del Fondo)	15,69	17,40	17,78	18,16	19,44	20,84	22,36	24,96	25,56
Assistenza Sanitaria Integ. + Contrib. di solidarietà 10%	171,60	171,60	171,60	171,60	171,60	171,60	171,60	171,60	171,60
Flexible Benefits	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00
TOTALE "D"	2.313,20	2.528,44	2.572,20	2.622,99	2.796,87	2.962,65	3.156,83	3.482,10	3.559,31
COSTO ANNUO	30.579,79	33.857,27	34.976,21	35.305,56	37.795,55	40.479,83	43.044,63	48.399,91	49.479,06
COSTO MEDIO ORARIO (lavoratori tempo ind.az)	18,11	21,16	21,59	22,07	23,62	25,30	27,15	30,25	30,82

Ore annue teoriche (40 ore x 52,2 settimane)	2088	
Ore annue mediamente non lavorate così suddivise:		
ferie (20 giorni)	160	
festività (10 giorni)	80	
permessi annui retribuiti	104	
assemblee, permessi sindacali, diritto allo studio	25	
malattia, infort., maternità	103	
permesso: gennaio 01 - 01/04/94 a succ. modif. (3 giorni)	8	
permesso ex art. 1,COM.	8	
Totale ore non lavorate	488	
Ore annue mediamente lavorate	1600	

Nell'ipotesi di utilizzo di lavoratori a turno si applicheranno le seguenti maggiorazioni sul costo orario:

- 1) Lavorazioni a turno di 24 ore per 7 giorni: 9,29%
- 2) Lavorazioni a turno di 24 ore per 5 giorni: 5,36%
- 3) Lavorazioni a turno di 16 ore per 5 giorni (lunedì-venerdì): 7,50%
- 4) Lavorazioni a turno di 16 ore per 6 giorni (lunedì-venerdì): 9,75%
- 5) Lavorazioni a turno di 16 ore per 6 giorni (lunedì-sabato): 8,23%
- 6) Lavorazioni a turno di 16 ore per 6 giorni (lunedì-sabato): 9,75%

Figura 3-3 Costo medio orario per il personale dipendente metalmeccanico

Da questa tabella si evince che esistono diversi livelli di operai Metalmeccanici con mansioni e responsabilità diverse fra loro. A seconda della macchina da affiancare o della lavorazione manuale da svolgere il costo della manodopera varierà. Si sono quindi scelte tre categorie di interesse e se ne sono individuati gli stipendi medi annui lordi, come mostrato nella tabella di figura 3-4.

Italian Workers hourly rate estimation based on CCNL contract			
Item	Worker's category		
	CAT 4 : CNC machines	CAT 3: semiautomatic machines	CAT 2: manual operations and machines
Annual normal remuneration	21.251 €	20.371 €	18.370 €
13 th month salary	1.771 €	1.698 €	1.531 €
Contributions (INPS+INAIL)	5166 €	4952 €	4466 €
Employee severance	1.771 €	1.698 €	1.531 €
Total A euro →	29.959 €	28.719 €	25.898 €
Total B hours → Total annual hours considering vacation, absenteeism lump-sum, PAR/ROL	1704	1704	1704
A/B euro → Hourly rate by workers categories	17,58 €	16,85 €	15,20 €

Figura 3-4 costo medio operai diviso in tre categorie

3.3 Fase 3

Da ultimo sono stati calcolati, con l'ausilio di un foglio Excel, i costi delle lavorazioni speciali e degli assemblaggi. Le lavorazioni speciali sono quelle lavorazioni che richiedono delle procedure particolari e che vanno gestite quasi interamente manualmente da operai, se ne vedrà qualche esempio più avanti nell'elaborato.

3.3.1 Assemblaggi

Per calcolare i costi degli assemblaggi, avendo già trovato gli stipendi orari degli operai, è stato necessario stimare i tempi per le varie

operazioni di assemblaggio. A tale scopo si è svolta un una ricerca sulle metodologie utilizzate per questa stima e siamo arrivati ad un elaborato prodotto dall'Università Cattaneo di Varese, mostrata in figura 3-5, che riporta i tempi standard per gli assemblaggi in funzione del peso degli oggetti e la distanza di questi dal banco di lavoro.

Questa tabella fa riferimento ad una situazione in cui un singolo operaio debba assemblare un oggetto a partire da un insieme di componenti disposti intorno al piano di lavoro.

Distance Moved (cm)	Time, TMUs				Allowance			Case and Description
	A	B	C	Hand in Motion B	Weight (kg) up to	Constant (TMUs)	Factor	
0 to 2	2.9	2.0	2.0	1.7	1	0	1.00	A Move object to other hand or against stop
4	3.1	4.0	4.5	2.8	2	1.6	1.04	
6	4.1	5.0	5.8	3.1	4	2.8	1.07	
8	5.1	5.9	6.9	3.7				
10	6.0	6.8	7.9	4.3	6	4.3	1.12	
12	6.9	7.7	8.8	4.9				
14	7.7	8.5	9.8	5.4				
16	8.3	9.2	10.5	6.0	8	5.8	1.17	B Move object to approximate
18	9.0	9.8	11.1	6.5				
20	9.6	10.5	11.7	7.1				
22	10.2	11.2	12.4	7.6				

Figura 3-5 Tempi standard predeterminati per le operazioni di assemblaggio

Sistema di sterzo

In questo capitolo si analizzerà nel dettaglio la documentazione relativa a BOM, CBOM e DBOM del sistema di sterzo che è stata presentata alla competizione della Formula SAE di Varano il 13 luglio 2023. I tre documenti sono stati raggruppati in un'unica presentazione Power Point.



Figura 4-1 rendering del sistema di sterzo

4.1 BOM

La prima operazione è stata definire il sistema di sterzo, individuando tutti i componenti che ne fanno parte. Quindi, si è scelto di

suddividere in tre insiemi mostrati nelle figure 4-2, 4-3 e 4-4.

BILL OF MATERIAL			DESIGN			CHOICES		
LV 1	LV 2	LV 3	PART NUMBER	QTY	ACTIVITIES	MAKE	BUY	SUPPLIER
Steering System			CH.SS	1	LO, S, A			Polimarche
	Steering Wheel		CH.SS.SW	1	LO, S, A			Polimarche
		Upper Shell	CH.SS.SW.0.01	1	S, D, A			Polimarche
		Lower Shell	CH.SS.SW.0.02	1	S, D, A			Polimarche
		Safety Wiring	CH.SS.SW.0.03	1				Wurth
		Spacer Ø4x21.6	CH.SS.SW.0.04	6	D			Polimarche
		Bolt M4x35	CH.SS.SW.0.05	6				Wurth
		Nut M4	CH.SS.SW.0.06	12				Wurth
		Quick Release	CH.SS.SW.0.07	1	A			OMP
		Backing Plate	CH.SS.SW.0.08	1	S, D			Polimarche
		Bolt M4x20	CH.SS.SW.0.09	6				Wurth
		Screw Cap	CH.SS.SW.0.10	4	D			Polimarche
		Display cover	CH.SS.SW.0.11	1	D			Polimarche
		Padding right	CH.SS.SW.0.12	1	D			Polimarche
		Padding left	CH.SS.SW.0.13	1	D			Polimarche

Figura 4-2 insieme: “volante”

Tutti i componenti sono stati individuati con un nome e con un codice parte, per un più rapido successivo riconoscimento, seguito dalla quantità.

BILL OF MATERIAL			DESIGN			CHOICES		
LV 1	LV 2	LV 3	PART NUMBER	QTY	ACTIVITIES	MAKE	BUY	SUPPLIER
	Steering Column		CH.SS.SC	1	LO, S, A			Polimarche
		Quick Release Adapter	CH.SS.SC.0.01	1	S, D			Polimarche
		Column Support	CH.SS.SC.0.02	1	S, D, PC			Polimarche
		Bearing 30x55x9	CH.SS.SC.0.03	1				Schaeffler
		Seeger 55	CH.SS.SC.0.04	1				Wurth
		Seeger 30	CH.SS.SC.0.05	1				Wurth
		Bolt M5x40	CH.SS.SC.0.06	7				Wurth
		Washer 5	CH.SS.SC.0.07	14				OMP (488,04)
		Nut M5	CH.SS.SC.0.08	7				Wurth
		Upper Rod	CH.SS.SC.0.09	1	S, D			Italtubes
		Rod Insert	CH.SS.SC.0.10	3	S, D			Formula seven
		Bevel Gear	CH.SS.SC.0.11	1	S, PC			Formula seven
		Bevel Gear Support	CH.SS.SC.0.12	1	S, D, PC			Polimarche
		Bolt M4x20	CH.SS.SC.0.13	4				Wurth
		Washer 4	CH.SS.SC.0.14	4				Wurth
		Lower Rod	CH.SS.SC.0.15	1	S, D			Italtubes
		Safety Wiring	CH.SS.SC.0.16	1				Wurth

Figura 4-3 insieme: “colonna di sterzo”

Inoltre, sono stati segnati i fornitori di tutte le parti. Dove il fornitore risulta essere “Polimarche” significa che il pezzo è stato prodotto direttamente dal team o commissionato ad una ditta esterna, ma comunque progettato internamente.

