

Università degli Studi di Roma “La Sapienza”



Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica

CATTEDRA DI ELEMENTI COSTRUTTIVI DELLE MACCHINE

A.A. 2000-2001

PROGETTAZIONE DI TELAI AUTOMOBILISTICI
“SPACE FRAME” IN LEGA LEGGERA
CON PARTICOLARE RIGUARDO A SOLUZIONI DI TIPO MODULARE

Tesista: Marco Traverso

Relatore: Prof. Ing. Umberto Pighini

Correlatore: Ing. Mario Fagnoli



Dipartimento di Meccanica ed Aeronautica
Facoltà di Ingegneria - Università degli Studi di Roma “La Sapienza”

DICEMBRE 2001

Ringraziamenti

Prima di passare all'esposizione degli argomenti oggetto della presente Tesi di Laurea, desidero esprimere la mia gratitudine a tutte le persone che mi hanno supportato – e talvolta anche “sopportato” – in questi anni di studi universitari.

Un Grazie quindi prima di tutto alla mia famiglia ed in particolare ai miei genitori, per la costante fiducia dimostratami e per avermi permesso di portare a termine con serenità questo Corso di Studi.

Un Grazie particolare a mio fratello Luca, per l'aiuto, i consigli e gli stimoli e per avermi fatto qualche volta da “fratello maggiore”.

Un Grazie anche ai miei amici e colleghi Ernesto, Fabio, Massimo, Riccardo e Valerio, per aver reso questi anni di studio piacevoli, interessanti e stimolanti.

Un Grazie a tutti i miei amici e le mie amiche che, ognuno a suo modo, hanno contribuito in questi anni a farmi crescere e (spero) a migliorarmi.

Ringrazio inoltre le persone che hanno dato la loro disponibilità ed il loro contributo durante la lunga fase di raccolta delle informazioni, ed in particolare Massimo Mazzara (Assomet), Herbert Freitag, Dieter Faisst ed Elvira Grettler (Alusuisse Automotive), la Redazione di Quattroruote, Kevin Widlic (Hydro Automotive Structures), Becky Sneder (The Aluminum Association).

Desidero inoltre Ringraziare l'Ing. Mario Fagnoli, Correlatore di questa Tesi, per la grande disponibilità ed i preziosi consigli.

Un ultimo sentito Ringraziamento va al Prof. Umberto Pighini, per gli insegnamenti delle Sue Lezioni, per la fiducia ed il supporto e per aver permesso la realizzazione di questa Tesi di Laurea.

Marco Traverso



INDICE DEI CONTENUTI:

| | |
|--|----|
| Sommario..... | x |
| Note Introduttive | xi |
| CAPITOLO 1 : TIPOLOGIE COSTRUTTIVE..... | 1 |
| 1.1 - Evoluzione Storica dei Telai Automobilistici | 2 |
| 1.1.1 - Introduzione..... | 2 |
| 1.1.2 - Dalle origini agli anni '40..... | 2 |
| 1.1.3 - Gli anni '50..... | 5 |
| 1.1.4 - Gli anni '60..... | 6 |
| 1.1.5 - Gli anni '70..... | 6 |
| <i>Fiat VSS - Veicolo Sperimentale a Sottosistemi (1978)</i> | 7 |
| 1.1.6 - Gli anni '80..... | 8 |
| 1.1.7 - Gli anni '90..... | 9 |
| 1.2 - Vetture di Serie | 10 |
| 1.2.1 - Introduzione..... | 10 |
| 1.2.2 - Honda NSX (1990)..... | 10 |
| 1.2.3 - Audi A8 (1994)..... | 11 |
| 1.2.4 - Renault Spider (1995)..... | 14 |
| 1.2.5 - General Motors EV1 (1996)..... | 15 |
| 1.2.6 - Lotus Elise (1996)..... | 16 |
| 1.2.7 - Plymouth Prowler (1997) | 19 |
| 1.2.8 - Fiat Multipla (1998)..... | 20 |
| 1.2.9 - Audi A2 (2000)..... | 21 |
| 1.2.10 - Bmw Z8 (2000)..... | 24 |
| 1.2.11 - Honda S2000 (2000)..... | 25 |
| 1.2.12 - Panoz Esperante (2000)..... | 27 |
| 1.2.13 - Confronto..... | 29 |
| 1.2.14 - Altre soluzioni | 30 |
| 1.3 - Concept Cars..... | 31 |
| 1.3.1 - Introduzione..... | 31 |
| 1.3.2 - GM Saturn (1994)..... | 31 |
| 1.3.3 - Dodge ESX2 (1998) | 32 |
| 1.3.4 - Ford-Pivco Th!nk (1998)..... | 32 |



| | |
|--|--------|
| 1.3.5 - Ford P2000 (1998) | 32 |
| 1.3.6 - Pininfarina Metrocubo (1999) | 33 |
| 1.3.7 - Dodge ESX3 (2000) | 33 |
| 1.3.8 - GM Precept (2000) | 33 |
| 1.3.9 - Altre Concept Cars | 34 |
| 1.4 - Ricerche e Sviluppi in Corso | 35 |
| 1.4.1 - Alcan ASVT (Aluminum Structured Vehicle Technology) | 35 |
| 1.4.2 - Alcoa AIV (Aluminum Intensive Vehicle)..... | 35 |
| 1.4.3 - Fiat Space Frame e Dual Frame..... | 35 |
| 1.4.4 - Foresight Vehicle Programme | 38 |
| 1.4.5 - Partnership for a New Generation of Vehicles (PNGV) | 39 |
| 1.4.6 - Ultra Light Steel Auto Body (ULSAB)..... | 39 |
| 1.5 - Soluzioni a Confronto | 42 |
| 1.5.1 - Introduzione | 42 |
| 1.5.2 - Scocca portante in acciaio (<i>steel unibody</i>)..... | 42 |
| 1.5.3 - Scocca portante in alluminio (<i>aluminum unibody</i>)..... | 44 |
| 1.5.4 - Telaio tubolare in acciaio..... | 45 |
| 1.5.5 - Carrozzeria e telaio a longheroni (<i>body-on-frame</i>) | 46 |
| 1.5.6 - Backbone Chassis | 48 |
| 1.5.7 - Scocca in fibra di carbonio | 49 |
| 1.5.8 - Conclusioni | 50 |
| 1.6 - Space Frame..... | 51 |
| 1.6.1 - Definizione | 51 |
| 1.6.2 - Requisiti funzionali..... | 52 |
| 1.6.3 - Aspetti produttivi generali | 54 |
| 1.6.4 - Premessa ai Capitoli 2 e 3..... | 55 |
| Bibliografia Capitolo 1 | 56 |
| CAPITOLO 2 : MATERIALI..... | 59 |
| <i>Introduzione</i> | 60 |
| 2.1 - Leghe di Alluminio | 61 |
| 2.1.1 - L'alluminio nell'industria automobilistica | 61 |
| 2.1.2 - Proprietà ed applicazioni strutturali delle leghe di alluminio | 63 |
| 2.1.3 - Costi del materiale | 68 |
| 2.1.4 - Criteri di progettazione | 68 |
| 2.1.5 - Componenti estrusi | 70 |
| 2.1.6 - Componenti stampati | 72 |
| 2.1.7 - Componenti pressofusi | 74 |



| | |
|---|-----|
| 2.1.8 - Comportamento a crash | 75 |
| 2.1.9 - Riciclabilità | 76 |
| 2.1.10 - Riparabilità | 77 |
| 2.2 - Altri Materiali | 79 |
| 2.2.1 - Acciai speciali | 79 |
| 2.2.2 - Materiali plastici | 80 |
| 2.2.3 - Compositi in fibra di carbonio | 82 |
| 2.3 - Sintesi | 84 |
| 2.3.1 - Confronto e previsioni per il futuro | 84 |
| Bibliografia Capitolo 2 | 85 |
| CAPITOLO 3 : TECNOLOGIE | 87 |
| 3.1 - Tecnologie di Lavorazione | 88 |
| 3.1.1 - Estrusione | 88 |
| 3.1.2 - Stampaggio | 90 |
| 3.1.3 - Pressofusione | 91 |
| 3.1.4 - Piegatura (<i>bending</i>) | 92 |
| 3.1.5 - Idroformatura | 94 |
| 3.1.6 - Tailor Welded Blanks | 97 |
| 3.1.7 - Altre Tecnologie | 99 |
| <i>Formatura Super Plastica (SPF - Super Plastic Forming)</i> | 99 |
| <i>Formatura Semi-Solida (Semi-Solid Forming o Rheocasting)</i> | 99 |
| <i>Electro-Magnetic Forming</i> | 100 |
| 3.2 - Tecnologie di giunzione | 101 |
| 3.2.1 - Introduzione | 101 |
| 3.2.2 - Saldatura a punti (RSW, Resistance spot welding) | 102 |
| 3.2.3 - Saldatura ad arco in atmosfera protetta (<i>MIG - TIG welding</i>) | 103 |
| 3.2.4 - Saldatura laser (<i>Laser welding</i>) | 107 |
| 3.2.5 - Saldatura ad impulso magnetico (<i>MPW, Magnetic pulse welding</i>) | 110 |
| 3.2.6 - Friction stir welding | 111 |
| 3.2.7 - Giunzioni meccaniche: rivettatura e graffatura (<i>clinching</i>) | 114 |
| <i>Rivetti autoperforanti (self-piercing rivets)</i> | 114 |
| <i>Graffatura mediante press joints (clinching)</i> | 114 |
| 3.2.8 - Giunzioni adesive | 118 |
| 3.2.9 - Giunzioni miste | 121 |
| 3.2.10 - Confronto | 122 |



| | |
|--|---------|
| Bibliografia Capitolo 3 | 123 |
| CAPITOLO 4 : REQUISITI DI PROGETTAZIONE | 124 |
| 4.1 - Schematizzazione dei Requisiti | 125 |
| 4.1.1 - Considerazioni generali | 125 |
| 4.2 - Requisiti Prestazionali | 128 |
| 4.2.1 - Comportamento statico e dinamico | 129 |
| <i>Resistenza statica</i> | 129 |
| <i>Rigidezza torsionale</i> | 130 |
| <i>Riduzione delle masse</i> | 132 |
| 4.2.2 - Sicurezza..... | 135 |
| <i>Comportamento a crash</i> | 135 |
| 4.2.3 - Durabilità | 139 |
| <i>Resistenza a fatica</i> | 139 |
| <i>Resistenza a corrosione</i> | 141 |
| 4.2.4 - Comfort..... | 141 |
| <i>Comportamento NVH (Noise, Vibration & Harshness)</i> | 141 |
| <i>Accessibilità</i> | 142 |
| <i>Abitabilità</i> | 142 |
| <i>Visibilità</i> | 143 |
| 4.2.5 - Manutenzione | 143 |
| <i>Riparabilità</i> | 143 |
| 4.2.6 - Correlazione tra requisiti prestazionali e aspetti costruttivi | 144 |
| 4.3 - Impatto Ambientale | 145 |
| 4.3.1 - Consumo energetico ed emissioni inquinanti | 145 |
| 4.3.2 - Riciclabilità..... | 147 |
| 4.4 - Costi di Produzione..... | 149 |
| 4.4.1 - Costi dei Materiali | 149 |
| 4.4.2 - Costi delle lavorazioni | 150 |
| 4.4.3 - Costi totali di produzione..... | 151 |
| 4.4.4 - Considerazioni economiche generali e conclusioni..... | 155 |
| 4.4.5 - Platform Sharing..... | 157 |
| 4.4.6 - Esperienza e Innovazione | 158 |
| Bibliografia Capitolo 4:..... | 160 |



| | |
|--|-----|
| CAPITOLO 5 : APPLICAZIONE: PROGETTAZIONE DI UN TELAIO SPACE FRAME PER CITY CAR MULTIFUNZIONALE..... | 162 |
| 5.1 - Campo di Applicazione e Progettazione Metodica | 163 |
| 5.1.1 - Scelta del campo di applicazione..... | 163 |
| 5.1.2 - Progettazione Metodica | 164 |
| 5.2 - Chiarimento del Compito | 167 |
| 5.2.1 - Raccolta Dati | 167 |
| <i>Soluzioni alternative di City Car</i> | 167 |
| <i>Normative tecniche e Codice della Strada</i> | 168 |
| 5.2.2 - Studio di fattibilità | 171 |
| 5.2.3 - Lista dei Requisiti | 173 |
| 5.3 - Concezione del Sistema Meccanico | 178 |
| 5.3.1 - Studio della Funzione | 178 |
| <i>Principio Tecnologico</i> | 178 |
| <i>Processo Tecnico</i> | 179 |
| <i>Struttura della Funzione</i> | 181 |
| 5.3.2 - Attuatori delle Funzioni Parziali..... | 183 |
| <i>Tabella Morfologica</i> | 185 |
| 5.3.3 - Schemi di Principio..... | 191 |
| <i>Schema di Principio n.1</i> | 192 |
| <i>Schema di Principio n.2</i> | 194 |
| 5.3.4 - Valutazione | 196 |
| 5.4 - Sviluppo del Progetto | 199 |
| 5.4.1 - Progetto preliminare | 199 |
| <i>Schematizzazione strutturale</i> | 199 |
| <i>Materiali utilizzati</i> | 200 |
| <i>Ipotesi di calcolo</i> | 201 |
| <i>Metodo numerico di calcolo</i> | 202 |
| <i>Verifica preliminare di resistenza ai carichi statici</i> | 208 |
| <i>Misurazione della rigidezza torsionale</i> | 212 |
| <i>Struttura di base</i> | 213 |
| <i>Analisi di sensibilità</i> | 215 |
| <i>Struttura di base modificata</i> | 220 |
| <i>Distribuzione delle sollecitazioni</i> | 221 |
| <i>Analisi di sensibilità</i> | 225 |
| <i>Ottimizzazione</i> | 232 |
| <i>Verifica di resistenza ai carichi dinamici</i> | 235 |



| | |
|--------------------------------------|---------|
| 5.5 - Layout del Veicolo..... | 241 |
| 5.5.1 - Versioni a passo corto..... | 243 |
| <i>Versione Cab</i> | 243 |
| <i>Versioni da trasporto</i> | 245 |
| 5.5.2 - Versioni a passo lungo..... | 248 |
| <i>Versione Cab</i> | 248 |
| <i>Versioni da trasporto</i> | 250 |
| Conclusioni..... | 253 |
| Bibliografia Capitolo 5 | 254 |
| Bibliografia Generale | 255 |
| Indice delle Abbreviazioni | 257 |



SOMMARIO

Oggetto di questa Tesi di Laurea è la progettazione di telai automobilistici con architettura Space Frame, attualmente una delle alternative strutturali di maggior interesse.

La Tesi si articola in due Parti: una Prima Parte, costituita dai Capitoli 1, 2, 3 e 4, in cui sono riportate le informazioni raccolte nella prima fase di documentazione, ed una Seconda Parte, costituita dal Capitolo 5, in cui è presentato lo studio di un caso pratico di applicazione.

Il Lavoro svolto nella Prima Parte ha messo in luce le principali caratteristiche dei telai automobilistici Space Frame, evidenziandone i numerosi e spesso complessi criteri di progettazione.

Si è cercato di inquadrare l'argomento anche in un'ottica di maggior respiro, con considerazioni generali di carattere economico e tecnologico.

Alla luce di quanto osservato, lo Space Frame si è rivelato una soluzione molto promettente, in particolare per veicoli a basso impatto ambientale e con ridotti regimi produttivi.

Si è quindi deciso di studiare, nella Seconda Parte, un caso pratico relativo all'adozione dello Space Frame in lega di alluminio per una City Car multifunzionale a basso impatto ambientale.

A tale riguardo è stato compiuto uno studio sulla configurazione del telaio e sulla sua resistenza statica e rigidezza torsionale.

Lo Space Frame si è rivelato idoneo dal punto di vista strutturale, ed ha permesso lo studio di differenti versioni della City Car a partire da una base comune e senza dover apportare modifiche sostanziali.



NOTE INTRODUTTIVE

La Prima Parte è il frutto di una lunga fase di documentazione.

Questa ricerca bibliografica si è spesso rivelata complessa, a causa della vastità e complessità dell'argomento e della scarsità di fonti reperibili. Tuttavia è stata fondamentale per raggiungere una sufficiente conoscenza dell'argomento ed una maggiore consapevolezza delle possibilità e, ovviamente, dei limiti del Lavoro svolto nella Seconda Parte (Capitolo 5).

Si è tentato, per quanto possibile, di dare un'organizzazione schematica e razionale alle informazioni raccolte, in modo da fornire un'esposizione lineare e facilitarne la consultazione. La molteplicità degli argomenti e delle relative implicazioni incrociate ha reso inevitabile alcune sovrapposizioni.

Per non appesantire eccessivamente la trattazione è stato omesso un sensibile numero di informazioni utili a completare il quadro generale dell'argomento, ma si è tentato di indicare il maggior numero possibile di fonti attraverso una Bibliografia suddivisa per i singoli Capitoli.

Le fonti specifiche sono infatti riportate alla fine del Capitolo relativo, in un ordine che riflette, dove possibile, il susseguirsi degli argomenti nell'esposizione degli stessi.

Le fonti non specifiche, consultate ed utilizzate nell'arco dell'intera stesura, sono invece riportate nella Bibliografia Generale, al termine del Capitolo 5.



CAPITOLO 1 : TIPOLOGIE COSTRUTTIVE



1.1 - EVOLUZIONE STORICA DEI TELAI AUTOMOBILISTICI

1.1.1 - Introduzione

Nel corso dei quasi 120 anni di evoluzione dell'automobile si sono succedute le più disparate soluzioni tecniche, spesso comparse solo per brevi periodi e poi dimenticate, altre volte invece universalmente accettate ed adottate.

In questo breve excursus è presentata l'evoluzione del telaio, seguendo le tendenze generali dell'industria automobilistica e riportando alcune interessanti soluzioni alternative proposte nel corso degli anni attraverso prototipi o vetture di serie, spesso senza successo dal punto di vista commerciale, ma di notevole interesse tecnico, e che non possono non essere considerate da chi voglia occuparsi della progettazione di strutture automobilistiche innovative.

1.1.2 - Dalle origini agli anni '40

La nascita delle automobili fu legata essenzialmente allo sviluppo ed al perfezionamento dei **motori a combustione**. Parallelamente si dovettero trovare soluzioni per una serie di nuovi problemi come i sistemi di **sterzo** e di **frenatura**. In questa fase la costruzione delle strutture di sostegno per la meccanica e la carrozzeria rappresentava un problema secondario e tecnologicamente meno rilevante: le ridotte prestazioni dei propulsori non ponevano particolari vincoli di peso o di rigidità per i telai.

Per quanto riguarda le soluzioni adottate, mentre i progettisti dei primi motori e dell'autotelaio (sospensioni, trasmissione, freni) non avevano punti di riferimento e potevano esplorare liberamente le più disparate soluzioni tecniche, per i costruttori di telaio e carrozzeria fu naturale attingere direttamente alle esperienze maturate con le **carrozze a cavallo**.

I primi veicoli, verso la fine del XIX Secolo, presentavano strutture da carrozza adattate alla motorizzazione a combustione interna. Anche i nomi delle varie



configurazioni – *phaeton, tonneau, landaulet, wagonette* - erano mutuati dal mondo delle vetture a cavallo.

Le strutture erano costituite da **telai in legno** su cui venivano montate le carrozzerie esterne, realizzate anch'esse mediante **pannelli di legno**.

Le esigue potenza a disposizione e le modeste velocità raggiungibili rendevano facilmente sopportabili anche a questi primitivi telai le sollecitazioni statiche e dinamiche.

Intorno al 1900 l'introduzione delle **lamiere in acciaio e in alluminio** ed il perfezionamento delle tecniche di forgiatura con maglio a caduta libera o meccanico (*drop-hammering* e *power-hammering*), rivoluzionò il modo di concepire la carrozzeria: i vecchi pannelli in legno, a sviluppo rettilineo o al massimo piegati secondo curve semplici attraverso un pretrattamento con vapore, non consentivano sufficienti distinzioni stilistiche tra i vari modelli.

Con i nuovi materiali fu possibile da subito realizzare le carrozzerie con minori vincoli formali: esse erano poi montate sui convenzionali telai in legno, eventualmente rinforzati con elementi in acciaio nelle zone di maggiore sollecitazione.

I pannelli erano realizzati quasi esclusivamente in lamiera di acciaio, ma sui veicoli più esclusivi e costosi erano adottate lamiere in alluminio.

Per una decina di anni, **fino al 1910** circa, la struttura predominante fu dunque quella di una **carrozzeria in lamiera** montata su **telai in legno**.

Nel 1915 l'ingegnere **H.J.Hayes** propose una soluzione alternativa costituita da una **carrozzeria con funzione aggiuntiva di telaio**, con vantaggi in termini di costi inferiori e riduzione di rumore e vibrazioni. Tale soluzione fu realizzata mediante la costruzione di tremila esemplari di vetture chiamate Ruler Frameless. In questi veicoli i pannelli della carrozzeria avevano forma tubolare e conferivano la rigidità necessaria, mentre il motore e le sospensioni poggiavano su un pianale orizzontale.

Nello stesso periodo l'ingegnere **Edward G. Budd** ipotizzò una vettura **totalmente in acciaio**: nell'idea originale la struttura avrebbe dovuto essere costituita da “**gusci**”



in **lamiera stampata** saldati tra loro; tuttavia la tecnologia di stampaggio del tempo non consentiva la lavorazione di lamiere secondo sezioni curve policentriche, ed erano quindi necessari numerosi membri di rinforzo oltre ad un utilizzo molto esteso della saldatura.

L'idea di Budd rappresentò comunque una prima comparsa, anche se in forma virtuale, della **monoscocca in acciaio stampata** attuale. La Dodge Brothers del 1914 adottava questa soluzione e fu la prima vettura totalmente in acciaio ad essere prodotta in migliaia di esemplari.

Nel **1922** l'uscita della **Lancia Lambda** costituì un passo decisivo nell'evoluzione della costruzione delle strutture automobilistiche. Fu ideata da Vincenzo Lancia, il quale si era ispirato alla struttura *monocoque* dei gusci delle imbarcazioni.

Con essa per la prima volta furono affrontati unitariamente i problemi strutturali di telaio e carrozzeria.

La Lambda presentava una struttura **interamente in acciaio**, con un pianale che incorporava il tunnel della trasmissione ed una **carrozzeria portante** costituita da un'ossatura rivestita dai pannelli in lamiera che contribuivano alla rigidità dell'insieme (vedi Tav.II).

Nello stesso anno la Auburn introdusse la soluzione di telaio ad X (*X-frame*), con vantaggi in termini di rigidità torsionale e di riduzione delle vibrazioni.

Nel **1934**, con la **Citroën Traction Avant**, la soluzione con **scozza portante** veniva applicata alla **produzione di massa**.

Intorno al 1935-36 la **Carrozzeria Touring** sviluppò il metodo costruttivo "**Sistema Superleggera**", costituito da **tubi di acciaio** al cromo-molibdeno di piccolo diametro saldati tra loro a reticolo, connesso a sua volta mediante saldatura ai longheroni. Sul traliccio di tubi era agganciata la **carrozzeria in lamiera di alluminio**, che non svolgeva funzione portante (vedi Tav.III-1).



L'applicazione principale era quella delle vetture da competizione, ma furono sviluppati anche modelli di serie.

Durante gli anni '40, con la **Seconda Guerra Mondiale**, gran parte delle industrie automobilistiche furono riconvertite alla produzione bellica, e le tecnologie subirono un sostanziale arresto.

Dopo il conflitto, negli USA, le industrie si spinsero alla ricerca dell'aumento delle prestazioni dei motori, e la riduzione di peso divenne un obiettivo secondario.

Parallelamente in Europa la scarsità delle disponibilità di acciaio portò allo sviluppo di vetture più leggere e di componenti ed intere carrozzerie in lamiera di alluminio.

Nel 1948, per esempio, fu messa in produzione la Land Rover, con carrozzeria realizzata proprio in pannelli di alluminio.

1.1.3 - Gli anni '50

A partire dagli anni '50 e per circa un ventennio, la domanda del mercato automobilistico fu molto elevata, superiore in generale all'offerta delle Industrie che poterono quindi soddisfare le esigenze produttive e sfruttare al meglio le economie di scala: ciò portò alla diffusione sempre più estesa della **scocca stampata in acciaio**, facile da assemblare in grande serie e con costi unitari estremamente competitivi per volumi produttivi elevati.

Parallelamente le vetture di nicchia presentavano soluzioni diverse.

La **Chevrolet Corvette** del **1953** rappresentò la prima applicazione a vetture di produzione della **fibra di vetro**, impiegata per la realizzazione dei 46 componenti della carrozzeria. Il telaio era uno **Space Frame in acciaio**.

Nel **1959** la **Maserati** introdusse la vettura da competizione **Tipo 60**, con un **telaio reticolare** costituito da 200 tubi di acciaio con diametri di 10, 12 e 15 mm., formanti un complesso reticolo che diede alla vettura l'appellativo di "*Birdcage*". Nella parte anteriore la struttura si sviluppava su tre piani orizzontali collegati tra loro da reticoli triangolari con elementi secondari di rinforzo nei punti di maggiore sollecitazione.



Le parti restanti della struttura erano più semplici e rinforzate ai nodi mediante fazzoletti di lamiera traforata. Le deformazioni elastiche dei tubi, realizzati in acciai di qualità medio-bassa, erano progettate per evitare il distacco delle saldature.

1.1.4 - Gli anni '60

Durante gli anni '60 in Europa vi fu un sostanziale **consolidamento** della soluzione della **scocca portante in acciaio** che portò, verso la fine del decennio, allo sviluppo delle prime procedure progettuali standardizzate all'interno delle Industrie Automobilistiche.

Parallelamente vennero eseguite ricerche su vetture sperimentali basate soprattutto sull'utilizzo dei nuovi materiali compositi.

Nel **1962** la **Lotus** introdusse con la **Elan** la soluzione del **Backbone Chassis** (vedi Tav.V-1), un telaio costituito da un elemento portante centrale in acciaio scatolato che sostiene il motore e le sospensioni e che contiene al suo interno la trasmissione. La carrozzeria era costituita da pannelli in fibra di vetro incollati al telaio.

Nel 1963-64 fecero la loro comparsa in Italia delle vetture utilitarie con scocca portante in materiali plastici rinforzati con fibre di vetro: la Autobianchi Stellina, la ASA 1000 Spyder, la LMX, S.S. 100, la Bagheera.

Nel 1967 la Bayer realizzò un'auto sperimentale con carrozzeria portante in plastica utilizzando pannelli sandwich costituiti da due laminati di vetroresina con del poliuretano espanso interposto.

Negli USA continuò ad avere larga applicazione la soluzione di carrozzeria su telaio a longheroni.

1.1.5 - Gli anni '70

Negli anni '70 aumentò la richiesta di **differenziazione** dei vari modelli e le Case furono costrette a sviluppare **piattaforme differenti**.

La **crisi petrolifera** del **1973** impose nuovi obiettivi progettuali: negli Stati Uniti tra il 1976 e il 1982, in risposta ai regolamenti federali **CAFE** (Corporate Average Fuel



Economy), il contenuto medio di acciaio nei veicoli fu diminuito da 1035 kg a 795 kg attraverso una riduzione delle dimensioni ed il passaggio dalla configurazione carrozzeria su telaio a longheroni (*body-on-frame*) alla scocca portante (*unibody*).

Vennero intraprese inoltre sperimentazioni con materiali leggeri.

Nel 1979 la Ford realizzò un prototipo della berlina LTD realizzato interamente con compositi in fibra di carbonio, ottenendo riduzioni di peso primarie di 315 kg e alleggerimenti secondari pari a 225 kg.

Fiat VSS - Veicolo Sperimentale a Sottosistemi (1978)

Particolare importanza per gli scopi del presente Lavoro riveste il prototipo Fiat VSS (vedi Figura 1.1.1 e Tav.VI-1), realizzato sulla base della Fiat Ritmo e frutto della collaborazione tra la Casa Torinese, l'I.D.E.A. Institute e lo studio dell'architetto Renzo Piano.

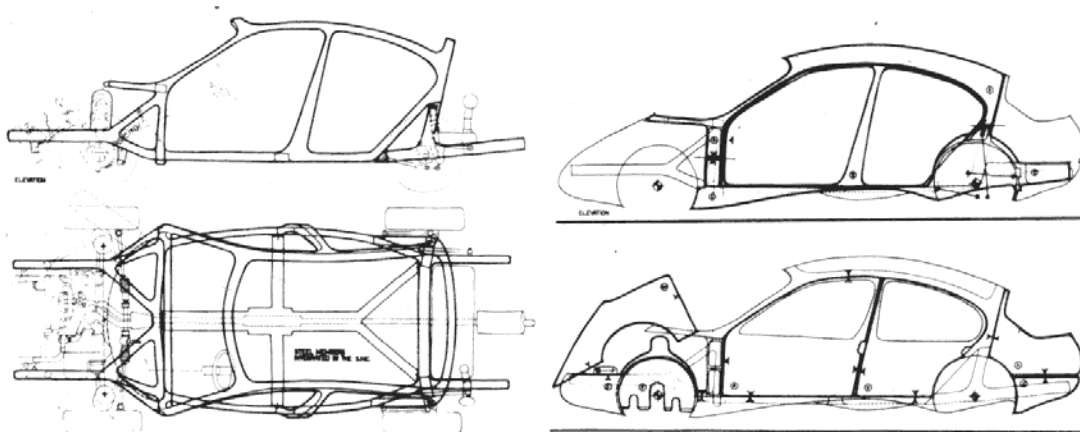


Fig. 1.1.1 - Schema della struttura del prototipo Fiat VSS

Esso costituisce una importante innovazione: il ritorno alla separazione tra parte strutturale (uno **Space Frame in acciaio**) e rivestimenti esterni (**pannelli plastici**) era per la prima volta mirato specificatamente alla riduzione delle masse e al raggiungimento di un'elevata flessibilità di forme, assemblaggio e produzione, anticipando di un ventennio delle problematiche oggi in primo piano nell'Industria Automobilistica.



Nell'idea originale, inoltre, i nove pannelli esterni dovevano essere prodotti separatamente ed arrivare già completi alla linea di assemblaggio finale, costituendo dunque dei veri e propri «**sottosistemi**», in una filosofia di produzione attualmente in fase di studio presso molte Case.

1.1.6 - Gli anni '80

Negli anni '80 l'incremento della competitività del mercato porta allo sviluppo e all'applicazione di nuovi materiali e tecnologie, prima fra tutte l'**elettronica**, e alla ricerca di nuovi obiettivi progettuali.

Cresce inoltre la sensibilità alle **problematiche ambientali** ed aumentano i provvedimenti legislativi tesi alla **riduzione delle emissioni inquinanti e dei consumi energetici**.

In questo scenario uno degli obiettivi perseguiti dalle Industrie è la **riduzione delle masse**: anche in quest'ottica sono intraprese vaste ricerche su soluzioni strutturali alternative.

Nel **1984** la General Motors presenta la **Pontiac Fiero** (vedi Tav. VI-2) ha un telaio **Space Frame** in **acciaio** e carrozzeria esterna in SMC.

La struttura è costituita da tre sottotelai modulari di base (anteriore, posteriore e pianale), saldati tra loro all'inizio del processo di assemblaggio. I componenti rimanenti sono fissati (vedi Tav. VI-3) in una singola stazione ("*Single Tool*"), in cui vengono anche praticati i fori nei punti di connessione con le parti meccaniche.

Nell'intero processo vengono utilizzati circa 4000 punti di saldatura.

I pannelli compositi esterni ed i componenti dell'abitacolo sono preparati ed assemblati nella fase finale della produzione.

Anche se il successo commerciale della Fiero è stato piuttosto modesto, le innovazioni apportate dalla sua struttura e dalle inedite procedure di assemblaggio hanno rappresentato il punto di partenza di numerose ricerche successive.



1.1.7 - Gli anni '90

I **vincoli ambientali** sui **consumi energetici** e sulle **emissioni inquinanti** diventano **sempre più restrittivi** e vengono affiancati dal tema della **riciclabilità** delle vetture a fine vita.

Le normative sulla **sicurezza** impongono un incremento delle **prestazioni strutturali** e l'adozione di dispositivi di protezione attiva e passiva.

Questo, in aggiunta alle esigenze del mercato che impongono un numero sempre maggiore di componenti ed accessori comporta un sensibile **aumento del peso** dei veicoli, con un incremento medio del 6-7% per rinnovo di gamma (ogni 6-7 anni).

Tale aumento rende ulteriormente più **urgente** la ricerca di soluzioni che consentano la **riduzione delle masse**.



1.2 - VETTURE DI SERIE

1.2.1 - Introduzione

L'attuale produzione automobilistica adotta nel **95%** circa dei casi la soluzione della **scocca stampata e saldata in lamiera di acciaio**.

Nel presente Paragrafo vengono presentate una serie di vetture di attuale produzione che impiegano soluzioni differenti, per tipologia costruttiva e/o per materiali utilizzati.

In alcuni casi sono riportati anche particolari costruttivi e di assemblaggio.

Le tecnologie ed i materiali citati saranno trattati con maggiore dettaglio nei successivi Capitoli 2 e 3.

1.2.2 - Honda NSX (1990)

L'Honda NSX, introdotta nel mercato nel 1990, è stata la prima auto di serie con carrozzeria e telaio interamente in alluminio.

La struttura è costituita da una **scocca portante** stampata che utilizza **5 leghe di alluminio** differenti, con longheroni inferiori estrusi. L'assemblaggio avviene mediante saldatura a punti.

Il peso complessivo della struttura è di 210 kg, con un risparmio dichiarato del 50% rispetto alla corrispondente soluzione in acciaio.

Per la prima volta sono stati affrontati i problemi specifici nella lavorazione delle leghe leggere applicata nella normale produzione veicolistica, e sono state introdotte apposite macchine per la saldatura e per lo stampaggio, e tecnologie di origine aeronautica, come l'incollaggio di alcuni componenti strutturali mediante resine epossidiche polimerizzate a 180°C.



1.2.3 - Audi A8 (1994)

L'Audi A8 è stata la prima auto di serie ad utilizzare un telaio **Space Frame in lega di alluminio**.

La sua struttura denominata Audi Space Frame (ASF®) è il frutto della collaborazione tra l'Audi e l'**Alcoa** (Aluminum Company Of America), iniziata nel 1982 e tuttora in corso.

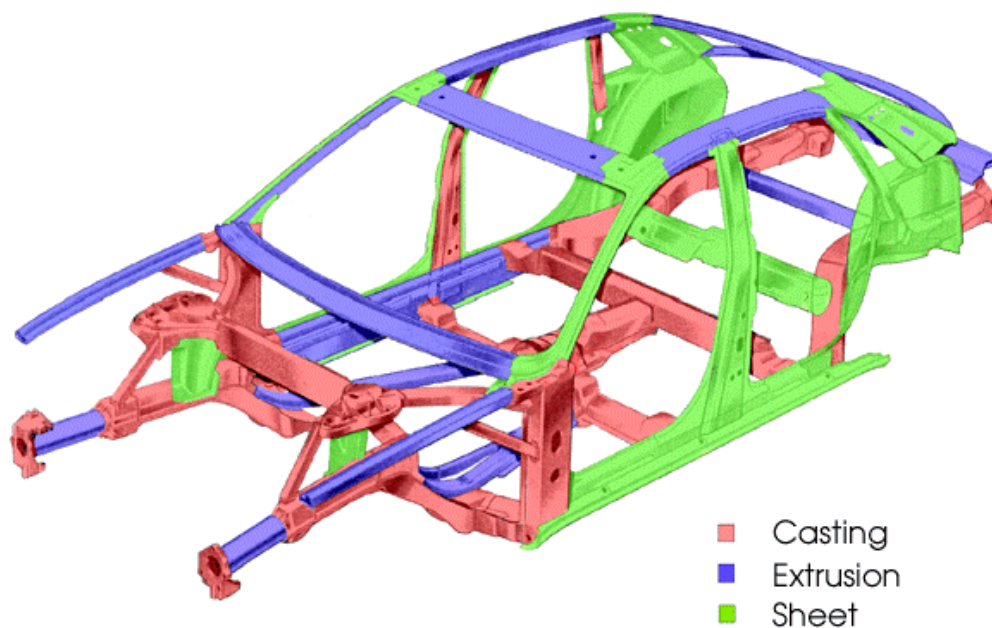


Fig. 1.2.1 - Struttura dello Space Frame dell'Audi A8

Lo Space Frame supporta la carrozzeria in lega leggera stampata, che ha anche funzione portante.

La vettura, prodotta in 15000 unità/anno, ha una rigidezza torsionale complessiva pari a 1350000 Nm/rad, contro una media della categoria di 955000 Nm/rad.

In caso di incidenti frontali, la sezione anteriore della struttura assorbe interamente l'energia di crash per velocità di impatto fino a 15 km/h e può essere smontata e sostituita, mentre la cella dell'abitacolo rimane intatta.

L'ASF è costituito da profilati estrusi in prevalenza a sezione chiusa, connessi tra loro mediante nodi pressofusi.

La riciclabilità è, secondo l'Audi, cinque volte maggiore rispetto all'acciaio.



L'energia totale richiesta per la produzione è di 152-163 GJ contro i 127 GJ di un'analogia vettura in acciaio.

Estrusi

Sono in prevalenza profilati con sezioni scatolate.

Le leghe utilizzate sono delle leghe inedite Al-Si con tenori di Si superiori allo 0,2% per garantire la fluidità e consentire l'indurimento per precipitazione durante l'invecchiamento artificiale.

Lamiere

Utilizzate per pannelli strutturali, pianale, tetto e parafrangente, con funzione portante, costituiscono il 45% del peso della struttura.

Il loro spessore è incrementato rispetto all'acciaio di un fattore 1.7-1.8.

La lega utilizzata è la 5182 allo stato T4 (più deformabile), con limite elastico pari a 140-395 MPa. E' invecchiabile nonostante il Mg sia in tenori minori del 7%, grazie alla presenza di altri alliganti.

Nodi pressofusi

Sono utilizzati nelle zone soggette alle sollecitazioni maggiori.

Vengono realizzati mediante un procedimento denominato VACURAL, consistente nell'iniezione di alluminio liquido in stampi sottovuoto, e che consente di ottenere:

- Elevate qualità ed omogeneità, porosità molto ridotta, in modo da garantire elevate caratteristiche meccaniche unite alla tenacità necessaria per la resistenza a fatica;
- Buona saldabilità, necessaria per la giunzione con i profilati.

Tecniche di giunzione

Sono utilizzate diverse tecniche:

- **Saldatura MIG:** usata per le lamiere sottili e per i collegamenti nodi-profilati;
- **Saldatura a punti:** per le lamiere dove non si può arrivare con le pinze da chiodatura;



- **Graffatura** (*clinching*): di importanza secondaria dal punto di vista strutturale per la resistenza statica ridotta; è utilizzata per l'accoppiamento di lamiere per il rinforzo delle superfici estese;
- **Rivettatura**: utilizzata negli elementi portanti a superficie estesa; a parità di spessore ha una resistenza superiore del 30% rispetto alla saldatura; ha inoltre il vantaggio di richiedere meno energia e di non modificare la struttura del materiale.
- **Adesivi strutturali**: usati per i vetri fissi, nei collegamenti delle portiere e dei cofani (insieme all'avvitatura), nei supporti molla.-ammortizzatore (insieme alla rivettatura e alla saldatura).

Assemblaggio

Dopo lo stampaggio, l'assemblaggio avviene attraverso la saldatura robotizzata dei componenti.

La finitura è operata attraverso una smerigliatura e una fosfatazione a 3 cationi (Zn, Ni, Mn) che favorisce l'adesione dello strato cataforetico ad immersione.

La verniciatura avviene in maniera analoga a quella per carrozzerie in acciaio.

Già durante questa fase si ha un primo invecchiamento artificiale, che viene successivamente completato con un ulteriore trattamento termico a 210°C per 30 minuti.



1.2.4 - Renault Spider (1995)

Ha uno **Space Frame in lega di alluminio** sviluppato dalla Hydro Aluminium, dal peso totale di 80 kg e con una rigidezza torsionale di 573000 Nm/rad.

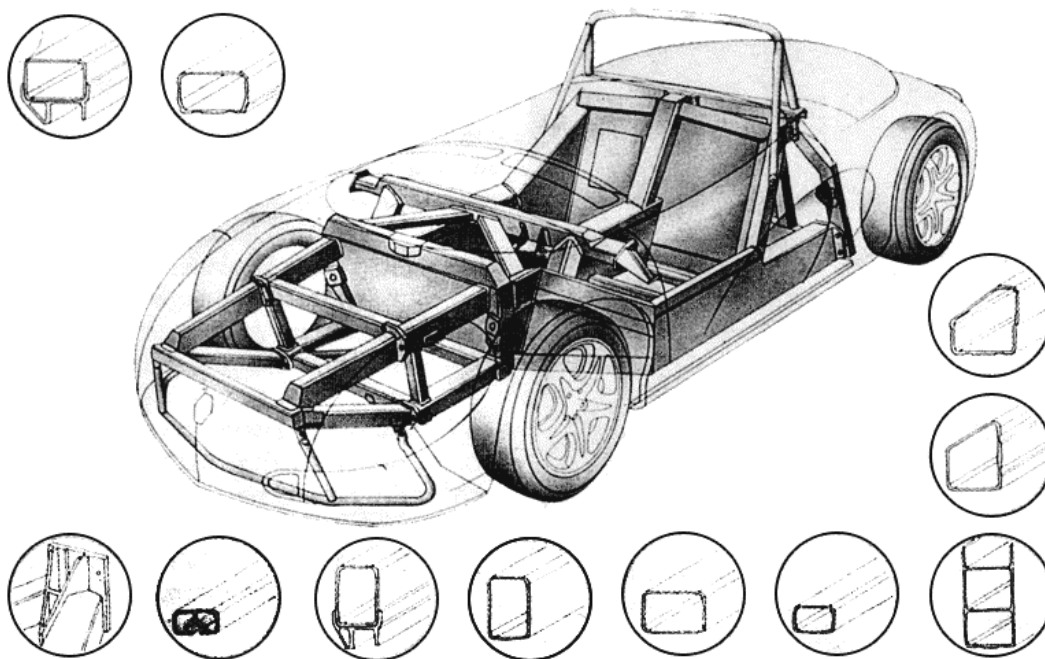


Fig. 1.2.2 - Struttura dello Space Frame e sezioni dei profilati - Renault Spider

E' composto da estrusi per la maggior parte in lega 6063 ed alcune parti critiche in lega 6082, saldati con il sistema MIG, ed è rivestito con uno strato di polimero.

La sua struttura è costituita da 3 elementi principali estrusi con sezione scatolata dallo spessore di 3 mm, uniti ai sottotelai anteriore e posteriore.

Presenta una marcata modularità che rende agevoli l'assemblaggio e la sostituzione di componenti nel caso di danneggiamento, riducendo la necessità di complesse operazioni di riparazione.

La struttura è in grado di assorbire un impatto a 50 Km/h senza che la cella dell'abitacolo subisca deformazioni.



Gli elementi principali della gabbia si congiungono anteriormente a formare una specie di prua che impedisce alle ruote anteriori di essere spinte all'interno dell'abitacolo in caso di impatto.

1.2.5 - General Motors EV1 (1996)

In risposta alle leggi californiane del 1985 secondo la quale entro il 1998 (data poi rimandata) il 2% delle vetture vendute avrebbero dovuto essere ad emissioni inquinanti nulle (ZEV, *Zero Emission Vehicle*), nel Dicembre del 1996 la General Motors mise in produzione la EV1, veicolo a propulsione interamente elettrica.