BILL OF MATERIAL			DESIGN			CHOICES		
LV 1	LV 2	LV 3	PART NUMBER	QTY	ACTIVITIES	MAKE	BUY	SUPPLIER
	Steering Rack		CH.SS.SR	1	LO, S, A			Polimarche
		Steering Box	CH.SS.SR.0.01	1	S			Formula seven
		Upper Box Support	CH.SS.SR.0.02	2	S, D			Polimarche
		Lower Box Support	CH.SS.SR.0.03	2	S, D			Polimarche
		Bolt M6x60	CH.SS.SR.0.04	4				Wurth
		Washer 6	CH.SS.SR.0.05	12				Wurth
		Nut M6	CH.SS.SR.0.06	8				Wurth
		Steering Rod	CH.SS.SR.0.07	2	S, D			Italtubes
		Rod insert	CH.SS.SR.0.08	4				Formula seven
		Rod End M8	CH.SS.SR.0.09	4				Schaeffler
		Nut 8	CH.SS.SR.0.10	4				Wurth
		Calibrated Bolt 8	CH.SS.SR.0.11	4				Wurth
		Spacer washer 8	CH.SS.SR.0.12	12				Wurth

Figura 4-4 insieme: “cremagliera di sterzo”

4.2 Volante

Sono stati individuate le posizione di tutti i componenti tramite una distinta componenti mostrata nella seguente figura 4-5.

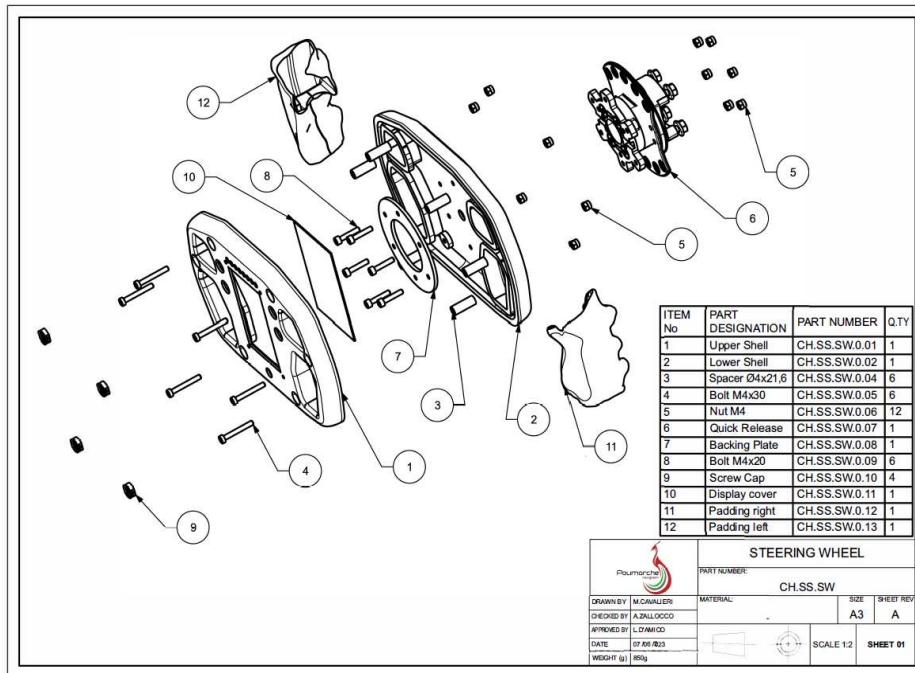


Figura 4-5 insieme di parti “volante”, distinta componenti

Poi, per i soli componenti acquistati è stata redatto un rapido elenco dei prezzi, come di vede dalla tabella della figura 4-6.

FRONT PARTS	PART NUMBER	QTY	UNIT PRICE [€]	TOTAL PRICE [€]	TOTAL WEIGHT [g]
Safety Wiring	CH.SS.SW.0.03	1	0,3	0,3	5
Bolt M4x35	CH.SS.SW.0.05	6	0,15	0,9	18
Nut M4	CH.SS.SW.0.06	12	0,15	1,8	12
Quick Release	CH.SS.SW.0.07	1	350	350	350
Bolt M4x20	CH.SS.SW.0.09	6	0,1	0,6	15
TOTAL →				350,7	400

Figura 4-6 Prezzi componenti “buy” dell’insieme “volante”

Infine, sono stati conteggiati, per mezzo della tabella mostrata in figura 4-7,tutti i costi relativi agli assemblaggi necessario per comporre l’insieme.

CH.SS.SW	STEERING WHEEL	COST [€]
TOOL	Sealing Gun (LOCTITE 5188)	
PROCESS	Bond CH.SS.SW.0.10 (Display Cover) to CH.SS.SW.0.01 (Upper Shell) with LOCTITE 5188 (Sealant)	0,51
TOOL	Screwdriver	
PROCESS	Assemble the LV.FR.DA (Steering Wheel Electronics) to the CH.SS.SW.0.01 (Upper Shell)	2,53
TOOL	Hex Key 3 mm	
PROCESS	Assemble CH.SS.SW.0.06 (Quick Release), CH.SS.SW.0.07 (Backing Plate), CH.SS.SW.0.02 (Lower Shell), with 6x CH.SS.SW.0.08 (Bolt M4x20)	1,77
TOOL	Sealing Gun (LOCTITE 5188), Hex Key 3 mm, Wrench 7mm	
PROCESS	Seal CH.SS.SW.0.01 (Upper Shell) and CH.SS.SW.0.02 (Lower Shell) with LOCTITE 5188 (Sealant) and assemble with 6x CH.SS.SW.0.03 (Spacer Ø4x21,6), 6x CH.SS.SW.0.04 (Bolt M4x35), 6x CH.SS.SW.0.05 (Nut M4)	3,80
TOOL	Wrench 10mm	
PROCESS	Assemble CH.SS.SW (Steering Wheel), CH.SS.SC.0.01 (Quick Release Adapter) with bolts of CH.SS.SW.0.06 (Quick Release Bolts)	1,27
TOOL	Plier	
PROCESS	Lock CH.SS.SW.0.06 bolts (Quick Release Bolts) with CH.SS.SW.0.03 (Safety Wiring) and cut it	3,80
TOTAL COST →		13,68

Figura 4-7 costi di assemblaggio dell'insieme "volante"

Per i componenti progettati internamente invece sono stati mostrati i disegni dei progetti ed il costo di tutte le lavorazioni necessarie. Di seguito verranno analizzati alcuni componenti di maggiore interesse.

4.2.1 Guscio del volante

Il guscio del volante è la struttura del volante vero e proprio ed è realizzato per contenere in sé l'elettronica e le pulsantiere. Ne viene mostrato il disegno tecnico nella figura 4-8. La geometria è tale da garantire una buona ergonomia per le manovre di sterzo ed il profilo laterale è studiato per l'applicazione di imbottiture.

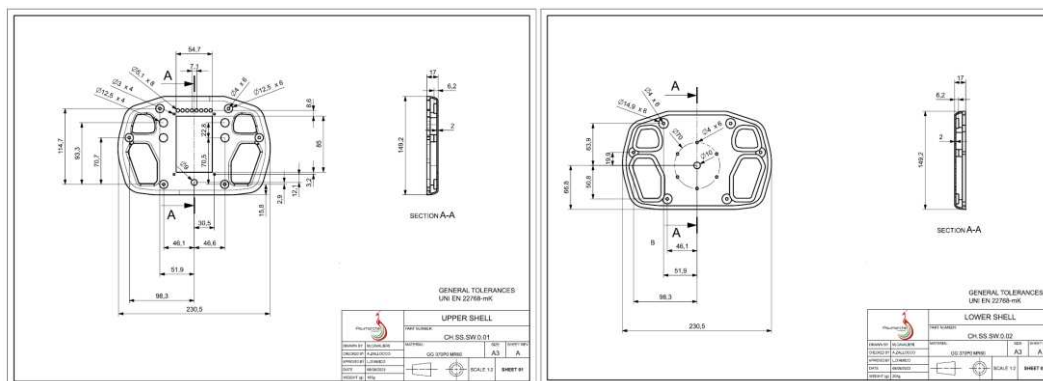


Figura 4-8 guscio del volante, disegno tecnico, parti superiore ed inferiore

È composto da due parti, fissate tra loro con dei bulloni fissati in posizione per mezzo di una piastra di supporto ed opportuni distanziali.

Questo volante è realizzato laminando della fibra di carbonio su di uno stampo. Si dedicherà un paragrafo più avanti nell'elaborato, nel capitolo dei materiali di interesse, per spiegare tutti i dettagli di questo procedimento.

4.2.2 Imbottiture del volante

Le imbottiture del volante hanno la funzione di aumentare l'ergonomia del volante migliorandone il grip. La loro geometria è studiata per poter essere incastrate sul volante ed avvolgere le dita del pilota aumentando il feeling di guida per mezzo di specifici incavi, come si vede dal disegno tecnico di figura 4-9.

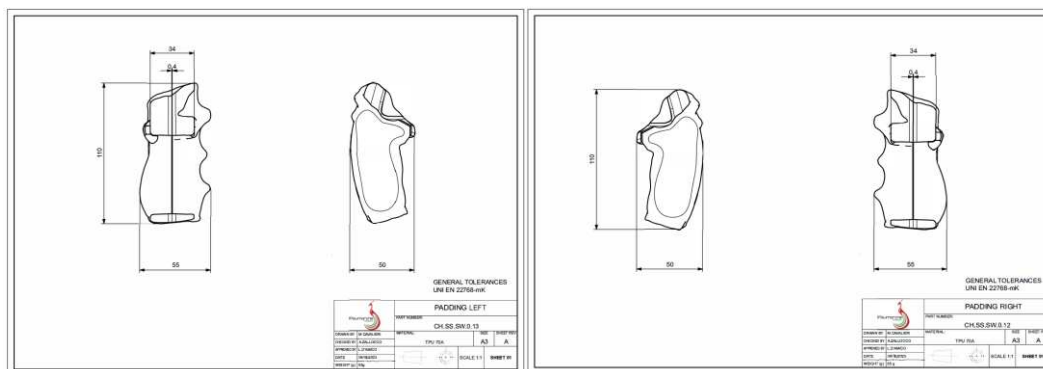


Figura 4-9 imbottiture del volante, disegno tecnico

Queste sono realizzate tramite stampante 3D a partire da poliuretano termoplastico, un materiale dalle caratteristiche simili alla gomma naturale che conferiscono una morbidezza ed una presa ideali. Del processo di stampa 3D si parlerà più approfonditamente in un paragrafo dedicato, nel capitolo dei materiali di interesse.

4.3 Colonna di sterzo

Si è mostrato l'insieme con un esploso su tavola ed una distinta componenti, in modo da definire la posizione relativa di tutte le parti.

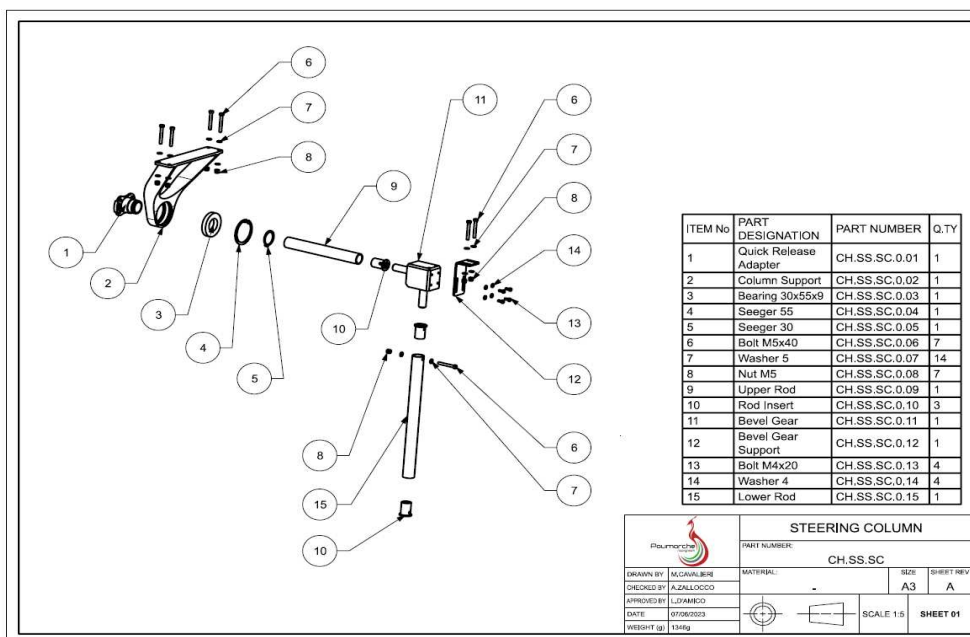


Figura 4-10 insieme "colonna di sterzo", distinta componenti

Poi sono stati sommati i prezzi di tutti i componenti commerciali acquistati.

FRONT PARTS	PART NUMBER	QTY	UNIT PRICE [€]	TOTAL PRICE [€]	TOTAL WEIGHT [g]
Bearing 30x55x9	CH.SS.SC.0.03	1	7,11	7,11	81
Seeger 55	CH.SS.SC.0.04	1	0,5	0,5	8,3
Seeger 30	CH.SS.SC.0.05	1	0,3	0,3	3,6
Bolt M5x40	CH.SS.SC.0.06	7	0,25	1,75	49,7
Washer 5	CH.SS.SC.0.07	14	0,5	7	21
Nut M5	CH.SS.SC.0.08	7	0,2	1,4	10,5
Upper Rod	CH.SS.SC.0.09	1	5	5	31
Rod Insert	CH.SS.SC.0.10	3	95	285	80
Bevel Gear	CH.SS.SC.0.11	1	1000	1000	450
Bolt M4x20	CH.SS.SC.0.13	4	0,1	0,4	10
Washer 4	CH.SS.SC.0.14	4	0,4	1,6	4,8
Lower Rod	CH.SS.SC.0.15	1	8	8	49
Safety Wiring	CH.SS.SC.0.16	1	0,3	0,3	5
TOTAL →				1318,36	783,9

Figura 4-11 prezzi componenti “buy” nell’insieme “colonna di sterzo”

Infine, sono stati conteggiati tutti i costi relativi agli assemblaggi necessario per comporre l’insieme.

CH.SS.SC	STEERING COLUMN	COST [€]
TOOL	Table Saw	
PROCESS	Cut CH.SS.SC.0.09 (Upper Rod), CH.SS.SC.0.15 (Lower Rod)	0,38
TOOL	Drill 5,1mm	
PROCESS	Hole CH.SS.SC.0.15 (Lower Rod)	0,50
TOOL	Sandpaper (120)	
PROCESS	Sand CH.SS.SC.0.01 (Quick Release Adapter), CH.SS.SC.0.09 (Upper Rod), CH.SS.SC.0.15 (Lower Rod), 3x CH.SS.SC.0.10 (Rod Insert)	0,51
TOOL	Glue Gun (LOCTITE 9466)	
PROCESS	Bond CH.SS.SC.0.09 (Upper Rod) to CH.SS.SC.0.01 (Quick Release Adapter), CH.SS.SC.0.10 (Rod Insert) and CH.SS.SC.0.15 (Lower Rod) to 2x CH.SS.SC.0.10 (Rod Insert)	1,27
TOOL	Seeger Plier, Hydraulic Press	
PROCESS	Assemble CH.SS.SC.0.03 (Bearing 30x55x9) to CH.SS.SC.0.02 (Column Support) and Lock with CH.SS.SC.0.04 (Seeger 55)	2,53
TOOL	Hex Key 4mm, Wrench 8mm	
PROCESS	Assemble CH.SS.SC.0.02 (Column Support) to CH.CM.FR.0.01 (Frame) with 4x CH.SS.SC.0.06 (Bolt M5x40), 8x CH.SS.SC.0.07 (Washer 5), 4x CH.SS.SC.0.08 (Nut M5)	5,07
CH.SS.SC	STEERING COLUMN	COST [€]
TOOL	Seeger Plier	
PROCESS	Assemble CH.SS.SC.0.01 (Quick Release Adapter) to CH.SS.SC.0.03 (Bearing 30x55x9) and lock with CH.SS.SC.0.05 (Seeger 30)	2,53
TOOL	Drill 2mm	
PROCESS	Drill 4x CH.SS.SC.0.13 Head (Bolt M4x20)	1,27
TOOL	Wrench 7mm, Plier	
PROCESS	Assemble CH.SS.SC.0.12 (Bevel Gear Support) to CH.SS.SC.0.11 (Bevel Gear) with 4x CH.SS.SC.0.13 (Bolt M4x20), 4x CH.SS.SC.0.14 (Washer 4) and lock with CH.SS.SC.0.16 (Safety Wiring) and cut it	8,87
TOOL	Wrench 8mm	
PROCESS	Assemble CH.SS.SC.0.11 (Bevel Gear) to CH.SS.SC.0.10 (Rod Insert) bonded to CH.SS.SC.0.09 (Upper Rod) and lock CH.SS.SC.0.12 (Bevel Gear Support) to CH.CM.FR.0.01 (Frame) with 2x CH.SS.SC.0.06 (Bolt M5x40), 4x CH.SS.SC.0.07 (Washer 5), 2x CH.SS.SC.0.08 (Nut M5)	5,07
TOOL	Wrench 8mm	
PROCESS	Assemble CH.SS.SC.0.10 (Rod Insert) bonded to CH.SS.SC.0.15 (Lower Rod) to CH.SS.SC.0.11 (Bevel Gear) with CH.SS.SC.0.06, 2x CH.SS.SC.0.07 (Washer 5), CH.SS.SC.0.08 (Nut M5)	2,53
TOTAL COST →		5,19

Figura 4-12 costo assemblaggi dell’insieme “colonna di sterzo”

Per i componenti progettati internamente invece sono stati mostrati i disegni dei progetti ed il costo di tutte le lavorazioni necessarie. Di seguito, a scopo esemplificativo, ne verranno mostrati alcuni.

4.3.1 Adattatore dello sgancio rapido

Questo componente ha lo scopo di adattare lo sgancio rapido, componente commerciale acquistato definito come parte dell'insieme "volante", al supporto della colonna di sterzo.

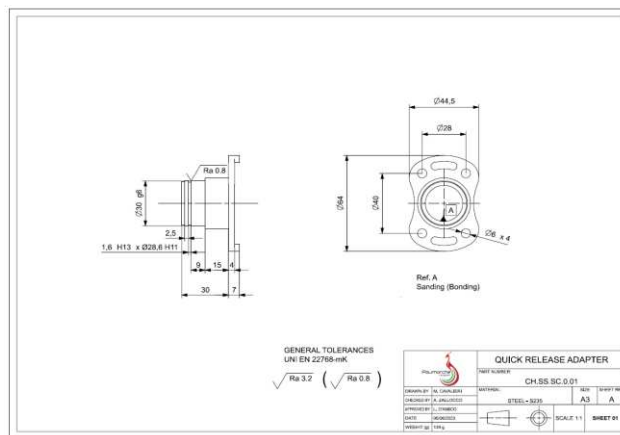



Figura 4-13 adattatore dello sgancio rapido + disegno tecnico

4.3.2 Supporto della coppia conica

Questo componente ha lo scopo di reggere il peso della coppia conica, ossia quel componente che trasferisce il moto tra due aste rotanti perpendicolari tra loro. Per la sua semplicità è perfetto per mostrare la tabella delle lavorazioni.