Nel suo sviluppo uno dei fattori chiave è stato il perseguimento della riduzione delle masse, per ridurre i consumi energetici (aumentando così prestazioni ed autonomia) e per compensare la notevole massa (533 kg) del gruppo batterie.

Per raggiungere tale obiettivo è stato progettato, in collaborazione con con l'Alcoa Technical Center, un telaio **Space Frame** interamente in **lega di alluminio**, con una riduzione del 40% rispetto alla corrispondente struttura in acciaio.

La rigidità torsionale è pari a 860000 Nm/rad e la frequenza naturale del I modo flessionale è di 25 Hz.

L'adozione dello Space Frame ha consentito inoltre una riduzione del numero di componenti dai 225 necessari per una analoga struttura in acciaio a 165.

La struttura è costituita da profilati estrusi monocella e multicella, lamiere stampate e 4 elementi pressofusi nei punti di attacco dei gruppi molla-ammortizzatore.

In totale sono utilizzate solo 4 leghe di alluminio differenti, il che favorisce la riciclabilità.

I pannelli esterni sono in compositi plastici.

Le **tecniche di giunzione** utilizzate sono:

- Saldatura a punti (2000, con una riduzione del 40%)
- Rivettatura (150): utilizzata nei punti con accesso difficoltoso e per l'unione di componenti differenti (es. estrusione-getto)
- Adesivi strutturali epossidici (150 m lineari).



1.2.6 - Lotus Elise (1996)

E' una vettura due posti sportiva spider prodotta in 3500 unità/anno.

Ha una **struttura scatolata** costituita da un insieme di profilati cavi estrusi in lega di alluminio di forma piatta (vedi Fig 1.2.3).

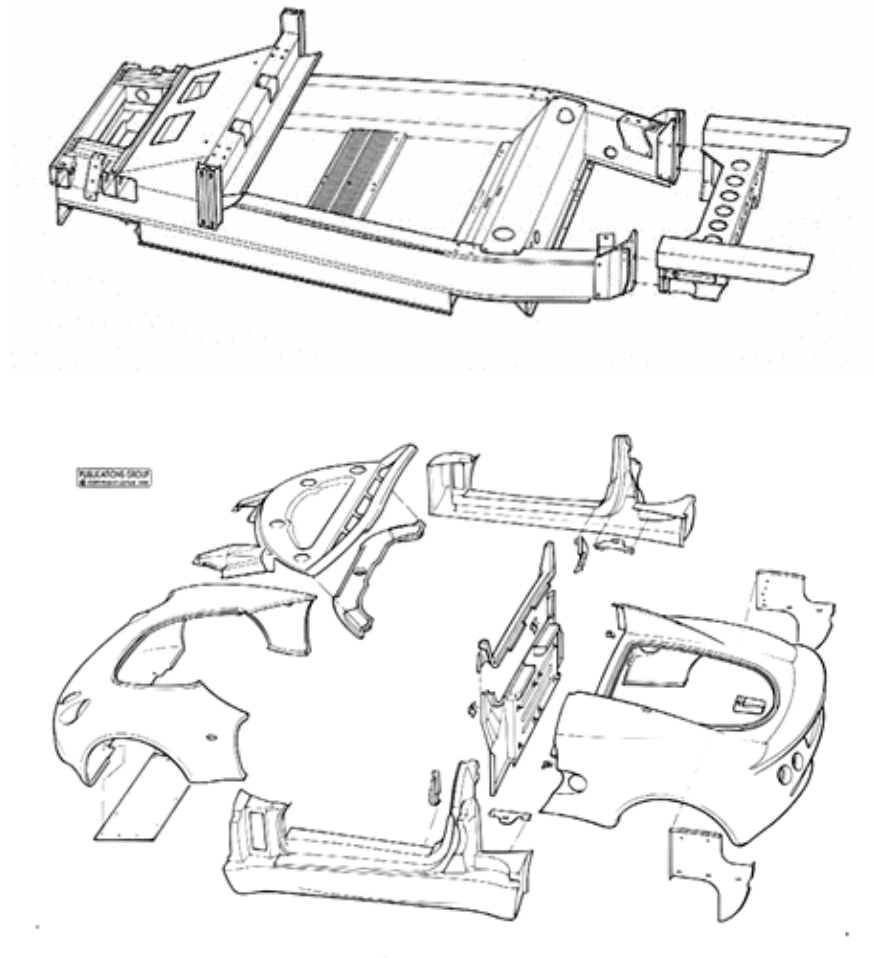


Fig. 1.2.3 - Schema del telaio e della carrozzeria della Lotus Elise (fonte: Lotus)

Il peso della struttura, costituita da 35 estrusi e 3 lamierati, è di 65 kg e la rigidezza torsionale è pari a 630000 Nm/rad.

La **carrozzeria** è costituita da pannelli di **fibra di vetro**.



Estrusi

Gli spessori delle sezioni variano tra 1.5 e 2 mm. La lega utilizzata è la AA 6063.

Lamiere

La lega utilizzata è la Hydro's 3105 grade – da Al riciclato al 100% con processo a 900°C su una *hotplate*, con la rimozione di impurezze di acciaio tramite elettromagnete.

Le torri delle sospensioni sono prodotte dalla Alusuisse con una pressa da 100000 tonnellate.

Tecniche di giunzione

Le connessioni sono effettuate mediante adesivi epossidici e rivettatura.

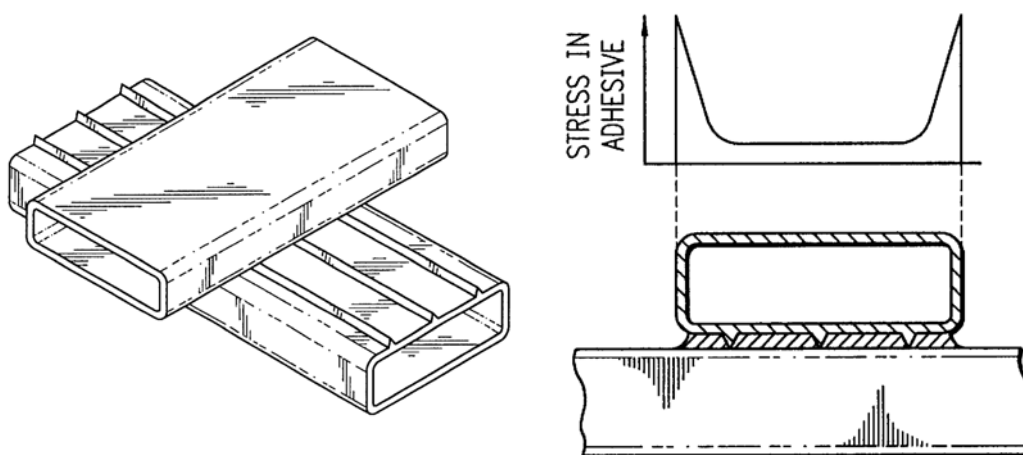


Fig. 1.2.4 - Schema della giunzione diretta di profilati mediante adesivi

L'adesivo utilizzato è una pasta epossidica con essiccamento a caldo (*heat-cured*). Non essicca fuori dal forno e può essere conservato per anni, tuttavia assorbe acqua che può trasformarsi in vapore durante l'essiccamento, danneggiando la giunzione.

Ha le seguenti caratteristiche meccaniche:

- Limite elastico 35 MPa
- Modulo di Young 2700 MPa
- Essiccamento 40 min. a 200°C



La rivettatura avviene con l'utilizzo di *Ejots*, rivetti autofilettanti in lega di alluminio con filettatura M6, avvitati da macchine elettriche in fori da 38mm. La differenza di diametro genera una temperatura di 120°C all'interno della lega e crea una bavatura nella parte interna del componente (di spessore pari a 2 mm) creando di fatto una filettatura profonda 4 mm.

Lavorazione e Assemblaggio

L'assemblaggio della struttura avviene secondo le seguenti fasi:

- Estrusione con pressa da 2200 tonnellate a 490 °C (temperature più basse consentirebbero maggiore rapidità di lavorazione, ma a scapito della qualità);
- Elementi sottoposti ad attacco acido e processo di anodizzazione: si ottiene una finitura che dà protezione alla corrosione e consente il successivo incollaggio
- Raccolta dei componenti mediante la lettura di codici a barre e loro preparazione manualmente su maschere di montaggio;
- Applicazione dell'adesivo in quantità misurate ed estremamente ridotte da parte di robot;
- Assemblaggio manuale dei componenti su maschera di montaggio.

Alcuni componenti vengono semplicemente serrati con morse; altri (i più grandi) sono bloccati mediante rivettatura per evitare movimenti; dei distanziatori sulla superficie degli estrusi consentono di mantenere la giusta distanza tra componenti compressi fra loro, in modo da evitare che l'adesivo venga spinto fuori dalla sua sede;

- Essiccamento in forno per 4 min. a 180 °C;
- Effettuazione di verifiche dimensionali a campione.

Durabilità e Riparabilità

Sono stati effettuati test consistenti nell'esposizione per 1000 ore a sali nebulizzati (soluzioni di acido solforico) a 52°C, sotto la quale una normale struttura di acciaio sarebbe virtualmente scomparsa.



La progettazione consente la sostituzione di interi componenti, ma spesso le Compagnie di Assicurazioni non consentono che gli autoriparatori usino adesivi: il telaio deve ritornare alla fabbrica.

Durante l'essiccamento in forno vengono incollate anche due coppie di piastre: una viene testata per determinare la resistenza a trazione della giunzione, l'altra è archiviata con il numero di telaio corrispondente, per future prove in seguito a danni o ad incidenti.

1.2.7 - Plymouth Prowler (1997)

Presentata come Concept Car nel 1993, è stata messa in produzione nel 1997 ed è attualmente l'auto americana che fa il maggior utilizzo di alluminio (400 kg in totale).

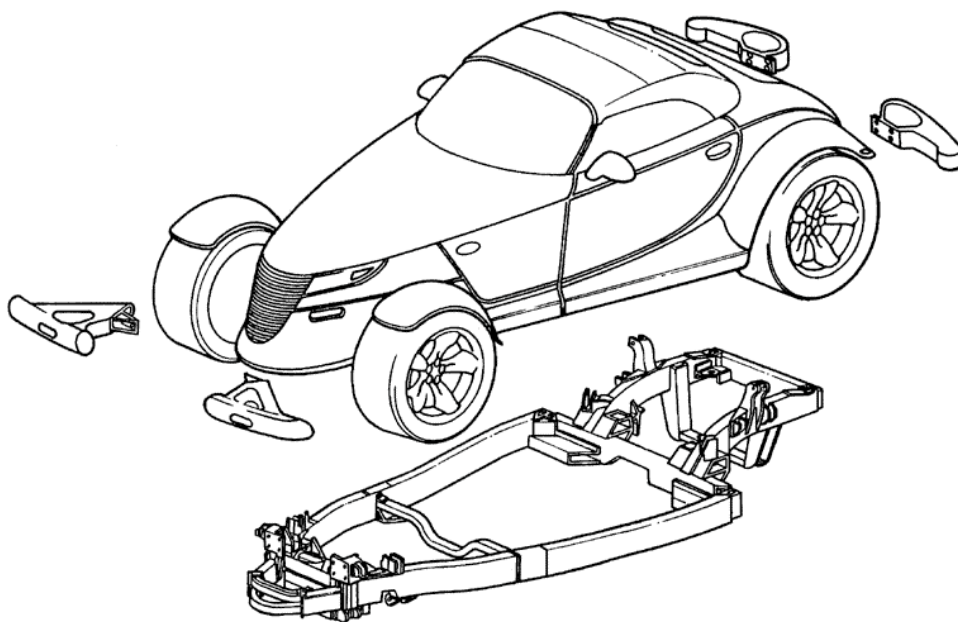


Fig. 1.2.5 - Carrozzeria su telaio a traverse e longheroni della Plymouth Prowler

Ha un telaio **Ladder Frame** in estrusi e pressofusi di alluminio costruito dalla Alcoa in 5000 esemplari all'anno: i pannelli esterni sono in lega di alluminio (AA 6022) e SMC.



Per l'assemblaggio sono utilizzate congiuntamente la saldatura (circa 330 metri), la rivettatura e le giunzioni adesive.

1.2.8 - Fiat Multipla (1998)

La vettura si basa su un telaio **Space Frame in lamiera di acciaio** studiato dalla Fiat per i modelli con volumi di produzione medio-bassi (vedi Tav. X-1).

I profilati sono lavorati da rullatrici che li piegano conferendo loro la forma desiderata.

Lo Space Frame viene preparato in Lastratura assemblando i vari sottogruppi. Il tutto converge sulla linea principale, dove, partendo dall'ossatura anteriore, si aggiungono i profilati che formano il reticolo e le lamiere che costituiscono il pianale della vettura.

Complessivamente la scocca è saldata con 4500 punti. Il grande numero di giunzioni richiede attenzione in particolare nei nodi, soggetti alle maggiori sollecitazioni.

Al montaggio della Multipla è stata dedicata una linea specifica. La plancia ed altri particolari complessi (porte, propulsori, sospensioni ed altro) sono assemblati e collaudati su una linea separata.



1.2.9 - Audi A2 (2000)

E' la **prima auto di grande serie** (60000 unità/anno) ad avere **telaio e carrozzeria interamente in alluminio**.

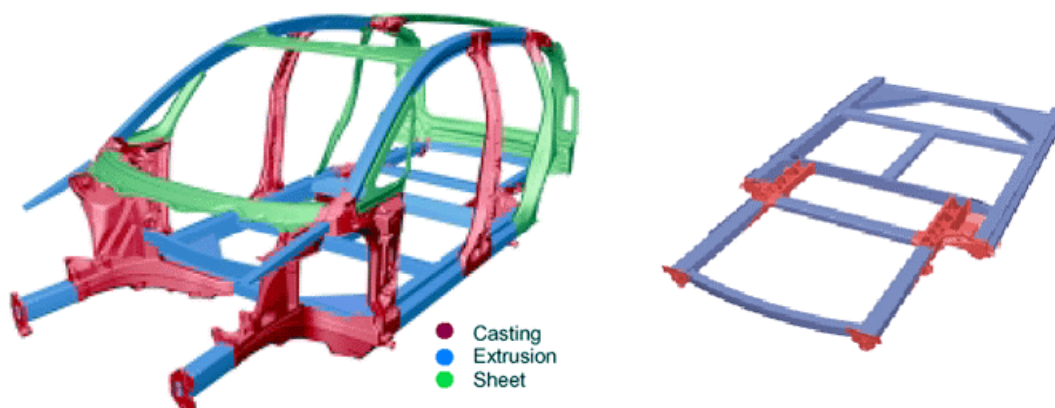


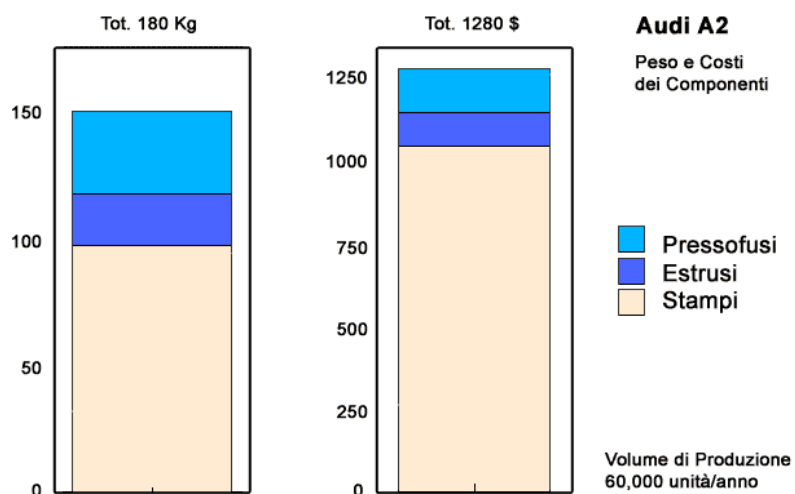
Fig. 1.2.6 - Struttura dello Space Frame e del pianale dell'Audi A2

La sua struttura è uno Space Frame in lega di alluminio (vedi Figura 1.2.6), diretta evoluzione dell'ASF® della A8, che ha richiesto un tempo di sviluppo di tre anni e che è stato mirato fondamentalmente ai seguenti obiettivi:

- Diminuzione dei costi;
- Riduzione del numero di componenti;
- Completa automazione della lavorazione;
- Adattabilità a volumi di produzione superiori.

In particolare la diminuzione del numero di componenti, attuata principalmente attraverso l'uso di elementi estesi multifunzionali, comporta i seguenti vantaggi:

- Maggior semplicità di gestione della produzione e di assemblaggio;
- Migliore precisione dimensionale;
- Diminuzione dei nodi e delle giunzioni.

**Diagramma 1.2.1 - Ripartizione di peso e di costi dei componenti strutturali dell'Audi A2**

Estrusi

Hanno in massima parte andamento rettilineo (vi sono solo 6 elementi curvi).

Gli elementi principali sono calibrati prima dell'assemblaggio mediante idroformatura, che consente anche la variazione della sezione nel senso della lunghezza.

In particolare la parte superiore dei montanti A, l'elemento longitudinale laterale del tetto (*SRR, side roof rail*) e il suo proseguimento nella parte superiore del montante C nel loro insieme sono costituiti da un singolo profilato estruso che mediante idroformatura assume una configurazione a sezione e curvatura variabile (vedi Figura 1.2.7).

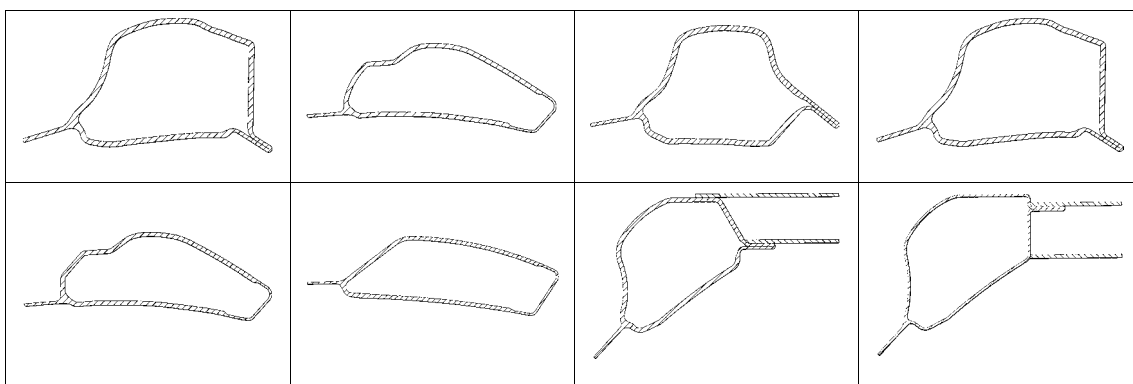


Fig. 1.2.7 - Sezioni trasversali del SRR dell'Audi A2 (fonte: Alcoa)



Il pianale è connesso alla parte frontale mediante nodi pressofusi e comprende dei membri addizionali (due diagonali ed uno longitudinale) che permettono il trasferimento dei carichi dalla parte anteriore della vettura al pianale stesso.

Le ristrette tolleranze (0,2 mm) consentono l'utilizzo della saldatura laser.

Lamiere

Il loro spessore è aumentato di un fattore 1.4 rispetto all'acciaio.

I pannelli esterni hanno anche un apporto strutturale.

Nodi pressofusi

Il loro numero è ridotto rispetto alla A8, tuttavia costituiscono dei componenti chiave della struttura:

- **Nodi di connessione frontali**

Si tratta di componenti pressofusi di estese dimensioni e che integrano tra l'altro le seguenti funzioni:

- Connessione mediante bullonatura dei longheroni frontali. La bullonatura facilita l'eventuale sostituzione del pezzo;
- Parte inferiore del montante A;
- Assorbimento di energia;
- Supporto del motore e della trasmissione;
- Supporto delle sospensioni.

- **Nodi di connessione posteriori**

Connettono il pianale posteriore a quello centrale.

Sono elementi multifunzionali e integrano i punti di ancoraggio dell'assale posteriore, i supporti i gruppi molla-ammortizzatori ed i punti di attacco delle sospensioni.



- **Montanti B**

Sono in un unico pezzo pressofuso, mentre sulla A8 erano costituiti da 6 sezioni separate.

Tecniche di giunzione

Rispetto alla A8, sono state completamente **eliminate le saldature a punti** e le graffature (*clinchings*), ridotte le saldature MIG, mentre è stato fatto un più esteso utilizzo della rivettatura ed è stata introdotta la saldatura laser.

Quest' ultima è stata in particolare utilizzata nei nodi a T che uniscono i longheroni e le traverse del pianale, con ottimizzazioni relative alla sequenza e alla direzione. Si sono inoltre adottate speciali tecniche di serraggio per minimizzare la distorsione termica e rientrare nelle ristrette tolleranze necessarie.

1.2.10 - Bmw Z8 (2000)

Ha un telaio **Space Frame in estrusi di alluminio** (vedi Tav. VIII-2), collegati fra loro mediante 1000 rivetti e 57 metri di saldatura MIG. Il risparmio di peso dichiarato è del 30%.

La forma della struttura è stata ideata a partire da una forma chiusa, immaginando di avvicinare tra loro gli elementi longitudinali laterali del tetto (*roof side rails*) e di abbassarli, piuttosto che rimuovere semplicemente tetto e montanti superiori B e C: si è ottenuto un massiccio tunnel centrale composto da due elementi che conferendo elevata rigidità consente l'abbassamento dei longheroni laterali in favore dell'accessibilità.

I sottotelai anteriore e posteriore sono connessi alla cella dell'abitacolo mediante coppie di bracci ad Y, che hanno notevole importanza ai fini della rigidità totale, e di gestione dei carichi di crash, assorbendo energia mediante deformazione con raggrinzamento e trasferendo i carichi stessi nella robusta zona centrale del pianale. I pannelli esterni sono in lamiera di alluminio ed hanno anche funzione strutturale.



I paraurti e le minigonne sono realizzati in materiale plastico (poliuretano) e sono in grado di assorbire urti fino a 4 km/h senza subire danni.

1.2.11 - Honda S2000 (2000)

Pur avendo **carrozzeria e telaio interamente in acciaio**, la Honda S2000 è un interessante esempio di tipologia costruttiva a sé stante.

L'obiettivo principale del progetto era il raggiungimento di un rigidezza torsionale e di un comportamento a crash analoghi a quella di una vettura chiusa senza sensibili incrementi di peso.

Sulle vetture scoperte la perdita di è generalmente contenuta mediante l'adozione di lamiere più spesse e l'introduzione di rinforzi aggiuntivi, specialmente in corrispondenza dei longheroni laterali e nella zona centrale del pianale. Questi interventi, oltre a non avere un'elevata efficienza, aumentano notevolmente la massa complessiva. In questo modo, inoltre, la BRC (*body rigidity centerline*) si abbassa notevolmente rispetto alle carrozzerie chiuse.

Nella progettazione della Honda S2000, per ottenere una struttura estremamente rigida, ogni elemento è stato posizionato in modo da minimizzare gli spostamenti della BRC.

Ne è risultata un'inedita struttura in acciaio costituita principalmente da:

- **Telaio superiore ad X** (*X-bone frame structure*);
- **Longheroni laterali** di notevoli dimensioni;
- **Pianale inferiore** comprendente due elementi longitudinali e una traversa centrale collegata agli stessi longheroni.

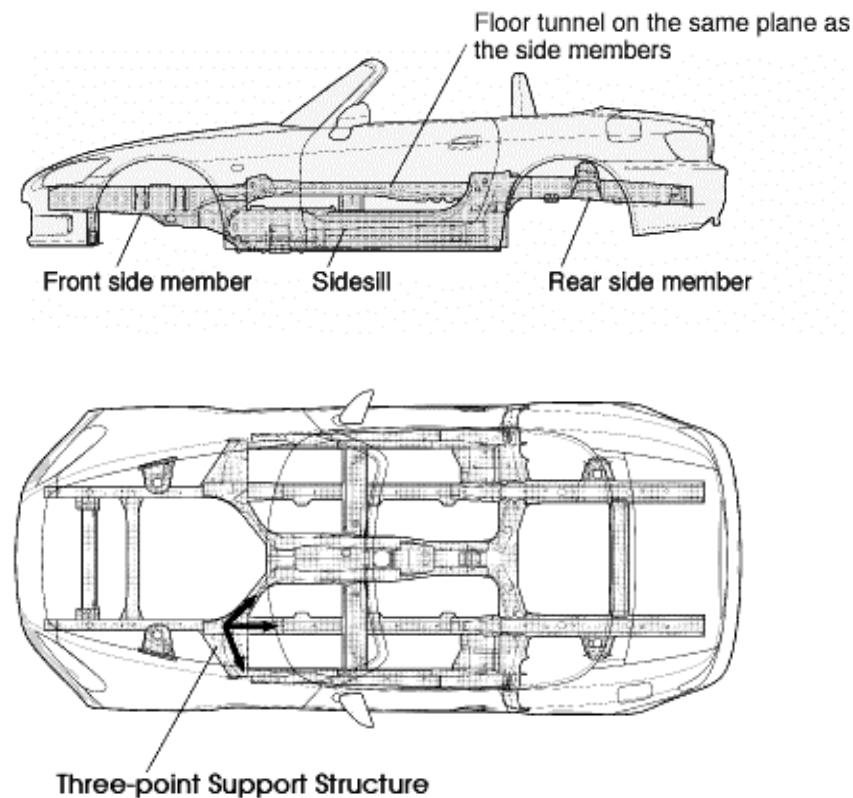


Fig. 1.2.8 - Schema della struttura della Honda S2000 (fonte: Honda)

Il **telaio superiore** comprende i membri laterali anteriori e posteriori, con sviluppo rettilineo, ed il tunnel centrale, che è l'elemento chiave nella rigidità della struttura. Esso ha una sezione scatolata ed è posto alla stessa altezza dei membri laterali anteriori e posteriori cui è connesso e con cui costituisce la “X” su un unico piano orizzontale. In questo modo la BRC resta pressoché sulla stessa altezza, prossima a quella dei membri laterali anteriori e posteriori, per tutta la lunghezza della vettura come accade con le carrozzerie chiuse.

I **membri laterali** anteriori sono connessi al tunnel centrale, ai longheroni laterali e ai membri longitudinali del pianale inferiore costituendo una struttura di supporto a tre punti (*three point support structure*) che ha un ruolo fondamentale nella distribuzione dei carichi.

Gli estremi anteriori e posteriori del tunnel centrale e dei longheroni laterali sono collegati ai sottotelai anteriore e posteriore mediante tiranti diagonali che formano delle strutture a X poste nelle sezioni anteriore e posteriore dell'abitacolo.



Il **sottotelaio posteriore** è una struttura tridimensionale costituita da tubi in acciaio che connettono i membri laterali e il tunnel del pianale con i bracci superiori ed inferiori delle sospensioni posteriori. Una traversa collega i due membri laterali e fornisce un punto di ancoraggio per il differenziale.

Il **sottotelaio anteriore** ha struttura analoga a quello posteriore e la sua rigidità è tale da non richiedere traverse di rinforzo nel vano motore.

I due sottotelai forniscono inoltre un'efficiente connessione tra gli altri elementi della struttura.

La rigidità complessiva è data dalla forma della struttura nel suo complesso più che da singoli rinforzi.

Lo **svantaggio** principale di questa soluzione è il **volume occupato** dai vari elementi, che rende piuttosto esiguo lo spazio a disposizione dei passeggeri: nel caso della S2000 questo inconveniente non ha tuttavia un peso molto rilevante vista la tipologia sportiva della vettura.

1.2.12 - Panoz Esperante (2000)

Si tratta di una vettura convertibile sportiva costruita in 500 unità/anno.



Fig. 1.2.9 - Struttura della Panoz Esperante



Il suo telaio (vedi Figura 1.2.9) è costituito da cinque componenti modulari:

- Gruppi **paraurti anteriore e posteriore** (moduli di crash);
- **Sottotelaio anteriore in acciaio**
Supporta il gruppo motore-trasmissione e le sospensioni anteriori;
- **Sottotelaio posteriore in acciaio**
Supporta le sospensioni posteriori ed il serbatoio del carburante;
- **Cella abitacolo** (CCM, *Central Chassis Module*).

La cella abitacolo, sviluppata in collaborazione con la RAMCO, filiale della Reynolds Aluminum, è costituita da profilati estrusi multicella in lega 6061 T6, con spessore di 5.0 mm, uniti mediante nodi estrusi con adesivi strutturali e giunzioni meccaniche (*back-up bolts*). La cella è poi unita al pianale e ad un ulteriore modulo costituito dall'insieme del paraframma e dei montanti A.

La rigidità torsionale dell'intera struttura è di 622000 Nm/rad.

La **carrozzeria** è costituita da pannelli di **lamiera in alluminio**, costruiti dalla Superform Inc. con un processo di formatura superplastica (SPF, *Super Plastic Forming*, vedi 3.1.7).

La struttura è stata progettata con un particolare riguardo all'**assemblaggio**: riduzione del numero di componenti, efficienza, accuratezza, ripetibilità, flessibilità.

La sua costruzione richiede 100 ore-uomo.

La **modularità** della struttura consente di subire variazioni dimensionali e riconfigurazioni per modelli differenti.

La carrozzeria non ha funzione strutturale, e può quindi subire facilmente variazioni stilistiche.



1.2.13 - Confronto

Nella tabella seguente sono riassunte le principali differenze tra alcuni degli AIV fin qui presentati:

Tabella 1.2.1 - Confronto tra alcuni AIV

| | GM EV1 | Audi A8 | Audi A2 |
|---------------------------------|---------------|-----------------|--|
| Class | ZEV | F | C |
| Weight and (Reduction) | 130 kg (40%) | 249 kg (38 %) | 153 kg (42 %) |
| Total length [mm] | 4309 | 5000 | 3750 |
| Production | | | |
| Quantity / day | n.a. | 80 | 300 |
| Quantity / year | 500 | 15000 | 60000 |
| Number of parts | 162 | 334 | 238 |
| Composition | | | |
| Extrusion | 25% | 22.7% | 17.8% |
| Casting | 25% | 21.8% | 22.1% |
| Sheet | 50% | 55.5% | 60.1% |
| Automatic assembly ratio | n.a. | 20% | 80% |
| Processing of extrusions | n.a. | 17 %: machining | 8 %: hydro-forming after 3 dimensional bending |
| Straight extrusions | n.a. | 49% | 84% |
| Casting | n.a. | VACURAL | Vacuum die cast |
| Joint | | | |
| Spot Welding | 2000 points | 500 points | - |
| MIG weld length | - | 70 m | 20 m |
| Laser weld length | - | - | 35 m |
| Adhesives | 150 m | - | - |
| Clinching | - | 178 points | - |
| SPR | 150 | 1100 | 1500 |

fonti: - *The Japan Aluminium Association, Automotive Committee, 2000.*

- *Saturn Corporation, 1996.*



1.2.14 - Altre soluzioni

Altre vetture di serie presentano soluzioni strutturali diverse dalla scocca in acciaio.

In particolare SUV, MPV, fuoristrada e veicoli commerciali leggeri impiegano in prevalenza **telai a longheroni e traverse**, per i quali è da segnalare il crescente utilizzo dell'idroformatura nella lavorazione dei componenti, in acciaio o in lega leggera.



1.3 - CONCEPT CARS

1.3.1 - Introduzione

Presentate in occasione dei principali Saloni dell'Automobile da tutte le maggiori Case automobilistiche, con l'intento di sondare le risposte del pubblico verso determinate proposte e per motivi di immagine, le Concept Cars costituiscono un valido punto di partenza per prevedere come si evolverà nel prossimo futuro la tecnologia automobilistica.

In particolare, già da diversi anni molte Concept Cars presentano telai alternativi al monoscocca in lamiera stampata, ed in massima parte strutture **Space Frame in lega leggera**.

In realtà questa soluzione è spesso adottata per **motivi economici** più che per ragioni connesse alla produzione effettiva.

Lo Space Frame infatti si presta ad essere realizzato in pezzi unici e con un **assemblaggio manuale**, il che contribuisce al contenimento degli elevati costi di questi prototipi.

Un'analisi delle tipologie delle soluzioni Space Frame è quindi possibile proprio grazie al consistente numero di Concept Cars che adottano questa struttura.

1.3.2 - GM Saturn (1994)

Ha una **scocca in acciaio stampato**, analogo a quello utilizzato sulla Opel Vectra. I pannelli esterni sono però in materiale plastico e non svolgono funzione strutturale: ciò porta la GM a definire la struttura come uno Space Frame.

In realtà l'impiego dei pannelli plastici è motivato dalla loro funzionalità ed estetica, dato che la diminuzione di peso ottenuta è annullata dal sovradimensionamento richiesto dal telaio per mantenere le stesse prestazioni della scocca completa.



1.3.3 - Dodge ESX2 (1998)

Ha uno **Space Frame in lega alluminio** con pannelli esterni in fibra di carbonio, che simulano pannelli plastici in corso di sperimentazione presso la Chrysler.

La carrozzeria esterna è composta da soli 6 pezzi.

Il peso complessivo è contenuto in 1030 kg, con un risparmio del 50% sulla parte strutturale.

1.3.4 - Ford-Pivco Th!nk (1998)

E' un prototipo di **City Car** nato da un progetto iniziato nel 1991 dalla norvegese Pivco.

Presenta una struttura costituita da due parti:

- Un **telaio inferiore** composto per il 90% da acciaio ad alta resistenza tagliato, piegato e saldato che elimina la necessità di costose presse per lo stampaggio;
- Un **telaio superiore** composto da estrusioni in lega di alluminio della Hydro Aluminium saldate ai nodi.

I pannelli esterni sono in materiale termoplastico (Polietilene) ed il tetto è in ABS.

1.3.5 - Ford P2000 (1998)

E' il frutto della collaborazione tra la Ford e l'Alcan Aluminum che vi ha investito 200 milioni di dollari.

Ha una scocca portante e carrozzeria in lamiera di alluminio stampata e saldata, dal peso complessivo di 182 kg, contro i 398 kg dell'analoga struttura in acciaio.

I duomi anteriori sono realizzati mediante pressofusione.

Oltre alla saldatura sono utilizzati anche adesivi epossidici.

Il veicolo ha un peso complessivo di 907 kg, con 332 kg di leghe leggere.

Alcune tecnologie sono state trasferite sulla Ford Prodigy HEV (2000).



1.3.6 - Pininfarina Metrocubo (1999)

E' un prototipo di City Car con un telaio realizzato utilizzando **profilati in lega di alluminio** con spessori elevati. La rigidezza è data prevalentemente dal pianale di forma piatta: la parte superiore è quasi un completamento ed ha la funzione di sostenere i pannelli in plastica.

1.3.7 - Dodge ESX3 (2000)

Ha un telaio **Space Frame in lega di alluminio** e magnesio con struttura ridotta all'essenziale, tanto da avere la definizione di "*Sparse Frame*". Esso consente una riduzione del peso del 46%.

L'ossatura è rivestita da una carrozzeria composta da 12 pannelli termoplastici (*injection-molded thermoplastic technology*), in cui gli spazi vuoti sono riempiti da schiume strutturali espanse (*thermoset polyurethane foam*) con rinforzi in acciaio, che rendono l'insieme rigido e leggero.

Per un'eventuale industrializzazione la Chrysler ipotizza dei costi totali ridotti del 15%.

1.3.8 - GM Precept (2000)

Presentata dalla General Motors nel 2000, fa un esteso utilizzo di leghe di alluminio.

In particolare, ha un telaio **Space Frame** dal peso di 152 kg con un risparmio di peso dichiarato del 45% rispetto alla corrispondente soluzione in acciaio.

Anche la pannelleria esterna è in lega di alluminio – fatta eccezione per il tetto in plastica – ed ha un peso complessivo di 74 kg.

I componenti della struttura sono così ripartiti:

- Lamiere stampate 69 kg
- Estrusi 49 kg
- Pressofusi 32 kg



1.3.9 - Altre Concept Cars

Ford Contour (1991)

Il telaio è uno Space Frame in lega di alluminio sviluppato dalla Ford Advanced Manufacturing con la collaborazione della Reynolds Aluminium e realizzato mediante profilati estrusi a sezione rettangolare monocella e multicella.

La carrozzeria è realizzata con pannelli compositi.

Italdesign Structura (1998) e Italdesign Aston Martin Twenty Twenty (2001)

Entrambi i prototipi hanno uno Space Frame in alluminio: la particolarità risiede nel fatto che esso non è coperto dai pannelli della carrozzeria, ma integrato con essi, e contribuisce in questo modo a definire lo stile esterno della vettura.

Cadillac Imaq (2000)

Ha uno Space Frame in lega di alluminio costituito da profilati estrusi: esso è in parte esposto nei montanti A, nei longheroni e nei SRR.

Fiat Ecobasic (2000)

E' una City Car con una scocca non convenzionale stampata in acciaio, simile ad un telaio a reticolo e composta da elementi di forma semplice, con puntoni anteriori e longheroni posteriori rettilinei.

La carrozzeria è realizzata con pannelli plastici pigmentati in massa.

Altre

Oltre alle vetture citate, molte altre Concept Cars adottano degli Space Frame in lega leggera, fornendo una base per la studio delle varie configurazioni possibili, tra cui:

- Pininfarina Ethos 1, Ethos 2, Ethos 3;
- Ford Synthesis-2010 (1993);
- GM Impact (1994): SF saldato e incollato con 168 componenti;
- Bertone Slim.



1.4 - RICERCHE E SVILUPPI IN CORSO

1.4.1 - Alcan ASVT (Aluminum Structured Vehicle Technology)

E' un programma di ricerca intrapreso dalla **Alcan** (Aluminum Limited of Canada). Prevede lo sviluppo di scocche portanti costituite da lamiere in lega di alluminio stampate e connesse mediante adesivi strutturali. Nell'ambito del programma, nel 1987 la Alcan ha contribuito alla realizzazione del prototipo **Ferrari 408**, con **Space Frame** in acciaio inossidabile (per la cella dell'abitacolo) e lega di alluminio, e con carrozzeria in materiali compositi.

1.4.2 - Alcoa AIV (Aluminum Intensive Vehicle)

Si tratta di un programma di ricerca intrapreso dalla **Alcoa** (Aluminum Company Of America), uno dei maggiori Gruppi industriali dell'alluminio. Prevede lo sviluppo di materiali e processi per la produzione di strutture Space Frame in leghe di alluminio con profilati estrusi connessi tra loro mediante nodi pressofusi, collegati tramite saldatura robotizzata o adesivi strutturali, e su cui sono fissati i pannelli esterni (in alluminio, acciaio o plastica). Il principale obiettivo è quello di compensare il maggior costo delle leghe leggere con una diminuzione dei costi di assemblaggio, grazie anche al dimezzamento del numero dei componenti.

1.4.3 - Fiat Space Frame e Dual Frame

L'utilizzo di telai di tipo Space Frame rientra nella strategia di prodotto del Gruppo Fiat tesa ad una **diminuzione del numero delle piattaforme** comuni, con conseguenti diminuzione dei costi ed aumento della flessibilità. In particolare, mentre l'intera gamma si baserà su due "superpiattaforme" da oltre 1 milione di unità all'anno ciascuna, per coprire rispettivamente i segmenti A/B e C/D/H.



Ai telai Space Frame spetterà il compito di costituire la base dei modelli non basati su queste, come i veicoli di nicchia, i modelli del segmento E, come le future Alfa Romeo 166 e Lancia K, gli Sport Utility Vehicles (SUV).

Ulteriori **vantaggi** indicati dalla Fiat sono:

- Investimenti nei macchinari ridotti del 20%;
- Costi di produzione ridotti del 30%;
- Riduzione del Time-to-Market;
- Flessibilità per cambiamenti nella carrozzeria;
- Prestazioni dinamiche e comportamento a crash.
- Minore ingombro negli impianti di produzione: la maggior parte dei sottocomponenti è preparata prima dell'assemblaggio della scocca.

Space Frame

Introdotta nella gamma Fiat con la Multipla, si tratta di uno Space Frame in acciaio, costituito da profilati piegati e saldati (vedi Figura 1.4.1).

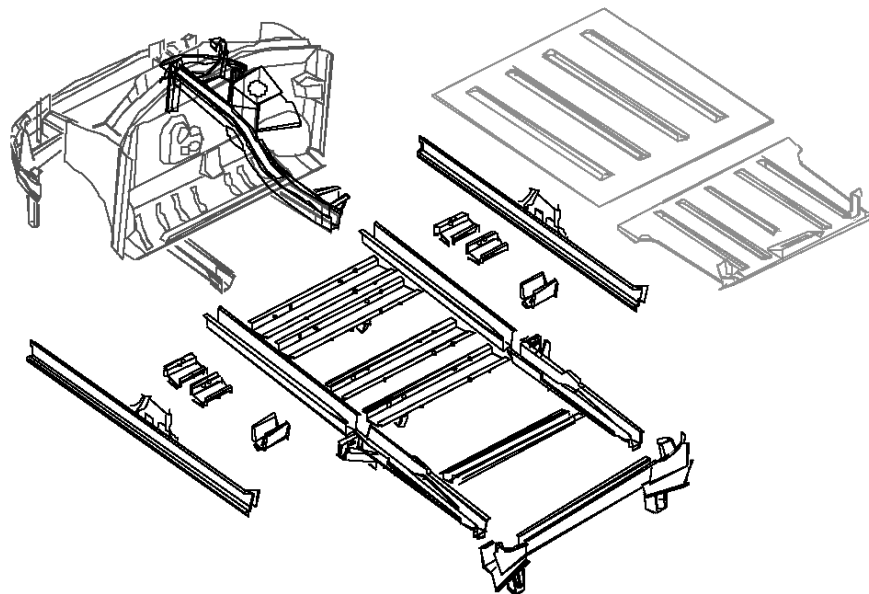


Fig. 1.4.1 - Principali componenti dello Space Frame Fiat (fonte: Fiat Auto)



Consente una elevata **flessibilità produttiva**, ed ha già trovato applicazione produttiva con il modello **Multipia** (1998), prodotto in 60000 unità/anno.

Per soluzioni con volumi produttivi maggiori è stato elaborato un telaio ibrido, la piattaforma Fiat Type C/D(2), detto **Semi-Space Frame**, che integra tra loro monoscocca e Space Frame.

La **Stilo** (2001) è stata sviluppata su questa struttura, che ne ha reso possibile la differenziazione tra le versioni 3 e 5 porte nelle principali dimensioni (vedi Tabella 1.4.1).

Tabella 1.4.1 - Differenze dimensionali Fiat Stilo 3p e 5p

| | Lungh. [mm] | Largh [mm] | Altezza [mm] | Passo [mm] |
|---------------------------|-------------|------------|--------------|------------|
| Fiat Stilo 3 porte | 4182 | 1784 | 1475 | 2600 |
| Fiat Stilo 5 porte | 4253 | 1756 | 1525 | 2600 |

fonte: Fiat Auto, 2001.

Dual Frame

Brevetto ideato dallo svizzero Franco Sbarro ed acquistato dalla Fiat, il Dual Frame (“doppio telaio”) consiste nella scomposizione di un telaio di tipo Space Frame in due parti distinte:

- Un **telaio inferiore modulare** che sostiene e permette di intercambiare gli organi meccanici;
- Un **telaio superiore** che sorregge i pannelli esterni e dà forma e volume alla vettura.

I due telai in acciaio sono connessi tra loro mediante **tasselli elastici**: in questo modo si ha notevole vantaggio in termini di **isolamento acustico**, con una riduzione prevista di 5-7 dB. In una seconda fase dello sviluppo si potranno utilizzare tasselli a controllo idraulico oppure “adattivi”, in grado cioè di cambiare tipo di risposta in tempo reale grazie all’adozione di fluidi magnetoreologici, con viscosità variabile in funzione di un campo magnetico agente controllato da una centralina elettronica.



Il progetto è destinato a essere sviluppato nell'immediato futuro per vetture con bassi volumi di produzione, per le quali si avrebbero i maggiori vantaggi in termini di contenimento dei costi e di flessibilità.

E' da osservare che il recente **accordo Fiat-GM** potrebbe implicare dei cambiamenti rispetto ai progetti ed ai programmi esposti.

1.4.4 - Foresight Vehicle Programme

E' il programma nazionale Inglese di Ricerca e Sviluppo in campo automobilistico, lanciato dal nel novembre del 1997 e finanziato con 10 milioni di sterline.

Ha l'obiettivo di promuovere tecnologie che consentano il rispetto da parte dei veicoli futuri di normative ambientali sempre più stringenti.

Uno degli obiettivi chiave è **l'alleggerimento dei veicoli** mediante l'impiego di strutture materiali innovativi.

In particolare il gruppo tematico Advanced Materials And Structures (FASMAT) ha elaborato degli obiettivi nel campo delle strutture veicolistiche (da realizzare progressivamente entro diverse scadenze, fino al 2020), come riportato nella Tabella 1.4.2.

Tabella 1.4.2 - Obiettivi del FASMAT per strutture automobilistiche

| | Drivers | FASMAT View |
|----|----------------------|---|
| 1 | Mass and drag | Reduce mass by 20% |
| 2 | Manufacturing cost | Reduce by 50% |
| 3 | Product variety | Break even for mass customisation reduced by 50% |
| 4 | Cost of ownership: | |
| 4a | Repairability | Reduce insurance rating |
| 4b | Structure durability | 10 year life costs 20% cost reduction |
| 4c | Damage resistance | 5 mph zero damage 10 mph zero damage <i>15 mph 30% reduction in repair cost</i> |
| 4d | Corrosion protection | 6 year no change |
| 4e | Security | 100% resistant to theft |

fonte: Foresight Vehicle Programme



1.4.5 - Partnership for a New Generation of Vehicles (PNGV)

E' un progetto statunitense nato nel 1993 da una collaborazione tra il **Federal Government** (attraverso 7 Agenzie partecipanti – tra cui il Department of Transportation, il Department of Energy e la NASA) e l'**USCAR** (United States Council for Automotive Research), che rappresenta i maggiori Gruppi Nazionali: Chrysler, Ford e General Motors.

Il suo obiettivo è di rafforzare le industrie americane mediante lo sviluppo di nuove tecnologie per la produzione di veicoli innovativi di elevata efficienza energetica media – tre volte quella attuale - e con ridotto impatto ambientale e di costituire un modello di cooperazione tra industrie e Governo per il futuro.

Il limite posto come traguardo è il raggiungimento entro i prossimi 10 anni della soglia dei **3 l/100Km** anche su veicoli di normale produzione di serie.

La riduzione dei pesi è riconosciuta come una delle strade da seguire, ed in questa ottica si considerano tutti i materiali e le tecnologie disponibili: leghe leggere di alluminio, titanio, magnesio, acciai ad alta resistenza, materiali compositi, plastici e ceramici.

Nell'ambito di tale progetto sono state sviluppate diverse Concept Cars, come la Dodge ESX2, la Ford P2000 e la GM Precept.

1.4.6 - Ultra Light Steel Auto Body (ULSAB)

L'ULSAB è un consorzio formato nel 1994 ed è attualmente costituito da 35 industrie tra le maggiori produttrici mondiali di acciaio.

Il suo obiettivo è l'effettuazione di ricerche per la realizzazione di scocche automobilistiche in acciaio che possano contenere i pesi e quindi contrastare l'ascesa delle leghe leggere come materiale alternativo.

Per raggiungere questo scopo, vengono utilizzati acciai ad elevata resistenza (210-370 MPa) e innovative tecnologie di lavorazione e assemblaggio, come l'idroformatura, *welded tailored blanks*, pannelli sandwich in acciaio, saldatura laser, giunzioni adesive.



L'obiettivo specifico, finanziato con 22 milioni di dollari, è la realizzazione di una scocca per vettura di classe E (berlina a 5 posti) che abbia una massa contenuta in 105 kg e sia producibile convenientemente in circa 100000 esemplari all'anno.



Fig. 1.4.2 - Scocca ULSAB in acciaio

La ricerca è stata condotta dalla Porsche Engineering Services Inc. di Troy, Michigan.

L'approccio al progetto è di tipo **olistico**: la struttura è trattata come un sistema integrato e non come l'insieme di singoli componenti.

L'ottimizzazione è condotta attraverso successive iterazioni verificate attraverso l'analisi numerica dei cambiamenti effettuati e dei possibili miglioramenti.

I risultati ottenuti indicano, con un peso complessivo della struttura di 203 kg e con riferimento ad una scocca tradizionale, una possibile riduzione dei pesi del 25%, con un aumento delle rigidità torsionali e flessionali rispettivamente dell'80 e del 52%, e un risparmio di 150 \$/unità.

Pareri meno ottimistici considerano poco praticabile industrialmente l'approccio olistico del progetto e prevedono che l'applicazione di queste nuove tecnologie potrebbe portare entro il 2005 ad una riduzione dei pesi massima contenuta al 10-15%.



Questa ricerca ha trovato nel 1999 una continuazione nel programma biennale **ULSAB-AVC** (Advanced Vehicle Concept), che si propone di allargare il progetto includendo nello studio anche i pannelli esterni (*closures*), il sistema delle sospensioni, engine cradle and tutti i componenti di rilevante importanza strutturale e di sicurezza, con l'obiettivo di contenere il peso complessivo in 900 kg, applicando tecnologie adottabili industrialmente già dal 2004.



1.5 - SOLUZIONI A CONFRONTO

1.5.1 - Introduzione

L'evoluzione storica fin qui esaminata ha evidenziato come, nonostante la grande varietà di soluzioni proposte, solo poche di esse siano state praticamente attuate ed industrializzate per elevate produzioni.

Il presente Paragrafo intende fornire una ricapitolazione delle tipologie costruttive più significative, con un riepilogo delle caratteristiche principali, per avere un seppur schematico quadro di riferimento.

Viene omessa la presentazione dello Space Frame, oggetto del successivo Paragrafo.

1.5.2 - Scocca portante in acciaio (*steel unibody*)

La scocca portante in lamiera di acciaio stampata è da decenni la **soluzione più adottata** da tutte le industrie automobilistiche per normali vetture di serie, tanto essere utilizzata dal **95% dei veicoli** attualmente in produzione. Il motivo principale risiede nelle qualità generali, nella economicità e nella grande adattabilità alla produzione automatizzata, accoppiate al buon livello delle prestazioni consentite.

Telaio e carrozzeria costituiscono un unico involucro che svolge entrambe le funzioni.

La struttura è costituita da elementi stampati (mediamente circa 300) uniti tra loro mediante saldature a punti (mediamente da 3000 a 5000) eseguite da macchine automatiche.

Necessita l'impiego di lamiere di acciaio da stampaggio con basso tenore di carbonio (max 0,8%) molto economiche e senza particolari vincoli di resistenza meccanica.

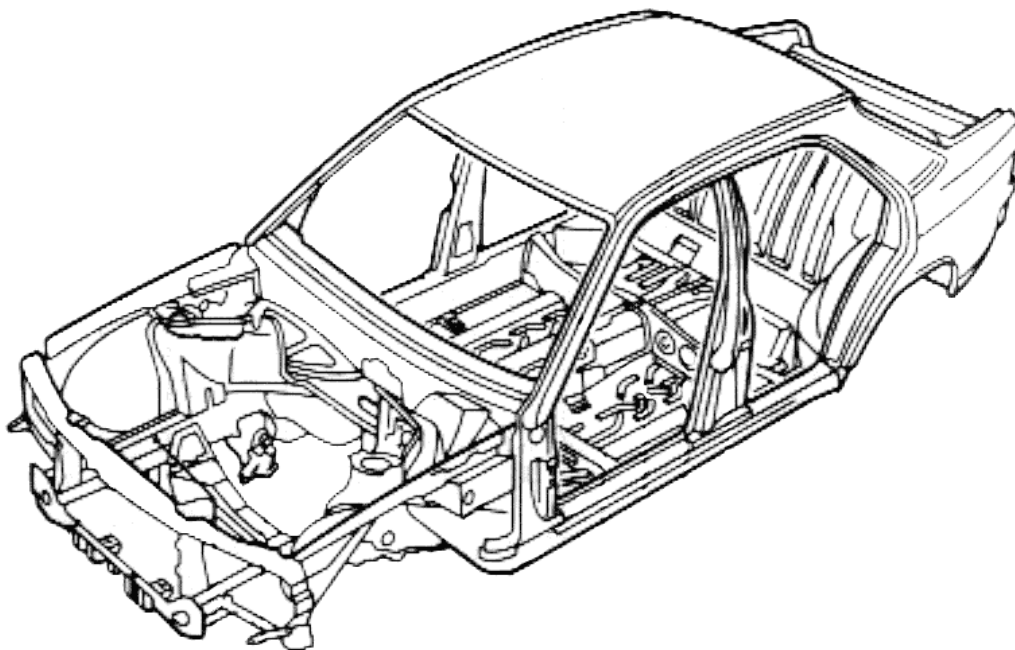


Fig. 1.5.1 - Scocca portante in acciaio (Mercedes 190, 1984)

Vantaggi:

- **Materiale di base molto economico;**
- **Economicità per elevate produzioni**, con investimenti elevati solo nella fase iniziale della produzione;
- Piena **adattabilità alla produzione in grande serie;**
- **Buon comportamento a crash;**
- **Ottimo sfruttamento dello spazio**, con elevate abitabilità e accessibilità.

Svantaggi:

- Intrinseca **pesantezza**, per la quantità di materiale utilizzato;
- **Costi elevati per veicoli con volumi di produzione medio-bassi.**



1.5.3 - Scocca portante in alluminio (*aluminum unibody*)

In questo caso la scocca è realizzata in modo analogo alla precedente, ma impiegando lamiere in lega di alluminio, risolvendo così il problema del peso elevato.

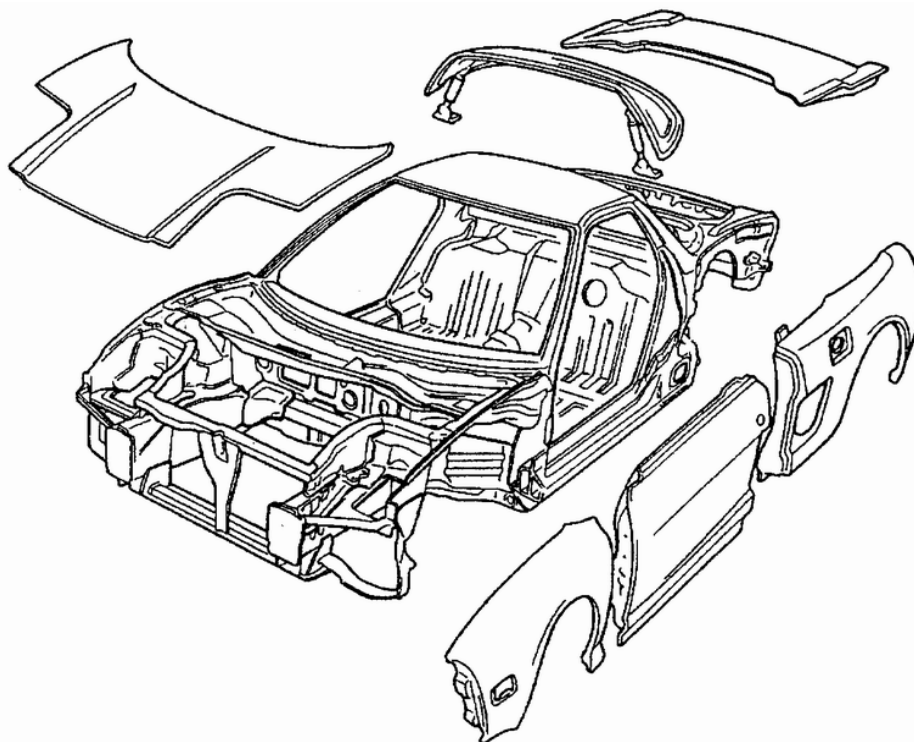


Fig. 1.5.2 - Scocca portante in lega di alluminio (Honda NSX, 1991)

Vantaggi:

- **Stessi vantaggi della scocca in acciaio.**
- **Riduzione di peso** media del 40%;

Svantaggi:

- **Costi** del materiale (5 volte superiori a quelli dell'acciaio);
- **Difficoltà di lavorazione** delle lamiere di alluminio;
- **Costi** molto elevati per veicoli con **volumi di produzione medio-bassi**.



Fondamentalmente la scocca in lega di alluminio comporta la non ottimizzazione delle tecnologie: viene cioè sostituito il materiale primario in un processo di progettazione e produzione che si è evoluto ed ottimizzato proprio intorno ad esso e che risulta quindi poco flessibile rispetto a tale cambiamento.

Tale soluzione sarà comunque utilizzata come punto riferimento aggiuntivo nei successivi Capitoli, dove sarà oggetto di ulteriori considerazioni.

1.5.4 - Telaio tubolare in acciaio

E' costituito da un **traliccio di tubi in acciaio**, generalmente con sezione circolare o rettangolare (per semplificare le connessioni) saldati tra loro.

E' caratterizzato da **elevate prestazioni**, con ottimi rapporti rigidità/peso, superati solamente dalle scocche in fibre di carbonio.

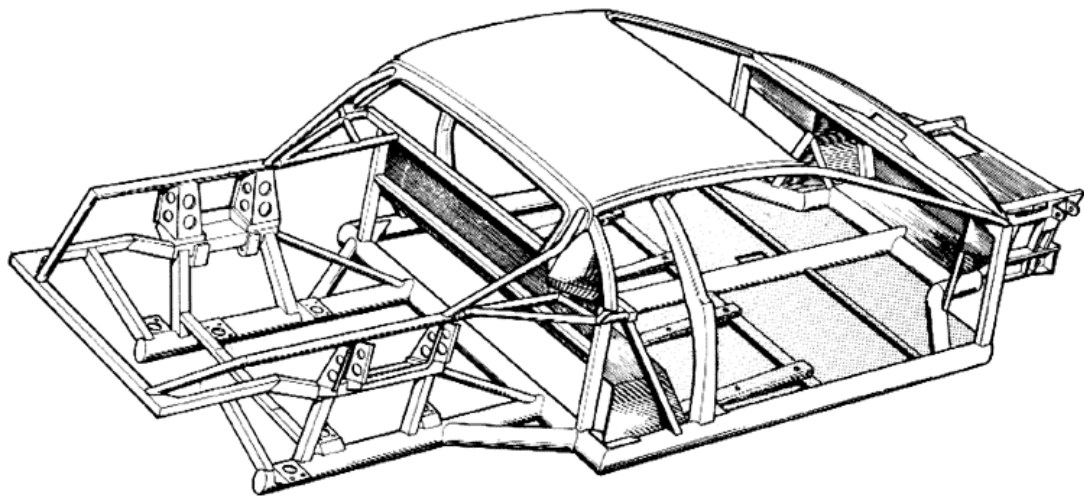


Fig. 1.5.3 - Telaio tubolare in acciaio (Ferrari Testarossa, 1984)

L'applicazione di questa soluzione a vetture di serie è fortemente ostacolata dalla **rilevanza dei costi e dei tempi di costruzione e di assemblaggio**, impossibili da automatizzare efficacemente.



Inoltre è un'architettura che non ottimizza lo spazio volumetrico della vettura, ed in particolare comporta **notevoli ingombri** nella zona dei longheroni laterali, che innalza la soglia inferiore delle porte laterali pregiudicandone l'accessibilità.

Per questi motivi le applicazioni per produzioni di serie si sono da sempre limitate a **vetture sportive di classe superiore**, soprattutto con ridotti volumi produttivi (le Ferrari precedenti alla 360 Modena, Lamborghini, Jaguar XJ 220, ...).

1.5.5 - Carrozzeria e telaio a longheroni (*body-on-frame*)

E' stato il primo schema costruttivo impiegato nella produzione di autoveicoli.

E' costituito da una struttura piana a forma di "scala a pioli" (*ladder chassis*) composta da due elementi longitudinali (longheroni), connessi da diversi elementi trasversali (traverse), cui è affidato il compito di fornire resistenza alle forze laterali e conferire rigidità torsionale all'insieme.

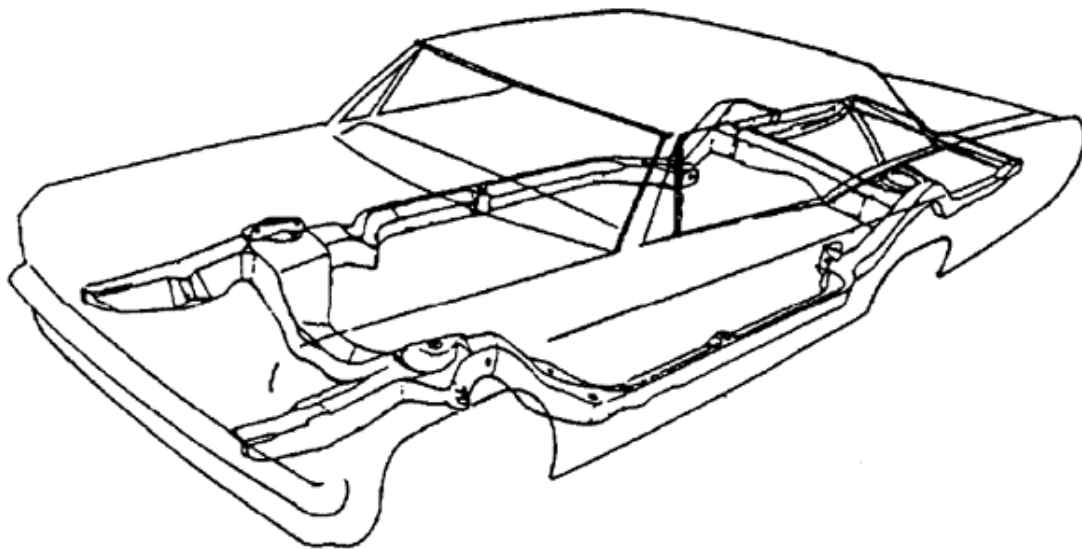


Fig. 1.5.4 – Schema di carrozzeria e telaio a longheroni di (berlina americana anni '50)

I punti di connessione fra traverse e longheroni sono generalmente rinforzati con piastre nodali saldate.



La carrozzeria è connessa al telaio mediante **tasselli elastici** che aumentano l'isolamento dell'abitacolo da rumore e vibrazioni.

Mediamente il telaio fornisce il 37% della rigidezza torsionale e il 34% di quella flessionale; le quantità rimanenti sono fornite dalla struttura della carrozzeria.

Vantaggi:

- **Semplicità** intrinseca della struttura con conseguente semplificazione della progettazione e dei processi di lavorazione ed assemblaggio;
- **Versatilità**: diverse carrozzerie possono essere montate sullo stesso telaio;
- Possibilità di **isolare l'abitacolo** mediante tasselli elastici;
- Integrazione delle traverse anteriore e posteriore con i paraurti.

Svantaggi:

- **Bassa rigidità torsionale**, dovuta principalmente alla bidimensionalità della struttura. A parità di rigidezza il peso è superiore del 10-15% rispetto alla monoscocca;
- **Assemblaggio complesso e labor-intensive**.

Questa soluzione è stata adottata sulla quasi totalità di veicoli fino agli anni '50 (fino agli anni '70 negli USA), e attualmente vede la sua applicazione sui veicoli commerciali, sui fuoristrada e su gran parte dei SUV e MPV.

Recentemente il notevole incremento di vendite di questi veicoli (in particolar modo negli USA) ha spinto le industrie ad apportare numerosi miglioramenti tecnologici e produttivi.



1.5.6 - Backbone Chassis

Fu introdotto per la prima volta da Colin Chapman con la Lotus Elan del 1962 (vedi Tav V-1).

Un **elemento centrale tubolare** di sezione rettangolare connette gli assi anteriore e posteriore, fornendo da solo quasi tutta la resistenza meccanica.

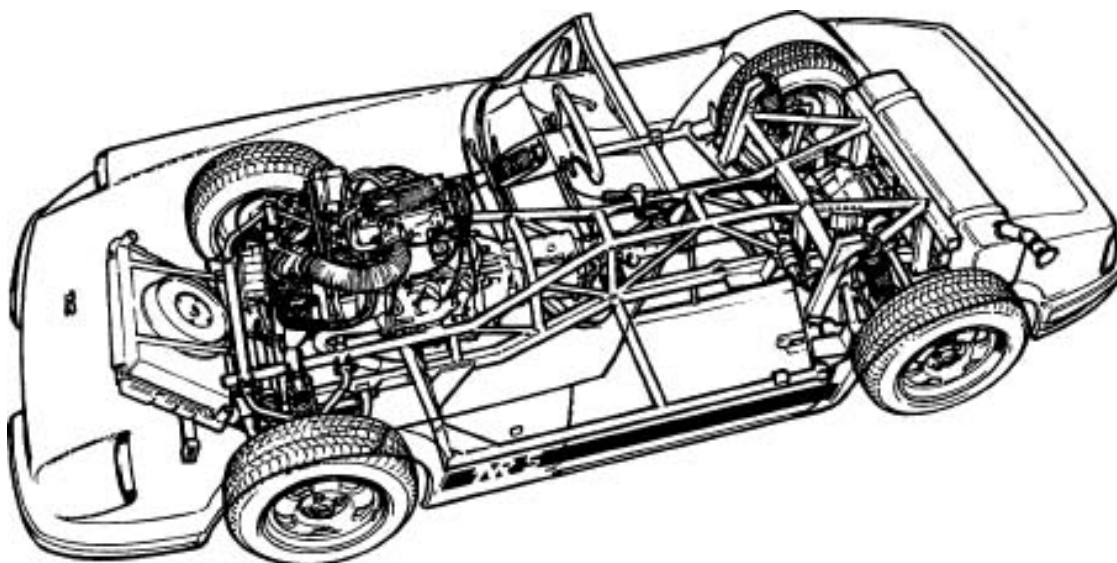


Fig. 1.5.5 - Backbone Chassis della TVR S1 (1987)

Al suo interno trova posto l'albero di trasmissione (nel caso di motore anteriore e trazione posteriore), e ad esso è vincolato l'intero autotelaio.

L'elemento centrale può essere costituito da un traliccio di elementi tubolari (come nei modelli della TVR, vedi Figura 1.4.5).

E' una **soluzione economica** e adatta a vetture di **ridotte dimensioni** e con **bassi regimi di produzione**, ma **carente nella rigidità**, con bassa protezione da impatti laterali e poca convenienza nelle grandi produzioni di serie.



1.5.7 - Scocca in fibra di carbonio

Mentre in alcune vetture di nicchia sono impiegati compositi in fibra di carbonio per alcuni pannelli esterni, solo poche automobili sono dotate di un'intera scocca realizzata con questi materiali.

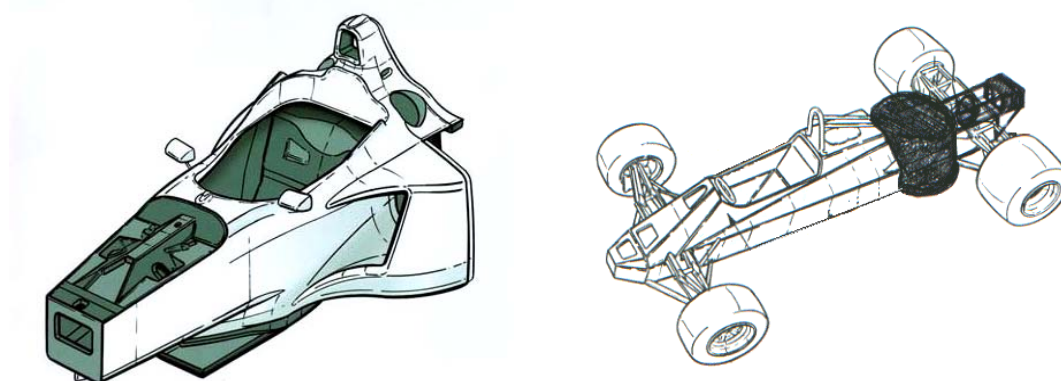


Fig. 1.5.6 - Scocche in fibra di carbonio per vetture monoposto da competizione

Le scocche in fibra di carbonio presentano le **più elevate prestazioni in assoluto**, in particolare riguardo al rapporto rigidità-peso e resistenza-peso, ma la loro adozione su vetture di serie presenta estreme difficoltà economiche (**costo del materiale**) e produttive (**complessità e lentezza della lavorazione**), rendendo di fatto tale soluzione adottabile esclusivamente su **vetture di categoria superiore** con regimi produttivi molto limitati.

Finora le sole vetture di serie con scocca in fibra di carbonio sono state la Ferrari F50, la Bugatti EB110SS e la McLaren F1.



1.5.8 - Conclusioni

In più di cento anni di storia le strutture per auto hanno raggiunto un elevato livello di prestazioni ed ottimizzazione. Tuttavia la soluzione oggi quasi universalmente adottata della **scocca autoportante in acciaio** presenta due notevoli **limiti**:

- **Costi elevati per volumi di produzione medio-bassi;**
- **Peso elevato.**

Questi fattori si scontrano con necessità produttive, economiche e ambientali di notevole ed attuale rilevanza.

In particolare la questione dei costi produttivi, ammortizzabili convenientemente solo per elevati regimi produttivi, si contrappone alla richiesta di **maggior flessibilità produttiva**, ai ristretti margini di profitto e alla necessità di differenziazione dei modelli, che porta all'adozione di strategie di *joint-venture* e *Platform Sharing*.

Il fattore peso, invece, si scontra fondamentalmente con le problematiche ambientali della riduzione delle emissioni inquinanti e della riduzione dei consumi energetici.

E' necessario un **alleggerimento** della struttura e della carrozzeria dei veicoli (che insieme costituiscono circa il 25% della massa totale) congiuntamente agli alleggerimenti secondari conseguenti.

Dalla analisi storica dell'evoluzione del telaio fin qui svolta emergono un certo numero di tipologie costruttive potenzialmente impiegabili nella produzione di vetture di serie.

La scelta del campo di interesse del presente lavoro è rivolta all'architettura "**Space Frame**". Ciò è motivato dal fatto che attualmente essa risulta l'unica alternativa industrialmente attuabile alla tradizionale scocca portante in acciaio, ed è oggetto di un crescente interessamento da parte del mondo industriale.



1.6 - SPACE FRAME

1.6.1 - Definizione

Dallo studio delle fonti disponibili non è possibile ricavare una definizione univoca di “Space Frame” che non sia allo stesso tempo piuttosto generale.

Nell’**Ingegneria Civile** gli Space Frame sono **strutture reticolari** impiegate già da tempo per la copertura di luci di notevole entità.

Il reticolo è costituito principalmente da una rete di membri (tiranti e puntoni) connessi alle estremità a formare geometrie di base triangolari.

Le connessioni possono essere:

- Giunti sferici: in questo caso gli elementi sono soggetti solo a carichi assiali, e la struttura è più propriamente detta *Space Truss*; il vantaggio è l’assenza di stati di sollecitazione triassiali e la conseguente possibilità di sfruttare al meglio la resistenza a trazione dei membri;
- Giunti rigidi: in questo caso gli elementi sono soggetti anche a carichi flessionali e torsionali.

In entrambi i casi la struttura presenta **elevata rigidità**.

In campo automobilistico l’applicazione di questo concetto porta ai telai tubolari, che presentano gli svantaggi visti in 1.5.4.

Lo Space Frame automobilistico è quindi costituito da un numero molto inferiore di componenti aventi maggiori dimensioni.



1.6.2 - Requisiti funzionali

Si può indicare con “Space Frame” una architettura strutturale costituita da una gabbia di profilati accoppiati tra loro mediante nodi rigidi.

Ad essa sono affidate le seguenti **funzioni**:

- **sostenere il motore** e i sistemi di **sospensioni, sterzo e trasmissione**;
- **sostenere i pannelli esterni**;
- **sostenere tutti i sistemi ausiliari, interni ed esterni**;
- **sostenere i carichi relativi ai passeggeri e alla merce trasportati**;
- conferire **rigidezza** al veicolo, con riguardo alle prestazioni dinamiche e al comfort di marcia;
- **proteggere i passeggeri** in caso di **incidente**.

Rispetto alla scocca portante l'unica **differenza** funzionale riguarda i **pannelli esterni**.

Nella scocca portante i montanti, il tetto, i parafranghi anteriori e posteriori costituiscono parte integrante della struttura portante, mentre i pannelli incernierati (cofano motore, portellone del bagagliaio e sportelli laterali) pur chiamati convenzionalmente strutturali, in realtà conferiscono rigidezza aggiuntiva alla struttura e solo secondariamente sostengono i carichi statici e dinamici.

Nello Space Frame, invece, tutti i pannelli esterni sono sostenuti dalla struttura portante, e non hanno compiti strutturali. Eventualmente, se in lamiera stampata, possono costituire un irrigidimento ulteriore del veicolo.

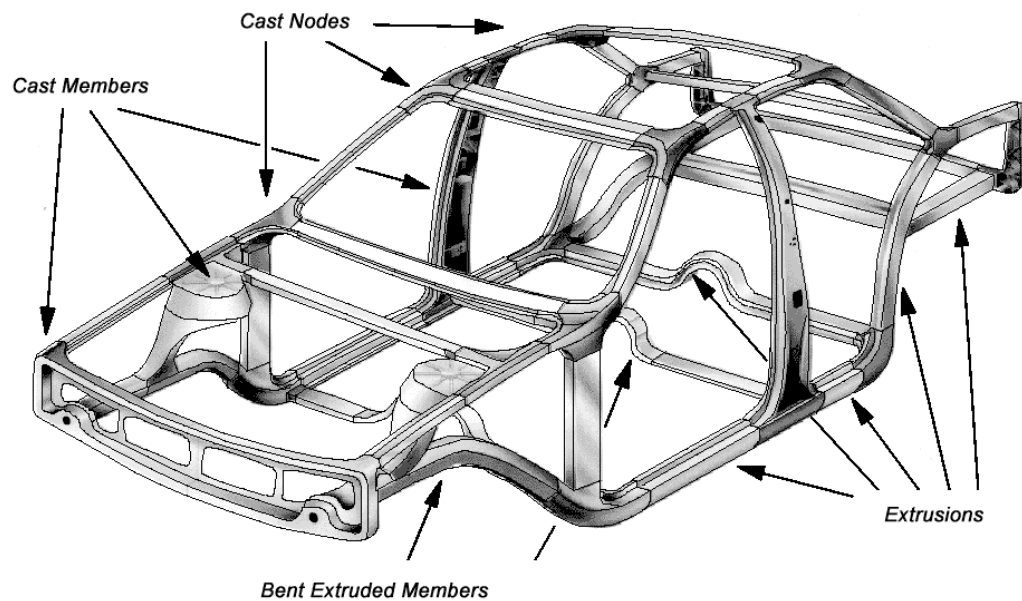


Fig. 1.6.1 - Configurazione generale di telaio Space Frame

Più in dettaglio, lo Space Frame può essere scomposto in quattro **tipologie di componenti**:

- **Profilati dritti o piegati** (generalmente estrusi);
- **Nodi** (generalmente pressofusi);
- **Componenti multifunzionali** (pressofusi o stampati);
- Eventuali **superfici in lamiera stampata**.

La struttura si presenta come un insieme di componenti indipendenti connessi tra loro.

Ogni singolo elemento può teoricamente essere progettato in modo indipendente riguardo i materiali e le tecnologie di lavorazione. Questa indipendenza consente una maggiore **specializzazione dei componenti** in relazione alla loro funzione, compatibilmente con le esigenze economiche e produttive.



1.6.3 - Aspetti produttivi generali

La soluzione dello Space Frame, pur apparendo più **snella** e **flessibile** per il minor numero di componenti e la conseguente semplificazione delle operazioni di assemblaggio, richiede una serie di tecniche di produzione con scarsa attitudine alla automazione, per varie ragioni:

- **Instabilità dimensionale;**
- **Costi di lavorazione;**
- Maggior richiesta di “*rework*”.

In sostanza è richiesta una tecnologia di tipo “*labor-intensive*” opposta a quella “*equipment-intensive*” dell’acciaio.

Tuttavia è possibile raggiungere una **elevata flessibilità produttiva e progettuale** che si evidenzia attraverso diverse considerazioni:

- Possibilità di adottare una strategia di **Platform Sharing**, con un risparmio medio del 20% sui costi di sviluppo di un nuovo modello, mediante lo sviluppo di strutture Space Frame modulari.
- **Tempi e costi inferiori per modifiche successive** alla messa in produzione;
- Maggiore **libertà nella scelta dei materiali**, con la creazione di componenti più efficienti e specializzati;
- **Riduzione del numero dei componenti**: è possibile utilizzarne meno di 100 contro i circa 300 di una scocca in acciaio.



1.6.4 - Premessa ai Capitoli 2 e 3

Nell'ambito della definizione e delle caratteristiche fornite in questo Paragrafo, non risultano univocamente determinati i materiali né le tecnologie di lavorazione e di giunzione dei componenti dello Space Frame.

Appare quindi indispensabile una panoramica sulle diverse configurazioni possibili, le relative caratteristiche ed i limiti per poter elaborare dei criteri di scelta da adottare in sede progettuale.

Nei Capitoli 2 e 3 sono presentati i principali materiali e le tecnologie (di lavorazione e di giunzione) attualmente adottati nella produzione di strutture automobilistiche, con particolare riferimento alle prestazioni ottenibili dai componenti finiti e indicando i vantaggi e gli svantaggi che il loro impiego nella normale produzione comporta.

Le valutazioni vengono effettuate rispetto al materiale ed alle tecnologie tradizionali: rispettivamente lamiera in acciaio, stampaggio e saldatura a punti.



BIBLIOGRAFIA CAPITOLO 1

- [1.1] *"Carrozzeria Italiana - Cultura e Progetto"*, Atti del Convegno, Alfieri, Gruppo Editoriale Electa, Milano, 1978.
- [1.2] K.Clemens, *"Seeing the light"*, European Cars, July 2000.
- [1.3] B.Vance, *"Pioneer of the All-Steel Automobile Body: Edward G. Budd"*, <http://www.canadiandriver.com/articles/bv/budd.htm>, Canadian Driver, 2001.
- [1.4] D.Neri, *"Auto di plastica: storie del '900?"*, Incontri, Modena, n.65, 2000.
- [1.5] Fiat Auto, *"Product Strategy and Industrial Cost Reduction"*, Merrill Lynch Global Automotive Conference Presentation, Geneva, February 29, 2000.
- [1.6] *"Audi A8 4.2 quattro long-wheelbase version"*, AUDI AG, Ingolstadt, Germany, September 1999.
- [1.7] R.Bordiga, *"Space Frame Hydro per la Spider Renault"*, Al: Alluminio e leghe, n.74, Ottobre 1995.
- [1.8] A.Kochan, *"Lotus: aluminium extrusions and adhesives"*, Assembly Automation, Vol.16, n.4, pp. 19-21, 1996.
- [1.9] *"The Lotus position"*, Engineering with Aluminium, October 1995.
- [1.10] *"Alu-Ise"*, Autocar, 3 July 1996.
- [1.11] *"GM EVI Structure"*, http://207.37.252.232/saturn/media/press_release/1996/e960524h.htm, Saturn Corporation, 24 May. 1996.
- [1.12] *"EVI and the future of aluminum in autos"*, <http://www.newsteel.com/news/NW970413.htm>, New Steel, American Metal Market LLC, April, 1997.
- [1.13] B.S.Moskal, *"EVI plant beats the clock"*, Industry Week, July 07, 1997.



- [1.14] L.R.Rakowski, "CMMs Rev Up Prototype Frame Assembly for Plymouth's '97 Hot Rod", Metalforming Magazine, August, 1996.
- [1.15] W.Leitermann, J.Christein, "The 2nd generation Audi Space Frame of the A2: A trendsetting all-aluminium car body concept in a compact class car", Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, 2000.
- [1.16] D.Engelhart, E.Lindner, "The technology of the Audi A2 – A new innovative Automobile Concept in the compact car class", Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, 2000.
- [1.17] "Audi A2 – Fascinating technology and a new form of agility", Audi AG Public Relations, Ingolstadt, February, 28th, 2000.
- [1.18] C.Kohl, "New full aluminum auto body introduced by Audi", American Metal Market, April 26, 2000.
- [1.19] N.Martin, "Audi's Green Machine", Automotive Industries, October, 1999.
- [1.20] "The Design of the BMW Z8", http://www.autoweb.com.au/start/_showall_on/id_BMW/doc_bmw0003038/article.html, AutoWeb Pty Limited, 3 March, 2000.
- [1.21] "Honda Insight Interactive Encyclopedia", <http://www.insightcentral.net/encyclopedia.html>, 2001.
- [1.22] L.Brooke, "One man's doing it", Automotive Industries, September, 2000.
- [1.23] G.Kobe, "Saturn grows up", Automotive Industries, July, 1999.
- [1.24] R.Testore, "Product Strategy and Industrial Cost Reduction", Presentation for the Merrill Lynch Global Automotive Conference, Geneva, February, 29, 2000.
- [1.25] "Foresight Vehicle Strategic Plan", Department of Trade and Industry, UK, February, 1999.



- [1.26] Dr P.G.Patil (Office of Advanced Automotive Tehcnologies, U.S. Department of Energy, Washington, DC), “*Advanced Vehicle Technologies for the Partnership for a New Generation of Vehicles*”, Tokyo International Forum, Tokyo, Japan, July 21-22, 1997.
- [1.27] U.Treyz, “*Trends 2000: Challenges in Lightweight Construction*”, http://www.messe-duesseldorf.de/en/2000/metav/expokurier2_s2.html, METAV - The International Fair for Manufacturing Technology and Automation, Messe Duesseldorf, June 27 - July 1, 2000.
- [1.28] P.Nieuwenhuis, P.Wells, “*The 21st Century Passenger Car: Lean or Green?*”, The Center for Automotive Industry and Research, Cardiff Business School, April 4, 1999.
- [1.29] L.Brooke, “Unibody vs. Body-on-frame - Sport Utility frames”, Automotive Industries, January, 1998.
- [1.30] S.Birch, “*Automotive dieting*”, Automotive Engineering International, April, 2000.
- [1.31] “*Structural Networks: Spaceframes*”, <http://www.starnetone.com/Business/geometry/geometry.htm>, Starnet International Corp., USA, 2000.

ALTRI RIFERIMENTI:

- “*Auto*”, Conti Editore, Bologna.
- “*Auto & Design*”, Auto & Design s.r.l., Torino.
- “*Quattroruote*”, Editoriale Domus, Milano.
- “*Automotive Engineering International Online*”, Society of Automotive Engineers, <http://www.sae.org/automag/>.



CAPITOLO 2 : MATERIALI



Introduzione

L'architettura Space Frame consente al progettista una considerevole **libertà nelle scelte dei materiali** e delle tecniche di lavorazione dei singoli componenti.

Per quanto riguarda i materiali, l'adozione dell'acciaio per i profilati esclude la possibilità di estrusione degli stessi: occorre rinunciare alle libertà di forma e alla variabilità dello spessore nelle sezioni ottenibili con questa tecnologia.

Sono necessarie invece lavorazioni di stampaggio o di piegatura dei lamierati che non consentono rilevanti vantaggi economici rispetto allo stampaggio di scocche e carrozzerie tradizionali.

Con le leghe leggere di alluminio invece, da un lato possono essere sfruttate le specifiche tecnologie di lavorazione (estrusione, pressofusione, ecc...), dall'altro si esaltano le qualità di leggerezza proprie dello Space Frame, mediante una progettazione mirata e specifica.

Appare quindi naturale abbinare l'architettura di tipo **Space Frame** all'**utilizzo di leghe leggere**, ed in particolare delle leghe di alluminio, cui viene dedicata per questi motivi una più ampia trattazione.



2.1 - LEGHE DI ALLUMINIO

2.1.1 - L'alluminio nell'industria automobilistica

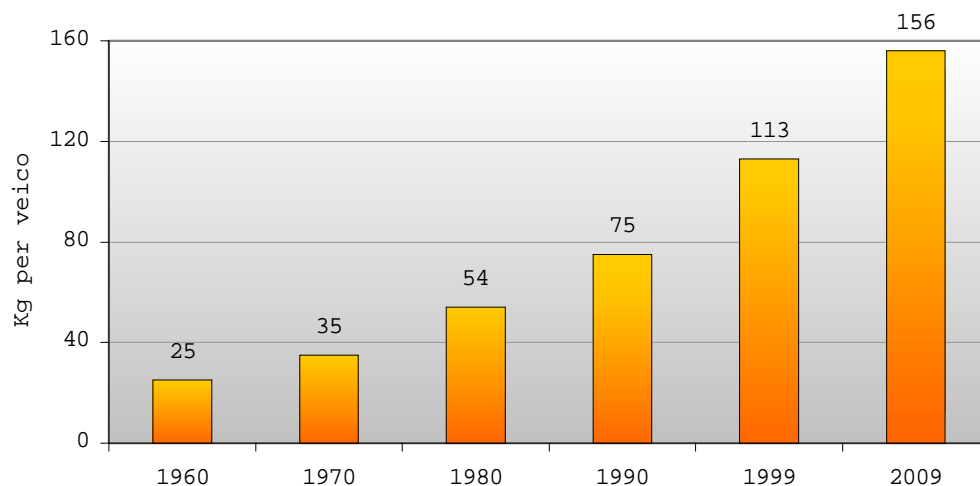
I dati statistici e le questioni economiche, produttive ed ambientali riguardanti l'utilizzo delle leghe leggere nell'industria automobilistica richiederebbero una trattazione dettagliata e a sé stante.

In questo contesto si intende semplicemente indicare, attraverso l'esposizione dei dati più significativi, come la scelta di questi materiali rientri in una strategia industriale più estesa ed estremamente attuale.

L'applicazione dell'alluminio e delle sue leghe alle costruzioni automobilistiche ed in particolare a telai e carrozzerie è stata praticata sin dall'inizio del XX Secolo.

Tuttavia fino a venti anni fa si è trattato di applicazioni specifiche, di nicchia, per prodotti con vincoli economici poco stringenti.

Diagramma 2.1.1 - Contenuto medio di alluminio nell'auto



fonte: Ducker Research, 1999.

A partire dagli anni '80 si è operato un progressivo **aumento dell'utilizzo delle leghe leggere**: il contenuto medio è da allora in costante crescita, con un complessivo raddoppio negli ultimi venti anni (vedi Diagramma 2.1.1).