CH.SS.SC.0.12	BEVEL GEAR SUPPORT	COST [€]
MATERIAL	Aluminium – EN AW-7075 [Al Zn5, 5MgCu]	0,21
TOOL	Low power <u>waterjet</u> cutting machine	
PROCESSES	<u>Install-setup workpiece</u> in the waterjet cutting machine	2,53
PROCESSES	<u>Waterjet</u> cutting	2,41
PROCESSES	<u>Remove-piece</u> out of the waterjet cutting machine	0,50
TOOL	<u>Brake</u> press	
PROCESSES	<u>Install-setup workpiece</u> in the machine	2,02
PROCESSES	<u>Sheetmetal</u> bending	0,30
PROCESSES	<u>Remove-piece</u> out of the machine	0,50
TOTAL COST →		8,47



WEIGHT	28 g
--------	------

Figura 4-14 supporto della coppia conica, tabella costi lavorazioni

Come si legge dalla tabella, il componente nasce sotto forma di una barretta di alluminio. È dapprima forato con una macchina da taglio a getto d'acqua, poi piegato con una pressa piegatrice. È da notare come sono stati tenuti in considerazione non solo il costo del materiale e quello delle macchine ma sono stati calcolati anche i costi per le operazioni manuali dei lavoratori, sulla base di tempistiche stimate nella maniera più realistica possibile.

4.4 Cremagliera di sterzo

Si è mostrato l'insieme con un esploso su tavola ed una distinta componenti, in modo da definire la posizione relativa di tutte le parti.

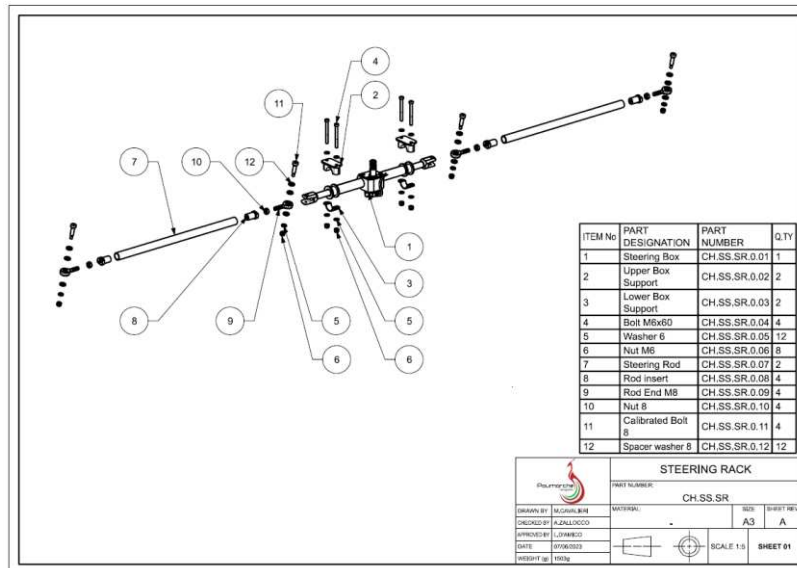


Figura 4-15 insieme “cremagliera di sterzo”, distinta componenti

Poi sono stati sommati tutti i costi di tutti i componenti commerciali acquistati in una tabella.

FRONT PARTS	PART NUMBER	QTY	UNIT PRICE [€]	TOTAL PRICE [€]	TOTAL WEIGHT [g]
Steering Box	CH.SS.SR.0.01	1	1600	1600	870
Bolt M6x60	CH.SS.SR.0.04	4	0,35	1,4	61,6
Washer 6	CH.SS.SR.0.05	12	0,6	7,2	20,4
Nut M6	CH.SS.SR.0.06	8	0,25	2	24
Steering Rod	CH.SS.SR.0.07	2	10	20	78
Rod insert	CH.SS.SR.0.08	4	65	260	60
Rod End M8	CH.SS.SR.0.09	4	6,77	27,1	128
Nut 8	CH.SS.SR.0.10	4	0,35	1,4	24
Calibrated Bolt 8	CH.SS.SR.0.11	4	2,38	9,58	92
Spacer washer 8	CH.SS.SR.0.12	12	0,8	9,6	27,6
TOTAL →				1938,24	1385,6

Figura 4-16 prezzi componenti “buy” nell’insieme “cremagliera di sterzo”

Quindi, allo stesso modo, sono stati sommati i costi dei componenti progettati dal team.

FRONT PARTS	PART NUMBER	QTY	UNIT COST [€]	TOTAL COST [€]	TOTAL WEIGHT [g]
Upper Box Support	CH.SS.SR.0.02	2	64,67	129,3	92
Lower Box Support	CH.SS.SR.0.03	2	13,42	26,84	10
TOTAL →				156,18	102

Figura 4-17 prezzi componenti “make” nell’insieme “cremagliera di sterzo”

Infine, sono stati conteggiati tutti i costi relativi agli assemblaggi necessario per comporre l’insieme.

CH.SS.SR	STEERING RACK	COST [€]
TOOL	Wrench 10mm, Hex Key 5mm	
PROCESS	Assembly 2x CH.SS.SR.0.02 (Upper Support), 2x CH.SS.SR.0.03 (Lower Support), CH.SS.SR.0.01 (Steering Box) and CH.SS.SC.0.10 (Rod Insert) bonded to CH.SS.SC.0.15 (Lower Rod) to CH.CM.FR.0.01 (Frame), with 4x CH.SS.SR.0.04 (Bolt M6x60), 8x CH.SS.SR.0.05 (Washer 6), 4x CH.SS.SR.0.06 (Nut M6)	5,07
TOOL	Sandpaper (120)	
PROCESS	Sand 2x CH.SS.SR.0.07 (Steering Rod), 4x CH.SS.SR.0.08 (Rod Insert)	0,51
TOOL	Glue Gun (LOCTITE 9466), Wrench 13mm	
PROCESS	Bond CH.SS.SR.0.07 (Steering Rod) with 2x CH.SS.SR.0.08 (Rod Insert) and assemble with 2x CH.SS.SR.0.09 (Rod End M8), 2x CH.SS.SR.0.10 (Nut M8) two times	2,53
TOOL	Hex Key 4mm, Wrench 10mm	
PROCESS	Assemble CH.SS.SR.0.09 (Rod End M8), CH.SS.SR.0.01 (Steering Box) with CH.SS.SR.0.11 (Calibrated Bolt 8), 3x CH.SS.SR.0.12 (Spacer washer 8), CH.SS.SR.0.05 (Washer 6), CH.SS.SR.0.06 (Nut M6) two times	6,33
TOOL	Hex Key 4mm, Wrench 10mm	
PROCESS	Assemble CH.SS.SR.0.09 (Rod End M8), VD.WH.FR.0.01 (DX Front Wheel Hub) and CH.SS.SR.0.09 (Rod End M8), VD.WH.FR.0.02 (SX Front Wheel Hub) with 2x CH.SS.SR.0.11 (Calibrated Bolt 8), 6x CH.SS.SR.0.12 (Spacer washer 8), 2x CH.SS.SR.0.05 (Washer 6), 2x CH.SS.SR.0.06 (Nut M6)	6,33
TOTAL COST →		20,77

Figura 4-18 costo assemblaggi dell'insieme "cremagliera di sterzo"

Da ultimo, sono stati conteggiati tutti i costi relativi agli assemblaggi necessario per unire gli insiemi e comporre il sistema.

CH.SS	SYSTEM LEVEL 1 BRAKE	TOTAL COST [€]
CH.SS.SW	STEERING WHEEL	13,68
CH.SS.SC	STEERING COLUMN	5,19
CH.SS.SR	STEERING RACK	20,77
TOTAL COST →		39,64

Figura 4-19 costo assemblaggi "sistema di sterzo"

Con l'insieme di questi dati è stato possibile produrre la tabella finale riportante la somma di tutti i costi del sistema di sterzo.

SYSTEM LEVEL 1	SYSTEM LEVEL 2	PART NUMBER	QTY	MAKE + BUY TOTAL COST [€]	BUY PARTS	MAKE PARTS	ASSEMBLY ON VEHICLE COST [€]	WEIGHT [g]
					COST [€] (PRICE)	COST [€]		
Steering System		CH.SS	1	7458,05	3607,3	3811,11	39,64	3901,5
	Steering Wheel	CH.SS.SW	1	3353,87	350,7	3270,27	13,68	1064
	Steering Column	CH.SS.SC	1	2482,66	1318,36	384,66	5,19	1349,9
	Steering Rack	CH.SS.SR	1	533,95	1938,24	156,18	20,77	1487,6

Figura 4-20 somma dei costi del sistema di sterzo

Sistema Frenante

In questo capitolo, analogamente al precedente, si analizzerà nel dettaglio la documentazione della certificazione del sistema di sterzo che è stata presentata alla competizione della Formula SAE di Varano il 13 luglio 2023. I documenti BOM, DBOM e CBOM sono stati raggruppati in un'unica presentazione Power Point.