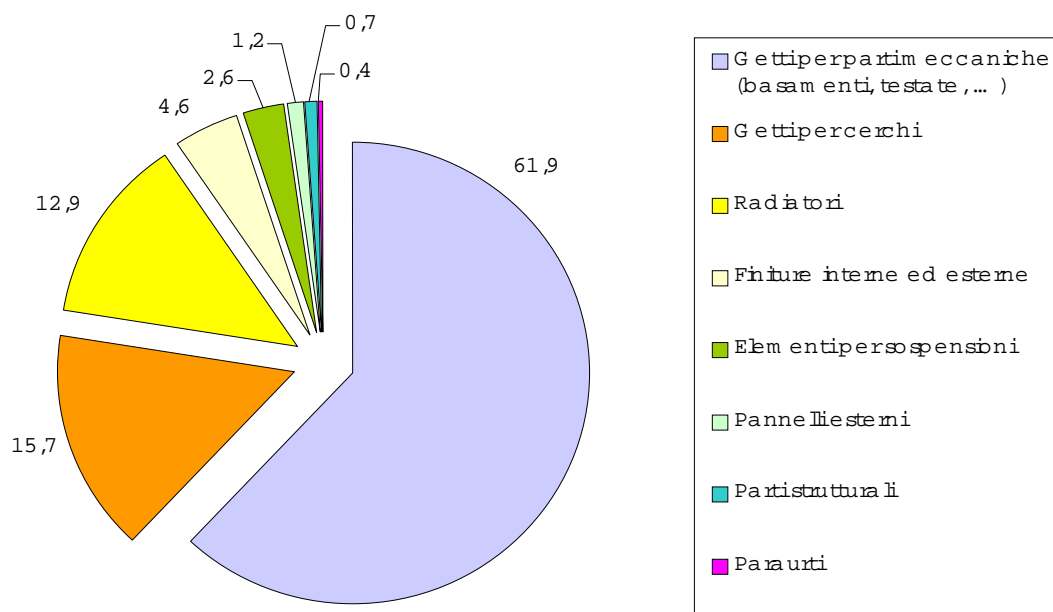


Questo è stato reso possibile principalmente dai seguenti fattori:

- **Miglioramento dei processi di lavorazione;**
- **Riduzione dei costi** dell'alluminio primario;
- Sviluppo di **leghe avanzate;**
- Aumento della **conoscenza delle proprietà di lavorabilità;**
- Maggiore conoscenza dei **criteri di progettazione** e delle **previsioni di durata** per componenti sotto sollecitazione;
- Estensione dell'utilizzo a **nuove applicazioni.**

L'applicazione principale è quella sotto forma di **getti** di componenti dei propulsori (**basamenti e testate**), ed attualmente meno del 3% delle applicazioni riguarda telaio e carrozzeria (vedi Diagramma 2.1.2).

Diagramma 2.1.2 - Applicazioni dell'alluminio nell'Industria Automobilistica



fonte: Ducker Research, 1999.

Per il prossimo futuro si prevede un utilizzo sempre maggiore delle leghe di alluminio, sia per consentire l'**alleggerimento** dei veicoli, sia per incrementare la **riciclabilità** delle vetture.



Le applicazioni strutturali saranno quindi sempre maggiori, e lo Space Frame rappresenta una delle soluzioni più promettenti in questo senso.

2.1.2 - Proprietà ed applicazioni strutturali delle leghe di alluminio

La qualità fondamentale dell'alluminio è la **leggerezza**, con una densità **di 2.7 kg/dm³ contro i 7.8 kg/dm³ dell'acciaio**. Per contro il modulo elastico è inferiore, essendo pari a 70 GPa contro i 210 GPa dell'acciaio.

Il conseguente rapporto **rigidezza/densità** risulta quindi pressoché **uguale** e pari rispettivamente a 26 e 27 GPa/(kg/dm³).

Tuttavia la **resistenza meccanica scadente** ($R_{p0.2}=20$ Mpa) rendono necessaria l'aggiunta di **elementi alliganti**, con le quali si ottiene un a notevole quantità di leghe differenti. Proprietà meccaniche e lavorabilità dipendono in massima parte dal tipo di lega considerata.

Una prima distinzione viene fatta tra **leghe da bonifica**, trattabili termicamente (HT, *Heat Treatable*) e **leghe non trattabili termicamente**.

Le prime presentano buona resistenza ma al crescere di questa la saldabilità e la formabilità decrescono. Le seconde sono più saldabili ma presentano una resistenza moderata.

Una seconda distinzione è fatta tra **leghe semilavorate** (ottenute per lavorazione plastica) e **leghe da getto**.

La **classificazione** più utilizzata è quella della **Aluminum Association**, cui di seguito si farà riferimento. Essa prevede una diversa denominazione tra leghe semilavorate (*wrought alloys*) e leghe da getto (*casting alloys*).

Nelle Tabelle 2.1.1 e 2.1.2 sono riportate entrambe le classificazioni con le corrispondenti caratteristiche principali di ogni serie. Nella successiva Tabella 2.1.3 è riportata la denominazione dei trattamenti termici.



Tabella 2.1.1 - Classificazione delle leghe di alluminio da lavorazione plastica (AA)

| LEGHE DA LAVORAZIONE PLASTICA (<i>WROUGHT ALLOYS</i>) | | | | |
|---|------------------|----|-----------|--|
| Serie | Elementi di lega | HT | UTS [MPa] | Caratteristiche principali |
| 1XXX | Al > 99.0% | - | 70-180 | <ul style="list-style-type: none"> - Elevata conducibilità, resistenza a corrosione e formabilità - Scarse proprietà meccaniche. |
| 2XXX | Al-Cu | • | 180-430 | <ul style="list-style-type: none"> - Buona lavorabilità; - Modesta resistenza a corrosione; - Scarsa saldabilità. |
| 3XXX | Al-Mn | - | 110-280 | <ul style="list-style-type: none"> - Eccellente conducibilità; - Buona saldabilità, buona resistenza a corrosione, - Scarsa lavorabilità. |
| 4XXX | Al-Si | • | 170-380 | <ul style="list-style-type: none"> - Ottima fluidità e forgiabilità. |
| 5XXX | Al-Mg | - | 120-350 | <ul style="list-style-type: none"> - Ottima saldabilità; - Buona resistenza a corrosione (anche marina). |
| 6XXX | Al-Mg-Si | • | 120-400 | <ul style="list-style-type: none"> - Eccellente lavorabilità; - Eccellente resistenza alla corrosione; - Modesta saldabilità. |
| 7XXX | Al-Zn | • | 220-610 | <ul style="list-style-type: none"> - Eccellente resistenza meccanica; - Discreta resistenza a corrosione; - Modesta lavorabilità. |

fonte: The Aluminum Association, Inc.



Tabella 2.1.2 - Classificazione delle leghe di alluminio da getto (AA)

| LEGHE DA GETTO (<i>CASTING ALLOYS</i>) | | | | |
|--|----------------------|----|-----------|---|
| Serie | Elementi di lega | HT | UTS [MPa] | Caratteristiche principali |
| 2XX.X | Al-Cu | • | 130-450 | <ul style="list-style-type: none"> - Ottima resistenza meccanica; - Buona tenacità; - Modesta colabilità; - Scarsa saldabilità. |
| 3XX.X | Al-Si+Cu Al-Si+Mg | • | 130-280 | <ul style="list-style-type: none"> - Buona resistenza meccanica; - Eccellente fluidità; - Buona resistenza e tenacità; |
| 4XX.X | Al-Si | - | 120-170 | <ul style="list-style-type: none"> - Eccellente fluidità; - Buona colabilità; - Buona saldabilità. |
| 5XX.X | Al-Mg | - | 120-170 | <ul style="list-style-type: none"> - Buona resistenza a corrosione; - Media colabilità. |
| 7XX.X | Al-Zn | • | 210-380 | <ul style="list-style-type: none"> - Eccellente lavorabilità; - Scarsa colabilità. |

HT = Heat Treatable; UTS = Ultimate Tensile Strength

fonte: The Aluminum Association, Inc.

Tabella 2.1.3 - Denominazione dei trattamenti termici

| SIGLA | TRATTAMENTO TERMICO |
|-------|--|
| 0 | Completa ricottura: 1-5 ore a 350-500°C |
| H | Incrudimento per deformazione plastica a freddo |
| T1 | Riscaldamento a temperatura di estrusione + invecchiamento naturale |
| T4 | Tempra di soluzione + invecchiamento naturale |
| T5 | Riscaldamento a temperatura di estrusione + invecchiamento artificiale |
| T6 | Tempra di soluzione + invecchiamento artificiale |

- Tempra di soluzione: riscaldamento a 450-550 °C e raffreddamento a 200 °C in acqua o aria;

- Invecchiamento naturale: 4-10 ore a 160-190 °C;

- Invecchiamento artificiale: 4-10 ore a 160-190 °C.



La varietà delle caratteristiche ottenibili rendono le leghe di alluminio impiegabili in un **numero notevole di applicazioni** all'interno dell'industria automobilistica.

In particolare le **leghe semilavorate** impiegate per le **applicazioni strutturali** sono quelle delle serie **2XXX, 5XXX, 6XXX e 7XXX**, mentre le leghe della serie 4XXX sono usate come materiale di apporto nella saldatura MIG e TIG.

Sono tutte leghe **trattabili termicamente**, e quindi con buoni valori di resistenza, **eccetto** le leghe della serie **5XXX**, che hanno però il pregio di poter essere **saldate** senza il degrado delle proprietà meccaniche inevitabile con le leghe da bonifica.

Esse vengono utilizzate in forma di **lamiera stampata** nella costruzione di pannelli **carrozzeria** o di intere **scocche**, in cui non sono richiesti elevati valori di resistenza meccanica mentre la saldabilità è una qualità fondamentale.

Le leghe delle serie **2XXX e 7XXX**, pur avendo i **valori più elevati di resistenza** meccanica, sono **meno lavorabili e non possono essere saldate**, necessitando di **giunzioni meccaniche** (rivettatura) o adesive.

Trovano estese applicazioni nella costruzione di **strutture aeronautiche**, dove è fondamentale il rapporto resistenza-peso e dove le difficoltà lavorazione e di assemblaggio non rappresentano un vincolo primario, visti gli esigui regimi produttivi e i differenti criteri economici.

Al contrario, nell'industria automobilistica i requisiti primari sono relativi ai **costi di lavorazione** ed alla **adattabilità alla produzione in grande serie**, e quindi queste leghe vengono impiegate limitatamente alla produzione di singoli componenti ad elevata resistenza, in prevalenza barre paraurti e rinforzi strutturali.

Tra le serie di **leghe da getto** trattabili termicamente (2XX.X, 3XX.X e 7XX.X), la 7XX.X presenta notevoli difficoltà di colata e la 2XX.X non è saldabile (viene spesso impiegata per basamenti, pistoni ed altri componenti).

Per le **applicazioni strutturali** sono quindi preferite le leghe della serie **3XX.X**.



In Tabella 2.1.4 sono riportate per ogni serie le principali leghe utilizzate per applicazioni strutturali automobilistiche ed i relativi impieghi.

Tabella 2.1.4 - Applicazioni strutturali delle leghe di alluminio nell'industria automobilistica

| Serie | Lega | Applicazioni |
|-------|------------------|---|
| 2XXX | 2008, 2010 | Pannelli esterni ed interni; adatte anche ad applicazioni strutturali. |
| | 2017, 2024, 2117 | Giunzioni meccaniche. |
| | 2036 | Pannelli esterni ed interni; pianali; telai di sedili. |
| 5XXX | 5052 | Paraurti per veicoli pesanti; pannelli. |
| | 5182 | Parti strutturali e saldate; pianali (lamiera), pannelli carrozzeria. |
| | 5454 | Strutture saldate, serbatoi carburante. |
| | 5754 | Parti strutturali e saldate (lamiera); scocche (lamiera). |
| 6XXX | 6009 | Pannelli esterni ed interni; load floor; barre paraurti; parti strutturali e saldabili; telai di sedili; rinforzi per paraurti. |
| | 6010 | Pannelli esterni ed interni; telai di sedili. |
| | 6022 | Pannelli esterni ed interni. |
| | 6061 | Componenti strutturali estrusi; brackets (estrusi e lamiera); rinforzi per paraurti; giunzioni meccaniche. |
| | 6063 | Componenti strutturali estrusi. |
| | 6082 | Componenti strutturali. |
| | 6111 | Pannelli carrozzeria. |
| 7XXX | 7003, 7004 | Telai per sedili; rinforzi per paraurti. |
| | 7021 | Barre paraurti; brackets (lamiera); rinforzi. |
| | 7129 | Barre paraurti; rinforzi; sostegni per poggiatesta; telai per sedili. |
| 3XX.X | 356.0, 357.0 | Componenti pressofusi; lavorazioni di squeeze-casting e thixocasting. |
| | 390.0 | Componenti pressofusi. |

fonte: The Aluminum Association, Inc.



2.1.3 - Costi del materiale

Uno degli ostacoli principali all'utilizzo delle leghe di alluminio è il loro costo.

Facendo riferimento a lamiere da stampaggio, per le leghe leggere si hanno mediamente prezzi di 3.3-4 \$/kg contro i 0.5-0.7 \$/kg per l'acciaio.

Compensa parzialmente questa differenza la minore quantità in massa necessaria, ma soprattutto la possibilità di utilizzare **alluminio secondario** nei materiali adottati e di riciclare poi le leghe con maggior profitto alla fine della vita del veicolo.

In generale è auspicabile comunque una **riduzione dei prezzi** ed una loro maggiore **stabilità**, possibile a sua volta con l'incremento delle quantità utilizzate.

In particolare per un impiego estendibile alla costruzione di scocche stampate in grande serie, la lamiera di alluminio dovrebbe avere un costo massimo di 2 \$/kg (1 \$/lb).

2.1.4 - Criteri di progettazione

L'adozione delle leghe di alluminio comporta una serie di differenze specifiche in relazione alle tecnologie di lavorazione e di giunzione, dovute in massima parte alle caratteristiche fisiche e meccaniche delle leghe.

Tra le proprietà che portano a problemi di lavorazione si possono indicare:

- **Resistenza meccanica**

E' sensibilmente minore rispetto a quella dell'acciaio. I componenti progettati a resistenza devono avere **sezioni maggiorate in dimensioni e/o in spessore**.

Per raggiungere valori di resistenza accettabili, inoltre, i pezzi devono essere sottoposti a trattamenti termici di **bonifica**, il che aggiunge una fase di lavorazione al ciclo di produzione aumentandone la complessità.

- **Modulo elastico**

E' tre volte minore rispetto all'acciaio. Ciò comporta approcci differenti nella progettazione di componenti dove il vincolo più restrittivo è la **rigidezza**, come nell'80% delle parti di strutture automobilistiche.



- **Relazione sforzo - deformazione**

Presenta un andamento differente, con l'assenza della fase di snervamento ed una pendenza variabile in modo meno brusco: si presta poco a schematizzazioni del tipo "perfettamente elastico-perfettamente plastico" e richiede per calcoli accurati l'adozione di **modelli più sofisticati**.

- **Riserva di resistenza oltre il limite elastico**

E' inferiore di quella fornita dall'acciaio: ciò si traduce in una **maggiorazione dei coefficienti di sicurezza** nella progettazione a resistenza (da 1.3-1.5 a **1.5-2.0** nel caso di **carichi statici**).

- **Coefficiente di dilatazione termica**

E' doppio rispetto a quello dell'acciaio, il che dà **problemi di tolleranze** dopo i trattamenti termici di pezzi già formati.

- **Elevata conducibilità elettrica e termica**

Comporta il notevole incremento delle **intensità di corrente** necessarie per la **saldatura** dei componenti.

Riduce tuttavia l'entità delle **tensioni residue** rendendo il raffreddamento meno disomogeneo.

- **Durezza e stabilità dell'ossido di alluminio**

Nelle operazioni di **saldatura** deve essere **rimosso** e occorre un'**atmosfera protetta** che impedisca la sua formazione nelle fasi successive.

Un grande **vantaggio** delle leghe di alluminio rispetto all'acciaio è la **superiore lavorabilità**. La temperatura di fusione, sensibilmente inferiore di quella dell'acciaio, e la maggiore lavorabilità rendono praticabile l'applicazione di differenti tecnologie, prime tra tutte la **pressofusione** e l'**estrusione**.

L'impiego di queste lavorazioni, pur se con differenze specifiche, consente la produzione di componenti con buone caratteristiche meccaniche e dalle **forme complesse**, con **integrazione** di più parti in singoli pezzi multifunzionali.



In questo modo può essere sensibilmente ridotto il numero dei componenti, e di conseguenza anche il numero delle giunzioni necessarie, con ulteriore diminuzione delle masse e **vantaggi produttivi**:

- Semplificazione dell'assemblaggio;
- Riduzione dell'usura dei sistemi di assemblaggio;
- Riduzione delle attrezzature e dei relativi ingombri;
- Riduzione della manodopera e dei possibili errori;
- **Incremento generale della qualità.**

Risulta quindi fondamentale abbinare l'adozione delle leghe leggere ad una riprogettazione dell'intero sistema di produzione in modo da esaltarne i vantaggi e ridurre al minimo gli inconvenienti.

2.1.5 - Componenti estrusi

La possibilità di estrusione è una delle maggiori attrattive dell'impiego delle leghe leggere.

La caratteristica principale è la possibilità di ottenere **sezioni molto complesse** in modo relativamente semplice.

Questo consente diversi **vantaggi**:

- Possono essere prodotti profilati nervati ed irrigiditi senza ricorrere a **sezioni composte**, ed evitando così la necessità di **giunzioni**.
- Possono essere integrate **funzioni aggiuntive**, come nervature o scanalature per **accoppiamenti** con altri componenti.
- Le **sezioni** possono essere **ottimizzate** in relazione alla funzione del singolo componente ed alle sollecitazioni cui è soggetto.

Per ottenere profilati rigidità e resistenza equivalente a quella raggiungibile con l'acciaio, si opera sia sullo spessore che sulle geometrie:

- Lo **spessore** viene mediamente aumentato in modo da incrementare la **sezione resistente**. Nella sezione trasversale esso ha **distribuzione variabile** in funzione



delle sollecitazioni locali. Questa ottimizzazione consente sensibili risparmi di materiale.

- La **forma** è ottimizzata in modo da dare **rigidezza** massima in relazione al tipo di sollecitazione che agisce sul componente

Le **tensioni residue** generate dalla distribuzione di temperatura nella sezione trasversale, pur avendo distribuzione piuttosto irregolare e non facilmente modellabile, tuttavia si mantengono di valore limitato ed inferiore a 20 MPa, ed hanno quindi un **effetto generalmente trascurabile** ai fini della capacità portante.

Tabella 2.1.5 - Proprietà meccaniche delle leghe da estrusione

| Lega | Stato | Spessore [mm] | UTS [MPa] | R _{p0.2} [MPa] | A50 [%] | Estrudibilità (EAA Rating) |
|-------|-------|---------------|-----------|-------------------------|---------|----------------------------|
| 6061 | T4 | n.d. | 215 | 125 | 16 | 60 |
| | T6 | n.d. | 305 | 265 | 9 | |
| 6063A | T4 | <25 | 150 | 90 | 10 | 100 |
| | T5 | <25 | 190 | 150 | 4 | |
| | T6 | <25 | 220 | 180 | 4 | |
| 6082 | T4 | <25 | 205 | 110 | 12 | n.d. |
| | T5 | <5 | 270 | 230 | 6 | |
| | T6 | <5 | 290 | 250 | 6 | |
| | T6 | 5-25 | 310 | 260 | 8 | |
| 2014A | T4 | 20 | 370 | 230 | 10 | 20 |
| | T6 | 20 | 435 | 370 | 6 | |
| 7108 | T4 | Tutti | 230-300 | 130-200 | 14 | 10 |
| | T6 | Tutti | 380 | 340 | 10 | |

fonti: Hydro Aluminium; European Aluminium Association.

Le leghe adottate nel processo di estrusione sono principalmente quelle della serie **6000** che sono impiegate nel 75% delle applicazioni: esse presentano un adeguato **compromesso tra estrudibilità e resistenza meccanica** e **possono essere saldate**.

Inoltre la necessità primaria di rigidezza nelle strutture portanti automobilistiche richiede l'aumento delle dimensioni delle sezioni resistenti indipendentemente dai



valori di resistenza meccanica: in questo modo l'utilizzo di leghe con limiti elastici di livello medio non risulta penalizzante.

Tra queste, le leghe con applicazioni strutturali sono principalmente la **6061**, la **6063** e la **6082**.

Tra le leghe di altre serie, utilizzate per componenti ad elevata resistenza si possono indicare la 2014 e la 7108.

La saldatura di componenti già trattati termicamente degrada notevolmente le proprietà raggiunte: talvolta è possibile effettuare la bonifica successivamente alla saldatura, ma ciò aggiunge una stazione di lavoro complessa nella linea di assemblaggio dei telai, mentre i trattamenti termici operati sui singoli componenti sono più semplici e possono essere eseguiti dai fornitori, anche direttamente nel processo di estrusione.

2.1.6 - Componenti stampati

Il vantaggio principale rispetto allo stampaggio di lamiere in acciaio è la conseguente riduzione di peso, ottenibile peraltro mediante tecnologie di stampaggio analoghe a quelle tradizionali.

Gli **svantaggi** relativi sono così riassumibili:

- **Maggior costo del materiale;**
- **Maggior ritorno elastico** e problemi di **splitting** con conseguente difficoltà di lavorazione;
- **Minore modulo elastico**

La **rigidezza** richiesta è ottenibile mediante:

- Adeguata **geometria**: comporta sensibili modifiche alle linee esterne e quindi al design della vettura, ponendo notevoli limiti in questo senso;
- Aumento dello spessore rispetto alla lamiera in acciaio: in questo modo si aumentano ulteriormente i costi e si riduce il vantaggio in termini di peso.



Poiché in generale si desiderano mantenere le forme dei pannelli pressoché inalterate, la via più praticata è l'utilizzo di spessori incrementati.

Per avere un ordine di grandezza, si può considerare che la rigidità flessionale di una piastra piana elastica è data in prima approssimazione dalla relazione:

Data la differenza tra i moduli elastici tra acciaio e leghe di alluminio, per avere un valore equivalente gli spessori delle lamiere in lega leggera devono quindi essere incrementate di un fattore pari a 1.4.

Le leghe più utilizzate per lo stampaggio di pannelli carrozzeria sono alcune della serie 6000 (**6009**, **6015** e **6016**) e la lega **5182**.

Le prime sono deformate allo stato T4 e subiscono un **invecchiamento artificiale** durante la cottura delle vernici.

La **5182** è invece deformata allo stato ricotto (O) e la deformazione plastica ne **incrementa la resistenza** meccanica per **incrudimento**.

Le leghe 6009 e 6016 presentano una buona resistenza meccanica ed alla deformazione, e quindi all'ammaccatura, superiore anche a quella dell'acciaio.

Le leghe 6015 e 5182 hanno invece maggiore formabilità, seppur decisamente inferiore a quella dell'acciaio da profondo stampaggio.

La 6015 presenta inoltre un contenuto ritorno elastico e permette di utilizzare più facilmente gli stessi stampi impiegati per l'acciaio o di stampare componenti con forme più complesse.

La 5182 ha ottime caratteristiche di resistenza alla corrosione e di saldabilità, e viene spesso utilizzata per la produzione di intere scocche portanti.

Nella Tabella 2.1.6 sono riportate le caratteristiche meccaniche di queste leghe e della lamiera in acciaio da stampaggio.



Tabella 2.1.6 - Proprietà meccaniche delle leghe da stampaggio

| Lega | Stato | UTS [MPa] | R _{p0.2} [MPa] | A50 [%] |
|----------------------|-------|------------|-------------------------|--------------|
| 6009 | T4 | 280 | 160 | 22 |
| 6015 | T4 | 190 | 115 | 20 |
| 6016 | T4 | 245 | 135 | 26 |
| 5182 | O | 265 | 130 | 23 |
| Acciaio SAE J2329 | - | 270 (min.) | 140-260 | 34-42 (min.) |

(min.) = valore minimo richiesto

2.1.7 - Componenti pressofusi

Le proprietà che facilitano l'applicazione delle tecnologie della fusione e della pressofusione alle leghe di alluminio sono:

- la relativamente **bassa temperatura di fusione**: consente l'impiego di forme metalliche che permettono di ottenere un'elevata precisione dimensionale;
- la facile **lavorabilità** all'utensile;
- l'ottima **finitura superficiale** ottenibile.

Gli **svantaggi** specifici risultano:

- L'**elevato ritiro** (contrazione volumetrica intorno al 5% e lineare intorno all'1.2%);
- La facilità di **reazione con l'ossigeno** e con l'umidità dell'aria;
- L'**anisotropia** della struttura macro e microcristallina e quindi delle caratteristiche meccaniche.

Generalmente i pezzi subiscono un processo di invecchiamento artificiale, che può essere effettuato prima o dopo l'assemblaggio con gli altri componenti, anche a seconda del tipo di giunzione utilizzata.



Sono impiegate leghe da getto della serie **3XX.X** ed in particolare le leghe **319**, **356**, **357** e **380** ma con le continue ricerche sono spesso introdotte nuove leghe con inedite e specifiche composizioni.

Nella Tabella 2.1.7 sono riportate le principali proprietà meccaniche delle leghe da getto.

Tabella 2.1.7 - Proprietà meccaniche delle leghe da getto

| Lega | Stato | UTS [MPa] | Rp0.2 [MPa] | A50 [%] | Brinell Hardness | Pressure Tightness | Machinability |
|--------|-------|--------------|----------------|------------|---------------------|-----------------------|---------------|
| 319.0 | T6 | 248 | 166 | 2.0 | 85.5 | B | A |
| 356.0 | T6 | 228 | 166 | 3.5 | 79 | A | A |
| 357.0 | T6 | 310 | 241 | 3.0 | 91 | B | B |
| A357.0 | T6 | 310 | 241 | 3.0 | 89 | B | B |
| 380.0 | - | 317 | 159 | 3.5 | 85.5 | B | C |

fonte: Acu-Cast Technologies, L.L.C., 2000.

2.1.8 - Comportamento a crash

Nel determinare il comportamento a crash di una struttura concorrono le proprietà del materiale, la forma ed il tipo di componenti ed il **modo di deformarsi** e di distribuire i carichi delle singole parti e della struttura nel suo complesso.

Le reazioni delle strutture in alluminio agli urti e alle sollecitazioni di crash sono in generale **migliori** rispetto a quelle dell'acciaio.

In particolare i **profilati cavi** in alluminio **collassano assialmente** con elevato assorbimento di energia. A parità di energia assorbita l'Al è del 50% più leggero per sezioni rettangolari del 63% per sezioni circolari (configurazioni a grinze più fitte).

Nei componenti estrusi soggetti ad impatto, inoltre, la deformazione è localizzata e quindi facilmente individuabile, e può essere resa progressiva con uno studio degli spessori e delle sezioni.



Nel comportamento a crash le **strutture leggere** hanno presentano vantaggi dovuti alla **minore energia cinetica** da dissipare nel caso di urti contro barriere fisse; sono tuttavia penalizzate nello **scontro** con i più pesanti **veicoli convenzionali in acciaio**.

2.1.9 - Riciclabilità

Diagramma 2.1.3 - Previsioni per il riciclaggio dell'alluminio nell'industria automobilistica

fonte: Ducker Research, 1999.

Le elevate qualità dell'alluminio nel campo della riciclabilità sono testimoniate da numerosi dati:

- L'alluminio rappresenta attualmente il **35-50% del valore residuo** del veicolo a fine vita, nonostante il suo **contenuto** sia mediamente del **5-10%**;
- L'alluminio è **riciclato** in percentuali del **85-90%**: di questa quantità il 5% circa è utilizzato per la produzione di semilavorati, mentre il restante 95% serve alla produzione di leghe per fusione meno pregiate, che tollerano composizioni differenti ma comportano perdite economiche del 30% circa;
- L'alluminio utilizzato nell'industria automobilistica proviene per il **60-70%** da **alluminio secondario** (e si prevede che entro il 2010 questa quota salirà al 90%).



L'energia richiesta dall'alluminio secondario è infatti pari al 5-15 % di quella necessaria a produrre alluminio primario;

- L'alluminio di scarto durante la lavorazione è riciclato all'interno della stessa industria automobilistica oppure in quella metallurgica.

2.1.10 - Riparabilità

Nel **5% degli incidenti stradali il telaio viene danneggiato**, così un ulteriore aspetto da considerare nella progettazione di un telaio in alluminio è la sua riparabilità.

L'utilizzo di componenti in lega di alluminio comporta notevoli differenze anche per quanto riguarda le tecniche di riparazione.

In particolare devono essere considerati i seguenti fattori:

- **Impossibilità di rettifica** dei componenti **estrusi**;
- **Saldatura complessa** ed eseguibile solo da officine specializzate;
- Necessità di **sostituzione dei componenti**

Le difficoltà delle operazioni di riparazione rende necessaria per una parte dei componenti, soprattutto se strutturali, la sostituzione in caso di danneggiamento. La progettazione della struttura deve essere mirata a semplificare tale operazione.

- **Ristrette tolleranze**

Con l'acciaio è possibile correggere eventuali imprecisioni dimensionali dovute alla distorsione introdotta dalla saldatura. Con l'alluminio ciò non è in linea di massima possibile: occorrono lavorazioni più precise con limiti di tolleranza non superiori a 2 mm.

- **Tecniche specifiche**

Per carrozzerie in lamiera di alluminio, ammaccature minori possono essere riparate mediante l'impiego di appositi utensili con testa in legno o plastica e l'applicazione di una pressione uniforme al posto della tradizionale battitura, per evitare deformazioni e stiramenti della lamiera.



Alcuni componenti strutturali possono essere riparati mediante raddrizzatrici idrauliche. I nodi saldati possono essere smontati mediante rimozione delle saldature a punti e successivo taglio a caldo (hot cleaving).

Danni più gravi prevedono il taglio della porzione di lamiera danneggiata ed il successivo fissaggio della parte nuova mediante saldatura o rivettatura.

- **Corrosione da contatto**

- Tutti gli **utensili** ed i componenti metallici che vengono a contatto con l'alluminio (viti, bulloni ed altro) devono avere adeguati **rivestimenti** (zincatura);
- I **componenti in plastica** o in gomma e gli adesivi devono essere **elettricamente isolanti** ed avere una specifica resistenza;
- L'ambiente di lavorazione non deve contenere polvere di acciaio (presente per lavorazioni di rettifica, molatura od altro).

- **Rete di assistenza specializzata**

Deve essere organizzata una infrastruttura di officine autorizzate, e deve essere previsto un servizio di trasporto gratuito nel caso di assenza di officine nella zona del cliente interessato. L'Audi ha per esempio organizzato negli Stati Uniti per il modello A8 una rete di 29 officine autorizzate a riparazioni di carrozzeria e di 4 officine autorizzate a riparazioni su componenti strutturali. In entrambi i casi i trasporti presso tali sedi sono a carico della Casa.



2.2 - ALTRI MATERIALI

2.2.1 - Acciai speciali

La vastissima **esperienza** maturata dalle industrie nella costruzione di scocche in acciaio ha portato a soluzioni sempre più raffinate ed ottimizzate.

Per ottenere ulteriori progressi nella riduzione dei pesi mantenendo le tecnologie dell'acciaio, la via che presenta le maggiori prospettive è quella che prevede la sostituzione degli acciai convenzionali con **acciai a media o alta resistenza** per quel 20% circa di componenti la cui progettazione è vincolata dai valori di sollecitazione, piuttosto che dalle esigenze di rigidità. In questo modo è possibile ridurre gli spessori e quindi le masse, con un risparmio quantificabile nel 30-50% per ogni singolo componente.

Gli acciai speciali trovano sempre più numerose applicazioni nelle scocche portanti anche grazie alla disponibilità di nuovi processi tecnologici come i ***welded tailor blanks*** e l'**idroformatura**.

Gli elementi interessati sono fondamentalmente quelli che gestiscono il **comportamento a crash**, dato che i carichi dinamici di esercizio risultano generalmente molto inferiori.

Tra questi in particolare si possono indicare:

- Barre paraurti;
- Barre anti intrusione;
- Longheroni;
- Rinforzi dei montanti B.

Fra i tipi di acciai utilizzabili sono di particolare importanza:

- **HSLA**

Sviluppati negli ultimi 15 anni, presentano elevata resistenza ma bassa formabilità.

- **Dual Phase Steel**

Hanno buone qualità di formabilità, ma presentano problemi di saldabilità.



Tabella 2.2.1 – Proprietà meccaniche di alcuni acciai speciali

| Tipo di acciaio | UTS [MPa] | Rp0.2 [MPa] | A50 [%] | Spessore [mm] |
|-----------------|-----------|-------------|---------|---------------|
| HSS | 380-480 | 340-410 | 26-30 | 0.6-9.5 |
| HSLA | 350-590 | 410-680 | 70-96 | 0.4-9.5 |
| Dual Phase | 340-810 | 550-1070 | 90-106 | 0.5-2.2 |

Gli **svantaggi** relativi all'impiego di questi materiali nella produzione di strutture automobilistiche sono principalmente:

- **Bassa formabilità:** essa diminuisce con l'aumentare della resistenza e porta a problemi di frattura (cracking) e splitting durante lo stampaggio
- **Degrado delle proprietà meccaniche** nella zona termicamente alterata durante la **saldatura**;
- **Maggior ritorno elastico**
E' necessario utilizzare presse con tonnellaggio maggiore (mediamente 500 t rispetto alle 300 t per acciai convenzionali);
- **Minore esperienza** con stampi e matrici per lo stampaggio.

Recentemente è stato proposto anche l'impiego di **acciai inossidabili austenitici**. Essi combinano una buona formabilità con un'eccellente resistenza a corrosione e alle temperature elevate, oltre ad avere elevata resistenza meccanica.

Gli **svantaggi** principali sono:

- **Costi elevati**;
- Necessità di particolari **trattamenti superficiali** per le **matrici** delle presse per lo stampaggio.

2.2.2 - Materiali plastici

L'adozione di materiali plastici a livello di telaio e carrozzeria è stata nel tempo sempre maggiormente praticata con il progredire delle relative tecnologie: oggi si dispone di plastiche due volte più leggere dell'alluminio, lavorabili in una varietà di forme e con macchine per lo stampaggio dal costo molto inferiore.



Il loro utilizzo per **applicazioni strutturali**, in forma di compositi polimerici, comporta però notevoli ostacoli:

- **Costo elevato** (1-10\$/pound); c'è competitività con i metalli solo per piccole quantità o per forme molto complesse;
- **Ridotta resistenza meccanica** (1/30-1/50 di quella dell'acciaio); l'utilizzo maggiore è per elementi senza stringenti requisiti in questo senso: pannelleria, finiture e altro; per scopi strutturali occorrerebbero spessori molto maggiori che ridurrebbero i vantaggi di peso e aumenterebbero i costi.

L'applicazione nella **pannelleria esterna** (senza funzione strutturale) è invece già ampiamente attuata, e costituisce il 40% dell'intero mercato dei materiali plastici nell'industria automobilistica.

Vantaggi:

- Peso ridotto;
- Possibilità di forme complesse;
- Resistenza ad ammaccature e graffi;
- Elevata capacità di integrazione, ad esempio con elementi di finitura esterna;

Svantaggi:

- Elevata dilatazione termica;
- Bassa resistenza ad elevate temperature;
- Comportamento fragile alle basse temperature.

In particolare con **pannelli plastici pigmentati in massa** (*solid-coloured*) sarebbe teoricamente possibile risparmiare fino a 12 ore sul tempo di produzione: 6 relative alla costruzione della scocca e 6 per la verniciatura, passando dalle attuali 20 ore a circa 8.

Per quanto riguarda i volumi produttivi, la soluzione risulta praticabile con convenienza fino a regimi di produzione di **80mila unità/anno**.



2.2.3 - Compositi in fibra di carbonio

Tra i materiali compositi, quelli con rinforzi in fibra di carbonio sono i più interessanti dal punto di vista strutturale.

Le **applicazioni** principali sono:

- **Telai monoscocca**

Si tratta della tecnologia che consente di raggiungere le prestazioni più elevate, ma con costi molto alti, e per questo la sua applicazione è da sempre limitata al mondo delle competizioni e a poche vetture sportive di classe superiore (Ferrari F50, McLaren F1, Bugatti EB110GT).

- **Pannelli esterni**

E' un'applicazione meno estrema, anche se le applicazioni restano comunque limitate alle categorie viste sopra. Sono accoppiati generalmente con telai tubolari in acciaio (Ferrari 288 GTO, Ferrari F40, Lamborghini Diablo GT) o con scocche portanti in acciaio (Porsche 959).

Al di là del costo molto elevato (oltre i 9 \$/kg e con forti incrementi per elevati valori di resistenza e rigidità) si possono comunque individuare altri **svantaggi** relativi alla adozione di questi materiali nella normale produzione:

- **Difficoltà di lavorazione:**

Anche se il numero dei componenti sarebbe ridotto di 2/3 rispetto ad una convenzionale scocca in metallo, è difficile rispettare strette tolleranze dimensionali: la matrice resinosa e le fibre si raffreddano in modo differenziato e le parti possono essere soggette a leggeri fenomeni di distorsione non facilmente valutabili a priori e senza la possibilità - spesso sfruttata nel caso dell'acciaio - di aggiustamenti successivi.

- **Bassa adattabilità alla produzione** in grande scala:

E' dovuta principalmente alla lentezza intrinseca del processo di lavorazione.

I tempi necessari per il raffreddamento e per le reazioni chimiche sono difficilmente riducibili senza andare incontro rispettivamente a fragilità del pezzo



e ad incontrollabilità del processo. Per mantenere elevata la produzione occorrerebbero quindi più linee in parallelo, difficili da coordinare nella pratica, tanto che generalmente si cercano di evitare processi che richiedano più di due linee in parallelo.

- **Comportamento a crash**

Mentre i metalli collassano per deformazione plastica, i compositi subiscono una combinazione di processi di frattura. Ciò, in combinazione con la struttura interna fortemente anisotropa, determinata da resine, fibre, e processi di lavorazione, rende la modellazione di questi materiali estremamente complessa ed il loro comportamento a crash difficilmente prevedibile.

- Necessità di sviluppo di **tecniche di riparazione** specifiche;
- Elevati **costi ambientali** nella produzione delle fibre.

Una tecnologia promettente è il processo di **liquid molding**.

Le fibre di rinforzo vengono posizionate in una matrice chiusa; è iniettata la resina liquida, che deve rimanere fluida abbastanza a lungo da riempire tutti i vuoti e raggiungere tutte le parti interne alla matrice. Dopo l'essiccamento può avvenire la rimozione della struttura ormai solida e la ripetizione del processo.

Il vantaggio principale è costituito dalla possibilità di integrare più parti con una drastica riduzione del numero di componenti (teoricamente si può arrivare anche ad un totale di 5 componenti).

I ritmi produttivi sono tuttavia ancora molto lenti: circa 15 minuti per parte contro i 17 secondi necessari per lo stampaggio delle lamiere d'acciaio. Ciò rende tale tecnologia ancora inadatta ai regimi di produzione propri dell'industria automobilistica.



2.3 - SINTESI

2.3.1 - Confronto e previsioni per il futuro

Diagramma 2.3.1

fonte: Materials System Laboratory, Massachusetts Institute of Technology

L'enorme bagaglio di esperienza accumulata dalle Industrie in più di un secolo nella produzione e nella lavorazione dell'acciaio rende particolarmente difficile il suo abbandono in favore di materiali alternativi.

I **materiali plastici e i compositi**, per le elevate prestazioni in grado di raggiungere, appaiono come le soluzioni più promettenti a **lungo termine**, ma richiedono ancora notevoli lavori di ricerca di affinamento per ridurre i costi, l'impatto ambientale, migliorarne la riciclabilità e renderli adottabili nella produzione di grande serie.

In quest'ottica le **leghe leggere** di alluminio e gli acciai speciali appaiono come la migliore **soluzione per il prossimo futuro**, permettendo sensibili miglioramenti pur consentendo lo sfruttamento dell'esperienza maturata dall'industria con le leghe metalliche.



BIBLIOGRAFIA CAPITOLO 2

- [2.1] *"Aluminium and Magnesium – Key to CO2 Reduction"*, www.kgpauto.com/News/Regular/aug00.htm, AutoBriefing, Knibb, Koberzano & Partners, August, 2000.
- [2.2] *"Aluminium and Magnesium in European Light Vehicles"*, www.kgpauto.com/Initiatives/almgprop.pdf, Knibb, Gormezano & Partners, J.D. Power-LMC Automotive Forecasting Services, January, 2001.
- [2.3] C.Yost, *"Aluminum Product Development and the Automotive Industries"*, Industry, Trade and Technology Review, May, 1994.
- [2.4] W.Ruch, F.Robberstad, *"L'alluminio nelle strutture per auto"*, Al: alluminio e leghe, Maggio 1994.
- [2.5] C.F.Koehl, *"Aluminum, Magnesium expected to make advances"*, American Metal Market, March 23, 1999.
- [2.6] *"Aluminum Alloy Selection and Applications"*, The Aluminum Association, Inc., Washington D.C., December, 1998.
- [2.7] *"Automotive Aluminum Alloys and Applications"*, The Aluminum Association, Inc., Washington D.C., 2001.
- [2.8] *"The aluminum angle"*, Automotive Engineering International Online, <http://www.sae.org/automag/metals/10.htm>, SAE International, June, 2000.
- [2.9] S.Fiorani, *"Body and Structure Repair"*, Automotive Body Repair News, November, 1997.
- [2.10] *"HSS sheet for chassis parts"*, Automotive Engineering International Online, <http://www.sae.org/automag/metals/09.htm>, SAE International, June, 2000.



- [2.11] T.Furukawa, *"Steel faces increasing competition from aluminum"*, America Metal Market, March 23, 1999.
- [2.12] *"Automotive steel design manual"*, Autosteel Partnership, <http://www.a-sp.org>, Michigan, USA, 1996.
- [2.13] C.Harler, *"Newly emerging mix of auto materials changes what shops will see tomorrow"*, AutoInc., May, 2000.
- [2.14] J.Ogando, M.J.Lewis, *"Materials enable design breakthroughs"*, Design News, March 20, 2000.
- [2.15] G.Chamberlain, *"Metals that make a difference"*, Design News, April 19, 1999.
- [2.16] P.Peterson - US Steel, *"Increased Use of Aluminum in Vehicles: The Environmental Truth - A Comparison between Steel and Aluminum"*, SAE Total Life Cycle Conference, April 28, 2000.
- [2.17] Alcan International Ltd, *"Alcan's aluminium vehicle technology"*, http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band_8/alctxt14.html, The Welding Institute, 2001.



CAPITOLO 3 : TECNOLOGIE



3.1 - TECNOLOGIE DI LAVORAZIONE

3.1.1 - Estrusione

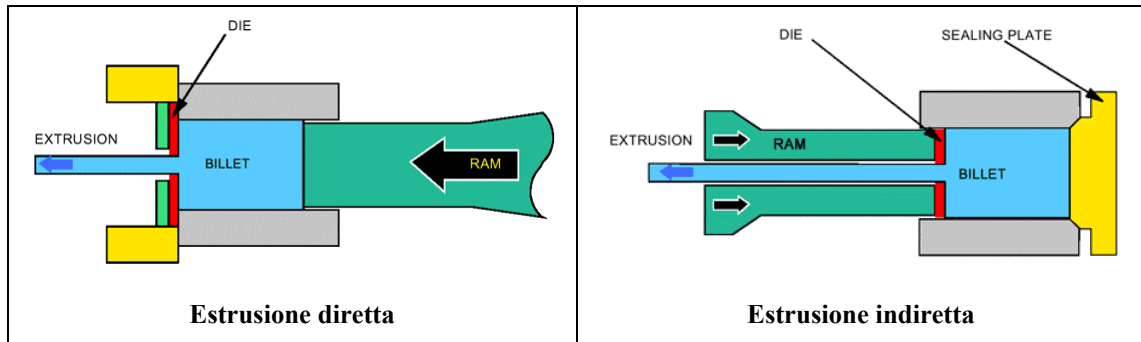


Fig. 3.1.1 - Schema di estrusione diretta e indiretta (fonte: European Aluminium Association)

Questo tipo di lavorazione presenta il principale vantaggio di avere **costi contenuti** (circa 4 \$/kg contro i 10 \$/kg dello stampaggio e della pressofusione): i macchinari per l'estrusione costano nell'ordine delle migliaia di dollari, mentre le presse per lo stampaggio delle lamiere costano cento volte tanto. Questa differenza fa sì che nell'estrusione il **costo del materiale** da solo incida per il **50% circa**.

Tuttavia non si hanno ulteriori vantaggi economici per elevati volumi di produzione, per due ordini di ragioni:

- Le **matrici** sono soggette a **maggior usura** e non durano per l'intera produzione come nel caso dello stampaggio – ne occorrono almeno due o tre serie.
Oltre certi volumi di produzione esse hanno pertanto un'incidenza sui costi pressoché costante;
- I **tempi di lavorazione** sono **più lunghi**, sia relativamente al processo di estrusione vero e proprio, sia per la necessità di sottoporre i pezzi estrusi a finitura e a trattamenti termici.

Le presse possono essere utilizzate con una **varietà di matrici**.



Si ottengono in modo relativamente semplice profilati con **sezioni** anche **molto complesse**. Ciò comporta diversi **vantaggi**:

- Non sono necessarie lavorazioni di piegatura e saldatura come nel caso di profilati in acciaio;
- E' possibile una migliore **ottimizzazione** delle sezioni stesse, con funzioni integrate e spessore delle pareti variabile in funzione della distribuzione delle tensioni.

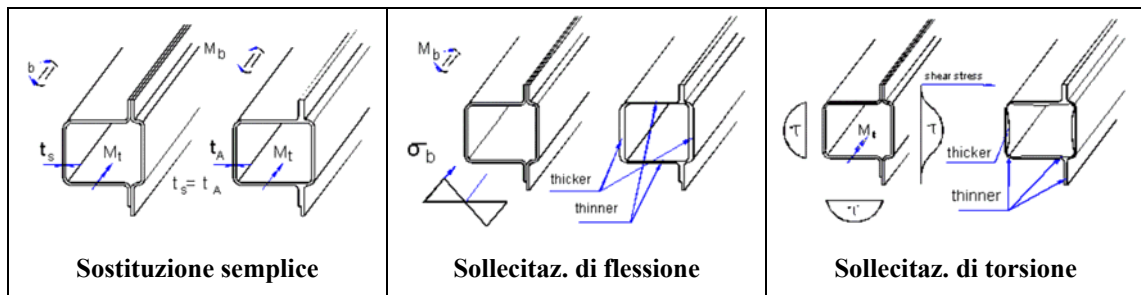


Fig. 3.1.2 - Sostituzione di profilati saldati in acciaio con estrusi in lega di alluminio

(fonte: Hydro Aluminium)

I pezzi ottenibili sono quasi esclusivamente di **forma lineare**; se ne può aumentare la complessità con lavorazioni ulteriori come la piegatura e l'idroformatura, andando però incontro a **costi maggiori**.

Il costo di un estruso di alluminio è inferiore a quello di un pezzo stampato in acciaio, ma questo viene bilanciato dal consistente investimento nelle tecniche di saldatura, che, specie con alti volumi di produzione, fa sentire il suo peso.

Per forme e proprietà i profilati estrusi appaiono naturalmente impiegabili in strutture di tipo Space Frame.



3.1.2 - Stampaggio

E' la tecnologia oggi universalmente utilizzata per la produzione di **scocche portanti in acciaio**.

Comporta elevati investimenti iniziali, compensati da una notevole diminuzione dei costi per produzioni in grande serie.

Il **vantaggio** principale è costituito dalla possibilità di sfruttare gli impianti e le macchine esistenti e parte dell'esperienza maturata con la lamiera in acciaio.

E' caratterizzata da elevati regimi produttivi (meno di 20 s per lo stampaggio di ogni pannello), che la rendono estremamente idonea alle produzioni in grande serie.

Nel caso dell'applicazione a **lamiere in lega di alluminio**, al di là dei costi maggiori del materiale (3-4 volte più elevati a parità di peso rispetto all'acciaio), si presentano i seguenti **inconvenienti**:

- **Splitting, raggrinzamento** e raccolta locale di materiale per stampi di pezzi con pieghe accentuate o ridotti raggi di curvatura.
E' possibile risolvere l'inconveniente mediante l'applicazione di fogli di vinile sulle superfici, l'uso di oli lubrificanti specifici e la progettazione di forme adatte.
E' inoltre necessario diminuire le velocità di lavorazione.
- **Ritorno elastico** durante la rimozione del pezzo dallo stampo.
Ciò comporta l'articolazione del processo in più fasi, oppure alla suddivisione il componente in 2 o più parti da unire insieme successivamente, con un incremento dei tempi e dei costi. [Mat22]
- **Difficoltà** per gli **spessori incrementati** al fine di ottenere una rigidezza equivalente.



3.1.3 - Pressofusione

E' una delle tecnologie maggiormente impiegate per la lavorazione delle leghe di alluminio: il relativamente basso punto di fusione rende il processo più facilmente gestibile e permette alle matrici degli **stampi** una **maggiore durata**.

Possono essere usate leghe secondarie con costi minore ed i pezzi presentano una buona precisione dimensionale ed un ottimo grado di finitura superficiale.

La qualità dei pezzi finiti e le loro proprietà metallurgiche e meccaniche sono fortemente dipendenti dal tipo di processo e dal materiale utilizzato.

I principali **procedimenti** utilizzati sono:

- Acurad (riempimento lento della cavità dello stampo);
- Sotto vuoto (iniezione con contemporanea aspirazione dell'aria contenuta nella cavità);
- Vacural (iniezione con lega aspirata dal forno).

Tabella 3.1.1 - Caratteristiche delle varie tipologie di pressofusione

| Processo | Allestimento [giorni] | Aspetto superficiale | Trattamento termico e saldatura | Spessore [mm] | Tenuta a pressione/ Caratteristiche meccaniche | Resa di colata [%] |
|----------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------------|---------------|---|--------------------|
| Bassa pressione | 30-100 | Buono + | Si | 2.5-16 | Ottima/Elevate | 85-95 |
| Pressocolata | 60-140 | Buono | No | 2-10 | Discreta/Medie | 65-70 |
| Squeeze Casting VSC | 100-160 | Buono | Si | 5-35 | Ottima/Elevatissime | 50-70 |
| Squeeze Casting HVSC | 80-150 | Buono | Si | 3.5-25 | Buona/Elevate | 55-65 |



3.1.4 - Piegatura (*bending*)

E' necessaria quando occorrono **componenti curvilinei** (con curvature bidimensionali o tridimensionali). Trova già largo impiego nella costruzione di Space Frame in lega di alluminio, dove è applicata ai profilati estrusi rettilinei.

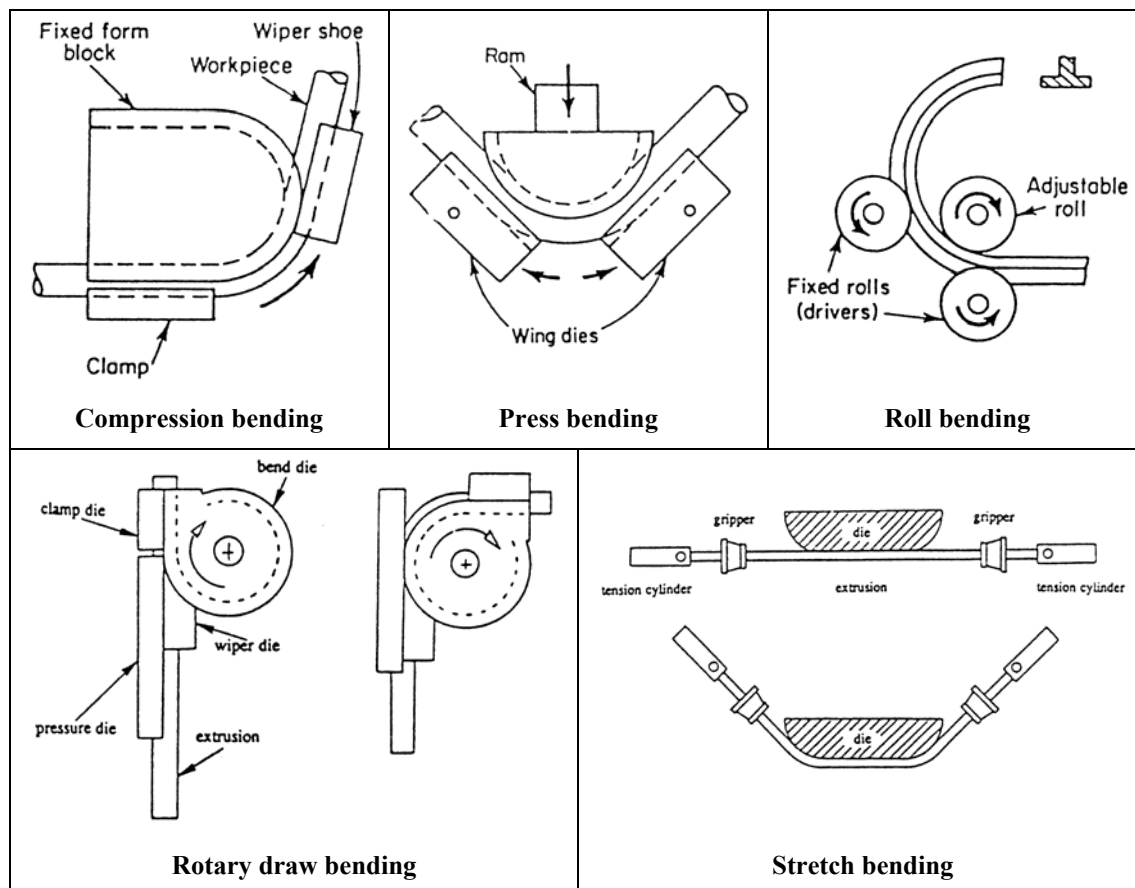


Fig. 3.1.3 - Schema delle principali tipologie di lavorazione di piegatura

Le principali **tipologie** di piegatura (vedi Figura 3.1.3) sono:

- **Compression bending**

Processo di piegatura per compressione, è il più usato e quello con i maggiori livelli di **automazione**. L'estruso è bloccato ad una estremità con una matrice rotante opportunamente sagomata che col suo movimento gli conferisce la



curvatura desiderata. Il principali limiti sono la possibilità di piegare il profilato solo **in un piano** e la difficoltà di controllo della zona soggetta a compressione.

- ***Press bending (o ram bending)***

Lo stampo viene spinto contro il profilato, sostenuto da due supporti (*wing dies*) che viene così deformato. I limiti sono la possibilità di **distorsione** della sezione per la mancanza del mandrino interno.

- ***Roll bending***

E' usato per ampi raggi di curvatura. Il profilato è posto fra tre rulli indipendenti: su quello centrale (*pinch roller*) è applicata una pressione che deforma il profilato. Il principale limite è la **distorsione** delle pareti delle sezioni dovuto all'assenza del mandrino interno.

- ***Rotary draw bending***

La piegatura avviene con la rotazione di una delle matrici (*bend die*); il profilato è bloccato da due morse (*clamp die* e *pressure die*) ed internamente alla sezione vi è un **mandrino** che riduce l'assottigliamento e la distorsione delle pareti.

- ***Stretch bending***

Il profilato è bloccato alle estremità ed è teso assialmente fino al limite di snervamento: è poi adagiato contro una matrice con cui gli è conferita la forma voluta. Sono ridotti il rischio di collasso delle pareti della sezione e gli effetti del ritorno elastico. Consente piegature con **ampi raggi di curvatura** anche secondo diverse direzioni: è applicato ai profilati di supporto alla pannelleria esterna.



3.1.5 - Idroformatura

E' una tecnologia recente che vede il suo principale campo di applicazione proprio nella componentistica per strutture automobilistiche.

Consiste nello **formatura** di un componente mediante la pressione esercitata su di esso da un fluido idraulico – ad esempio acqua - contro uno stampo.

E' applicabile a **lamiere** o ad **elementi cavi** come tubi o profilati estrusi, sia in lega leggera che in acciaio.

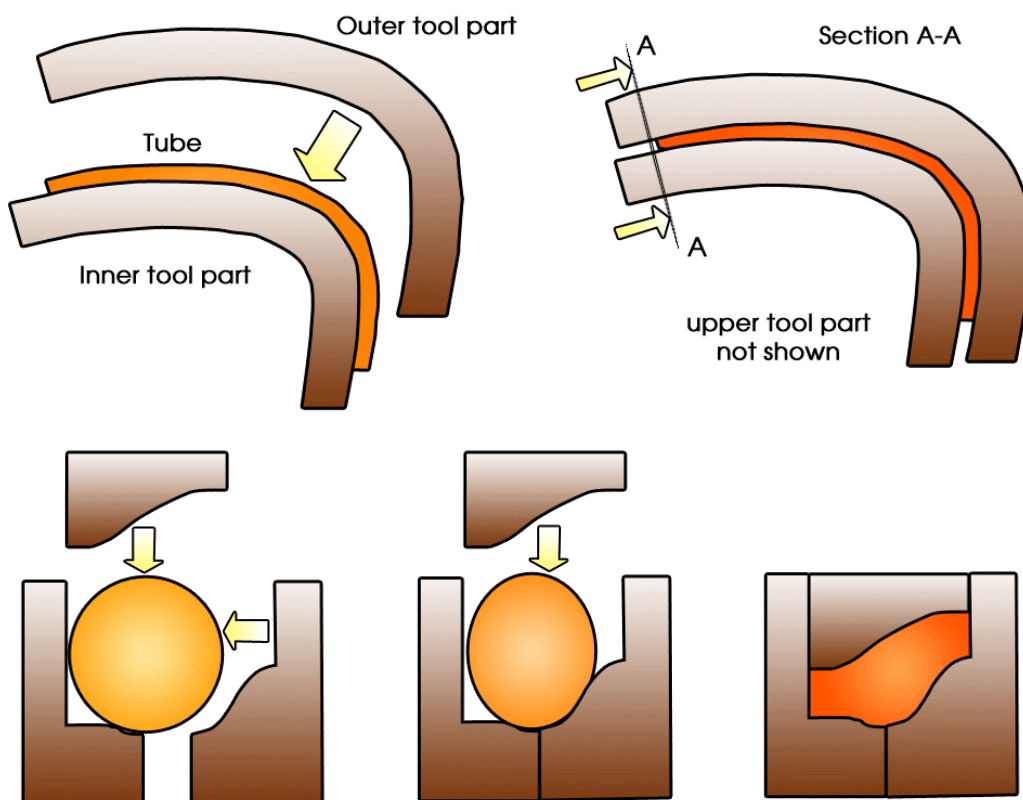


Fig. 3.1.4 - Processo di idroformatura per elementi tubolari

L'idroformatura di un **profilato cavo** avviene mediante il posizionamento dello stesso in uno stampo e l'introduzione al suo **interno** del **fluido a pressione** (vedi Figura 3.1.4). E' utilizzata soprattutto per ottenere **geometrie complesse**.



L'idroformatura di **lamiera** può avvenire in 2 modalità:

- La lamiera è forzata in uno stampo dal fluido messo in pressione da una pompa o dall'azione di una pressa;
- La lamiera è deformata da un punzone che agisce contro il fluido a pressione.

In entrambi i casi si ottiene anche un **indurimento per incrudimento**.

Il processo è definito a bassa o ad alta pressione a seconda che il fluido sia a pressioni minori o maggiori di 83 MPa (12000 psi). Le pressioni più elevate sono necessarie con le geometrie più complesse.

Vantaggi (rispetto a parti stampate o saldate):

- Possibilità di **variare la sezione** nel senso della lunghezza del pezzo;
- **Integrazione di parti e funzioni** con conseguente riduzione del numero di componenti;
- **Integrazione** delle operazioni di **perforazione** e punzonatura nel processo di idroformatura;
- Eliminazione di flange per la saldatura;
- Riduzione dei rivestimenti degli stampi;
- Stabilità dimensionale;
- **Riduzione dei pesi**;
- Costi non molto elevati.

L'idroformatura è già diffusa nella realizzazione di singoli componenti per telai e scocche in acciaio, ed in particolare per i **longheroni** e le **traverse** di molti SUV.

Un'applicazione più complessa è per esempio la lavorazione degli elementi laterali del tetto (SRR, *side roof rails*).



- **Audi A2**

I due elementi che incorporano la parte superiore dei montanti A, i *side roof rails* e la parte superiore dei montanti C sono realizzati mediante l'idroformatura di profilati cavi in lega di alluminio e sfruttano ampiamente la variazione della sezione nel senso della lunghezza, incorporando anche, mediante l'opportuna deformazione delle pareti del profilato di base, le flange per la connessione agli altri componenti (vedi Figura 1.2.7).

- **Scocca ULSAB**

I *side roof rails* sono pezzi singoli ottenuti per idroformatura da tubi saldati in acciaio ad alta resistenza dal diametro esterno di 96 mm e spessore di 1 mm, sottoposti ad una pre-piegatura con 6 differenti raggi di curvatura ed ad una formatura finale con fluido a 550 MPa.

Sono componenti strutturali fondamentali della scocca in acciaio in quanto gestiscono sia i carichi di esercizio che di crash. Per ottimizzare questo trasferimento gli estremi posteriori sono posizionati direttamente sopra i punti di attacco gruppi molla-ammortizzatore (vedi Figura 3.1.5).



Fig. 3.1.5 - Elemento longitudinale idroformato della scocca ULSAB (fonte: [3.8])



3.1.6 - Tailor Welded Blanks

E' una tecnologia di lavorazione molto recente. Consiste nella preparazione di una lamiera da stampaggio mediante **l'unione saldata** di due o più singole **lamiere con caratteristiche differenti** tra loro. Con il successivo stampaggio si ottiene un pezzo che ha caratteristiche differenti nelle sue varie parti a seconda delle funzioni che esse devono svolgere e delle sollecitazioni a cui sono soggette.

Tipici esempi sono pezzi formati con lamiere di **spessore diverso** o aventi rivestimenti protettivi solo nelle zone effettivamente soggette a corrosione.

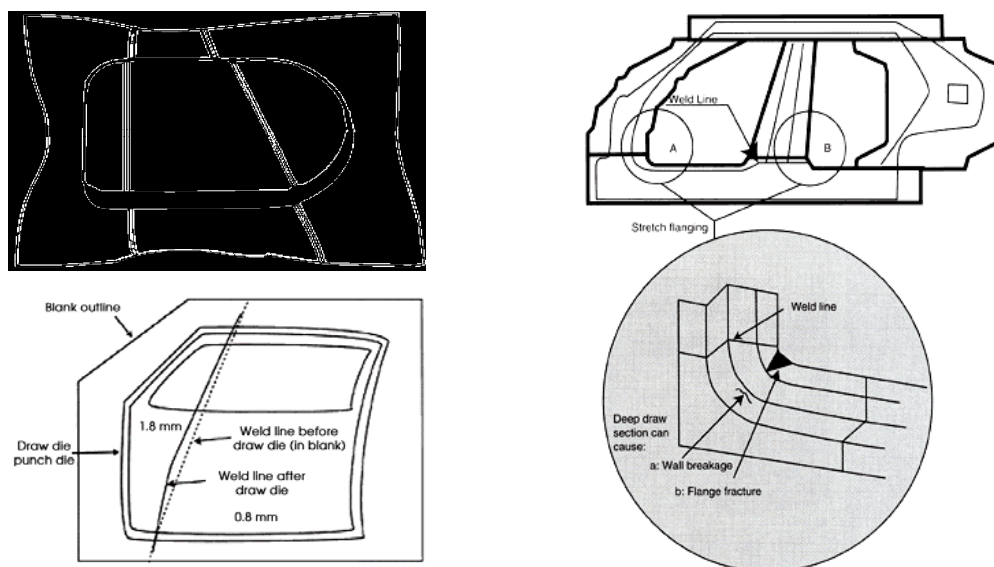


Fig 3.1.6. - Idroformatura per sportelli laterali e per fiancate

Vantaggi:

- **Componenti più leggeri;**
- Riduzione della quantità di materiale utilizzato e di scarto;
- Aumento dichiarato del limite elastico del materiale del 25-40%;
- Risparmi di costi relativi al materiale valutabili in 1,2 milioni di sterline per produzioni di 500mila vetture/anno.
- Riduzione dei costi di lavorazione, ottenuta eliminando fino all'80% delle operazioni di stampaggio.

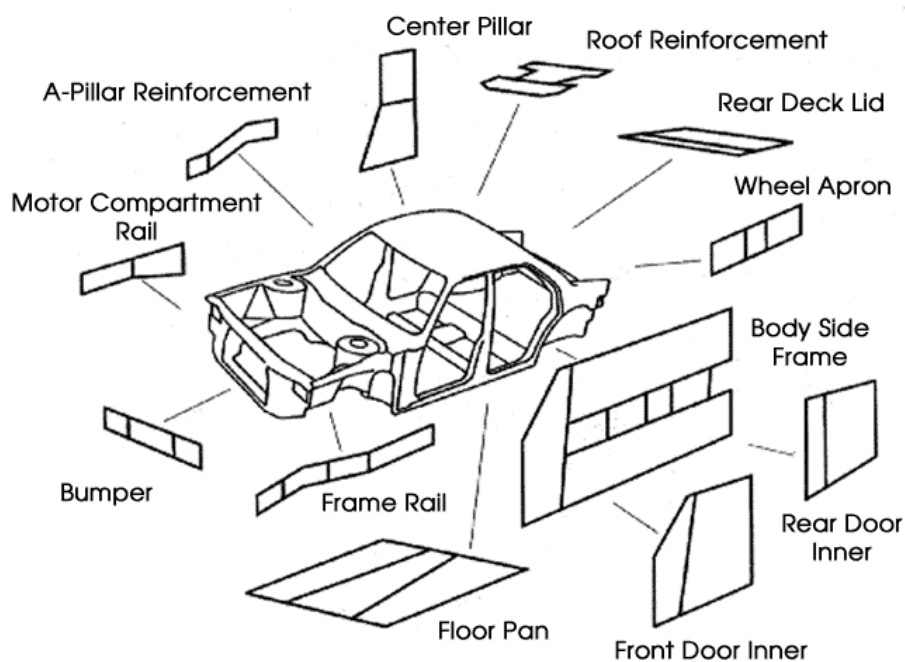


Fig 3.1.7 - Applicazioni dei tailor welded blanks alla costruzione di scocche automobilistiche

E' già industrialmente applicata per la produzione di singoli componenti, come pannelli porta, supporti motore, rinforzi ed altro (vedi Figura 3.1.7).

Le giunzioni più idonee sono le saldature laser, in quanto:

- Sono molto strette;
- Non richiedono particolari finiture.



3.1.7 - Altre Tecnologie

Formatura Super Plastica (SPF - Super Plastic Forming)

Il processo, di derivazione aeronautica, consiste in un preriscaldamento della lamiera in lega di alluminio a 480°C, appena al di sotto del punto di fusione, e nella successiva formatura che avviene lentamente contro un controstampo in acciaio mediante l'applicazione di una pressione di 10 atmosfere.

Vantaggi:

- Necessità dei soli controstampi;
- Sollecitazioni minori;
- Maggiore resistenza ed omogeneità dei pannelli;
- Migliore qualità della verniciatura.

Svantaggi:

- Notevole lentezza del processo: ogni ciclo dura 25 minuti;
- Possibilità di comportamento fragile durante il processo di riscaldamento.

Formatura Semi-Solida (Semi-Solid Forming o Rheocasting)

Studiata per la prima volta dal MIT circa 30 anni fa, è stata introdotta solamente nel 1996 per la produzione di serie.

Il materiale di base è lega di alluminio sotto forma di lingotti ottenuti da una colata continua con adeguata struttura chimica e metallurgica.

I lingotti vengono successivamente riscaldati fino a diventare parzialmente liquidi.

Si ottiene un materiale molto malleabile che viene stampato in una pressa nella forma finale, senza bisogno di successive lavorazioni.

L'agitazione del metallo liquido durante la solidificazione rende la **composizione finale omogenea** e regolare.



Si possono evitare i costi della forgiatura e delle lavorazioni successive e produrre parti più resistenti ed affidabili rispetto a quelli ottenuti per fusione.

Le **applicazioni** possibili comprendono componenti di lunga durata, per cui siano previste sollecitazioni rilevanti o altro come parti di sospensioni e di condizionatori d'aria.

Electro-Magnetic Forming

Sviluppata dal Department of Materials Science and Engineering della Ohio State University e dai ricercatori dell'USCAR, è una tecnica di stampaggio specifica per leghe di alluminio.

La lavorazione avviene con il posizionamento, a breve distanza della lamiera da formare, di una bobina attraverso cui passa un breve ed intenso impulso elettrico.

Il campo magnetico indotto genera una forza repulsiva tra bobina e lamiera che spinge quest'ultima ad elevata velocità contro lo stampo, dandole la forma finale.

Vantaggi:

- Notevole riduzione o eliminazione dei problemi di raggrinzatura e di ritorno elastico;
- Aumento della formabilità, con possibilità di stampare parti geometricamente complesse.

Sono tuttavia necessarie ulteriori **sperimentazioni** per l'attuabilità produttiva.

In particolare, devono essere risolti problemi connessi con la robustezza delle bobine.



3.2 - TECNOLOGIE DI GIUNZIONE

3.2.1 - Introduzione

L'utilizzo di componenti in materiali alternativi alle lamiere di acciaio richiede l'introduzione di tecnologie e procedure di accoppiamento specifiche, differenti da quelle finora sviluppate.

Nello studio e nella scelta dei metodi più adatti occorre tener conto principalmente dei seguenti fattori:

- **Prestazioni:**
 - Resistenza strutturale;
 - Resistenza a fatica;
 - Resistenza a corrosione;
 - Comportamento a crash.
- **Produzione:**
 - Livello di qualità medio;
 - Affidabilità;
 - Versatilità e modularità del processo al variare del materiale e del pezzo;
 - Ritmo di produzione caratteristico e adattabilità all'automazione;
 - Possibilità di accoppiare materiali differenti;
 - Esperienza dell'industria e conoscenza pratica e teorica del fenomeno fisico.
- **Costi:**
 - Capitali iniziali di investimento;
 - Costi di manutenzione;
 - Costi per la sicurezza e per la formazione degli operatori;
 - Costi e condizioni ambientali.
- **Ciclo di vita:**
 - Riparabilità;
 - Riciclabilità.



3.2.2 - Saldatura a punti (RSW, Resistance spot welding)

Il maggior **vantaggio** di questa tecnologia è la vastissima **esperienza** accumulata dalle industrie nella produzione di scocche in lamiera di acciaio.

La sua applicazione alle leghe di alluminio si scontra con alcuni fattori in massima parte dipendenti dalle caratteristiche fisiche dell'alluminio stesso:

- La sua elevata conducibilità richiede una corrente elettrica superiore ed elettrodi di dimensioni maggiori che, stando a contatto con il metallo per tempi più lunghi, sono soggetti a maggiore usura: hanno infatti una durata di 500-2000 saldature contro le 10000 per l'acciaio.
 - Un'ulteriore difficoltà risiede nella rimozione/rottura dello strato di ossido superficiale. L'elevata temperatura di fusione dell'ossido di alluminio richiede un notevole riscaldamento della resistenza.
- E' possibile utilizzare pre-trattamenti superficiali, ma il calore necessario resta comunque elevato.

Nella Tabella 3.2.1 sono riportati alcuni valori di confronto caratteristici.

Tabella 3.2.1 - Caratteristiche della RSW per acciaio e leghe di alluminio

| Parametri | Acciaio | Leghe di Alluminio |
|------------------------------------|----------|--------------------|
| Tempo di saldatura (cicli a 50 Hz) | 7-10 | 3 |
| Intensità di corrente (KA) | 7.0-10.0 | 18.0-23.0 |
| Forza tra gli elettrodi (KN) | 1.9-2.6 | 4.1-5.0 |

fonte: The Welding Institute, 1999

In definitiva l'utilizzo della saldatura a punti per **leghe di alluminio** presenta i seguenti **svantaggi**:

- **Aumento dei costi** classificabile in:
 - Servizi primari: linee di alimentazione (x 3), aria, acqua (x 2);
 - Costo delle macchine: trasformatori (x 1,5), altre macchine utensili;
 - Consumo degli elettrodi (x 5-10);



- Necessità di **preparazione della superficie**;
- **Decadimento delle proprietà meccaniche**;
- **Difficoltà** o impossibilità di **saldatura** in punti ad **accesso ridotto**.

Queste limitazioni nella maggior parte dei casi non sono bilanciate dalla vastissima esperienza maturata, e l'applicazione della RSW alle leghe leggere è piuttosto sporadica.

3.2.3 - Saldatura ad arco in atmosfera protetta (*MIG - TIG welding*)

Le saldature ad arco in atmosfera protetta MIG (*Metal Inert Gas*) e TIG (*Tungsten Inert Gas*) sono considerate metodi affidabili per la giunzione di leghe di alluminio. Entrambe risolvono il problema della formazione dell'ossido di alluminio durante il processo di saldatura:

- Nel sistema **MIG** con l'adozione di un flusso controllato di un gas inerte che, investendo il sito di saldatura, riduce la presenza di ossigeno evitando l'ossidazione del metallo;
- Nel sistema **TIG** la rimozione dell'ossido è affidata all'elettrodo: invertendo la polarità, si inverte il conseguente flusso di elettroni, che normalmente andrebbe dall'elettrodo al punto di saldatura. Si adotta un'alimentazione a corrente alternata in modo da permettere il raffreddamento dell'elettrodo nei semicicli in cui il flusso degli elettroni è invertito.

Durante la saldatura un gas inerte (generalmente argon) protegge l'elettrodo, l'arco, il bagno e le zone del pezzo adiacenti ad esso da contaminazioni atmosferiche che comprometterebbero la qualità del giunto.

Saldatura MIG

La saldatura avviene per fusione sfruttando l'elevata temperatura prodotta da un arco elettrico che scocca tra un elettrodo fusibile (filo) e il pezzo da saldare. Il filo elettrodo rappresenta il materiale d'apporto. Generalmente il suo avanzamento avviene con un meccanismo di spinta, ma nel caso delle leghe di alluminio i rischi di



un cedimento del filo sono elevati, pertanto è prevista una apparecchiatura, situata nella torcia, che tira il filo (che può essere contemporaneamente spinto).

Durante la saldatura il filo elettrodo, il bagno, l'arco, le zone circostanti il materiale, sono protetti dalla contaminazione atmosferica tramite il gas inerte fluente dalla pistola.

Le velocità di avanzamento del filo sono nell'ordine dei 10-20m/min e sono controllate dalla variazione di corrente dell'arco; l'alimentazione è autonoma.

La versione del MIG più diffusa è quella semiautomatica anche se può essere completamente automatizzata.

E' ideale per applicazioni di carpenteria, per grandi strutture, serbatoi, carrozze ferroviarie, costruzioni nautiche.

Vantaggi:

- Elevata produttività dovuta alla continua alimentazione del materiale d'apporto;
- Elevata densità di corrente (100-250A/mm²) che consente elevata velocità di deposito.

Svantaggi:

- Apparecchiatura complessa, costosa, difficilmente trasportabile, ingombrante;
- Difficoltà a saldare giunti in posizioni particolari.

Saldatura TIG

È un processo di saldatura per fusione che sfrutta l'elevata temperatura prodotta da un arco elettrico che scocca tra un elettrodo infusibile ed il pezzo da saldare. Gli elettrodi sono a base di tungsteno.

La saldatura viene eseguita fondendo i lembi accostati del pezzo, in un tempo molto breve (3-5 s). Per spessori ridotti non è previsto l'uso di materiale d'apporto. Per spessori elevati esso è invece utilizzato sotto forma di bacchette immerse nel bagno di fusione a intervalli regolari, fondendo ogni volta per un tratto di alcuni millimetri. Esso viene aggiunto lateralmente in modo manuale o automatico.



Questo comporta una complicazione del processo, con la necessità di operatori altamente qualificati o di macchine programmate in modo estremamente preciso.

Il **controllo** della saldatura può essere:

- **manuale**: la lunghezza d'arco e l'elettrodo sono controllati dall'operatore;
- **semiautomatico**: la lunghezza d'arco ed elettrodo sono controllati dalla macchina mentre l'operatore sposta l'elettrodo lungo la saldatura;
- **automatico**: tutte le operazioni sono effettuate dalla macchina.

Vantaggi:

- Rapidità di esecuzione;
- Adattabilità a qualsiasi posizione di lavoro;
- Facilità di controllo dell'arco con conseguente regolarità del deposito;
- Regolazione di intensità di corrente entro ampi limiti;
- Sorgente termica potente e concentrata. Questo rende possibili saldature di spessori molto ridotti (fino a 0.5 mm) con discrete velocità di saldatura.

Confronto e caratteristiche comuni

Il MIG è più semplice, più pratico, più veloce del TIG; viene usato quando la produttività e la semplicità operativa sono importanti.

Vantaggi comuni:

- Qualità e integrità delle giunzioni, con appropriata progettazione del giunto e calibrazione dei parametri di saldatura;
- Notevole esperienza industriale;
- Possibilità di automazione;
- Possibilità di accesso unilaterale; in particolare la saldatura MIG, accoppiata con una robotizzazione del processo, è adatta alla giunzione di nodi con complesse geometrie come quelli delle strutture Space Frame.

**Svantaggi comuni:**

- **Suscettibilità alla frattura** della saldatura, con tendenza allo sviluppo di cricche. La serie 6000, che viene spesso usata nella costruzione dei profilati estrusi degli Space Frame, è particolarmente suscettibile al fenomeno. Possono essere utilizzati dei fili di *filler* ricchi di silicio, come la serie 4000, che ha però minore resistenza. In realtà, come regola generale, la saldatura dovrebbe essere più solida del metallo a cui è applicata.

- Necessità di **preparazione superficiale**, con rimozione di eventuali oli e lubrificanti oltre allo strato di ossido.

E' possibile eseguire la saldatura anche senza la preparazione superficiale, ma si va incontro ad una sensibile diminuzione della qualità, dovuta alla maggiore porosità e alla mancanza di controllo del livello di penetrazione nelle lamiere sottili, della distorsione prodotta e quindi delle tolleranze dimensionali.

- **Distorsione termica**

La distorsione indotta dal calore sviluppato può compromettere le tolleranze dimensionali del pezzo. Questo problema è stato uno dei principali fattori che hanno escluso la saldatura ad arco nella costruzione del telaio della Lotus Elise.

Una soluzione possibile sarebbe l'aumento dello spessore dei pezzi in prossimità dei punti di saldatura con l'applicazione di spessori aggiuntivi, ma ciò comporterebbe ulteriore complessità di montaggio ed un aumento del peso della struttura non necessario a fini strutturali.

- **Trattamenti termici post-saldatura**

Con le leghe da bonifica come quelle della serie 6000 nella zona termicamente alterata le proprietà meccaniche subiscono un notevole degrado che è possibile in parte recuperare attraverso un successivo processo di invecchiamento, che comporta però costi aggiuntivi.

Inoltre mediante un'opportuna progettazione possono essere sfruttati gli stati tensionali indotti dalla saldatura, per esempio per la programmazione di modi di frattura predeterminati.

- **Aspetti ambientali**

- Produzione di fumi di allumina, ozono e polvere di alluminio;



- Elevate richieste energetiche.

Il sistema di saldatura ad arco in atmosfera controllata viene già adottato frequentemente dall'industria automobilistica, come nel caso dell'Audi con la produzione dei telai ASF in lega di alluminio dei modelli A8 e A2.

Ricerche e sviluppi futuri:

- Affidabilità del processo;
- Rendimento e prestazioni del materiale d'apporto e degli alimentatori;
- Razionalizzazione degli algoritmi di controllo.

3.2.4 - Saldatura laser (*Laser welding*)

E' un procedimento sempre più utilizzato per i suoi notevoli vantaggi:

- Minore richiesta di energia;
- Distorsione ridotta;
- Adattabilità all'automazione;
- Possibilità di accesso unilaterale;
- Eliminazione della necessità di preparazione delle superfici;
- Flessibilità;
- Possibilità di monitoraggio in tempo reale della qualità della saldatura mediante l'analisi delle emissioni ultraviolette ed infrarosse emesse dalla weld-pool (bagno di saldatura), con controllo dei parametri di potenza e collimazione del laser, e conseguente incremento della qualità nella produzione.
- Elevate velocità di saldatura;
- Minore erosione del materiale rispetto alla saldatura ad arco;
- Minore necessità di materiale d'apporto;
- Resistenza delle saldature.

Vi è un crescente interesse nello sfruttamento di questa tecnologia, nelle due tipologie CO₂ e Nd:YAG, nelle costruzioni automobilistiche in lega di alluminio.



In particolare le aree in cui questa tecnologia potrebbe trovare maggiore applicazione sono:

- Saldatura di lamiera, in alternativa alla saldatura a punti, alle giunzioni adesive e meccaniche;
- Saldature di strutture Space Frame tra **componenti estrusi e pressofusi**, in alternativa alle saldature ad arco.

Svantaggi:

- **Costi molto elevati**
 - Investimento di capitali;
 - Materiali di consumo - gas di schermaggio, lenti di protezione per i laser Nd:YAG e lenti per quelli CO₂;
 - Necessità di rigorose misure di sicurezza e di formazione del personale, sia per l'utilizzo che per la manutenzione.
- **Limitate profondità di penetrazione**

A seconda della potenza di lavoro, sono possibili 2-6 mm per la saldatura Nd:YAG e 6 mm per la CO₂.
- **Tolleranze dimensionali ridotte**

L'estrema focalizzazione del laser su una zona ristretta non ammette tolleranze maggiori del 10% dello spessore del materiale tra i due pezzi da saldare.
- **Problemi specifici per la saldature di leghe di alluminio**
 - Possibilità di sensibilizzazione alla frattura dell'alluminio nelle zone trattate, come per la saldatura ad arco.
 - Elevata riflessività della superficie;
 - Elevata conducibilità elettrica e termica;
 - Volatilizzazione dei costituenti con punto di ebollizione più basso.

Nel loro insieme tutti questi fenomeni portano ad un accentuato degrado delle proprietà meccaniche nella zona termicamente alterata (vedi Tabella 3.2.2).



Tabella 3.2.2 - Caratteristiche di giunti in lega di alluminio saldati con saldatura laser

| GIUNTO | | | SALDATURA | | | PROPRIETA' | | |
|------------|---------------|-------------------|-----------------|--------------|------------------|------------------------------|-----------|---------|
| Leghe | Spessore [mm] | Tipo di giunto | Tipo di Laser | Potenza [kW] | Velocità [m/min] | Resist. [N/mm ²] | Perdita % | Δ50 [%] |
| 6060-6060 | 2 – 2 | Giunto di testa | CO ₂ | 4.8 | 5 | 141 | 44 | 3.0 |
| 6060-6060 | 2 – 2 | Giunto di testa | Nd:YAG | 2.0 | 1 | 157 | 37 | 5.5 |
| 6060-getto | 2 – 2.5 | Giunto a sovrapp. | CO ₂ | 4.0 | 2.5 | 107 | 39 | <2 |

fonte:[3.6]

Recenti ricerche (GSI Lumonics) sono riuscite ad ottenere con leghe delle serie 5000 e 6000 buoni risultati in questo senso con una diminuzione delle caratteristiche originali contenuta al 10-15%, nell'ipotesi di leghe da bonifica invecchiate successivamente alla saldatura, cosa non sempre auspicabile dal punto di vista produttivo.

In generale l'industria tende ad estendere l'impiego del laser nell'assemblaggio dei telai, ed è quindi auspicabile il suo utilizzo nella costruzione degli Space Frame.

Ricerche e sviluppi futuri:

- Tolleranze nelle variabili di produzione;
- Valutazione delle prestazioni in servizio.



3.2.5 - Saldatura ad impulso magnetico (*MPW, Magnetic pulse welding*)

Nonostante esista già da 60 anni, questa tecnologia è stata recentemente oggetto di nuove sperimentazioni, ad opera della Pulsar e del gruppo Dana, tese ad una sua applicazione ad elementi strutturali veicolistici.

La lavorazione si articola nelle seguente **fasi**:

- Due elementi tubolari di diametro differente vengono sovrapposti alle estremità.
- Una bobina elettromagnetica è posta all'esterno in corrispondenza della sovrapposizione.
- Mediante un brevissimo impulso elettrico attraverso la bobina (fino a 2 milioni di Ampere in meno di 100 ms) si genera una intensa forza di repulsione tra la bobina stessa e il tubo esterno che spinge quest'ultimo contro il tubo interno con un'energia cinetica tale da provocare nell'impatto una pressione sufficiente a generare la saldatura tra i due pezzi (vedi Figura 3.2.1).

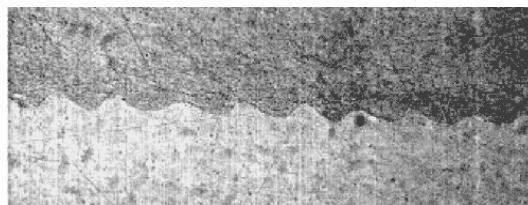


Fig. 3.2.1 - Sezione di saldatura ad impulso magnetico

Il vantaggio maggiore risiede nella possibilità di saldare tra loro **materiali differenti**.

Svantaggi:

- Sono richieste **alte pressioni**;
- Ridotta durata degli attuatori;
- Il tubo esterno (soggetto al movimento) deve essere un buon conduttore elettrico, il che esclude gli acciai.



I progressi tecnologici hanno fondamentalmente riguardato la possibilità di saldare elementi tubolari con elevati diametri massimi (elevando i limiti precedenti, nell'ordine dei 25 mm) ed elementi con geometrie non assialsimmetriche, mediante l'adozione di adeguate bobine.

Il gruppo Dana prevede un'applicazione specifica di questa tecnologia ai telai Space Frame, attraverso la possibilità di operare giunzioni tra **profilati estrusi** in lega di **alluminio** e **nodi in acciaio**, sfruttando in tal modo le proprietà di entrambi i materiali e ottenendo ulteriori riduzioni di peso.

3.2.6 - Friction stir welding

Si tratta di una tecnologia recentemente introdotta e brevettata dal TWI (The Welding Institute) in grado di operare la saldatura tra lamiere o componenti estrusi in lega di alluminio mediante **giunzioni di testa rettilinee**.

La lavorazione prevede l'inserimento di un utensile rotante all'interfaccia dei due pezzi da saldare. Ad esso è impresso un moto rettilineo lungo la linea di giunzione e rotativo intorno al proprio asse (vedi Figura 3.2.2).

In questo modo si genera un flusso plastico di materiale intorno all'utensile che produce una saldatura allo stato solido con un basso livello di distorsione.

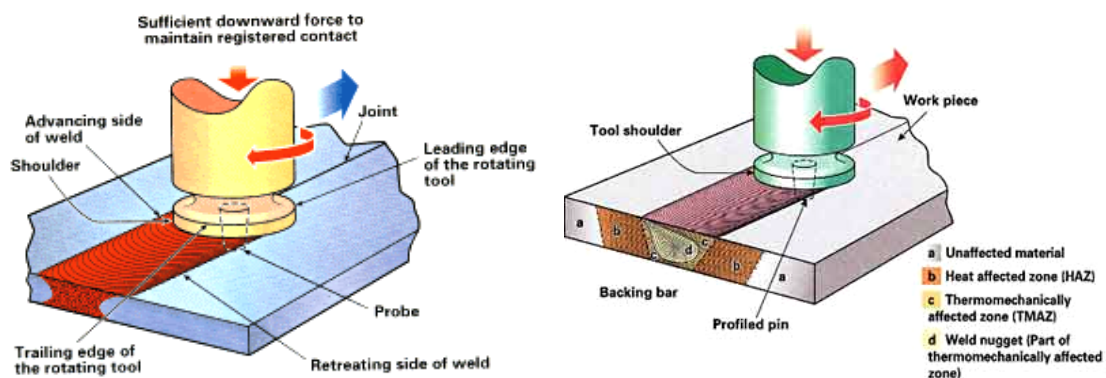
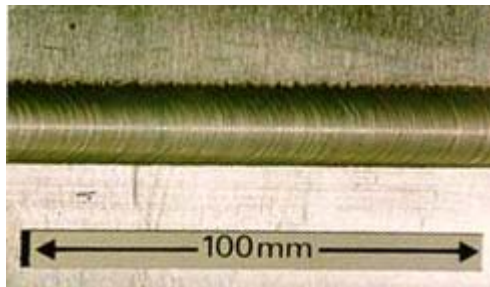


Fig. 3.2.2 - Schema di giunzione mediante Friction Stir Welding (fonte: The Welding Institute, 2000)

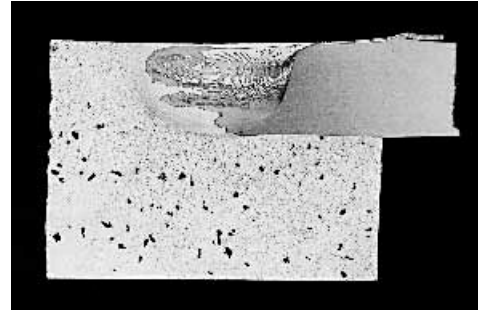
L'azione dell'utensile rompe e asporta lo strato di ossido disperdendolo nella saldatura stessa. Dopo la lavorazione, questa si presenta di buona fattura, e la



microstruttura del materiale attorno ad essa presenta una grana fine senza particolari difetti (vedi Figura 3.2.3).