Figura 5-1 rendering del sistema di frenante

Come prima cosa si è definito il sistema frenante con tutti i suoi componenti. Quindi, sono stati individuati tre sottoinsiemi di parti.

SYSTEM LEVEL 1	SYSTEM LEVEL 2	PART NUMBER	QTY	MAKE + BUY TOTAL COST [€]	BUY PARTS	MAKE PARTS	ASSEMBLY ON VEHICLE COST [€]	WEIGHT [g]
					COST [€] (PRICE)	COST [€]		
<u>Brake</u>		VD.BR	1	6370,48	3794,23	2517,62	58,63	5029
	Front	VD.BR.FR	1	3353,87	1084,78	2246,1	22,99	2369
	Rear	VD.BR.RE	1	2482,66	2182,33	271,52	28,81	2362
	Balance Bar	VD.BR.BB	1	533,95	527,12	-	6,83	298

Figura 5-2 somma dei costi sistema frenante

5.1 Anteriore

L'insieme di parti "anteriore" comprende tutti i componenti che sono collocati nella parte frontale del veicolo. Per semplicità, gli insiemi di parti del sistema frenante sono stati divisi solo in base alla disposizione geometrica.

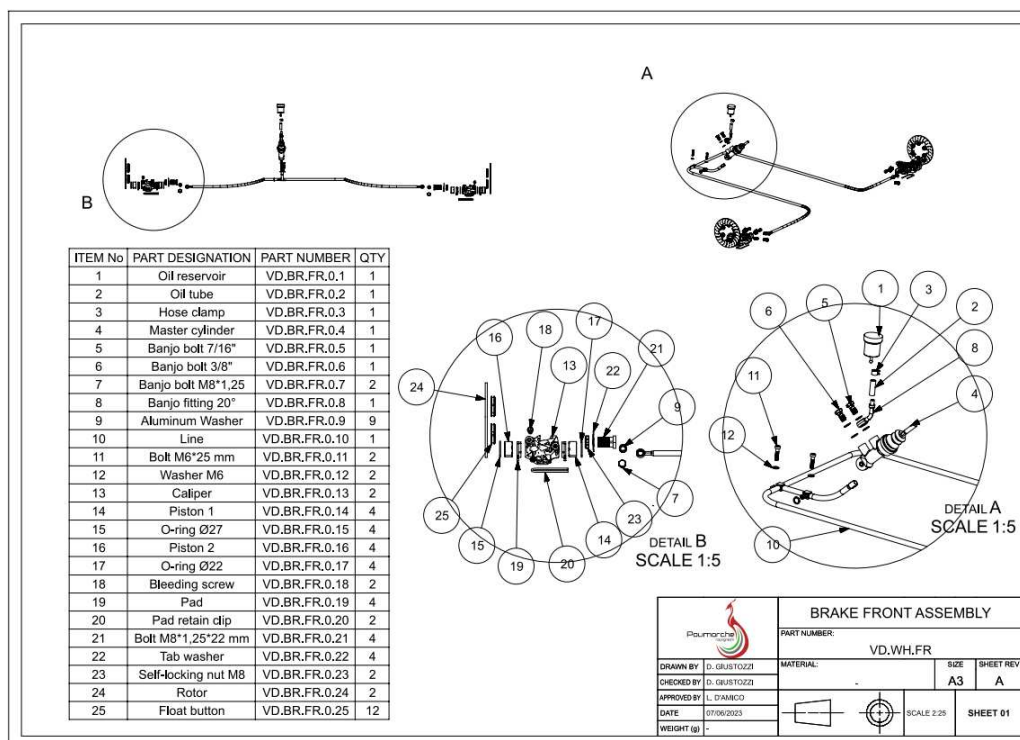


Figura 5-3 distinta componenti dell'insieme "anteriore"


In questo capitolo, per completezza d'esposizione verranno mostrati i componenti buy, oltre che quelli make.

OIL RESERVOIR	
Part number	
Polimarche	AP Racing
VD.BR.FR.0.01	CP4709-19



Weight	
Weight	75 g
Processes	
- Small oil reserve which guarantees the correct functioning of the system	
Price €/pcs	
Price €/pcs	59,12

OIL TUBE	
Part number	
Polimarche	Gieffe
VD.BR.FR.0.02	536B



Weight	
Weight	3 g
Processes	
- Raw material cut at 30 mm	
Price €/pcs	
Price €/pcs	8,98

HOSE CLAMP	
Part number	
Polimarche	Wurth
VD.BR.FR.0.03	05413113



Weight	
Weight	1 g
Processes	
Price €/pcs	
Price €/pcs	2,00

Figura 5-4 componenti “buy” dell’insieme “anteriore”

Per ogni componente commerciale acquistato è indicato il codice di identificazione, il nome del fornitore, il peso, ed il costo di vendita.

PAD	
Part number	
Polimarche	Brembo
VD.BR.FR.0.19	7934020



Weight	
Weight	50 g
Processes	
- good performance both hot and cold, dry and wet, characterize this friction material.	
Price €/pcs	
Price €/pcs	27,49

PADS RETAINER CLIP	
Part number	
Polimarche	Brembo
VD.BR.FR.0.20	X206007



Weight	
Weight	9 g
Processes	
- pad safety system that locks them in the correct position	
Price €/pcs	
Price €/pcs	15,95

Bolt M8x1,25	
Part number	
Polimarche	Wurth
VD.BR.FR.0.21	00958-30



Weight	
Weight	21 g
Processes	
Price €/pcs	
Price €/pcs	0,40

Figura 5-5 componenti “buy” dell’insieme “anteriore”

Inoltre, ad alcuni componenti, è stata associata una piccola descrizione. I componenti “buy” sono, in gran parte, oggetti di viteria e minuteria, comunque oggetti per cui non vale la pena impiegare risorse per la progettazione e la produzione. Una eccezione è composta dalle pastiglie dei freni che richiederebbe uno studio dei

materiali molto importante. È pertanto stato conveniente progettare le pinze freno sulla base della geometria delle pastiglie Brembo.

5.1.1 Pinze freno

VD.BR.FR.0.13	CALIPER	COST [€]
MATERIAL	EOS ALUMINUM - AISi10Mg	23,29
TOOL	EOS 3D Printer	
PROCESS	Setup aluminum powder in the SLM printer	22,8
PROCESS	Selective laser melting	718,80
PROCESS	Remove piece from the 3D printer	2,55
TOOL	Electrical Discharge Machine	
PROCESS	Install-setup printed part in the EDM	2,93
PROCESS	Printed part detachment with EDM	56,50
PROCESS	Remove printed part from the EDM	2,93
TOOL	Long Nose Plier, knife and spatula	
PROCESS	Support removal	10,13



WEIGHT 173 g

175

Figura 5-6 pinze freno, tabella costi lavorazioni

Queste pinze freno sono state realizzate tramite stampa 3D di materiale metallico, in particolare una lega di alluminio. Il loro design è stato concepito per ridurre al minimo il loro peso, infatti come mostrato nel rendering, la loro geometria è tale da avere materiale solo nelle direzioni in cui passano le forze durante l'uso. Il processo di stampa di queste pinze è di tipo SLM, se ne parlerà in maniera più approfondita nel capitolo dedicato alla stampa 3D.

5.2 Posteriore

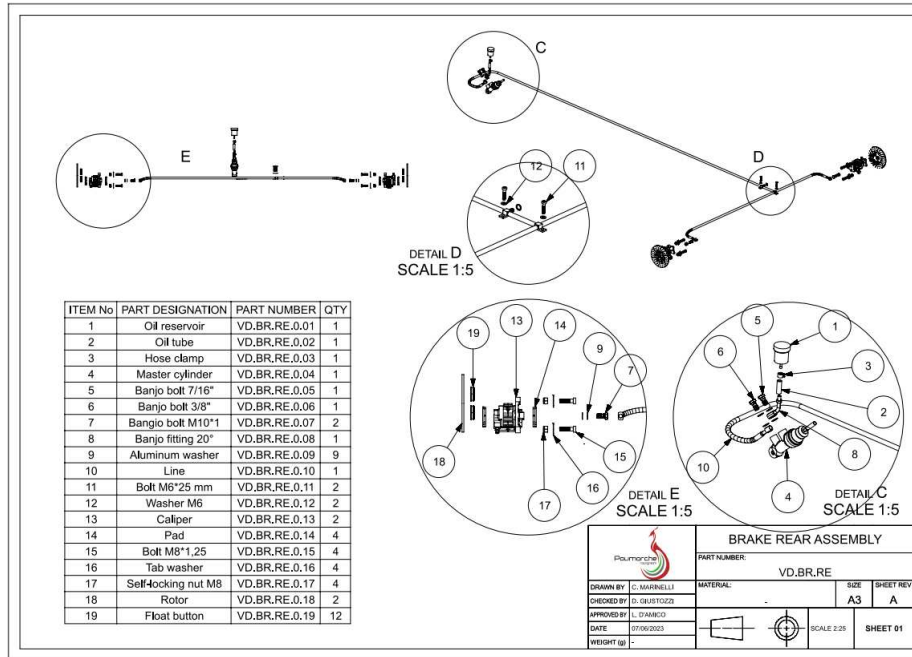


Figura 5-7 distinta componenti dell'insieme "posteriore"

Il sistema frenante è distribuito in maniera quasi del tutto simmetrica, di conseguenza l'insieme posteriore è pressoché identico a quello anteriore. Questo comporta una ripetizione dei componenti tra i due insiemi. Si è scelto però di optare per delle pinze freno commerciali per le ruote posteriori.