I



II

Fig. 3.2.3 - I. Aspetto del cordone di saldatura; II. Sezione di saldatura tra componenti in lega da getto e in lega da lavorazione plastica (spessore di 6 mm) (fonte: The Welding Institute, 2000)

Vantaggi:

- Aspetto del cordone di saldatura;
- Basso numero di difetti (dieci volte minore rispetto alla resistenza a punti);
- Buona resistenza a fatica;
- Ridotta richiesta di energia;
- Assenza di schermatura con gas e di particolari preparazioni delle superfici;
- Qualità dipendente da parametri facilmente controllabili (stato e profilo del pezzo e sua movimentazione);
- Lavorazione ripetibile e facilmente monitorabile;
- Possibilità di saldare spessori fino a 12 mm;
- Possibilità di saldare **leghe differenti** (per esempio delle serie 5000 e 6000);
- Possibilità di saldare profilati estrusi e componenti stampati con parti pressofuse;
- Possibilità di utilizzo di **normali fresatrici adattate**.

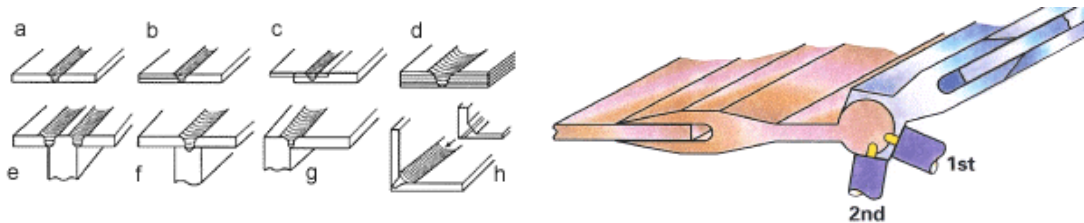
Svantaggi:

- **Ridotta velocità** del processo (vedi Tabella 3.2.3);
- Limitazione a **linee di giunzione rettilinee**;



- Necessità di **bloccaggio rigido** dei pezzi per evitare rotture del cordone (in caso di completa penetrazione), a causa delle elevate pressioni coinvolte;
- **Tolleranze elevate**, pari a circa il 10% dello spessore;
- Problemi nelle zone di inizio e fine giunzione, con rilascio di fori che devono essere eventualmente riempiti;
- **Limitata flessibilità** rispetto alla saldatura ad arco e alla saldatura laser;
- Necessità di ulteriori sperimentazioni per la praticabilità a livello produttivo.

Mediante un'eventuale **robotizzazione** del processo sarebbe possibile estendere la lavorazioni a geometrie tridimensionali più complesse.



I - Configurazioni possibili

II - Giunto a posizione variabile

| | | | |
|---|-----------------------|---|-----------------------------|
| a | Square butt | e | 3 piece T butt |
| b | Combined butt and lap | f | 2 piece T butt |
| c | Single lap | g | Edge butt |
| d | Multiple lap | h | Possible corner fillet weld |

Fig. 3.2.4 - Tipologie di giunti ottenibili con la saldatura FSW (fonte: The Welding Institute, 2000)

Prove sperimentali sono state condotte su lamiere in lega 6082 e i risultati relativi alle velocità di esecuzione sono riportati nella Tabella 3.2.3.

Tabella 3.2.3 - Velocità del processo di FSW per lamiere in lega 6082

| Spessore (mm) | Velocità (m/min) |
|---------------|------------------|
| 1.6 | 0.6 |
| 3.2 | 0.3 |

fonte: The Welding Institute, 2000



3.2.7 - Giunzioni meccaniche: rivettatura e graffatura (*clinching*)

Le giunzioni meccaniche hanno recentemente riguadagnato interesse nel settore strutturale automobilistico con l'impiego delle leghe di alluminio e con lo sviluppo di nuove procedure di accoppiamento.

Le tecniche principali sono la rivettatura mediante **rivetti autoperforanti** e la **graffatura** mediante *press-joints*.

Rivetti autoperforanti (*self-piercing rivets*)

All'interno di una pressa, un rivetto tubolare viene spinto da un punzone attraverso le lamiere da accoppiare contro uno stampo che lo fa espandere nella lamiera inferiore generalmente senza che essa sia perforata.

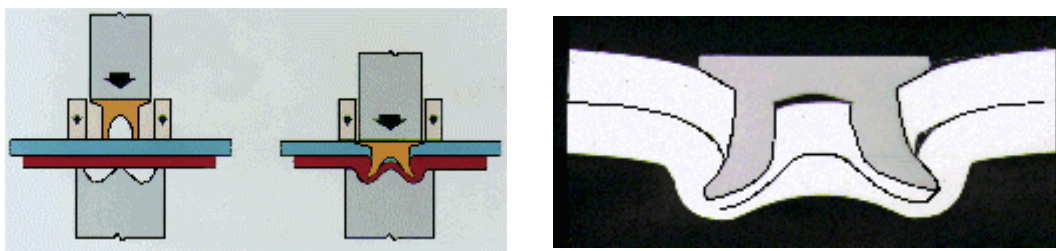


Fig. 3.2.5 - Schema di giunzione mediante rivetti autoperforanti

L'operazione coinvolge forze consistenti (circa 40 kN), per cui è necessaria una struttura a C (*C-Frame*) per contenere le reazioni della rivettatrice. E' necessario poter accedere ad entrambe le facce del giunto.

Utilizzati in congiunzione con gli adesivi strutturali innalzano la resistenza al peel della giunzione.

Graffatura mediante *press joints* (*clinching*)

L'operazione avviene in modo simile, ma senza rivetti: il punzone deforma le lamiere in uno stampo progettato affinché sia permesso il bloccaggio delle stesse nel "bottone" che si genera. Sono preferibili ai rivetti autoperforanti nel fissaggio di



pannelli, in cui la giunzione mediante rivetti produrrebbe delle fessure in cui l'umidità potrebbe innescare la corrosione interstiziale.

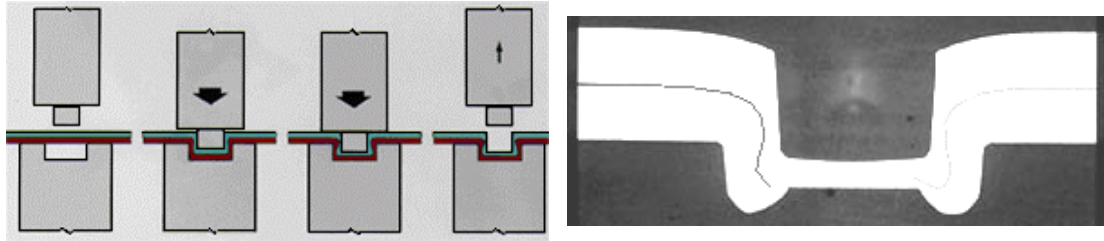


Fig. 3.2.6 - Schema di giunzione mediante graffatura (clinching)

Vantaggi:

- Non richiedono particolari trattamenti superficiali;
- **Lieve** o trascurabile **distorsione** del pezzo;
- Immediato **controllo visivo della qualità** della giunzione ed estese possibilità di prove non distruttive;
- Possibilità di unione tra **materiali differenti**;
- **Elevata velocità** del processo:
E' pari a un secondo circa per operazione, comparabile con quella della saldatura. Inoltre, al contrario di quanto avviene per quest'ultima, il tempo di processo non aumenta con l'aumentare dello spessore dei pezzi da saldare;
- Possibilità di **automatizzazione**:
Il macchinario può essere montato su bracci robot ed integrato in linee di produzione ad alta capacità. Inoltre non sono necessari la preforatura né l'allineamento dei pezzi rispetto alla direzione d'impatto;
- **Investimenti** di capitale **relativamente ridotti**;
- Basso assorbimento di energia;
- Bassi costi di gestione e manutenzione:
Sono dovuti principalmente alla elevata durata degli utensili: 200000 operazioni per la rivettatura ed il clinching contro le 200-500 operazioni per saldatura a punti dell'alluminio;
- **Elevato livello di sicurezza** per assenza di fumi, emissioni e alte tensioni.

**Svantaggi:**

- Necessità di accesso ad entrambe le facce del giunto;
- Accesso alle zone meno raggiungibili impedito dalle dimensioni della pistola rivettatrice;
- Aspetto esteriore del giunto condizionato dalle rientranze e sporgenze sulla superficie.

Inoltre nel caso di **rivettatura** si hanno gli ulteriori **svantaggi**:

- Possibilità di corrosione galvanica tra pezzi di metalli differenti e tra rivetto e lamiera, risolvibili tuttavia mediante rivestimenti anticorrosione;
- Sensibilità delle fessure alla corrosione interstiziale;
- Incremento di peso dovuto al materiale dei rivetti.

È possibile adottare anche rivetti ciechi (*blind rivets*), in quelle zone dove non è possibile accedere ad entrambi i lati del giunto, ma in questo caso vi è la necessità di preforatura ed allineamento dei pezzi, con la conseguente riduzione dei margini di tolleranza.

Un'alternativa è l'adozione degli *Ejots*, rivetti autoperforanti o autofilettanti: questi ultimi sono preferibili perché evitano la formazione di trucioli e residui metallici che potrebbero causare danni alle attrezzature.

Entrambi tuttavia introducono sollecitazioni residue nella struttura: un eventuale accoppiamento con adesivi strutturali migliora la resistenza a fatica, poiché questi distribuiscono le tensioni più uniformemente intorno alla foratura.

Tabella 3.2.4 - Resistenza meccanica delle diverse giunzioni meccaniche

| Tipo di giunzione | Carico medio di rottura al peel (KN) | Carico medio di rottura a taglio (KN) |
|-----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Saldatura a punti | 1.1 | 5.0 |
| Rivetti autoperforanti in acciaio | 1.5 | 5.2 |
| Press joints | 0.6 | 1.8 |

fonte: The Welding Institute, 1999.



Dalla Tabella 3.2.4 si può osservare come le prestazioni dei rivetti autoperforanti siano risultate superiori a quelle della tradizionale saldatura a punti, anche se tali risultati dipendono in larga parte dal materiale utilizzato per i rivetti stessi.

I *press joints* presentano resistenze inferiori, compensate però dal migliore **comportamento a fatica**, dovuto alla distribuzione più omogenea e graduale degli sforzi attorno alla giuntura (studio della Volvo Cars).

Ulteriori prove sono state eseguite nell'accoppiamento di **materiali differenti**: alluminio/acciaio e tra pannelli sandwich alluminio/plastica.

Ricerche e sviluppi futuri

L'industria automobilistica dimostra verso queste tecniche un discreto interesse, principalmente per la loro versatilità di utilizzo, l'affidabilità ed i costi complessivi contenuti.

Audi, Alcoa e Lotus hanno già utilizzato la rivettatura nella giunzione di strutture Space Frame in alluminio preferendola alla saldatura a punti, mentre non esistono molte fonti disponibili riguardo l'applicazione automobilistica dei rivetti ciechi.

Per consentire un'estesa applicazione nella produzione automatizzata, oltre alla elevata affidabilità del processo e alla semplicità di ispezione visiva, si è reso necessario lo sviluppo da parte dei produttori di rivetti di complessi sistemi di **monitoraggio** con diverse funzioni:

- Controllo contemporaneo di un massimo di 5 rivettatrici;
- Rilevazione di errori di rivettatura e di rivetti fuori tolleranza;
- Controllo dello stato di usura degli utensili e degli stampi;
- Controllo dello stato di fatica del *C-Frame*.

Nell'applicazione di queste tecniche alla produzione di serie devono essere infine approfondite alcune questioni legate alle **prestazioni in esercizio**, in particolare riguardo al **comportamento a fatica**, a **corrosione** e a **crash** e alla messa a punto di **prove e provini** da correlare al comportamento reale.

Per quanto riguarda la **corrosione**, si stanno sviluppando speciali rivestimenti per i rivetti in grado di eliminare la corrosione galvanica.



3.2.8 - Giunzioni adesive

Di crescente interesse è l'uso di adesivi a scopi strutturali.

Gli **adesivi** si definiscono “**strutturali**” quando la loro resistenza al taglio (per giunti a sovrapposizione) è maggiore di 70 N/mm^2 .

Vantaggi (rispetto alla saldatura):

- **Maggiore precisione per l'assenza di distorsione** del materiale con possibilità di utilizzare spessori più sottili;
- Carichi distribuiti su **aree maggiori**;
- **Resistenza a fatica**;
- Capacità di **assorbimento di urti**;
- Assenza di deperimento delle caratteristiche meccaniche proprie della zona termicamente alterata nella saldatura;
- Riduzione della corrosione galvanica;
- Assenza di alterazione degli eventuali rivestimenti protettivi anticorrosione;
- Possibilità di utilizzare **leghe da bonifica** ad elevata resistenza.
- Capacità di **sigillatura**;
- Possibilità di accoppiare **materiali differenti**, con ampia libertà di scelta ed ottimizzazione in sede progettuale;
- Aumento dello **smorzamento** di rumore e vibrazioni con conseguente riduzione della fatica e del rischio di frattura;
- Elevati valori di **resistenza al taglio** (200-280 MPa).

Svantaggi:

- Necessità di **preparazione delle superfici**;
- **Giunzioni non smontabili**;
- Sensibilità a **temperature elevate** con perdita della resistenza meccanica (normalmente già a 150°C);



- **Bassa resistenza al *peeling* e al *clivaggio*** (soluzione: uso congiunto a rivettatura o saldatura a punti);
- **Collasso per impatti ad elevate velocità**
Questi possono talvolta essere ridotti combinando l'essiccamento con altre fasi della produzione, come l'essiccamento della verniciatura;
- **Ridotta esperienza;**
- Necessità di **sistemi di fissaggio** durante l'incollaggio e l'essiccamento;
- **Tempi** di essiccamento rilevanti;
- Necessità di rigorosi controlli di processo per ottenere giunti di qualità;
- **Incerta affidabilità** delle prestazioni con variazioni nel tempo e rispetto alla temperatura e all'umidità;
- Necessità di adeguato immagazzinaggio degli adesivi e loro eventuale scadenza.

Tabella 3.2.5 - Principali caratteristiche di applicazione di adesivi strutturali

| Tipo Adesivo | Working Time | Set Up Time | Full Curing Time | Temperatura max di esercizio [°C] |
|--------------|--------------|-------------|------------------|-----------------------------------|
| Acrilici | 45' | 1h30'-2h | 8h* | 80 |
| Epossidici | 30'-2h | 1h-6h | 24h** | 180 |
| Uretani | 45' | 6h | 24h** | 150 |

* Non riducibile mediante trattamento in forno

** Riducibile ad 1 h con temperature di 120-140°C

L'essiccamento avviene a temperature superiori a 100°C, e in caso di riparazione comporta difficoltà logistiche (disponibilità di forni adatti) e pratiche (bassa resistenza alla temperatura degli allestimenti interni).

Devono essere adottate particolari tecniche di rimozione dell'adesivo, di preparazione della superficie e dell'incollaggio, specifiche per ogni tipo di adesivo adottato.



Tabella 3.2.6 - Principali caratteristiche e applicazioni degli adesivi strutturali

| Tipo adesivo | Tossicità | Costo degli investimenti | Costo dei materiali | Complessità del processo | Temperat. del processo | Resistenza a solventi | Resistenza al calore | Durabilità | Note |
|---------------------------------------|-----------|--------------------------|---------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|------------|---|
| Epoxide | 1-3 | 1-2 | 2 | 2 | E | 3 | 2-3 | 3 | Usati generalmente con grandi strutture |
| Toughened acrylic | 1-2 | 1 | 2-3 | 1-2 | C | 2-3 | 2-3 | 2-3 | Ottime prestazioni generali |
| Toughened epoxide (heat cured) | 1 | 1 | 2-3 | 1 | H | 3 | 3 | 3 | Eccellenti adesivi strutturali |
| Polyurethane | 2 | 1-2 | 1-2 | 1-2 | E | 2-3 | 2-3 | 2 | Buone prestazioni generali, ma necessità di pretratt. superfic. con i metalli |

1 = basso, 2 = medio, 3 = alto, C = a freddo, H = a caldo, E = sia a caldo che a freddo

fonte: Permabond UK

Tabella 3.2.7 - Confronto tra proprietà meccaniche di diversi metodi di giunzione

| | Spotweld | Rivet | ASV Epoxy Adhesive | Typ. Structural Epoxy Adhesive |
|--|-----------------|----------------------|--------------------|--------------------------------|
| Fatigue (10⁷ cycles) | Low (2 N/mm) | Moderate (6 N/mm) | High (24 N/mm) | High |
| Impact | High | High | High | Moderate |
| Creep | High | High | High | Moderate |
| Durability (Under load) | High | High | High | Moderate |
| Stiffness (Tensile) | Low (80 MPa) | Low | High (1200 MPa) | High |

fonte: Alcan International Ltd

L'impiego di adesivi strutturali può consentire anche **nuovi schemi progettuali** e produttivi: si possono ottenere riduzione dei costi mediante l'adozione di materiali più economici e la semplificazione delle fasi di produzione. Possono essere adottati nuove tecniche nella fabbricazione dei sotto-componenti, come la combinazione tra laminati, estrusi e pressofusi.



Gli adesivi possono essere applicati in modo più flessibile all'interno del processo di produzione mediante l'ottimizzazione e la pianificazione delle varie fasi. In questo modo si possono eliminare le operazioni superflue e i “colli di bottiglia” all'interno del flusso di produzione.

Ricerche e sviluppi futuri

Per una maggiore diffusione degli adesivi strutturali nelle applicazioni automobilistiche devono essere ancora approfonditi diversi fattori:

- Metodi di **testing** industrializzabili per l'identificazione di problemi di peel e/o di taglio attuabili in **tempo reale** (15-20 secondi per ispezione);
- Metodi di **controllo non distruttivo**;
- Ricerche sulla **preparazione superficiale**;
- Valutazione della **durabilità** delle giunzioni;
- Valutazione dell'**impatto ambientale**.

3.2.9 - Giunzioni miste

Giunzioni adesive - meccaniche

Le tecniche viste finora possono essere in qualche caso applicate congiuntamente. In particolare di notevole interesse appaiono le giunzioni miste adesive-meccaniche.

In questo caso l'aggiunta dei fissaggi meccanici alla giunzione adesiva permette di mantenere i vantaggi di quest'ultima ovviando ad alcuni problemi:

- Maggiore resistenza al peeling;
- Sigillatura del giunto;
- Eliminazione delle morse e delle staffe nella fase di assemblaggio.

Giunzioni adesive - saldature

L'utilizzo congiunto di saldatura e adesivi, diminuisce il fatigue cracking ed aumenta la resistenza al peeling e al clivaggio.



3.2.10 - Confronto

Pur senza essere entrati nei dettagli delle singole tecnologie, già dalle loro principali caratteristiche può essere tracciato uno schema che indichi le applicazioni più adatte nell'ambito dei telai Space Frame in lega di alluminio.

Nella Tabella 3.2.8 sono riassunte le caratteristiche principali per i metodi di giunzione più adatti alla costruzione di strutture automobilistiche.

Tabella 3.2.8 - Caratteristiche dei principali metodi di giunzione per strutture automobilistiche

| GIUNZIONE | VANTAGGI | SVANTAGGI | APPLICAZIONI |
|--|---|--|--|
| RSW Saldatura a punti | <ul style="list-style-type: none"> - Esperienza; - Automazione; - Costi ridotti; - Uso con adesivi. | <ul style="list-style-type: none"> - Preparaz. superfici; - Comportam. a fatica; - Controllo della qualità; - Consumo elettrodi. | <ul style="list-style-type: none"> - Uso con adesivi. |
| Saldatura MIG-TIG | <ul style="list-style-type: none"> - Resist. fino all'80-90% di quella del materiale; - Esperienza; - Automatizzabile; - Tracciati 3D. | <ul style="list-style-type: none"> - Comportam. a fatica dip. dalla geometria; - Rigorosi controlli; - Saldabilità getti; - Deformazione HAZ. | <ul style="list-style-type: none"> - Esteso utilizzo per componenti strutturali in lega leggera. |
| Saldatura Laser | <ul style="list-style-type: none"> - Qualità saldature; - Resistenza; - Elevata velocità; - Automatizzabile; - Bassa distorsione. | <ul style="list-style-type: none"> - Costi elevati; - Tolleranze dimensionali pezzi ridotte; - Problemi con leghe di alluminio. | <ul style="list-style-type: none"> - Produzione di Welded tailored blanks; - Giunti a sovrapposizione; - Nodi di connessione estrusi-pessofusi a geometria complessa. |
| FSW Friction stir welding | <ul style="list-style-type: none"> - Qualità saldature; - Comportam. a fatica; - Leghe differenti; - Costi ridotti; - Ripetibilità. | <ul style="list-style-type: none"> - Giunzioni rettilinee; - Precisione dimensionale; - Problemi nelle zone di inversione del moto; - Ridotta velocità del processo. | <ul style="list-style-type: none"> - Giunzioni tra profilati rettilinei in lega leggera. |
| Rivetti autoperforanti | <ul style="list-style-type: none"> - Comportam. a fatica; - Esperienza; - Automatizzabile; - No preparaz. superfici; - Materiali differenti. | <ul style="list-style-type: none"> - Consumo di materiali; - Rigidezza; - Aumento spessore giunto. | <ul style="list-style-type: none"> - Sostituzione della saldatura a punti; - Parti con elevate sollecitazioni. |
| Press joints | <ul style="list-style-type: none"> - Resist. simile alla RSW; - Costi ridotti; - No preparaz. superfici; - Materiali diversi; - Fissaggio per parti incollate. | <ul style="list-style-type: none"> - Bassa resistenza; - Basso assorbim. di energia; - Scarsa tenuta all'acqua; - Operazioni di allineam. nell'assemblaggio. | <ul style="list-style-type: none"> - Uso con adesivi; - Aree con carichi ridotti. |
| Giunzioni adesive | <ul style="list-style-type: none"> - Mantenim. proprietà materiali; - Rigidezza; - Resist. a corrosione; - Materiali differenti; - Sigillatura. | <ul style="list-style-type: none"> - Durata; - Preparaz. superfici; - Fabbricazione ed assemblaggio; - Controllo della qualità. | <ul style="list-style-type: none"> - Giunzioni tra profilati con sup. di contatto estese e regolari. |



BIBLIOGRAFIA CAPITOLO 3

- [3.1] S.W.Hadley, S.Das, J.W.Miller, "*Aluminum R&D for Automotive Uses and the Department of Energy's Role*", Oak Ridge National Laboratory for the U.S. Department of Energy, Tennessee, USA, March 2000.
- [3.2] W.A.Lees (Permabond UK), "*Structural assembly of sheet metal using adhesives*", The Welding Institute, Cambridge, UK, 2001.
- [3.3] B.Pekkari, "Trends in joining, cutting and a sustainable world", Richard Weck Lecture, Institute of Materials, London, UK, 8 November, 2000.
- [3.4] G.S.Daehn, "*Lightweight Materials and Structures*", Department of Materials Science & Eng., The Ohio State University, USA, 2000.
- [3.5] H.J.Powell, K.Wiemer, "*Joining technology for high volume manufacturing of lightweight vehicles*", The Welding Institute, Cambridge, UK, 1999.
- [3.6] L.Carley, "*Will structural bonding replace welding?*", CarleysSoftware.com, 2000.
- [3.7] "*The Aluminum Extrusion Manual*", AEM, 1998.
- [3.8] R.Miner, "*UltraLight Steel Auto Body Stretches the the Limits of Hydroformed Tube Technology*", <http://autosteel.org/resources/hydro.zip>, 2000.
- [3.9] A.Kochan, "*Magnetic pulse welding show potential for automotive applications*", Assembly Automation, Vol.20, n.2, pp 129-131, MCB University Press, 2000.
- [3.10] A.Higgins, "*Automotive adhesives - from design to repair*", Machine Design, March 23, 2000.



CAPITOLO 4 : REQUISITI DI PROGETTAZIONE



4.1 - SCHEMATIZZAZIONE DEI REQUISITI

In questo Capitolo si intende indicare le problematiche principali che intervengono nella progettazione di strutture automobilistiche e le loro implicazioni e relazioni, al fine di individuare e definire, mediante anche un'opportuna schematizzazione, metodologie ed approcci progettuali finalizzati ai diversi obiettivi.

4.1.1 - Considerazioni generali

La progettazione del gruppo telaio-carrozzeria è una fase estremamente complessa nello sviluppo di un nuovo veicolo.

Essa è alla base del layout generale e deve **integrarsi** strettamente con lo sviluppo di tutti i componenti meccanici, elettrici, elettronici ed ausiliari e degli accessori addizionali.

Inoltre nella definizione della struttura concorrono una serie estremamente vasta di fattori tecnici, produttivi, ambientali ed economici.

Appare indispensabile quindi una schematizzazione che consenta un approccio metodico e sistematico.

Per semplicità vengono considerati solo i fattori esterni e non quelli relativi all'integrazione con gli altri componenti della vettura.

Fondamentalmente i **requisiti progettuali** possono suddividersi nelle seguenti categorie:

- **Requisiti prestazionali**

Sono costituiti da tutte le qualità “visibili” all'utente finale del veicolo;

- **Impatto ambientale**

Comprendono i fattori legati all'impatto ambiente e al ciclo di vita del veicolo;



- **Costi di Produzione**

Comprendono tutti i costi dei materiali, delle lavorazioni e dell'assemblaggio, sia per quanto riguarda gli investimenti iniziali per macchinari ed impianti, sia per le spese di gestione e manutenzione.

All'interno di questa suddivisione i singoli requisiti vengono classificati in base ad aree più vaste e vengono collegati ai relativi parametri di valutazione

Per ogni singolo requisito vi sono vincoli che condizionano ed orientano la progettazione.

Questi vincoli possono essere:

- **Vincoli progettuali**

Sono posti dal costruttore al team di sviluppo e possono consistere in soglie minime di accettabilità o valori-obiettivo con relativo intervallo di variazione consentito.

Riguardano praticamente tutti gli aspetti della progettazione.

- **Vincoli legislativi**

Sono costituiti dalle norme e leggi che governano l'omologazione delle vetture nei singoli Paesi. Devono essere necessariamente rispettati per la messa in produzione del veicolo nei vari mercati.

Riguardano principalmente:

- Vincoli dimensionali;
- Dotazioni minime di sicurezza;
- Superamento di prove di crash;
- Emissioni inquinanti del veicolo.

Il processo progettuale consiste fondamentalmente nel soddisfacimento dei vincoli legislativi e nel raggiungimento del miglior compromesso tra la valutazione tecnica



(relativa alle prestazioni) e quella economica, in base alle esigenze di mercato specifiche per il singolo prodotto.

Nei successivi Paragrafi vengono discussi i singoli requisiti, evidenziando aspetti e problematiche specifiche, loro relazioni e interdipendenze e possibili strategie risolutive.



4.2 - REQUISITI PRESTAZIONALI

La loro schematizzazione in base alle diverse aree è data nella Tabella 4.2.1.

Tabella 4.2.1 - Classificazione dei requisiti prestazionali

| AREA | REQUISITO | PARAMETRO DI VALUTAZIONE |
|---------------------------------|-------------------------|--|
| PRESTAZIONI IN ESERCIZIO | COMPORTAMENTO STATICO | - Analisi e verifica statica |
| | COMPORTAMENTO DINAMICO | - Rigidezza - Analisi e simulazione dinamica |
| | RIDUZIONE DELLE MASSE | - Massa complessiva |
| SICUREZZA | COMPORTAMENTO A CRASH | - Tipo di deformazione - Energia assorbita - Simulazioni numeriche - Crash test sperimentali. |
| DURABILITÀ | RESISTENZA A FATICA | - Tipo di giunzioni - Simulazioni numeriche - Prove di fatica |
| | RESISTENZA A CORROSIONE | - Tipo di materiali, rivestimenti e giunzioni |
| COMFORT | COMPORTAMENTO NVH | - Simulazioni dinamiche - Test sperimentali |
| | ACCESSIBILITÀ | - Tipo di fiancata - Ampiezza ed angolo di apertura sportelli |
| | ABITABILITÀ | - Parametri dimensionali abitacolo |
| | VISIBILITÀ | - Parametri geometrici abitacolo |
| MANUTENZIONE | RIPARABILITÀ | - Costi di riparazione - Comportamento a crash per basse velocità di impatto |



4.2.1 - Comportamento statico e dinamico

Il comportamento statico di una struttura automobilistica consiste nella sua capacità di sostenere i carichi statici, cioè è direttamente legato alla sua resistenza statica.

Il comportamento dinamico, invece, è influenzato in primo luogo dai valori di rigidezza torsionale della struttura.

Resistenza statica

Prima funzione del telaio è quella di sostenere tutti i carichi statici.

La struttura deve essere quindi prima di tutto verificata sotto tali condizioni. In realtà le esigenze di rigidezza, affidabilità, durata e resistenza a crash impongono dei limiti più restrittivi, per cui in generale la struttura risulterà **sovradimensionata** rispetto ai soli carichi statici.

In ogni caso è necessario compiere un'analisi preliminare mediante la **schematizzazione dei carichi** dovuti a:

- Massa propria;
- Pannelli esterni;
- Componenti meccanici (motore, trasmissione, sterzo, sospensioni);
- Componenti ausiliari;
- Masse non sospese;
- Abitacolo;
- Carico trasportabile (passeggeri e bagagli);
- Finiture interne ed esterne.

L'analisi fornisce la distribuzione e l'entità delle sollecitazioni e consente l'individuazione dei punti maggiormente sollecitati.

In generale tutte le sollecitazioni devono mantenersi inferiori al **limite elastico** del materiale, secondo **coefficienti di sicurezza** che dipendono anche dal tipo di materiale utilizzato.



Rigidezza torsionale

La rigidezza torsionale delle strutture automobilistiche è uno dei principali parametri di valutazione del **comportamento dinamico** delle stesse.

La deformazione torsionale del telaio genera rotazioni intorno all'asse longitudinale del veicolo (asse di rollio) che si aggiungono a quelle proprie delle sospensioni, **interferendo** con queste nel **controllo dell'assetto**.

Una superiore rigidezza del telaio migliora la tenuta di strada, poiché consente ai componenti delle sospensioni un maggior controllo sulla cinematica del veicolo: il telaio deve essere poco deformabile in modo che la rigidezza al rollio dipenda quasi esclusivamente dalle sospensioni.

I vantaggi conseguibili sono una maggiore **prevedibilità** del comportamento dinamico e una superiore **precisione** nel relativo **controllo**.

Inoltre una struttura troppo flessibile accumula l'**energia elastica di deformazione** e la rilascia successivamente, in modo non controllabile, sotto forma di **oscillazioni** del telaio che, riducendo il contatto dei pneumatici con la strada e diminuendo la precisione dello sterzo, compromettono la buona tenuta del veicolo e il comfort di marcia.

Diagramma 4.2.1 - Rigidezza torsionale e pesi di modelli di vari segmenti (2000-2001)



Nel Diagramma 4.2.1 sono riportate le rigidezze torsionali complessive di alcuni modelli di attuale produzione, suddivisi per segmento di appartenenza. Si nota come il **segmento H** (vetture sportive) sia caratterizzato da un **ampio intervallo** di valori di rigidezza torsionale, in quanto comprende vetture coperte e scoperte e con massa, classe, prestazioni e costi alquanto differenti tra loro.

Va inoltre considerato che i valori riportati provengono da **fonti differenti** e possono non risultare tra loro perfettamente omogenei rispetto al metodo di misurazione utilizzato.

Non esistono infatti procedure standard per la misurazione della rigidezza torsionale: i carichi ed i vincoli applicati alla struttura possono essere di tipo diverso e portare quindi a misurazioni tra loro non confrontabili.

Inoltre tutti i **componenti aggiuntivi**, ed in primo luogo il motore, i pannelli esterni e le vetture, fornendo collegamenti e vincoli addizionali ai membri strutturali, **irrigidiscono ulteriormente** il veicolo: i valori complessivi sono quindi sensibilmente superiori rispetto alle rigidezze della sola struttura (BIW, *body-in-white*).

La **progettazione per la rigidezza torsionale** consiste prevalentemente in una fase di **analisi numerica** con **ottimizzazione** della struttura riguardo a configurazione di base, sezioni utilizzate, elementi di rinforzo.

Generalmente vengono posti dei **valori-obiettivo di rigidezza** e si ottimizza la struttura per la minimizzazione della massa.



Riduzione delle masse

Uno degli obiettivi che guidano maggiormente lo sviluppo dei nuovi veicoli è la riduzione delle masse.

L'adozione sulle vetture attuali di un numero sempre maggiore di componenti, dai dispositivi di sicurezza attiva e passiva ai materiali fonoassorbenti, ai sistemi elettronici di comunicazione, controllo ed intrattenimento, ha fatto levitare considerevolmente il peso medio delle automobili negli ultimi venti anni, nonostante le ottimizzazioni rese possibili da calcoli sempre più sofisticati e l'adozione di leghe leggere per un sempre più elevato numero di componenti.

Questo aumento del peso complessivo comporta sensibili **svantaggi** in due direzioni:

- **Aumento del consumo energetico;**
- **Riduzione delle prestazioni** a parità di potenza del propulsore.

La riduzione della massa del veicolo contribuisce positivamente alla soluzione di entrambi i problemi (vedi Diagrammi 4.2.2 e 4.2.3).

Diagramma 4.2.2 - Relazione tra consumo e massa del veicolo

fonte: Alcan International Ltd



In generale le fonti (Bmw, EAA) indicano una riduzione di consumo del 5-10% per ogni riduzione del 10% della massa.

Diagramma 4.2.3 - Relazione tra accelerazione e massa del veicolo

fonte: The Aluminum Association, Inc. [6]

Una **riduzione di peso del 24%** (da 1530 kg a 1160 kg) comporta un **miglioramento dell'accelerazione del 18%** (da 10.0 a 8.2 s nell'accelerazione da 0 a 100 km/h).

Poiché l'insieme telaio-carrozzeria costituisce mediamente il 20-25% della massa totale del veicolo, esso ha un ruolo fondamentale nell'alleggerimento del veicolo nel suo complesso.

Per avere un'idea dei benefici potenzialmente ottenibili in termini di consumo energetico con l'alleggerimento dei veicoli, si può considerare che ipotizzando una riduzione di peso complessiva del 40% (ottenibile con l'utilizzo di materiali compositi ed estesi alleggerimenti secondari), si può arrivare al massimo ad una riduzione del consumo di carburante del 33%.

Per ottenere ulteriori riduzioni è necessario intervenire sull'efficienza del propulsore e sulla riduzione della resistenza aerodinamica e di rotolamento.



Alleggerimenti secondari

Alla **riduzione di peso primaria**, riguardante specificatamente **telaio e carrozzeria**, si aggiunge la possibilità di conseguire **alleggerimenti secondari**, ottenibili mediante il **ridimensionamento di propulsione**, trasmissione e sospensioni in funzione del peso minore.

Nella Tabella 4.2.2 è riportata la relazione tra la potenza necessaria e la massa della struttura, per vari tipologie costruttive, mentre nel Diagramma 4.2.4 è fornita la relazione tra potenza e massa del motore.

Tabella 4.2.2 - Relazione tra massa della struttura e potenza del motore

| Body Design | Mass of Body [kg] | Power of PT [kW] |
|----------------------|-------------------|------------------|
| Steel Unibody | 350.2 | 110.1 |
| Light Steel Unibody | 257.9 | 99.7 |
| Cost optimized CIV | 237.1 | 97.4 |
| CIV | 230.7 | 96.7 |
| Aluminum Unibody | 205.1 | 93.8 |
| Aluminum Space Frame | 182.4 | 91.2 |
| Carbon-CIV | 161.6 | 88.9 |

fonte: Materials Systems Laboratory, Massachusetts Institute of Technology [4.7]

Diagramma 4.2.4 - Relazione massa-potenza per motori a benzina

fonte: Materials Systems Laboratory, Massachusetts Institute of Technology [4.7]



Ne consegue, nel caso di **Space Frame in alluminio**, è possibile **risparmiare 20 kg** circa per il solo **propulsore**.

L'importanza degli alleggerimenti secondari è testimoniata anche da altre fonti secondo cui le riduzioni ottenibili con alleggerimenti primari e secondari sono più che doppie rispetto a quelle ottenibili con i soli alleggerimenti primari (il 7% contro il 3% per riduzioni di peso primarie del 10%).

4.2.2 - Sicurezza

Comportamento a crash

Caratteristica fondamentale di una struttura automobilistica è la sua capacità di **proteggere i passeggeri in caso in incidente**, cioè il suo **comportamento a crash**.

La crescente considerazione della sicurezza ha portato a norme di omologazione sempre più severe, e la progettazione per il comportamento a crash è principalmente finalizzata al superamento dei test necessari per l'omologazione delle vetture nei vari Paesi.

Le caratteristiche principali che descrivono il comportamento a crash della vettura sono:

- **Assorbimento di energia;**
- **Indeformabilità dell'abitacolo;**
- **Percorso e distribuzione dei carichi di crash;**
- **Minimizzazione dei danni per impatti a bassa velocità.**

Assorbimento di energia

I componenti della struttura più esposti all'impatto devono essere in grado di deformarsi assorbendo la massima energia possibile, in modo da minimizzare gli effetti sulla cella dell'abitacolo, trasferendo verso di essa carichi pressoché costanti e di entità quanto più ridotta possibile.



Nella parte anteriore e posteriore degli Space Frame ciò si traduce in generale nel posizionamento di puntoni longitudinali che in caso di impatto si deformano assialmente mediante collasso assiale e raggrinzamento “a fisarmonica”.

I puntoni sono connessi alla struttura centrale in modo da trasferire ad essa i carichi di impatto solo dopo il loro completo collasso.

Indeformabilità dell'abitacolo

In caso di impatto la struttura della **cella** dell'abitacolo deve rimanere il più possibile **integra** per assicurare la protezione degli occupanti. I suoi elementi devono quindi presentare **elevati valori di rigidità**, e la struttura deve superare anche **test di ribaltamento**: per le vetture scoperte è necessario prevedere un roll-bar fisso (eventualmente integrato nei montanti anteriori) o attivabile automaticamente in caso di rovesciamento.

Barre anti-intrusione

In caso di **impatti laterali** (che da soli costituiscono il **25% circa degli incidenti**), le fiancate della vettura rappresentano una zona critica in quanto è minima la distanza che separa i passeggeri dal punto di impatto e nella quale deve avvenire l'assorbimento dell'energia di crash.

La soluzione universalmente adottata è il posizionamento all'interno delle portiere di **barre anti-intrusione ad elevata resistenza**, che impediscono lo sfondamento all'interno dell'abitacolo ed assorbono parte dell'energia di impatto.

Generalmente tali barre sono costituite da tubi in acciaio, ma recentemente sono state sviluppate anche barre costituite da profilati estrusi in lega di alluminio 7XXX. Rispetto alle prime queste hanno il vantaggio di essere più leggere, resistenti alla corrosione (qualità importante vista la bassa ventilazione presente all'interno degli sportelli) e di avere deformazioni più graduali.



Nel caso di sportelli di notevole lunghezza le barre anti-intrusione possono essere sostituite od affiancate da un sistema di protezione dei fianchi costituito da un componente estruso multicella connesso ad una barra anch'essa estrusa (vedi Figura 4.2.1).

In caso di violento urto laterale, questo sistema impedisce allo sportello di essere spinto all'interno della vettura oltre i longheroni laterali.

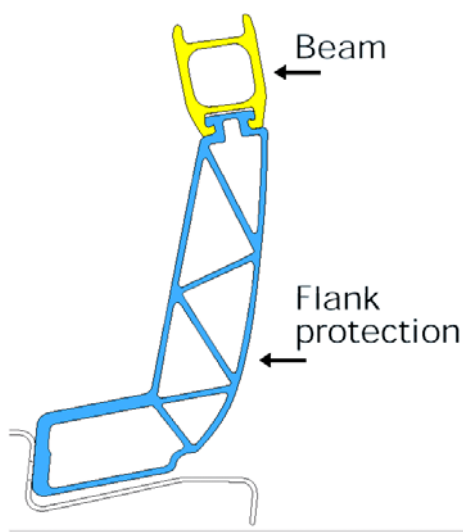


Fig. 4.2.1 - Sistema di barra anti-intrusione ed elemento di protezione laterale
(fonte: Alusuisse [4.8])

Percorso e distribuzione dei carichi di crash

La struttura nel suo complesso deve avere un comportamento in grado di gestire i carichi di crash nel modo più efficace possibile. Alcuni dei molti requisiti in questo senso sono:

- I componenti strutturali devono **collassare in modo predeterminato, progressivo ed evitando ingobbamenti ed instabilità**;
- Deve essere **evitata l'invasione dell'abitacolo** da parte dei componenti strutturali e meccanici;
- Devono essere previsti **elementi di protezione** contro l'invasione dell'abitacolo da parte di componenti meccanici (gruppo motore, gruppi ruota) e dei bagagli



trasportati, con il posizionamento di barre o reti di protezione dietro il divano posteriore);

- Deve essere per quanto possibile garantita la possibilità di **apertura delle portiere** dopo l'incidente;
- La zona del **serbatoio del carburante** deve rimanere il più possibile **integra**;
- I montanti non devono deformarsi piegandosi verso l'interno.

I progressi compiuti negli ultimi venti anni indicano una molteplicità di soluzioni adottabili per garantire il buon comportamento a crash della struttura:

- Puntoni anteriori e posteriori ad elevato assorbimento di energia;
- Piantone dello sterzo collassabile;
- Motore collassabile al di sotto del pianale;
- Pianale strutturale che trasferisce i carichi dalla parte anteriore a quella posteriore scaricando la cella dell'abitacolo.

Minimizzazione dei danni per impatti a bassa velocità

Pur essendo una qualità connessa più alla riparabilità che alla sicurezza, può tuttavia considerarsi un caratteristica di completamento del comportamento a crash di una vettura.

E' relativa ad incidenti con velocità di impatto non superiori a 15 km/h.

Si può migliorare mediante:

- Elementi di sacrificio facilmente sostituibili;
- Strutture selettive in grado di mantenersi indeformate per bassi livelli di energia di crash.

Anche nella progettazione per il comportamento a crash è da rilevare l'elevato livello di confidenza raggiunto nello sviluppo di scocche in lamiera stampata: il passaggio a strutture differenti implica nuove ricerche e sperimentazioni in questo senso.



4.2.3 - Durabilità

Il gruppo telaio-carrozzeria deve durare per l'intera vita della vettura. La sua resistenza nel tempo ai carichi statici e dinamici è garantita dal sovradimensionamento effettuato nelle prime fasi di analisi e verifica strutturale. Sono quindi da considerare le sollecitazioni di fatica e i problemi di corrosione.