CALIPER	
Part number	
Polimarche	AP Racing
VD.BR.RE.0.13	CP4226-2S0



Weight	240 g
Processes	
Price €/pcs	474,58

PAD	
Part number	
Polimarche	AP Racing
VD.BR.RE.0.14	CP4226D27



Weight	40 g
Processes	
Price €/pcs	21,96

BOLT M8x1,25	
Part number	
Polimarche	Wurth
VD.BR.RE.0.15	00958-30



Weight	21 g
Processes	
Price €/pcs	0,40

Figura 5-8 componenti “buy” dell’insieme “posteriore”

5.3 Barra di bilanciamento

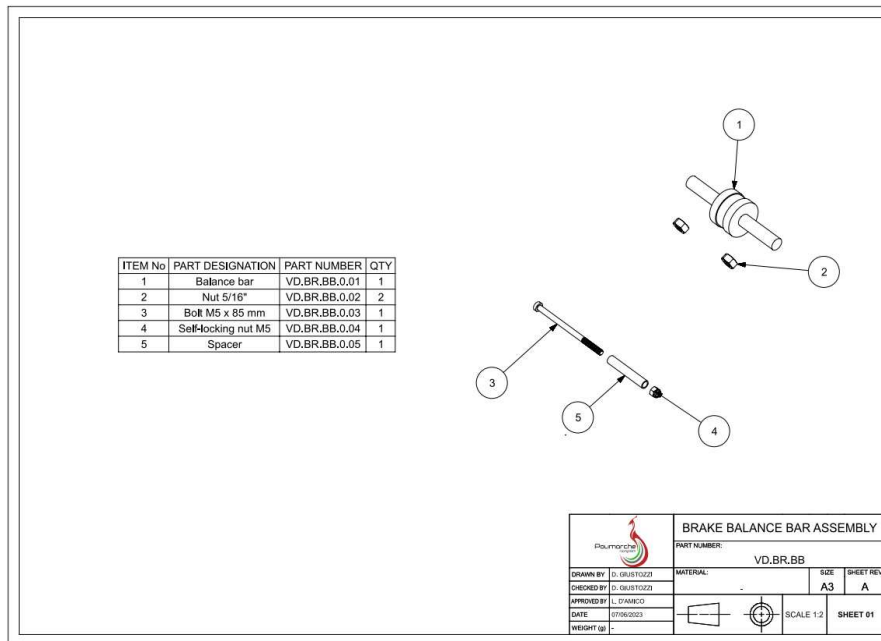


Figura 5-9 distinta componenti dell’insieme “barra di bilanciamento”

Questo insieme di componenti ha lo scopo di ripartire la potenza frenante tra la parte anteriore e posteriore della vettura. I componenti di questo insieme sono tutti “buy”.

BALANCE BAR	
Part number	
Polimarche	AP Racing
VD.BR.BB.0.01	CP 5500



Weight	269 g
Processes	
- Divides the braking force between the front and rear braking system	
Price €/pcs	525,87

NUT 5/16"	
Part number	
Polimarche	RS PRO
VD.BR.BB.0.02	245 - 0754



Weight	6 g
Processes	
Price €/pcs	0,118

BOLT M5x85	
Part number	
Polimarche	Wurth
VD.BR.BB.0.03	00945 100



Weight	11 g
Processes	
Price €/pcs	0,10

Figura 5-10 componenti "buy" dell'insieme "barra di bilanciamento"

Processi manifatturieri analizzati

6.1 Materiali compositi

I materiali compositi sono combinazioni di due o più materiali (matrice legante, ed elementi di rinforzo), diversi in forma e composizione. I costituenti non fondono tra loro né si dissolvono mantenendo i loro aspetti, ma agendo insieme per migliorare le caratteristiche meccaniche del materiale. Questi materiali sono ampiamenti diffusi in molti settori applicativi industriali ma sono ancora largamente studiati e si scoprono sempre più spesso nuove combinazioni che portano a caratteristiche sempre più performanti. Il concetto di materiali composito nasce già dagli antichi egizi che usavano rinforzare una matrice a base di fango con della paglia per creare dei mattoni con una resistenza maggiorata. In generale ogni materiale componente corrisponde ad una differente fase, ciascuna dotata di proprietà chimico-fisiche differenti, andando a formare una struttura non omogenea.

6.2 Fibra di Carbonio

È importante sottolineare subito che quando si parla di fibra di carbonio si indica un materiale composito a matrice resinosa che ha come fibra rinforzante dei filamenti di carbonio.

6.2.1 Le Fibre

La produzione dei filamenti di carbonio avviene mediante l'ossidazione e la pirolisi termica di molecole organiche a catena lunga di diversi tipi, la più comune è la poliacrilonitrile (PAN), ma

possono essere anche derivate dalla pece o dal rayon. Tale materiale di partenza, in forma di filamenti sottili, subisce un complesso processo di ossidazione in atmosfera inerte, a temperature che possono raggiungere i 2000°C. Il calore così elevato innesca una serie di reazioni chimiche, che prendono il nome di grafitizzazione, il cui risultato è l'eliminazione della gran parte degli atomi diversi da quelli di carbonio, così da trasformare le molecole organiche in grafite (carbonio al 92- 96%), con una struttura reticolare esagonale regolare.



Figura 6-1 dettaglio delle fibre di carbonio

Infine, le catene organiche grafitizzate si fondono, generando un singolo filamento dalle elevatissime proprietà meccaniche, con un diametro che nella maggior parte dei casi è circa 5-7 μm (per rendersi conto dello spessore, si consideri che il diametro di un globulo rosso è pari a 8 μm , quello di un capello varia tra i 65 e i 78 μm e quello di un batterio va dai 0,2 μm ai 30 μm). 9 A seconda delle loro caratteristiche meccaniche, le fibre di carbonio possono essere classificate commercialmente in base al modulo di Young (o modulo di elasticità):

- SM (standard modulus) <265GPa
- IM (intermediate modulus) 265-320 GPa
- HM (high modulus) 320-440 GPa
- UHM (ultra high modulus) >440 GPa

6.2.2 Le Matrici

Le resine utilizzate nei compositi rinforzati con fibre sono talvolta denominate "polimeri". Tutti i polimeri mostrano un'importante proprietà comune in quanto sono composti da lunghe molecole simili a catene costituite da molte semplici unità ripetute. I polimeri possono essere classificati in due tipi, "termoplastici" e "termoindurenti", in base l'effetto del calore sulle loro proprietà:

- I **materiali termoplastici**, come i metalli, si ammorbidiscono con il riscaldamento e alla fine si sciolgono, indurendo di nuovo con il raffreddamento, senza alcun effetto apprezzabile sulle proprietà del materiale in nessuno dei due stati nel tempo. Tipici materiali termoplastici sono il nylon, il polipropilene e ABS.
- I **materiali termoindurenti** sono formati da resina e indurente, o resina e catalizzatore, che vengono miscelati al fine di scatenare una reazione chimica irreversibile per formare un prodotto duro e infusibile. Alcuni esempi sono le resine fenoliche, il poliestere e la resina epossidica.

6.2.3 Disposizione delle Fibre

Per la realizzazione di manufatti in composito le fibre di carbonio vengono dapprima intrecciate in veri e propri panni in tessuto di carbonio, cioè una determinata disposizione di fibre lunghe intrecciate e, una volta messe in posa, vengono immerse nella matrice. Gli strati sono tenuti insieme mediante l'incastro meccanico delle fibre stesse, o con un materiale secondario per legarle insieme e tenerle in posizione, conferendo all'assieme un'integrità sufficiente per essere maneggiato. Le tre principali categorie di orientamento della fibra sono: **Unidirezionale**, $0/90^\circ$, **Multi assiale**.

-I tessuti **unidirezionali** in carbonio sono composti da fibre orientate in un unico senso, lavorano quindi in una sola direzione, offrendo la

possibilità di inserire la fibra nel componente esattamente dove è richiesta, e nella quantità ottimale. Essi si differenziano per la grammatura, corrispondente al peso specifico di un metro quadrato di quel determinato tessuto e per il numero di filamenti che compongono le fibre del tessuto.



Figura 6-2 fibre di carbonio unidirezionali

-I tessuti **multi-assiali** hanno le fibre disposte parallelamente a strati sovrapposti, orientati nelle varie direzioni e poi cucite con sottili filamenti per mantenerle unite.



Figura 6-3 fibre di carbonio multi-assiale

I due metodi più utilizzati per formare le geometrie dei vari componenti unendo matrice e fibra sono la **forgiatura** e la **laminazione**. È da evidenziare che è anche possibile inserire microfibre di carbonio nei polimeri atti alla stampa 3D per rinforzare il materiale risultante, ma di questa metodologia si parlerà nel paragrafo successivo.

6.2.4 Formatura e resinatura

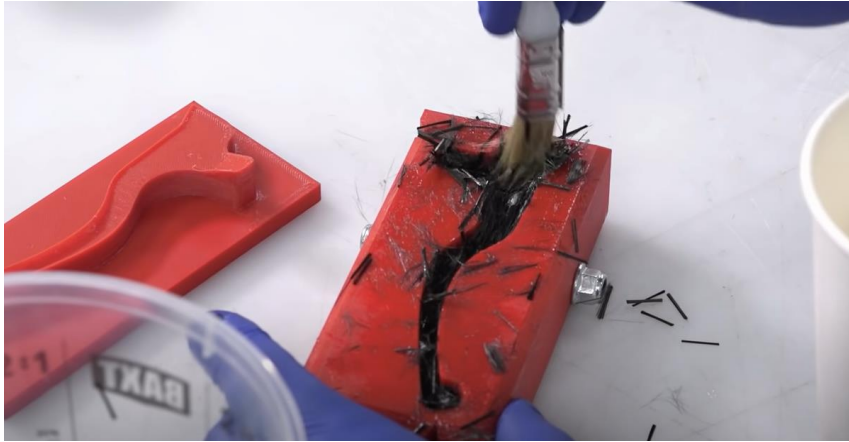


Figura 6-4 forgiatura della fibra di carbonio

Questo metodo produttivo è forse il più semplice nell'ambito della prototipazione ed è solitamente utilizzato per realizzare un numero molto limitato di pezzi. Il processo consiste nell'applicazione manuale di fibre di carbonio all'interno di uno stampo aggiungendo la matrice resinosa un po' per volta con un pennello. Come visibile nella figura 6-4, la lunghezza delle fibre è piuttosto corta, nell'ordine dei centimetri, per cui disponendole in maniera randomica all'interno dello stampo conferirà al componente una uguale risposta lungo tutte le direzioni. Valgono quindi tutte le considerazioni fatte in precedenza sulla disposizione delle fibre, ed a seconda dei casi può convenire l'una o l'altra configurazione. Il rapporto ideale tra fibra e matrice è solitamente 60-40% ma può variare a seconda del tipo di resina. Lo stampo deve essere fatto in maniera tale da essere compresso gradualmente, per mezzo di una pressa, compattando fibre e resina. Spesso questi stampi vengono a loro volta ottenuti tramite stampa 3D in PETG (tereftalato di polietilene glicolizzato) per minimizzare i costi a discapito della durata degli stampi stessi, ma possono essere anche realizzati in materiali metallici tramite lo

stampaggio SLM. Di quest'ultima tecnica si parlerà più avanti in questo capitolo.

6.2.5 Stampaggio in autoclave

La tecnica dello stampaggio in autoclave è il metodo più utilizzato in tutte quelle realtà produttive in cui occorre realizzare superfici anche di medio-grande dimensione con caratteristiche meccaniche molto spinte. Non è indicata per la produzione in serie a causa della elevata durata del processo e quindi del costo complessivo, per cui è più indicata per la realizzazione di componenti in insiemi che necessitano di elevate performance meccaniche in rapporto al peso, quali veicoli per applicazioni racing come bici da corsa, supercars e moto di fascia premium.



Figura 6-5 telaio di una Dallara Stradale

Il materiale di partenza per lo stampaggio in autoclave è il “prepreg” (preimpregnato), ossia semi-lavorati, in cui le fibre sono già impregnate dell'esatta quantità di resina voluta dal progettista e che garantiscono quindi uno dei requisiti principali indispensabile per

garantire la ripetibilità del processo, cioè costanza del rapporto fibre-matrici. La resina che compone la matrice è termoindurente, ossia si solidifica quando viene esposta ad alte temperature, come conseguenza di ciò, i preimpregnati vanno conservati nel loro imballo originale in celle frigorifere a una temperatura compresa tra i -15 e i -20 °C e hanno generalmente una shelf life di alcuni mesi.

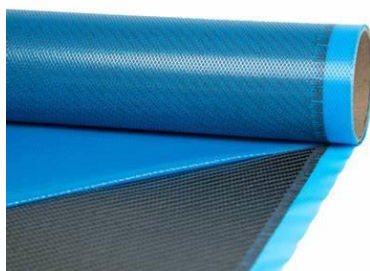


Figura 6-6 prepeg di fibra di carbonio

Nella fase preliminare il prepeg va laminato sullo stampo, ossia va adagiato sulla su di esso per mezzo di ritagli che permettano al foglio di riprendere la geometria dello stampo anche negli angoli e nei dettagli più piccoli. Spesso a tale scopo vengono utilizzate apposite spatoline che hanno la funzione di premere lo strato di carbonio nella cavità, come mostrato in figura 6-7.

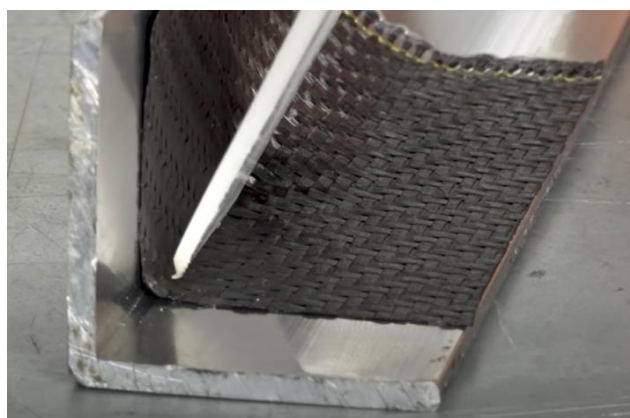


Figura 6-7 laminazione del prepeg sullo stampo

Spesso è necessario applicare più strati di fibra per raggiungere lo spessore necessario, in questi casi è opportuno sgrossare un po' la resina dalla fibra prima di procedere all'applicazione dello strato

successivo. Per fare questo si adagia uno strato di carta assorbente sulla superficie poi si chiude il tutto dentro una busta del sottovuoto, quindi, si applica la pressione negativa che farà fuoriuscire parte della resina che verrà assorbita dalla carta assorbente. Applicati tutti gli strati necessari si giunge al momento dello stampaggio in autoclave vero e proprio. L'autoclave è un grande recipiente pressurizzato, come in figura 6-8 le cui dimensioni massime sono circa 5-6 metri di diametro e 18-20 metri di lunghezza. La pressurizzazione è ottenuta su di un fluido di lavoro che è generalmente costituito da CO2 riscaldato e messo in pressione.



Figura 6-8 autoclave

All'interno dell'autoclave il componente è compattato dalla pressione e l'alta temperatura attiva la resina che, in quanto termoindurente, acquisirà la rigidità voluta.

6.3 Stampa 3D

La tecnologia di Produzione Additiva (Additive Manufacturing) è una tecnica che si contrappone a quella tradizionale della Produzione Sottrattiva, ossia quell'insieme di lavorazioni che portano alla produzione di un componente a partire da un materiale pieno, scavando e tagliando. I principali vantaggi sono quelli di non avere

bisogno di più macchine per produrre un manufatto e la riduzione del materiale usato che, nella produzione sottrattiva, è importante. L'invenzione di questa tecnologia risale al 1981 con lo sviluppo, da parte di Hideo Kodama, della SLA, anche se già dagli anni 60 ci furono i primi tentativi. Dopo tale data si sono susseguite altre tecnologie, tra le quali FDM, SLS, DMLS e SLM. La grande espansione della AM è avvenuta solamente nei primi anni 2000 con l'introduzione delle macchine desktop e la possibilità di accesso alla tecnologia anche da parte degli utenti, invece che solamente delle aziende.

6.3.1 FDM

La Fused Deposition Melting avviene con una stampante dotata di una testina calda. Il filamento, che è raccolto in bobine, è tirato e fuso all'interno dell'ugello per poi essere depositato strato dopo strato per creare il modello. L'elemento centrale di tutto il processo è l'ugello, un estrusore che può variare in materiale e in grandezza. Il supporto che sostiene il pezzo in lavorazione è un piatto che può essere freddo o riscaldato, avente lo scopo di permettere la creazione dei vari strati impilati uno sull'altro. Il motivo del riscaldamento del piatto, è evitare la ritrazione del materiale appena depositato.

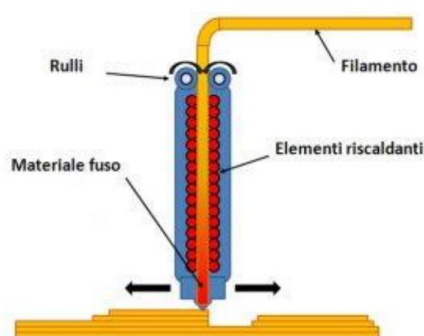


Figura 6-9 ugello di una stampante FDM

La scelta del materiale è influenzata dalla macchina usata e dallo scopo finale del pezzo che si realizza. Alcuni dei materiali più utilizzati nei processi di stampa FDM sono:

- ABS (acrilonitrile-butadiene-stirene): una termoplastica dura che può essere usata per pezzi durevoli e prototipi. Ha lo svantaggio di rilasciare fumi dannosi durante la stampa. (i lego sono in ABS)
- PLA (polylactic acid): è una bioplastica ricavata dall'amido di mais. Ha il vantaggio di essere biodegradabile e quindi attossico per l'ambiente, tuttavia, questo fa sì che non possa essere usato per pezzi che devono durare. (le bottiglie di plastica biodegradabili sono in PLA)
- Nylon: per parti che durevoli e che devono supportare fatica. (molte protesi sono realizzate in nylon)
- PETG (tereftalato di polietilene glicolizzato): usato per pezzi di grandi dimensioni e flessibili
- TPU (poliuretano termoplastico): presenta alta flessibilità ed elasticità (le cover dei telefoni sono in TPU)

Non mancano, ovviamente, materiali compositi che hanno come base gli elementi appena citati e come rinforzo fibre ottenute dai materiali più disparati, quali legno, vetro, carbonio e molti ancora. Sono molti i parametri su cui si può agire nel processo di stampa ed il loro corretto settaggio può garantire non solo la precisione della geometria del componente ma anche le sue caratteristiche meccaniche. Alcuni di questi parametri si possono modificare in fase di programmazione della stampa: temperatura di estrusione, temperatura del letto di stampa, velocità di stampa, altezza dello strato; mentre altri sono di carattere meccanico: materiale utilizzato e dimensioni dell'ugello. La scelta di questi parametri dipende da una moltitudine di fattori ma principalmente dal materiale, dalla

macchina e dalle condizioni di temperatura ed umidità. Solitamente questi parametri vengono forniti direttamente dalla casa produttrice della stampante in relazione al materiale utilizzato, ma spesso, quando si sperimenta l'utilizzo di un nuovo materiale oppure di un materiale conosciuto ma su di una stampante sulla quale non era mai stato utilizzato è necessario svolgere svariati tentativi per giungere ai parametri di stampa ottimali.