Resistenza a fatica

Nella progettazione delle tradizionali scocche stampate in acciaio la fatica non è tra i problemi principali: in molti casi le procedure prevedono che una volta che la scocca abbia raggiunto i requisiti di resistenza, rigidità e comportamento NVH, ne sia realizzato un prototipo su cui effettuare prove di fatica.

In generale i rari cedimenti osservati riguardano i singoli punti di saldatura RSW, e sono per lo più dovuti a problemi tecnologici in fase di giunzione.

Nel caso di utilizzo di **leghe leggere** il problema della **fatica** è di entità decisamente **maggiore**, a causa della minore conoscenza del fenomeno, del differente comportamento del materiale e delle diverse tecnologie di giunzione impiegate.

Le **parti più critiche** sono i **nodi strutturali** e le **giunzioni**.

Nodi strutturali

Dei nodi interessa soprattutto:

- **Geometria e forma del componente**

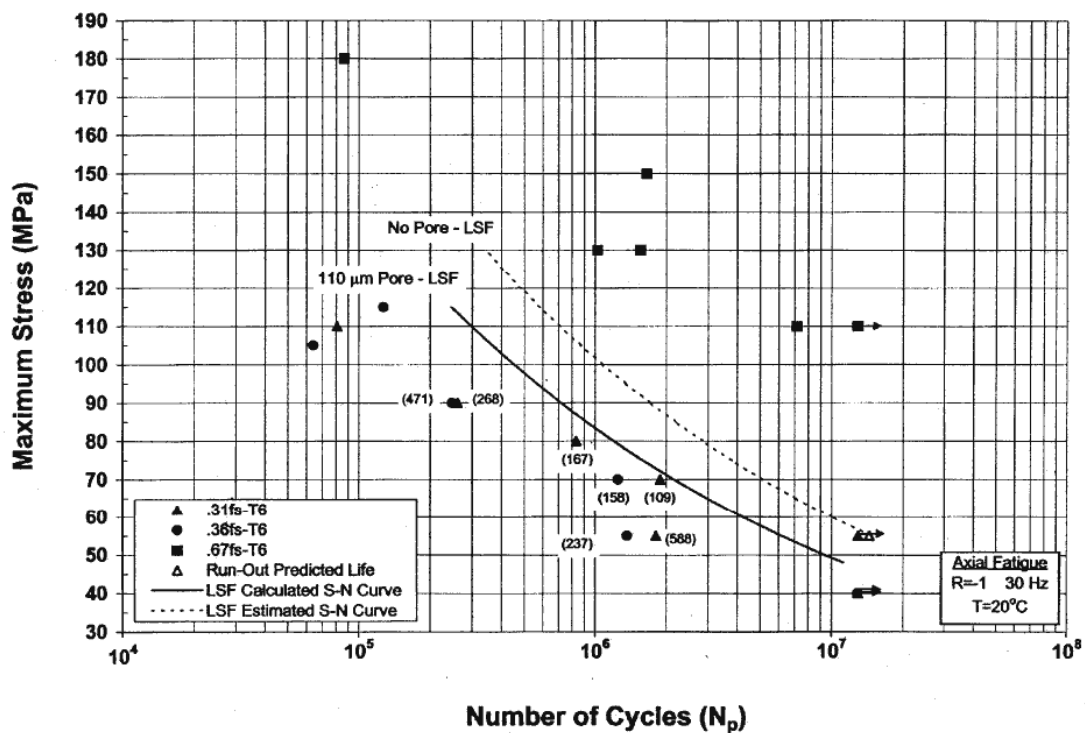
Deve essere ridotto il numero di spigoli vivi e di discontinuità di forma e spessore fortemente localizzate;

- **Proprietà metallurgiche**

Sono richieste tenacità e assenza di difetti nella microstruttura.



Diagramma 4.2.5 - Comportamento a fatica di parti in lega A357-T6 ottenute per formatura semi-solida



fonte:[4.1]

Dal Diagramma 4.2.5, relativo a pezzi ottenuti mediante formatura semi-solida, risulta come abbiano comportamento migliore le strutture metallografiche più fini, con grana globulare¹ e, nel caso di formatura semi-solida, con maggiore frazione solida (HSF, *high solid fraction*).

Quest'ultima caratteristica ha dato impulso alla nascita di nuove tecnologie di formatura semi-solida, come la *thixocasting*.

¹ La "globularità" della grana è espressa con il fattore di forma SF (*shape factor*), dato dalla relazione:

Risulta $SF=1$ per grano perfettamente circolare.



Giunzioni

La resistenza a fatica delle giunzioni dipende direttamente dal tipo di tecnologia impiegato. In particolare per le leghe di alluminio le tecnologie con maggiore resistenza a fatica sono (per valori di resistenza decrescenti):

1. Giunzioni miste incollate-rivettate;
2. Giunzioni incollate;
3. Giunzioni rivettate;
4. Giunzioni saldate (RSW).

Importanza non secondaria riveste anche la geometria della giunzione e il tipo di sollecitazione prevalente.

Resistenza a corrosione

In questo senso l'impiego di leghe di alluminio garantisce ottime prestazioni.

Particolari attenzioni devono essere dedicate ad eventuali punti di contatto con componenti in acciaio, come rivetti ad alta resistenza o altri membri strutturali, in cui può generarsi il fenomeno della corrosione galvanica.

Occorre in questo senso prevedere adeguati rivestimenti.

4.2.4 - Comfort

Comportamento NVH (Noise, Vibration & Harshness)

Con la sigla NVH si intende l'insieme di prestazioni relative al comportamento dinamico vibrazionale della struttura, con particolare riferimento al comfort di marcia.

L'obiettivo in questo senso è l'ottenimento di una struttura con le prime frequenze di oscillazione torsionale e flessionale più alte possibili, compatibilmente con il contenimento della massa, in modo da essere abbastanza lontani dalle frequenze più fastidiose per l'uomo (tipicamente sotto i 10 Hz).

**Diagramma 4.2.6 - Frequenza propria I modo di oscillazione torsionale e peso vettura**

() E' secondo la GM l'unica vettura prodotta negli USA ad avere una frequenza propria pari a 25Hz*

*(**) Aluminum Vehicle Technology – Aluminum Intensiv Vehicle*

(fonte: The Aluminum Association, Inc. [6])

Un altro requisito è l'adeguato isolamento della struttura dalle fonti primarie di vibrazione mediante tasselli in materiale ad elevato smorzamento.

Accessibilità

L'accessibilità è influenzata dalla struttura principalmente mediante:

- Dimensioni e posizionamento dei longheroni;
- Tipologia e dimensioni generali della fiancata;
- Presenza e dimensioni dei montanti B;
- Eventuale presenza di elementi strutturali di rinforzo.

Abitabilità

In relazione alla struttura del telaio essa dipende da:

- Dimensioni generali;
- Presenza di elementi strutturali all'interno dell'abitacolo, con particolare riferimento al tunnel centrale e alle traverse e ai longheroni del pianale.



Visibilità

Anche la visibilità è influenzata dal tipo di struttura, principalmente mediante:

- Dimensioni e posizionamento dei montanti A, B e C;
- Ampiezza e posizionamento delle vetrate.

4.2.5 - Manutenzione

Riparabilità

In relazione al gruppo telaio-carrozzeria, la riparabilità dipende principalmente da:

- **Resistenza della struttura ad impatti a basse velocità;**
- **Resistenza della pannelleria esterna a graffi e ad ammaccature;**
- **Costi** per riparazioni e sostituzioni **strutturali;**
- **Costi** per riparazioni e sostituzioni della **pannelleria esterna.**

La principale caratteristica richiesta è la minimizzazione dei danni nel caso di impatti di lieve entità (tipicamente **fino a velocità di 15 km/h**).

Ciò permette di ridurre drasticamente i costi di riparazione, consentendo anche la diminuzione dei premi assicurativi.

Per verificare il comportamento in queste condizioni è stata sviluppata in Germania una apposita procedura detta AZT Test, che prevede un impatto frontale a 15 km/h contro una barriera rigida con sovrapposizione del 40% ed un analogo impatto posteriore contro un veicolo di massa pari a 1 t.

La riduzione dei costi assicurativi nel caso di superamento positivo del test è superiore al 50%.

Per quanto riguarda la **pannelleria esterna**, le qualità dipendono ovviamente dal materiale utilizzato; in caso di impiego di lamiera in lega di alluminio, i problemi sono quelli già discussi precedentemente (vedi 2.1.10), mentre nel caso di impiego di



pannelli plastici, possono essere adottate diverse soluzioni, attualmente in fase di sviluppo:

- **Pigmentazione in massa;**
- **Memoria di forma.**

4.2.6 - Correlazione tra requisiti prestazionali e aspetti costruttivi

Da quanto visto precedentemente si può compilare una tabella di correlazione qualitativa tra i requisiti prestazionali ed i vari aspetti costruttivi e progettuali.

Tabella 4.2.3 - Correlazione qualitativa tra requisiti prestazionali e aspetti costruttivi

| | Materiali | Lavorazioni | Giunzioni | Layout |
|-------------------------|-----------|-------------|-----------|--------|
| Riduzione delle masse | ● | ● | ○ | ● |
| Resistenza statica | ● | ● | ● | ● |
| Rigidità | ○ | ● | ○ | ● |
| Comportamento a crash | ● | ● | ● | ● |
| Resistenza a fatica | ○ | ● | ● | ○ |
| Resistenza a corrosione | ● | ○ | ● | ○ |
| Comportamento NVH | ● | ○ | ● | ● |
| Abitabilità | ○ | ● | ○ | ● |
| Riparabilità | ● | ○ | ● | ● |

Legenda: ○ = correlazione ridotta; ● = correlazione media; ● = correlazione elevata.

Mediante tale Tabella è possibile focalizzare in maniera diretta gli aspetti principali in relazione ai requisiti specifici.



4.3 - IMPATTO AMBIENTALE

I requisiti progettuali relativi all'impatto ambientale possono essere schematizzati mediante la suddivisione data nella Tabella 4.3.1.

Tabella 4.3.1 Classificazione dei requisiti relativi all'impatto ambientale

| Area | Requisito | Parametro di valutazione |
|---|------------------------------------|---|
| CONSUMO ENERGETICO ED EMISSIONI INQUINANTI | CONSUMO ED EMISSIONI IN PRODUZIONE | - Materiali - Tecnologie di lavorazione e di giunzione |
| | CONSUMO ED EMISSIONI IN ESERCIZIO | - Massa complessiva |
| MATERIE PRIME E RICICLABILITÀ | CONSUMO MATERIE PRIME | - Materiali - Tecnologie di lavorazione |
| | RICICLABILITÀ A FINE VITA | - Materiali - Tecnologie di lavorazione e di giunzione |
| | COSTI DI RICICLAGGIO | - Materiali - Tecnologie di lavorazione e di giunzione |

4.3.1 - Consumo energetico ed emissioni inquinanti

La valutazione del consumo energetico è effettuata tenendo conto di:

- **Energia totale di produzione:** è la quantità complessiva di energia utilizzata, dalla produzione del metallo alla costruzione del veicolo;
- **Consumo energetico dal veicolo durante il suo ciclo di vita.**



Le emissioni inquinanti sono ovviamente direttamente dipendenti dai consumi energetici, anche se la loro valutazione dipende dal tipo di agente inquinante preso come parametro di confronto.

Vari autori hanno effettuato confronti tra la tradizionale scocca portante in acciaio e lo Space Frame in lega di alluminio abbinato a pannelli esterni anch'essi in lega di alluminio.

In entrambi i casi è risultato che con l'utilizzo di **leghe leggere a maggiori richieste energetiche** nella fase di **produzione** si contrappongono **consumi ridotti** grazie agli alleggerimenti conseguiti: la valutazione può essere quindi espressa mediante il **punto di pareggio in km percorsi**, al di sopra del quale la soluzione dello Space Frame in lega di alluminio risulta superiore.

Il punto di pareggio risulta anticipato nel caso di impiego di leghe secondarie, che richiedono solamente il 7% dell'energia necessaria per la produzione primaria, oltre a consentire sensibili vantaggi economici.

I principali risultati sono riportati nella Tabella 4.3.2.

Tabella 4.3.2 - Confronto tra scocca in acciaio ed in lega di alluminio per consumo energetico ed emissioni inquinanti

| CONSUMO ENERGETICO COMPLESSIVO | |
|---------------------------------------|------------------------|
| Tipo di alluminio | Punto di pareggio (km) |
| Alluminio primario | 85000 (55000-79000) |
| Alluminio secondario al 30% | 60000 |
| Alluminio secondario al 50% | 40000 |
| EMISSIONI INQUINANTI | |
| Parametro di valutazione | Punto di pareggio (km) |
| CO ₂ | 110000 (95000) |
| Indice GWP (Global Warming Potential) | 114000 |

fonte dei dati in parentesi: Audi AG, 1999.

A questo confronto devono poi essere aggiunti i corrispondenti costi per la verifica della fattibilità industriale.



4.3.2 - Riciclabilità

Il consumo di materie prime e la riciclabilità della vettura a fine vita sono direttamente collegati fra loro.

In questo senso le prestazioni dei veicoli dipendono da:

- **Quantità di materiale secondario** impiegato nella produzione;
- **Quantità di componenti non riciclabili:**
Attualmente essa ammonta al 25% circa del totale, ripartito in:
 - 1/3 di plastiche di vario tipo;
 - 1/3 di gomma e altri elastomeri;
 - 1/3 di vetro, tessuti e fluidi.
- **Valore dei materiali riciclabili;**
- **Costo del processo di riciclaggio.**

Tutti questi fattori dipendono ovviamente in massima parte dai materiali impiegati.

Le leghe di alluminio presentano in questo senso caratteristiche molto positive, tuttavia è necessaria una progettazione mirata per trarne il massimo del vantaggio.

In particolare i requisiti fondamentali della **progettazione per la riciclabilità** risultano:

- **Evitare la mutua contaminazione** tra le diverse leghe mediante:
 - Impiego di **componenti** tra loro **omogenei**;
 - **Riduzione del numero di leghe impiegate**, in modo da favorire un processo perfettamente riciclabile, in cui ogni classe di lega viene riciclata in se stessa;
 - Impiego di **leghe con composizione compatibile**;
- Evitare l'utilizzo di componenti ibridi multi-materiale;
- Progettazione per la **facile separazione** delle leghe nel processo di riciclaggio;
- **Evitare la contaminazione da elementi esterni** mediante il miglioramento del controllo delle varie fasi del riciclaggio.

Contenuti di Ferro superiori allo 0,3% rendono il materiale riciclato adatto solamente a prodotti da getto di basso livello, mentre Cd, Pb e Bi comportano problemi ambientali.



I principali problemi sotto questi aspetti sono relativi alla costruzione dei nodi della struttura: se realizzati mediante pressofusione impiegando leghe ad alto contenuto di silicio, necessario per la fluidità del getto, devono essere isolati dai profilati. Ciò comporta difficoltà soprattutto nel caso di nodi numerosi e disposti in zone non facilmente raggiungibili o di connessioni ai profilati effettuate con saldatura.

Una **soluzione** può essere rappresentata dall'esteso **utilizzo di profilati estrusi**, che non presentano alcun problema di riciclaggio.

Le connessioni tra i vari profilati possono in questo caso essere realizzate mediante:

- Collegamento diretto tra profilati;
- Interposizione di nodi estrusi;
- Interposizione di nodi realizzati con lega compatibile, come l'idroformatura o la *squeeze-casting*, che consentono l'utilizzo di leghe da lavorazione plastica ed in particolare della serie 6000.



4.4 - COSTI DI PRODUZIONE

4.4.1 - Costi dei Materiali

Una tipica vettura del segmento D costa circa 13.3 \$/kg al momento della distribuzione, di cui circa 5 \$/kg per la lavorazione. Di questa somma il 60% circa è dovuta alle lavorazioni vere e proprie, mentre il restante 40% è relativo ai materiali, inclusi gli scarti di lavorazione.

Il motivo che rende il prezzo delle vetture attuali così competitivo è fondamentalmente da ricercare nel **basso costo della lamiera di acciaio**, compreso generalmente tra 0,7 e 1,2 \$/kg.

Tuttavia nella valutazione di materiali alternativi occorre considerare che il parametro di confronto non deve essere il prezzo per unità di massa, quanto piuttosto il **prezzo per unità di componente già lavorato**. Nonostante costi iniziali maggiori, materiali alternativi possono consentire la riduzione dei costi di lavorazione mediante impianti e macchine più economici, diminuzione delle fasi di lavorazione, riduzione ed integrazione dei componenti (vedi Tabella 4.4.1).

Inoltre ogni kg di acciaio è sostituito da una quantità inferiore di materiale.

Tuttavia è opinione comune che per garantire l'applicabilità industriale di nuovi materiali il costo del componente finito deve mantenersi intorno al limite di 2,2 \$/kg (cioè 1 \$/lb) [10].

Tabella 4.4.1 - Costi specifici relativi all'acciaio

| Materiale | Costo specifico | Costo specifico per parte |
|--------------------|-----------------|---------------------------|
| Acciaio | 1 | 1 |
| Acciaio HSS | 1,1 | 1 |
| Glass-fiber FRP | 3 | 1,5 |
| Carbon FRP | 20 | 5 |
| Leghe di alluminio | 4 | 2 |

FRP = fiber-reinforced polymers

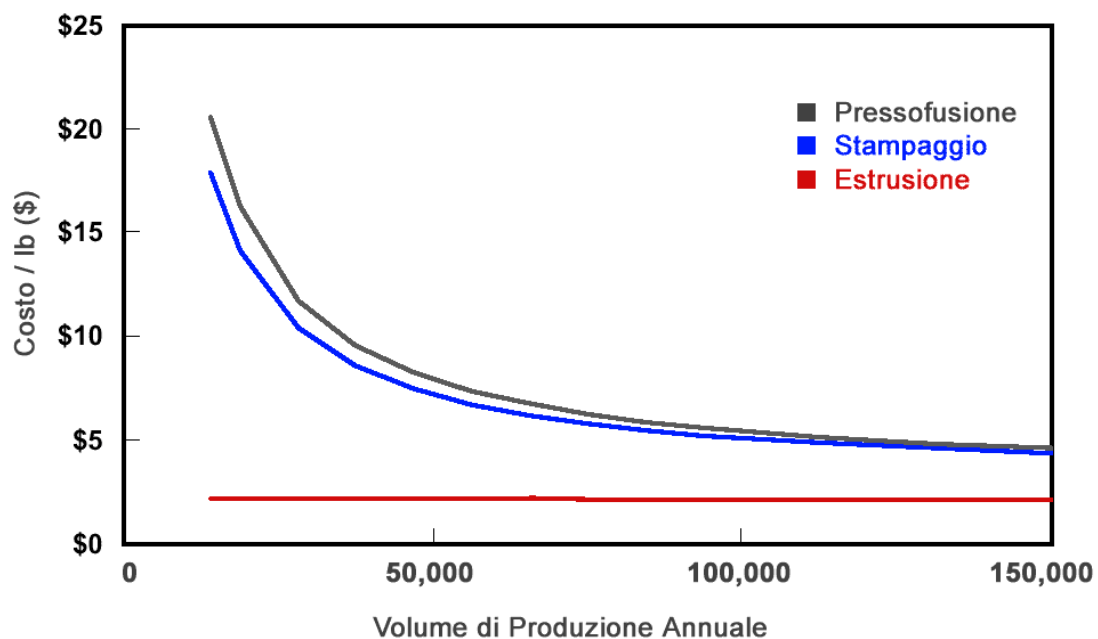


4.4.2 - Costi delle lavorazioni

Si è già visto come in generale l'applicazione di tecnologie di lavorazione convenzionali alle leghe di alluminio comporti differenze più o meno sensibili rispetto all'acciaio. In generale si può considerare che se da un lato è possibile ridurre i costi per la lavorazione vera e propria dei componenti, soprattutto mediante l'impiego di tecnologie più compatibili con le leghe leggere, ed in primo luogo l'estrusione e la pressofusione, dall'altro le fasi di giunzione e di assemblaggio presentano difficoltà tali da comportare notevoli incrementi di costi.

Per semplicità, si riporta un confronto di massima fra le principali tecnologie, con i costi relativi a vari regimi produttivi (vedi Diagramma 4.4.1).

Diagramma 4.4.1 - Costi delle differenti lavorazioni delle leghe di alluminio



fonte: Materials System Laboratory, MIT [2]

Si nota come l'estrusione sia una tecnologia perfettamente flessibile, in quanto non comporta sensibili variazioni di costi al variare dei regimi produttivi. La sua adozione è quindi fondamentale in processi progettuali orientati alla flessibilità, come si vedrà nei Paragrafi successivi.



4.4.3 - Costi totali di produzione

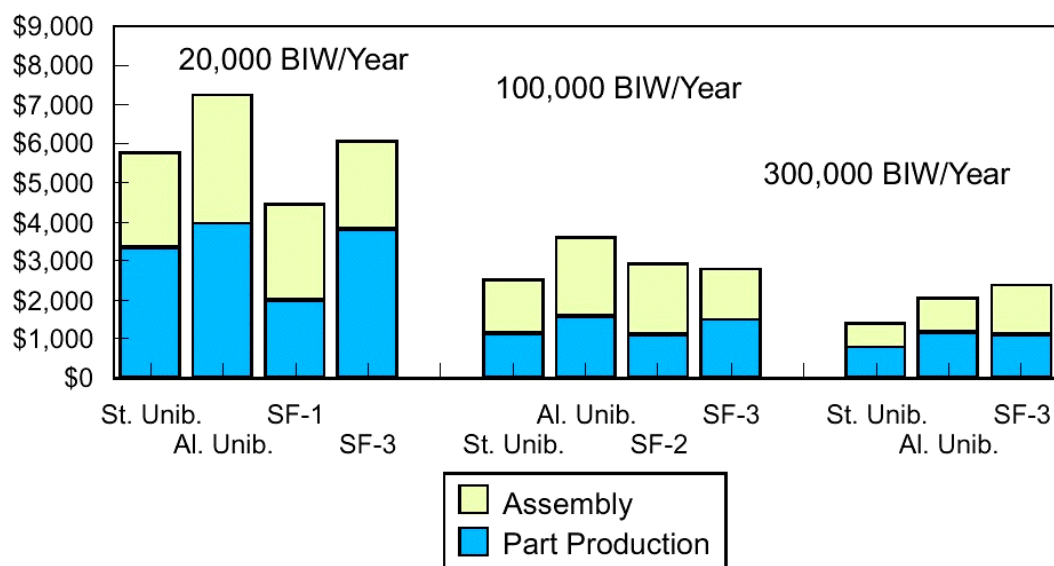
Una valutazione economica completa deve tenere conto di un numero estremamente elevato di fattori, dal tipo di materiali impiegati agli investimenti per le linee di lavorazione e di assemblaggio, ai costi del personale, alle spese per la gestione e la manutenzione degli impianti.

Un'analisi dettagliata richiederebbe una trattazione a parte, ma è possibile in questa sede riportare i risultati ottenuti dal **Materials System Laboratory** del **Massachusetts Institute of Technology** in diverse ricerche effettuate in questo campo.

La prima [2] consiste nel confronto dei costi di produzione relativi a diverse soluzioni costruttive: scocca in acciaio, in lega di alluminio e Space Frame in lega di alluminio. Da essa emerge che l'adozione dello Space Frame comporta vantaggi economici fino a volumi produttivi di 20mila unità all'anno (vedi Diagramma 4.4.2).

Diagramma 4.4.2 - Costi di produzione di diverse strutture automobilistiche

BIW Production Cost



fonte: Materials System Laboratory, MIT [2]



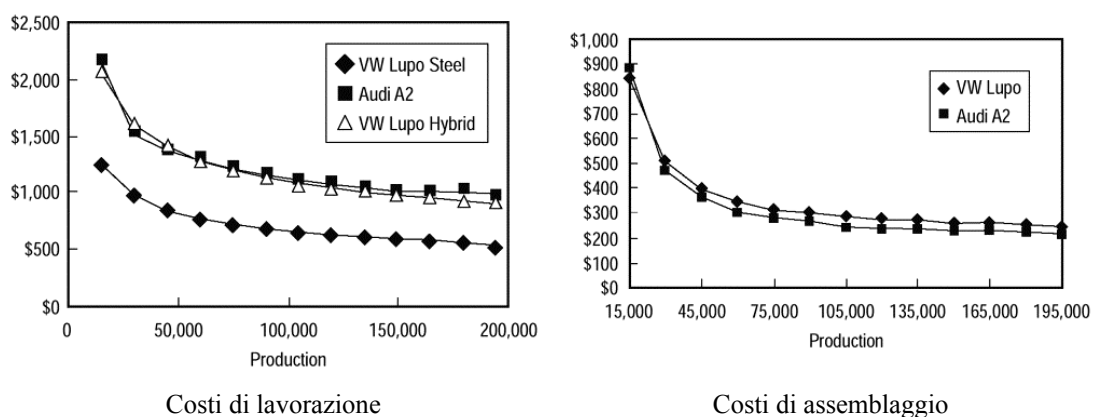
Tabella 4.4.2 - Costi di produzione di scocche automobilistiche

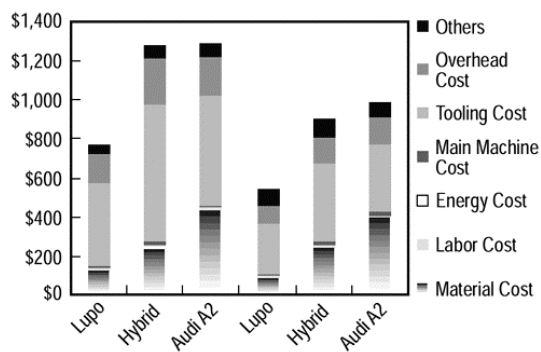
| <i>Cost/BIW</i> | Annual Production Volume 20,000 | Annual Production Volume 100,000 | Annual Production Volume 300,000 |
|--------------------|--|---|---|
| Spaceframe SF-1 | \$4,472 | N/A | N/A |
| Spaceframe SF-2 | N/A | \$2,925 | N/A |
| Spaceframe SF-3 | \$6,073 | \$2,791 | \$2,404 |
| Aluminum Unibody | \$7,249 | \$3,602 | \$2,058 |
| Steel Unibody | \$5,774 | \$2,545 | \$1,417 |

fonte: Materials System Laboratory, MIT [2]

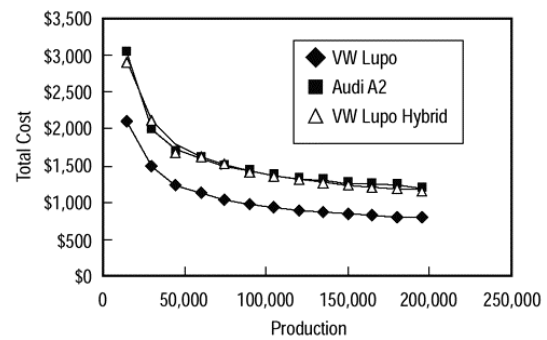
La seconda [4.4] mette a confronto vari modelli per due segmenti differenti: vetture compatte (VW Lupo, VW Lupo Hybrid e Audi A2) e medio-superiori (Ford Contour, Ford P2000. Audi A8). I risultati principali sono riportati nei diagrammi 4.4.3 e 4.4.4.

Diagrammi 4.4.3 - Confronto tra costi per modelli compatti





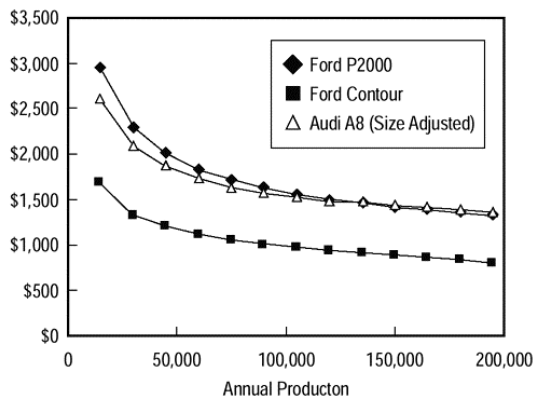
Ripartizione dei costi



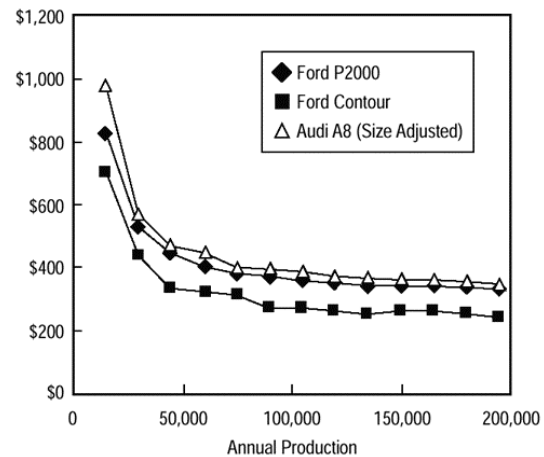
Costi totali di produzione

fonte: [4.4]

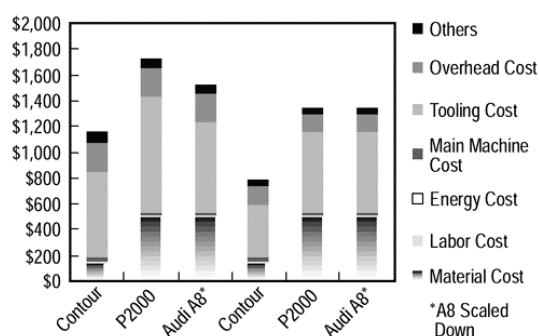
Diagrammi 4.4.4 - Confronto tra costi per modelli medio-superiori



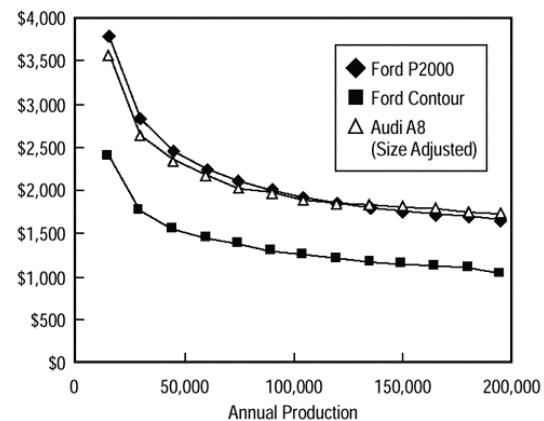
Costi di lavorazione



Costi di assemblaggio



Ripartizione dei costi



Costi totali di produzione

fonte: [4.4]



Si nota come i costi totali di produzione dei veicoli con Space Frame si mantengano in questo caso superiori a quelli convenzionali con scocca in acciaio per tutti i regimi produttivi considerati, anche se in entrambi i confronti per i modelli Audi va considerata la classe più elevata (segmenti C e F) rispetto alle vetture confrontate (segmenti A ed E).

Insieme ai **costi di produzione** occorrerebbe considerare quelli di **esercizio**: il vantaggio economico legato al risparmio del carburante dovuto agli alleggerimenti conseguiti può portare ad un pareggio dei costi per gli utenti nell'arco della vita del veicolo, specialmente nei Paesi dove il **prezzo delle benzine** è maggiormente penalizzato da **imposte fiscali** (vedi Tabella 4.4.3).

Tabella 4.4.3 - Risparmio di carburante per AIV (Aluminum Intensive Vehicle)

| | Costo carburante | Risparmio dopo 80000 Km |
|-------------|-------------------------|--------------------------------|
| Stati Uniti | 1\$/gallone | 290 \$ |
| Europa | 1\$/litro | 850 \$ |

fonte: [10]

Tali risparmi non sono tuttavia sufficienti a giustificare pienamente una spesa iniziale superiore mediamente di 1000-1500 \$, soprattutto tenendo conto che la riduzione dei costi di esercizio generalmente non rientra tra i fattori principali nella scelta di acquisto di un'automobile.

Gli elevati contenuti tecnologici ed innovativi degli AIV possono influenzare le scelte decisionali di acquisto solamente nel caso di vetture di nicchia, come modelli sportivi, o di vetture di segmento superiore.



4.4.4 - Considerazioni economiche generali e conclusioni

Si è visto come nel panorama industriale attuale soluzioni strutturali alternative, come lo Space Frame in alluminio, trovino la loro naturale applicazione in veicoli di nicchia o comunque con volumi di produzione inferiori a 100mila unità all'anno.

E' tuttavia possibile spingersi oltre con considerazioni circa l'attuale sistema produttivo ed il suo futuro.

La tecnologia della scocca in acciaio, di tipo *equipment-intensive*, consentirebbe in teoria le maggiori **economie di scala** per volumi di produzione nell'ordine dei **2 milioni di unità all'anno**.

In realtà nel mercato mondiale non esistono singoli modelli con volumi produttivi così elevati, e meno di dieci Case automobilistiche raggiungono una produzione complessiva così alta – la produzione mondiale annuale si aggira oggi sui 50 milioni di vetture. Ciò comporta fondamentalmente il mancato raggiungimento delle economie di scala: si può contare su **margini di profitto molto esigui**, mediamente **compresi tra l'1 e il 5%**.

Inoltre modelli con volumi di produzione non elevati, soprattutto di costo medio-basso, possono comportare profitto nullo o addirittura negativo.

In quest'ottica, le Case adottano delle **strategie** che consentono un **recupero sui profitti**:

- **Platform Sharing**

Diversi modelli vengono sviluppati su una base strutturale comune (eventualmente modificata) e differenziati mediante la carrozzeria e l'immagine del marchio.

- **Globalizzazione**

Joint-venture ed unificazioni di marchi differenti in singoli Gruppi industriali, con la successiva adozione di strategie di platform sharing.

- **Aumento dei prezzi** per vetture di livello medio-superiore e superiore.

E' una politica attuabile solo da Case affermate e con la disponibilità di marchi prestigiosi, per i quali i clienti sono disposti a pagare prezzi maggiori.



Sono inoltre in corso di sviluppo ricerche su strategie progettuali, produttive e di distribuzione alternative, che garantiscano maggiore snellezza e flessibilità (programmi 3dayCar, Th!nk Micro Factory Retailing, HyperCar - Rocky Mountain Institute).

E' inoltre da considerare che le questioni energetiche ed ambientali, unite alla maggiore longevità delle nuove automobili e, specialmente nei Paesi industrializzati, alle elevate densità di vetture per abitante, fanno sì che la produzione attuale sia maggiore di quella auspicabile e realmente necessaria. Previsioni per il futuro indicano che i volumi produttivi dovranno diminuire, rendendo fattibile il mantenimento dell'attuale scocca in acciaio solo per pochi modelli di grande serie.

Si può quindi affermare che le soluzioni strutturali alternative potranno costituire a lungo termine la soluzione più conveniente per la gran parte della produzione automobilistica.

Le singole applicazioni attuali costituiscono la base di esperienza necessaria per l'estensione delle nuove tecnologie e per la graduale riconversione del sistema industriale.

Va infine notato che parte dei vantaggi economici relativi alla produzione di scocche in acciaio sono legati allo sfruttamento di impianti già esistenti. Ciò rende più facile la produzione di strutture Space Frame per nuove industrie più piccole e flessibili, meno vincolate da investimenti già effettuati [10].



4.4.5 - Platform Sharing

E' una strategia produttiva sempre più diffusa tra le Case costruttrici.

Essa ha permesso a tutti i maggiori Gruppi una drastica riduzione del numero di piattaforme di base: a titolo esemplificativo negli ultimi anni la Ford è passata da 32 a 16 piattaforme (con un contemporaneo incremento del 50% del numero di modelli differenti) e la Volkswagen da 16 a 4.

La strategia di Platform Sharing consente di beneficiare di diversi **vantaggi**:

- Eliminazione delle **ridondanze di costi di sviluppo** e di **piattaforme** offerte sul mercato;
- **Ottimizzazione delle risorse** con aumento della **qualità** e delle **prestazioni**;
- Possibilità di adeguare gli stessi modelli ai singoli mercati con investimenti accettabili.

Va inoltre considerato che un'adeguata progettazione può comunque garantire la differenziazione dei modelli basati sulla stessa piattaforma.

Un ottimo esempio è fornito proprio dalla **Volkswagen**, che sulla base della "piattaforma A" ha sviluppato i modelli New Beetle, Golf, Jetta, Audi A3 e Audi TT.

Inoltre le **vetture di nicchia** possono contare su un maggior valore nel mercato che, grazie alla percezione di unità, esclusività e superiorità, può tradursi in prezzi più elevati rispetto ai modelli di maggior diffusione.

Gli **svantaggi** che comporta sono così riassumibili:

- **Compromessi** in termini **prestazionali e/o funzionali**

Un prodotto sviluppato a partire da una base non specificatamente progettata può risentire di questo limite a confronto con prodotti analoghi sviluppati ex-novo.

- **Incompatibilità**

Lo sviluppo di un modello a partire da una piattaforma comune può comportare la necessità di risolvere problemi connessi all'adattamento stesso più che a



miglioramenti delle qualità e delle prestazioni, comportando costi ulteriori e “non visibili”.

- **Rischi più elevati**

Eventuali difetti nella “superpiattaforma” comportano elevatissimi costi di riconversione. La progettazione deve essere particolarmente curata, controllata ed ottimizzata.

4.4.6 - Esperienza e Innovazione

Uno degli elementi fondamentali nella progettazione ingegneristica di un veicolo è l'**esperienza**. Lo sviluppo di un nuovo progetto parte quasi sempre sulla base del precedente.

Partire **senza riferimenti**, come potrebbe avvenire per la messa in produzione di strutture Space Frame, comporta **inefficienza** sotto vari aspetti:

- **Vincoli di tempo**

Il ***time-to-market*** è basilare per la competitività nel mercato. La progettazione degli impianti e l'acquisizione delle macchine e delle linee produttive necessarie sono il maggior ostacolo alla riduzione dei tempi di sviluppo, ma risultano fuori dal controllo diretto delle Case costruttrici, al contrario dei tempi di progettazione, che diventano quindi un importante fattore su cui contare.

- **Vincoli di costo**

Il riutilizzo di progetti passati consente ulteriori risparmi: non devono essere sviluppate nuove tecnologie di lavorazione e si riduce il rischio connesso alla affidabilità del prodotto, ai costi del servizio di garanzia ed in generale alle modifiche successive alla messa in produzione.

- **Limitazioni delle conoscenze**

Generalmente le Case adottano codici di calcolo che verificano il comportamento delle strutture sotto determinati carichi, partendo da progetti precedenti, migliorandoli e riadattandoli ai nuovi vincoli, supportando questo lavoro con la costruzione di prototipi e l'effettuazione di prove sperimentali.



Creare una nuova struttura pone molte più incognite relative al suo comportamento reale ed ai carichi effettivi di esercizio cui è soggetta, richiedendo quindi complesse simulazioni e la costruzione di un maggior numero di prototipi per le verifiche sperimentali.

E' da notare però che questa strategia progettuale pone notevoli **ostacoli** ai processi di **innovazione** come l'introduzione di un nuovo materiale o lo sviluppo di una nuova formula costruttiva.

In particolare le prestazioni dell'elemento innovativo non devono essere giudicate in relazione ai processi progettuali e produttivi passati – per i quali la soluzione tradizionale continuerebbe ad emergere chiaramente come la migliore fra le possibili alternative – ma in base alla sua potenzialità in un sistema progettuale e produttivo appositamente sviluppato.



BIBLIOGRAFIA CAPITOLO 4:

- [4.1] T.G.Basner, R.D.Pehlke, A.K.Sachdev, *"Fatigue Behaviour of Semi-Solid Formed A357-T6 Aluminum"*, SAE Technical Paper 2001-01-0413, SAE 2001 World Congress Detroit, Michigan, March 5-8, 2001.
- [4.2] F.R. Field III, J.P. Clark (Massachusetts Institute of Technology), *"A practical road to lightweight cars"*, , Technology Review, January, 1997.
- [4.3] E.Lutz, *"Sicherheit mit Aluminuimstrukturen am Automobil: Seitenaufprallträger, Stossfänger und Crash Box"*, Alusuisse Technology & Management Ltd, Switzerland, 2001.
- [4.4] A.Kelkar (Cisco Systems), R.Roth, J.Clark (Massachusetts Institute of Technology), *"Automobile Bodies: Can Aluminum Be an Economical Alternative to Steel?"*, JOM, The Minerals, Metals & Materials Society, n.53, August, 2001.
- [4.5] M.Brylawski, *"Uncommon knowledge: automotive platform sharing's potential impact on advanced technologies"*, Hypercar Inc., Conference pre.print for the 1st International Society of the Advancement of Material and Process Engineering (SAMPE) Automotive Conference, 27-29 September, Detroit, Michigan, 1999.
- [4.6] A.Frangi, *"Lightweighting and Alternative Vehicle Propulsion Systems"*, Presentation for the Steering Committee Meeting, Materials Systems Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, April 19-20, 2001.
- [4.7] P.Furrer, *"Recycling of Aluminum in Cars – Today and Tomorrow"*, SAE Technical Paper 951846, Total Life Cycle Conference, Vienna, Austria, October 16-19, 1995.



- [4.8] “Aluminium offers safety throughout the automobile”, Alusuisse Singen GmbH, Germany, 2001.



CAPITOLO 5 :
APPLICAZIONE:
PROGETTAZIONE DI UN TELAIO SPACE
FRAME PER CITY CAR MULTIFUNZIONALE



5.1 - CAMPO DI APPLICAZIONE E PROGETTAZIONE METODICA

5.1.1 - Scelta del campo di applicazione

Fra le molte applicazioni possibili per l'architettura Space Frame, una delle più interessanti è quella riguardante le cosiddette City Car, veicoli sviluppati recentemente per fronteggiare le esigenze di riduzione dell'inquinamento ambientale e geometrico, particolarmente sentite nei centri urbani.

L'applicazione dello Space Frame risulta particolarmente adatta per questo tipo di veicoli, principalmente per le seguenti esigenze:

- **Volumi di produzione ridotti**

La categoria delle City Car è caratterizzata da volumi di produzione sensibilmente inferiori rispetto alle vetture di segmenti più elevati.

- **Riduzione delle masse**

L'esigenza di ridurre le emissioni inquinanti richiede l'adozione di propulsioni elettriche o ibride o, in alternativa, l'impiego di motorizzazioni tradizionali diesel o benzina, ma con cilindrata estremamente contenute.

In entrambi i casi il veicolo deve avere una massa quanto più possibile ridotta, nel primo caso per poter aumentare l'autonomia e compensare la massa dovuta alla presenza del gruppo batterie, nel secondo per diminuire la potenza necessaria e ridurre di conseguenza consumi ed emissioni.

Entrambe le esigenze vengono ampiamente soddisfatte dall'adozione dell'architettura costruttiva dello Space Frame in lega leggera, per i motivi visti in dettaglio nei precedenti Capitoli.



Lo studio sarà incentrato sul gruppo telaio-carrozzeria e sulla configurazione generale del veicolo, mentre i vari componenti, meccanici e non, verranno considerati marginalmente ed in funzione della loro interazione con telaio e carrozzeria.

Gli aspetti presenti nella Lista dei Requisiti, nella Struttura della Funzione e nella Matrice Morfologica sono pertanto riferiti alla parte strutturale ed alla configurazione generale.

5.1.2 - Progettazione Metodica

L'applicazione presentata nel presente Lavoro è svolta secondo le procedure della **Progettazione Metodica**.

Progettare vuol dire trasformare un insieme di richieste date dal cliente in una completa descrizione del Sistema Meccanico (**SM**) ottimale, pronto per una eventuale fabbricazione.

Al Processo di progettazione partecipano vari **Operatori**:

- I **Progettisti** e i **mezzi di lavoro**, che modificano le informazioni dell'operando durante il processo di progettazione;
- I **Metodi di Progettazione** (*Design Methods*) e le **Tecniche di rappresentazione**.