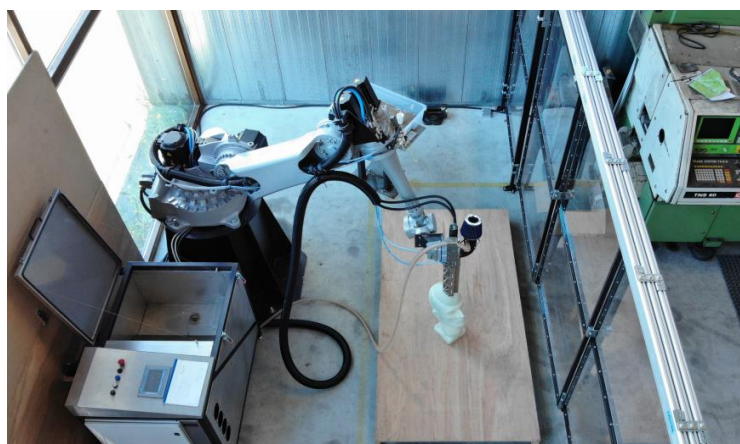


Figura 6-10 AM Flexbot della CEAD

In uno studio svolto durante il periodo Erasmus presso la Fontys University di Eindhoven, di cui allego la relazione (Report EXPO 28), mi era stato possibile analizzare come variano le caratteristiche meccaniche di resistenza, al variare dei parametri di stampa, di un prodotto stampato a partire da PP30GF (polipropilene rinforzato con 30% di fibra di vetro), per mezzo di una stampante FDM di grandi dimensioni, la AM Flexbot della CEAD mostrata in figura 6-10. In particolare, al variare della temperatura di estrusione e della velocità di stampa cambia la temperatura superficiale al contatto tra gli strati, quindi la coesione tra di essi che garantisce la resistenza verticale. Una velocità di stampa ed una temperatura di estrusione troppo elevate porteranno ad una minor precisione nella geometria del prodotto ed aumentano il rischio che il materiale troppo caldo collassi sotto il peso degli strati superiori o che raffreddando in maniera troppo repentina a causa dell'eccessivo gradiente provochi

una deformazione localizzata importante che può portare anche al distacco completo di alcuni strati.

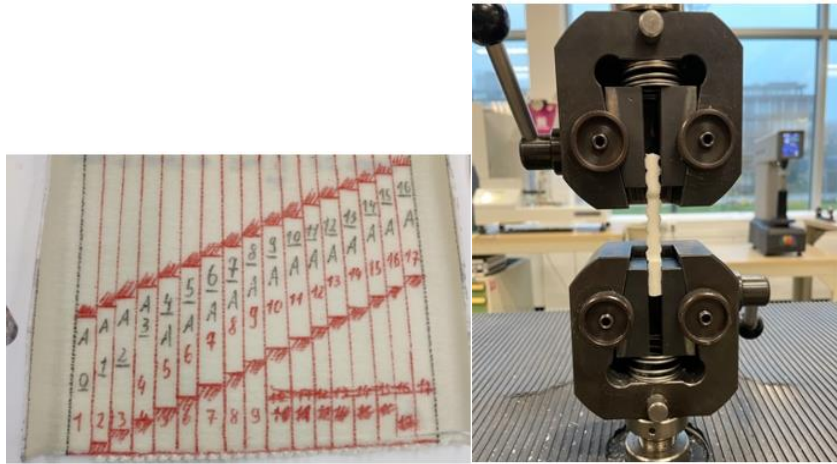


Figura 6-11 test di resistenza svolti sul materiale stampato durante le prove

È stato quindi necessario cambiare un parametro alla volta, ripetere le stampe ed analizzare i risultati sia visivamente sia per mezzo di test di resistenza, come mostrato in figura 6-11.

6.3.2 SLM

Il Selective Laser Melting è una tecnologia di Additive Manufacturing compresa nei processi PBF (powder bed fusion) con la quale si realizzano prodotti, aggregando polvere metallica in modo stratificato. Il modello CAD 3D di partenza viene suddiviso in strati da un software integrato nel sistema di controllo della macchina. Lo schema di strato guida la stampante nella deposizione del materiale. Le stampanti SLM utilizzano l'energia di un raggio laser per fondere in un unico pezzo monolitico i singoli elementi di polvere, tuttavia non legandoli a livello molecolare.

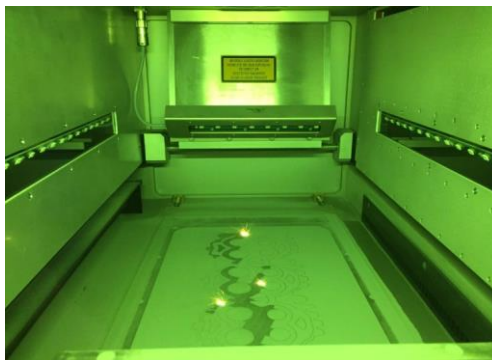


Figura 6-12 vista all'interno di una stampante SLM in funzione

Mentre il laser è in posizione fissa, uno specchio mobile, situato nella parte alta della camera di stampa, ne devia la luce così che il punto luminoso percorra l'intera traiettoria che descrive l'oggetto colpendo la polvere che si fonde con i granelli circostanti. Conclusa la scansione del fascio laser sullo strato di polvere, la piattaforma mobile si sposta verso il basso ed un elemento con movimento orizzontale deposita un'altra superficie di polvere per lo strato successivo. Quella non fusa viene recuperata, filtrata e riutilizzata alla fine del processo di stampa. Spesso se la geometria del prodotto è tale da non potersi sorreggere durante la fase di stampa, specialmente a causa delle alte temperature che lo indeboliscono temporaneamente, sono necessaria strutture di supporto. Queste strutture di supporto, visibili in figura 6-13, sono studiate per minimizzare la superficie di contatto col componente da stampare così che sia più facile poi rimuoverle dal prodotto finito.



Figura 6-13 prodotti stampati con le relative strutture di supporto

L'intero processo è svolto dopo aver riempito la camera di stampa con un gas inerte, solitamente Argon, allo scopo di contenere l'ossidazione o altre possibili contaminazioni del materiale.

Conclusioni

In questo elaborato è stato esposto il lavoro svolto durante il tirocinio. Durante questo periodo di “collaborazione esterna” mi è stato possibile osservare l’operato dei membri più esperti del team, assistere alle fasi decisionali, contribuire alla ricerca di alcuni dati, e contribuire alla compilazione delle slides. Purtroppo, non mi è stato possibile partecipare alla competizione in cui hanno esposto la presentazione, nonostante ciò, ho potuto ascoltare la registrazione del responso dei giudici. Il giudizio è stato nel complesso molto positivo, tanto che è valso il terzo post di categoria, ma non si è comunque persa l’occasione di fare qualche critica costruttiva.

Per prima cosa ci è stato raccomandato di tenere in considerazione i costi legati alla progettazione dei componenti, facendoci notare che questi sono i costi che alimentano gli stipendi degli ingegneri quali potremmo essere noi.

Seconda osservazione importante fatta dai giudici è stata di porre maggiore attenzione nell'interpretazione dei dati forniti in output dai software, in particolare, durante la revisione dei dati di LeanCost ci era sfuggito un dato di costo che doveva essere modificato.

Ultima osservazione sul contenuto è stata riguardo l'assenza di esposizione del processo decisionale che ha portato alla scelta di quali componenti acquistare e quali progettare, secondo la distinzione del buy e del make.

Dopo queste osservazioni sul contenuto, i giudici hanno consigliato anche su come migliorare la forma della presentazione suggerendo di presentare un numero inferiore di slides con poche parole chiave, senza riempirle troppo.

Posso sicuramente essere soddisfatto del progetto nel suo complesso ma sento di poter fare due considerazioni io stesso riguardo il processo di costificazione: ho notato infatti che, nonostante siano stati riportati i fornitori dei pezzi buy, non sono state segnate in alcun modo le aziende presso cui saranno fisicamente prodotti i componenti make. Per quanto l'Università disponga di molti macchinari, per la produzione della maggior parte dei componenti, anche se progettati internamente, è necessario l'utilizzo di macchinari di cui non si dispone e sarà perciò necessario delegare a terzi molte delle lavorazioni. Per il prossimo anno, quando verrà presentata l'auto costruita, sarà interessante implementare la costificazione con le lavorazioni effettivamente eseguite, facendo riferimento alle aziende ed ai singoli macchinari realmente coinvolti.

Bibliografia

<https://www.youtube.com/@easycompositestv>