La metodologia di progettazione è la branca che si occupa dello sviluppo di metodi (strumenti) che possono essere usati e combinati tra loro per procedere nella progettazione;

- Le **Conoscenze Tecniche** e Specialistiche di progettazione (esperienza del settore);
- La **Qualità** della **Dirigenza** e del **Personale** del processo di progettazione;
- Le **condizioni di lavoro** (ambiente).

Risulta decisiva per il progettista, oltre alla caratteristica di un Sistema Meccanico di produrre l'effetto desiderato, l'individuazione di tutte le Proprietà che l'acquirente si aspetti da questo, che dipendono interamente da una classe di proprietà di base,



chiamate “**proprietà elementari di progettazione**”, che caratterizzano ogni aspetto del SM: Estetica, Sicurezza, Affidabilità, Ergonomia, Compatibilità ambientale, Accordo con gli standards, Prestazioni, Assemblabilità, Adattabilità alla Produzione, Manutenibilità, Adattabilità alla conservazione, Adattabilità all’imballaggio, Adattabilità al trasporto, Liquidazione dopo l’uso, Livello di costo.

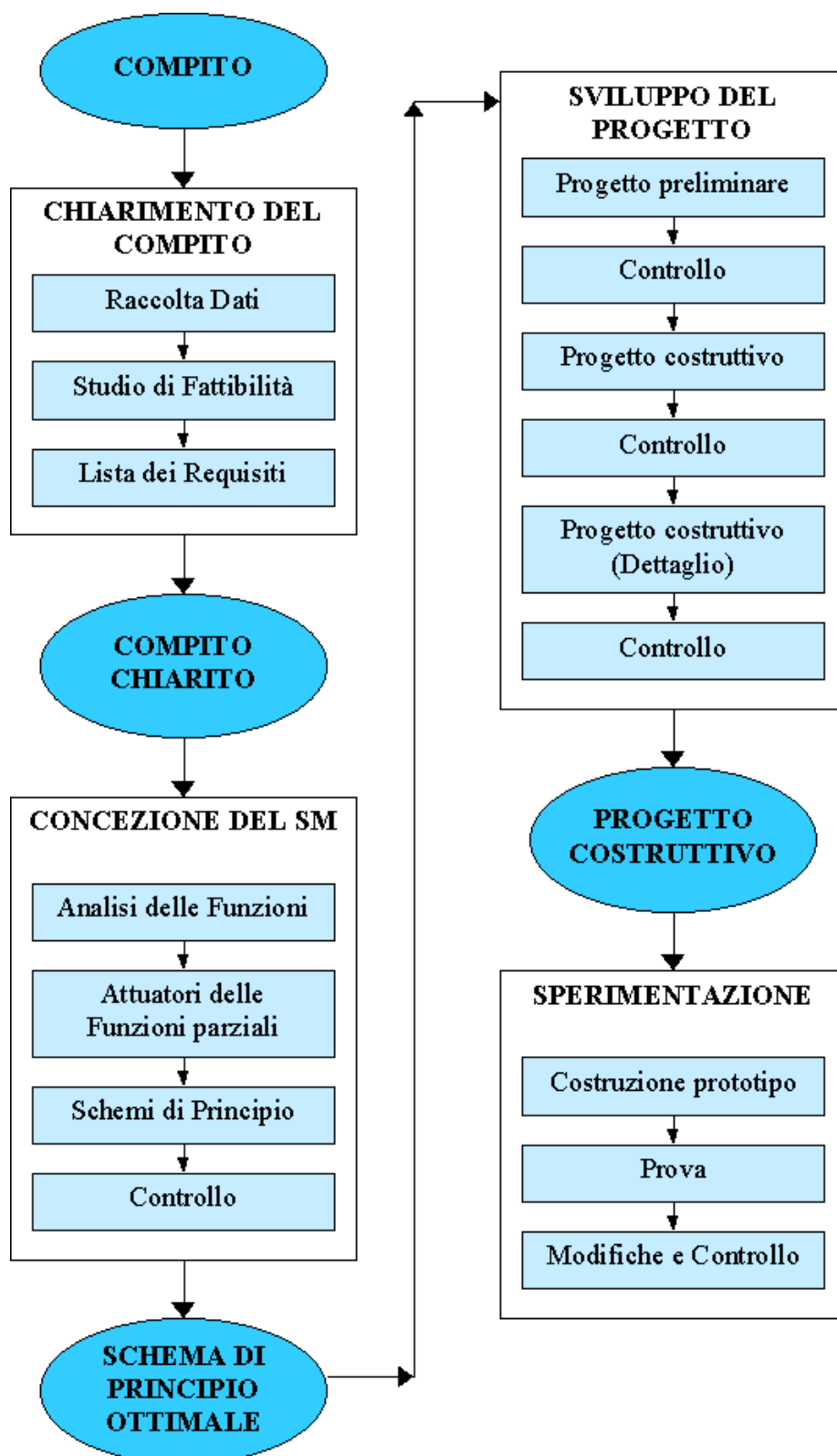
Il Modello di Progettazione Metodica richiede per ogni fase di progettazione conoscenze specifiche riguardanti le suddette proprietà, tenuto conto del grado di concretezza del sistema che si sta progettando.

Esso realizza una trasformazione di oggetti, con lo scopo di raggiungere il fine di un prodotto ottimo con il minimo impiego di tempo e denaro. Alla locuzione “**costi minimi**” si possono dare due diversi spessori: una prospettiva più ristretta che consideri solamente l’ economia dell’ azienda, ed una prospettiva più ampia che includa i costi sociali ed ambientali ed i rischi e i benefici per le comunità.

La suddivisione temporale delle attività può essere schematizzata come nel Diagramma 5.1.1.



Diagramma 5.1.1 - Struttura del Processo di Progettazione Metodica





5.2 - CHIARIMENTO DEL COMPITO

Il settore dell City Car è attualmente in fase di forte espansione e sviluppo
Viste le caratteristiche di flessibilità e modularità rese possibili dallo Space Frame, si intende con questo Lavoro sviluppare il progetto di un telaio per **veicolo urbano di tipo modulare e multifunzionale**, che esalti tali qualità.

5.2.1 - Raccolta Dati

La raccolta dati è suddivisibile a seconda dei diversi aspetti trattati:

1. Tipologie costruttive per strutture automobilistiche;
2. Materiali e tecnologie di lavorazione e giunzione;
3. Requisiti progettuali e costi di produzione;
4. Stato della tecnica;
5. Soluzioni alternative di City Car;
6. Normative tecniche e Codice della Strada.

I primi quattro aspetti, fondamentali per poter effettuare scelte progettuali coerenti e consapevoli, sono state ampiamente trattate nei Capitoli precedenti.

I rimanenti vengono presi in esame nel presente Sottoparagrafo.

Soluzioni alternative di City Car

Le informazioni raccolte riguardo City Car di attuale produzione o presentate in via sperimentale, indicano una notevole varietà sia rispetto alle tecnologie utilizzate ed al tipo di propulsione che alla configurazione stessa del mezzo.

Per quanto riguarda le tecnologie, valutazioni preliminari e di confronto possono basarsi sulle considerazioni già espresse precedentemente.

Per ciò che concerne il tipo di propulsione, pur non costituendo l'oggetto del presente Lavoro, si possono fare alcune considerazioni ed assunzioni:



Le alternative possibili appaiono le seguenti:

- Propulsione mediante motore elettrico;
- Propulsione mediante motore a combustione interna.
- Propulsione ibrida.

Si può in questa sede escludere la propulsione puramente elettrica, in quanto pone delle problematiche logistiche e tecniche tali da non permettere, almeno nel panorama attuale, una estesa diffusione, auspicabile al fine di contribuire ad un concreto miglioramento delle condizioni di inquinamento e di traffico dei centri urbani ad elevata densità.

Le rimanenti alternative presentano entrambe interessanti caratteristiche, e si cercherà lo sviluppo di una struttura che, a partire da una propulsione con motore a combustione interna, possa anche consentire l'impiego di della propulsione ibrida.

Per quanto riguarda invece la configurazione del veicolo, possono essere prima di tutto individuate **tre tipologie principali**:

- Vettura per trasporto passeggeri 2 posti;
- Vettura per trasporto passeggeri 4-5 posti;
- Vettura per trasporto merci.

All'interno delle singole categorie si presentano esigenze specifiche per cui verranno date soluzioni distinte tra loro a partire da una struttura comune.

Normative tecniche e Codice della Strada

Al fine della realizzazione di un nuovo Sistema Meccanico e durante il suo utilizzo è vincolante il rispetto delle Normative e regole vigenti.

Sono di seguito riportate Norme tecniche e decreti legislativi inerenti il SM in argomento.



Per quanto riguarda la normativa in caso di city-car essa è molto varia e a tal proposito non c'è una definizione esatta. Essa, infatti, si confonde in generale con quella riguardante il parco macchine.

La classificazione di base relativa alla tipologia di veicolo, distingue principalmente le **automobili** dai “**quadricli**” (veicoli leggeri motorizzati a quattro ruote). Questi ultimi vengono suddivisi in due sottogruppi dalla direttiva 92/61CE del 1992, adottata dall' Italia tramite il Decreto Ministeriale del 5 Aprile del 1994:

- **Quadricicli leggeri** considerati come **ciclomotori**.

Sono guidabili senza patente a partire dai 14 anni, con una sola persona a bordo, e devono avere le seguenti caratteristiche di base:

- massa a vuoto minore di 350 kg;
- velocità massima non superiore a 45 km/h;
- motore ad accensione comandata con cilindrata non superiore a 50 cc o altro motore con potenza limitata a 4 kW.

- **Quadricicli** considerati come **motocicli** ai sensi dell' art. 53 del nuovo Codice della strada.

Sono guidabili a partire dai 16 anni con patente "A" (da 18 anni se con il passeggero), e devono avere le seguenti caratteristiche di base:

- massa a vuoto non superiore a 400 kg (550 kg per trasporto merci), esclusa la massa delle batterie per i veicoli elettrici;
- potenza massima fino a 15 kW.

La prima soluzione appare fortemente limitante, soprattutto in relazione alla bassa potenza disponibile ed alla massima velocità raggiungibile, che non consentirebbero un utilizzo della vettura in tratti extraurbani o comunque a scorrimento medio-veloce.

La soluzione di quadriciclo si rivela invece vantaggiosa in termini economici (costi assicurativi e fiscali) e di impiego (possibilità di accesso a zone “protette” come centri storici): le uniche limitazioni appaiono quelle relative al numero di passeggeri



trasportabili (due) e al carico massimo consentito (550 kg per la vettura in ordine di marcia).

Nell'ottica di una marcata **multifunzionalità** della vettura in esame, appare quindi auspicabile la possibilità di adattare le diverse varianti della struttura di base alla classe di quadriciclo o di autovettura, a seconda delle esigenze riguardo al numero di posti ed alla massa del carico trasportabile.

La **configurazione base** sarà comunque quella di **quadriciclo**.

Vengono di seguito riportate le norme tecniche relative:

- **80/1269/CEE da ultimo emendata dalla 81/491/CEE** – Coppia massima e potenza massima netta del motore ad accensione comandata o spontanea.
- **70/221/CEE da ultimo emendata dalla 81/333/CEE** – Serbatoio di carburante.
- **92/21/CEE** – Masse e dimensioni.
- **Traino di rimorchio proibito.**
- **Procedura di misura stabilita da apposita norma CUNA** – Velocità massima per costruzione del veicolo.
- **70/220/CEE da ultimo emendata dalla 93/59/CEE; per fumosità diesel 72/306/CEE; 88/77/CEE da ultimo emendata dalla 91/542/CEE** – Misure contro l'inquinamento atmosferico.
- **92/23/CEE** – Pneumatici.
- **71/320/CEE da ultimo emendata dalla 91/422/CEE** – Frenatura.
- **76/756/CEE da ultimo emendata dalla 91/663/CEE** – Installazione dei dispositivi di illuminazione e di segnalazione luminosa sul veicolo.
- **76/757/CEE; 76/758/CEE e 89/516/CEE** – Dispositivi di illuminazione e di segnalazione luminosa, la cui presenza obbligatoria o facoltativa è stabilita nelle prescrizioni di installazione di cui al punto precedente.
- **70/388/CEE** – Avvisatore acustico.
- **70/222/CEE** – Alloggiamento della targa di immatricolazione posteriore.



- **72/245/CEE da ultimo emendata dalla 89/491/CEE** – Compatibilità elettromagnetica.
- **70/157/CEE da ultimo emendata dalla 92/97/CEE** – Livello di scarico e livello sonoro.
- **71/127/CEE da ultimo emendata dalla 88/321/CEE** – Retrovisore o retrovisori.
- **74/483/CEE da ultimo emendata dalla 92/114/CEE** – Sporgenze esterne.
- **74/61/CEE** – Dispositivi di protezione contro un impiego non autorizzato del veicolo.
- **92/22/CEE** – Vetri, tergicristalli, lavacristalli e dispositivi di sbrinamento e di disappannamento.
- **76/115/CEE da ultimo emendata dalla 90/629/CEE e 77/541/CEE da ultimo emendata dalla 90/628/CEE** – Ancoraggi delle cinture di sicurezza .
- **78/316/CEE** – Identificazione di comandi, spie e indicatori.
- **Art.74 del nuovo C.d.S. e 76/114/CEE** – Iscrizioni regolamentari (contenuto, posizione e tipo di fissaggio).
- **Certificato di omologazione e certificato di approvazione**
 - Per ogni tipo di veicolo da essa omologato, l' autorità competente compila tutte le rubriche del certificato di omologazione.
 - Per ogni tipo di entità tecnica o di componente da essa approvato, l' autorità competente compila le rubriche del certificato di approvazione riportato in un allegato o in una appendice dell DP relativa all' entità tecnica o al componente in questione.

5.2.2 - Studio di fattibilità

In questa fase occorre verificare la fattibilità tecnica ed economica.

Per quanto riguarda la prima, si può fare riferimento alle considerazioni espresse nei Capitoli precedenti.

Per quanto riguarda l'aspetto economico, già trattato a livello di materiali, componenti e lavorazioni, va notato che in termini di costi complessivi esso appare particolarmente rilevante per le City Car in quanto la loro diffusione è oggi



ostacolata principalmente dai prezzi molto elevati, mediamente intorno ai 19 milioni di lire, allineati con quelli di autovetture appartenenti a segmenti superiori (A e B). Risulta quindi necessario contenere i costi complessivi entro un livello sufficientemente lontano da questa soglia, e la valutazione economica delle varie soluzioni sarà cruciale nelle scelte progettuali.

La City Car dovrà essere ecologica, multifunzione, con dimensioni che rispecchino quelle delle altre City Car in commercio, rispettando allo stesso tempo le normative vigenti in merito.

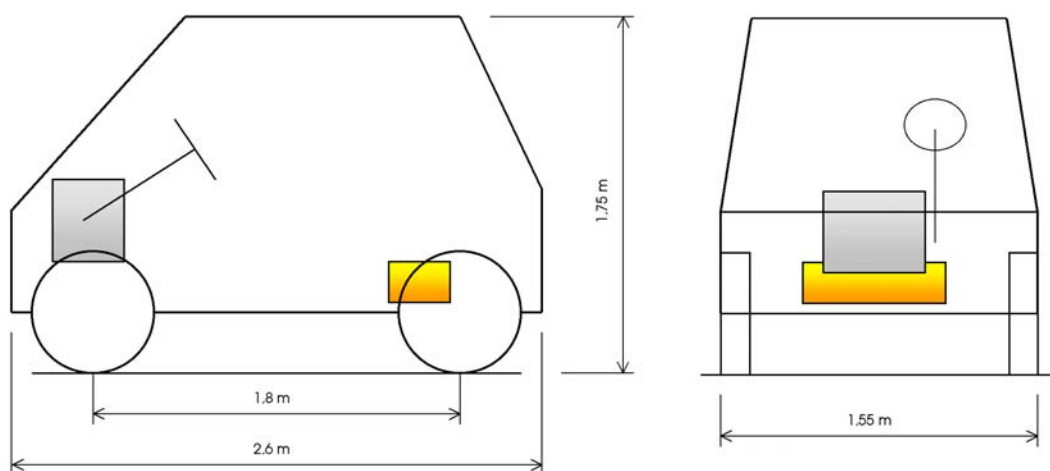


Fig. 5.2.1 - Layout generale e dimensioni massime della City Car

In particolare poi appare importante conferire alla vettura un aspetto indipendente rispetto ai canoni estetici e geometrici delle normali vetture di classe A e B, in modo da poter essere percepita come una nuova classe di veicolo e non come una normale automobile ridimensionata e spogliata delle dotazioni più costose.

Per quanto riguarda le principali caratteristiche meccaniche, si può presentare una scheda che riassume le assunzioni fatte, derivanti dallo studio delle soluzioni in commercio e dalla volontà di impiegare soluzioni affidabili ed economiche:



Tabella 5.2.1 - Caratteristiche meccaniche ipotizzate

| | |
|-------------------------------|---|
| Propulsione | MCI (Diesel o benzina) Ibrida |
| Posizione motore | Anteriore trasversale |
| Trazione | Anteriore |
| Potenza max | 11-40 kW |
| Capacità serbatoio carburante | 20 litri |
| Trasmissione | Automatica (frizione centrifuga o CVT) |
| Freni anteriori | Disco |
| Freni posteriori | Disco o tamburo |

5.2.3 - Lista dei Requisiti

La precedente raccolta dei dati, il campo di applicazione scelto e le considerazioni fatte in precedenza, in particolare nel Capitolo 4, consentono la stesura della lista sistematica dei requisiti richiesti.

Gli aspetti principali più rilevanti sono:

- **Funzione:** la funzione della city-car è quella di permettere rapidi ed agevoli spostamenti urbani, nel rispetto delle esigenze ambientali.
- **Condizioni d'impiego:** uso prevalentemente urbano, ma con possibilità di percorsi extraurbani (tangenziali,...).
- **Dimensioni, peso e prestazioni:** in linea con le altre city-car in commercio.
Le prestazioni in termini di velocità sono connesse alla scelta del sistema di propulsione (termico, elettrico, termico + elettrico).
- **Caratteristiche del motore:** seguendo le normative riguardanti le city-car, ed in particolare quella sui quadricicli, sembra adeguata la soluzione di una potenza complessiva di 11 kW per un sistema di propulsione ibrido (4 kW è una potenza troppo ridotta).
- **Manutenzione ordinaria e straordinaria:** deve essere generalmente semplice, con frequenza ridotta e costi contenuti.



- **Impatto ambientale:** il progetto va affrontato tenendo sotto controllo la compatibilità del prodotto e del processo produttivo con l'ambiente. Per non avere problemi in fase di dismissione del prodotto, bisogna eseguire un'attenta progettazione fin dall'inizio; inoltre aspetti da valutare attentamente sono la scelta di materiali e di un processo produttivo finalizzati ad un basso consumo energetico ed emissioni contenute.
- **Sicurezza:** deve essere garantita un'elevata sicurezza attiva e passiva, con rispetto delle norme vigenti.
- **Produzione:** in fase di progettazione del SM occorre considerare anche le fasi successive di produzione e distribuzione. Solo con un progetto pensato per l'intero ciclo di vita del prodotto si riescono a raggiungere i risultati desiderati.
- **Costi:** considerando la bassa diffusione delle piccole auto da città, introdurre un prodotto non economico, anche se innovativo, porterebbe ad un probabile insuccesso commerciale; quindi il progetto deve sempre procedere tenendo presente il contenimento dei costi.



| LISTA DEI REQUISITI | | |
|---|-----------|------------|
| CARATTERISTICHE DEL SM | RICHIESTO | DESIDERATO |
| FUNZIONE | | |
| Trasporto di persone e merci | • | |
| CONDIZIONI DI IMPIEGO | | |
| Impiego urbano | • | |
| Impiego extraurbano | • | |
| Impiego con condizioni metereologiche sfavorevoli | • | |
| CORPO VETTURA | | |
| 2 posti | • | |
| 4 posti | | • |
| Capacità di carico minima 150 l | • | |
| DIMENSIONI E PESO | | |
| Lunghezza max 3000 mm | • | |
| Lunghezza max 2600 mm | | • |
| Larghezza max 1350-1500 mm | • | |
| Altezza max 1450-1750 mm | • | |
| Peso max a vuoto senza batterie 350-400 kg | • | |
| Peso max a pieno carico 550 kg | • | |
| SPECIFICHE TECNICHE GENERALI DEL VEICOLO | | |
| Propulsione mediante MCI | • | |
| Propulsione ibrida | | • |
| PRESTAZIONI | | |
| Stabilità e tenuta di strada elevate | • | |
| SICUREZZA | | |
| Elevata sicurezza attiva e passiva | • | |
| Rispetto norme vigenti | • | |
| Sicurezza superiore a quella indicata dalle norme vigenti | | • |



| | | |
|--|---|---|
| COMFORT DI MARCIA | | |
| Isolamento acustico e vibrazionale dell'abitacolo | ● | |
| Abitabilità adeguata | ● | |
| Facile accessibilità | ● | |
| Visibilità | ● | |
| AFFIDABILITÀ | | |
| Elevata | ● | |
| MANUTENZIONE | | |
| Accessibilità per la manutenzione | ● | |
| Semplicità di riparazioni e/o sostituzioni strutturali | ● | |
| Resistenza ad impatti a bassa velocità | ● | |
| Resistenza ad ammaccature e graffi | ● | |
| Semplicità di sostituzione pannelli esterni | ● | |
| Facile reperibilità dei ricambi | ● | |
| INTERNI | | |
| Ergonomici | ● | |
| Confortevoli | ● | |
| ESTETICA | | |
| Forma gradevole | ● | |
| Forma innovativa | | ● |
| IMPATTO AMBIENTALE | | |
| Emissioni inquinanti secondo le norme vigenti | ● | |
| Emissioni inquinanti inferiori alle norme vigenti o nulle | | ● |
| Utilizzo di materiali riciclati | | ● |
| Utilizzo di tecnologie con bassi livelli di emissioni inquinanti | | ● |
| PRODUZIONE | | |
| Facilità di produzione ed assemblaggio | ● | |
| Volumi produttivi di piccola serie | ● | |



| | | |
|--|---|---|
| Facilità di conversione del tipo di vettura (trasporto persone, merci) | • | |
| Minimizzazione del numero di componenti | | • |
| Utilizzo di componenti standard | | • |
| Utilizzo di componenti modulari | | • |
| COSTI | | |
| Prezzo di vendita allineato a quello delle altre City Car | • | |
| Prezzo di vendita inferiore a quello delle altre City Car | | • |
| Bassi costi di manutenzione | • | |
| Bassi costi dei ricambi | • | |
| LIQUIDAZIONE | | |
| Utilizzo di materiali riciclabili | • | |
| Facilità di disassemblaggio | • | |
| Facilità di riciclaggio | • | |
| Inquinamento da liquidazione minimo | | • |



5.3 - CONCEZIONE DEL SISTEMA MECCANICO

In questa seconda fase è effettuata la definizione delle proprietà e delle funzioni che il sistema meccanico in fase di progetto deve avere.

Si farà riferimento al veicolo nel suo complesso per poi approfondire le funzioni specifiche dello Space Frame.

5.3.1 - Studio della Funzione

La Funzione è il compito che il **Sistema Meccanico** (SM) deve svolgere. Essa è anche detta Funzione Globale. Nel nostro caso la Funzione del **SM (City Car)** è quella di **trasportare** persone e merci da un luogo ad un altro con particolare riferimento all'**ambito urbano**.

Principio Tecnologico

Il **Principio Tecnologico** stabilisce il **tipo di trasformazione** che deve subire l'operando e, di conseguenza, la successione delle operazioni atte a realizzare tale operazione.

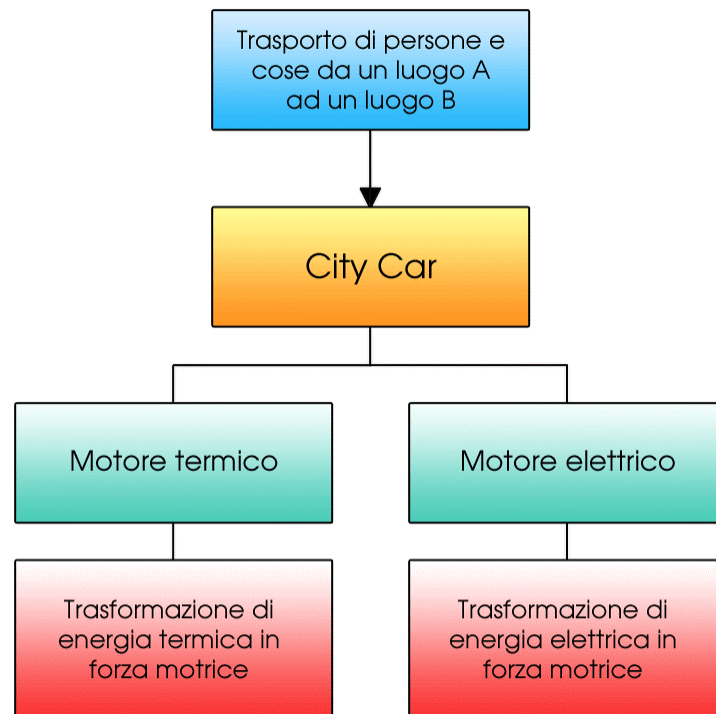
Nel nostro caso gli operandi, ovvero le persone e le cose, devono subire una trasformazione di posizione e quindi il principio tecnologico consiste nell'individuare il modo più opportuno per permettere agli operandi di compiere un determinato percorso.

I principi che realizzano la funzione richiesta sono:

- Principio tecnologico che sfrutta le proprietà dei motori termici, cioè il **principio termico**;
- Principio tecnologico che sfrutta le proprietà dei motori elettrici, cioè il **principio elettrico**, nel caso di motorizzazione ibrida.



Diagramma 5.3.1 - Principio Tecnologico



Processo Tecnico

Il **Processo Tecnico** (PT) è un processo artificiale ideato dall'uomo per realizzare una trasformazione di entità in base alla scelta del Principio Tecnologico e della tecnologia.

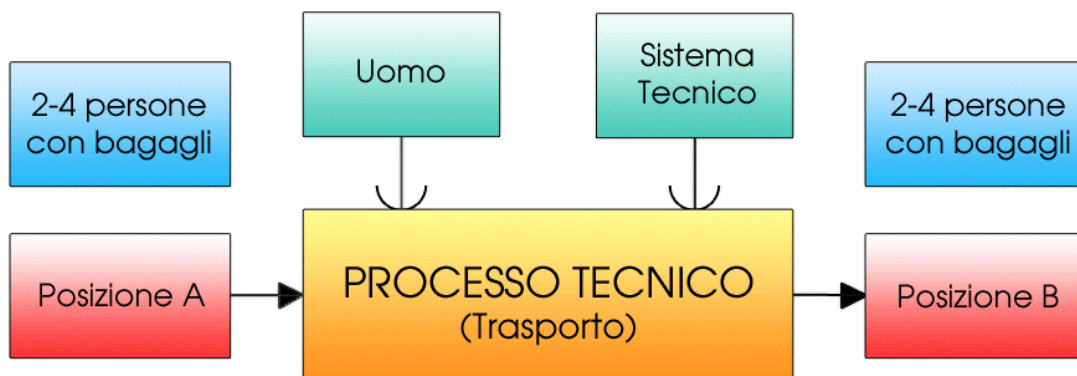
Nel PT gli stati degli oggetti (operandi) vengono intenzionalmente trasformati. Il mezzo attraverso il quale si compie questa trasformazione è il Sistema Meccanico (SM).

Nel caso della City Car l'operando è rappresentato dall'insieme uomini e cose che devono essere trasportati da un luogo ad un altro della città.

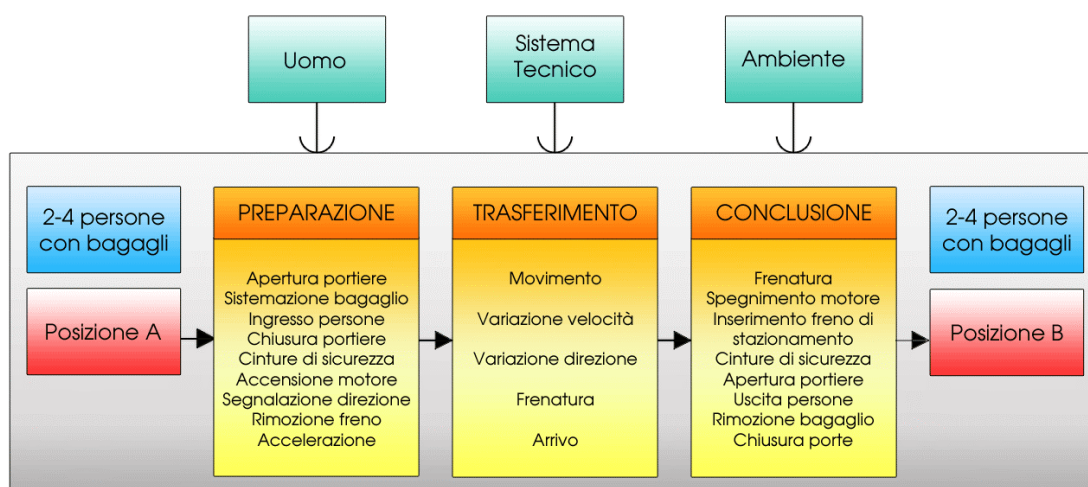
Il **Processo Tecnico** è il **trasporto**, il **Sistema Meccanico** è il **veicolo**.

Il PT viene rappresentato in due modi differenti:

- Sotto forma di una “scatola nera” (*Black Box*) nella quale è indicato solo il tipo di trasformazione subita dagli operandi (vedi Diagramma 5.3.2);

**Diagramma 5.3.2 - Black Box del Processo Tecnico**

- Sotto forma di diagrammi a blocchi dove sono visibili tutte le fasi in cui si articola il processo di trasformazione dell' operando (*Glass Box* – vedi Diagramma 5.3.3).

Diagramma 5.3.3 - Glass Box del Processo Tecnico



Struttura della Funzione

La **Funzione Globale** è realizzabile attraverso l'attuazione di funzioni parziali.

La sua analisi consente di elaborare la **Struttura della Funzione**, che rappresenta l'insieme di queste Funzioni Parziali finalizzate alla funzione globale stessa.

La Struttura della Funzione contiene tutte quelle operazioni parziali, relative principalmente al Sistema Tecnico, che devono essere realizzate per giungere alla trasformazione desiderata.

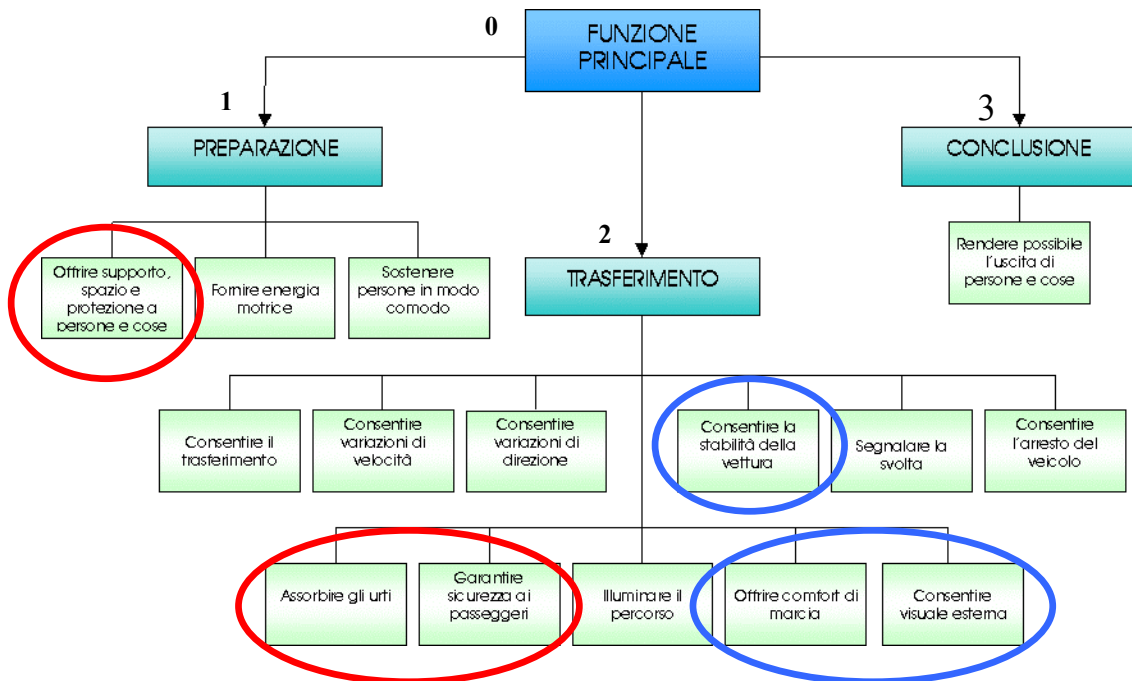
Essa inoltre visualizza il legame che intercorre tra queste operazioni disponendole su vari livelli secondo un ordine gerarchico e consequenziale: ogni azione indicata in un livello è compresa in quella del livello superiore e comprende quelle al livello inferiore.

Tabella 5.3.1 - Schema generale della Struttura della Funzione

| N° | FUNZIONE PARZIALE | MODULI FUNZIONALI |
|----|--|--|
| 1 | Offrire spazio, supporto e protezione a persone e cose | Carrozzeria e telaio |
| 2 | Fornire energia motrice | Gruppo motopropulsore |
| 3 | Sostenere le persone in modo comodo | Sedili |
| 4 | Garantire sicurezza ai passeggeri | Sistemi di sicurezza attiva e passiva |
| 5 | Offrire comfort di marcia | Abitabilità, servocomandi e sistema di aerazione |
| 6 | Consentire variazioni di velocità | Cambio |
| 7 | Rendere possibile l'entrata e l'uscita di persone e cose | Portiere |
| 8 | Consentire la visuale esterna | Cristalli |
| 9 | Variazione della direzione di marcia | Sistema di sterzata |
| 10 | Consentire il trasferimento | Ruote |
| 11 | Consentire la stabilità della vettura | Sospensioni |
| 12 | Variazione di velocità ed arresto del veicolo | Impianto frenante |
| 13 | Assorbimento urti | Gruppi paraurti anteriore e posteriore |
| 14 | Illuminazione del percorso, segnalazione di svolta, indicazione della propria posizione. | Impianto elettrico e luci |



Diagramma 5.3.4 - Schema a blocchi della Struttura della Funzione



Nella Tabella 5.3.1 e nel Diagramma 5.3.4 sono riportati rispettivamente uno schema generale ed uno schema a blocchi della Struttura della Funzione.

In particolare nel Diagramma 5.3.4 le parti indicate sono quelle di interesse per la configurazione generale del veicolo e per il telaio.

Quelle evidenziate in **rosso** sono le **più importanti** e direttamente correlate al telaio. Quelle evidenziate in **blu** sono **secondarie** e relative rispettivamente alla rigidezza per quanto riguarda la stabilità della vettura, al comportamento NVH per il comfort di marcia (relativamente a rumore e vibrazioni) e alla configurazione della cella abitacolo per quanto riguarda la visibilità.



5.3.2 - Attuatori delle Funzioni Parziali

Le funzioni parziali correlate con il telaio vengono a loro volta suddivise in sottofunzioni, in modo da giungere alla definizione dei singoli moduli funzionali attuatori di tali sottofunzioni, senza entrare nel merito della loro tipologia costruttiva.

Tabella 5.3.2 - Analisi delle Funzioni Parziali del telaio e dei Moduli Funzionali corrispondenti

| FUNZIONE PARZIALE | SOTTOFUNZIONI | MODULI FUNZIONALI |
|--|--|---|
| R.P. LA SISTEMAZIONE, IL SUPPORTO E LA PROTEZIONE DI PERSONE E COSE | R.P. l'ancoraggio del gruppo propulsore | Supporti motore |
| | R.P. il supporto del gruppo propulsore | Elementi longitudinali anteriori |
| | R.P. il supporto per i passeggeri e i componenti interni | Pianale |
| | R.P. il supporto per il bagaglio | Elementi longitudinali e trasversali posteriori |
| | R.P. l'ancoraggio ed il supporto per le sospensioni anteriori | Gruppi passaruota-duomi anteriore |
| | R.P. l'ancoraggio ed il supporto per le sospensioni posteriori | Gruppi passaruota-duomi posteriore |
| | R.P. la chiusura laterale dell'abitacolo | Portiere Montanti A e B inferiori |
| | R.P. la copertura dell'abitacolo | Montanti superiori Traverse tetto SRR |
| | R.P. l'isolamento dal vano motore | Elementi parafiamma |



| | | |
|---|--|--------------------------------|
| R.P. LA SICUREZZA PER I PASSEGGERI | R.P. la protezione da impatti anteriori | Barra paraurti anteriore |
| | R.P. la protezione da impatti posteriori | Barra paraurti anteriore |
| | R.P. la protezione delle gambe dei passeggeri da urti laterali | Longheroni |
| | R.P. la protezione dei fianchi e del busto dei passeggeri da urti laterali | Barre laterali anti-intrusione |
| | R.P. l'assorbimento di urti anteriori | Puntoni anteriori |
| | R.P. l'assorbimento di urti posteriori | Puntoni posteriori |
| | R.P. la protezione da ribaltamento | Cella abitacolo |
| R.P. LA STABILITÀ DELLA VETTURA | R.P. la rigidezza della struttura | Telaio |
| R.P. IL COMFORT DI MARCIA | R.P. l'isolamento da rumore e vibrazioni | Telaio |
| R.P. LA VISUALE ESTERNA | R.P. gli angoli di visuale | Vetratura cella abitacolo |



Tabella Morfologica

Una volta definite le Funzioni Parziali e le corrispondenti Sottofunzioni, tenendo anche conto della Tabella 5.3.2, può essere compilata la **Tabella Morfologica** (Tabella 5.3.3), che **associa** ad ogni **Funzione** i possibili **Moduli Funzionali** adottabili e le relative **soluzioni costruttive** alternative, secondo quanto visto nei primi 3 Capitoli.

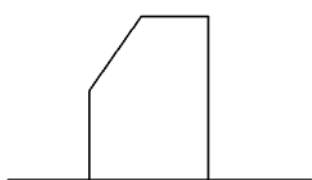
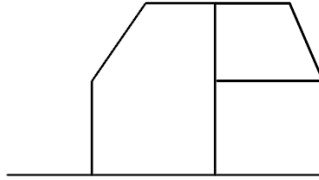
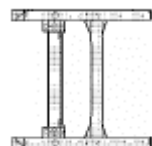

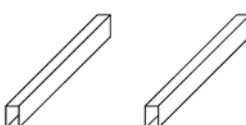
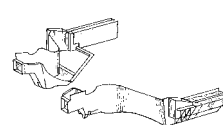
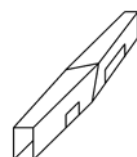
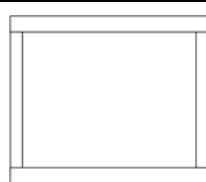
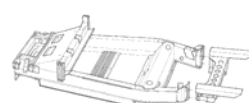
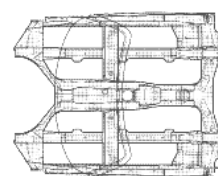
Ad ogni soluzione costruttiva viene associata una **valutazione** relativa a tre aspetti:

- **P - Prestazioni assolute** (in termini di resistenza, rigidità, riduzione di peso);
- **F - Prestazioni** in termini di **flessibilità e modularità** della struttura;
- **C - Costi realizzativi**.

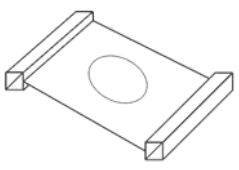
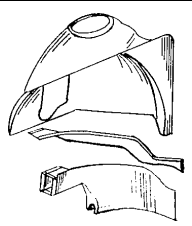
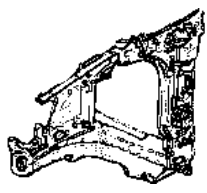
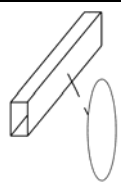
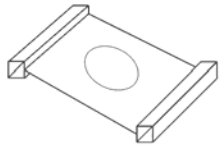
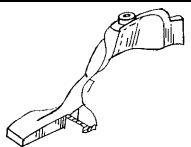


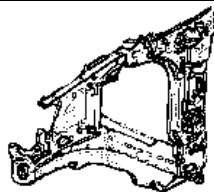



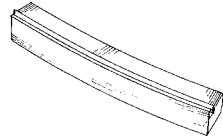

Tale valutazione è espressa mediante un numero compreso tra 1 (peggiore) e 5 (migliore).



Tabella 5.3.3 - Tabella Morfologica

| FUNZIONE | | MODULI FUNZIONALI E SOLUZIONI COSTRUTTIVE | | | | | | | | |
|--|---|---|-----|--|-----|---|---|-----|-----|--|
| R.P. LA TRASLAZIONE | Ruote con cerchi da 13'' | | | Ruote ribassate (PAX System - Michelin) | | | Ruote con cerchi da 11-12'' | | | |
| | P 4 | F 3 | C 4 | P 4 | F 5 | C 2 | P 1 | F 4 | C 5 | |
| R.P. LA PROTEZIONE DA RIBALTAMENTO |  | | | | |  | | | | |
| | Cella abitacolo anteriore | | | | | Cella abitacolo estesa | | | | |
| | P 2 | F 5 | C 5 | P 5 | F 3 | C 3 | | | | |
| R.P. L'ANCORAGGIO DEL GRUPPO PROPULSORE |  | | | | |  | | | | |
| | Elementi trasversali | | | | | Supporti a mensola | | | | |
| | P 4 | F 4 | C 3 | P 4 | F 4 | C 4 | | | | |
| R.P. IL SUPPORTO DEL GRUPPO PROPULSORE |  | | |  | | |  | | | |
| | Profilati longitudinali estrusi rettilinei | | | Elementi longitudinali stampati | | | Profilati longitudinali idroformati | | | |
| | P 4 | F 5 | C 4 | P 5 | F 2 | C 2 | P 5 | F 4 | C 2 | |
| R.P. IL SUPPORTO PER I PASSEGGERI E I COMPONENTI INTERNI |  | | |  | | |  | | | |
| | Pianale a longheroni e traverse | | | Pianale scatolato | | | Pianale ottimizzato | | | |
| | P 3 | F 5 | C 4 | P 4 | F 3 | C 3 | P 5 | F 2 | C 2 | |

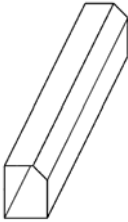
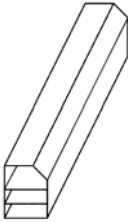


| | | | | | | | | | |
|---|---|-----|-----|---|-----|-----|--|-----|-----|
| R.P. L'ANCORAGGIO ED IL SUPPORTO PER LE SOSPENSIONI ANT. |  Passaruota-duomi anteriori con piastra su elementi estrusi | | |  Passaruota-duomi anteriori Stampati | | |  Nodi multifunzionali pressofusi | | |
| | P 2 | F 4 | C 3 | P 5 | F 2 | C 2 | P 4 | F 2 | C 1 |
| R.P. L'ANCORAGGIO ED IL SUPPORTO PER LE SOSPENSIONI POST. |  Connessione di retta su profilati | | |  Piastra su profilati estrusi | | |  Stampati | | |
| | P 2 | F 4 | C 5 | P 4 | F 4 | C 4 | P 5 | F 3 | C 2 |
| R.P. LA CHIUSURA LATERALE DELL'ABITACOLO ANTERIORMENTE |  Montanti A inferiori estrusi | | |  Montanti A inferiori stampati | | |  Nodi multifunzionali pressofusi | | |
| | P 3 | F 4 | C 4 | P 4 | F 3 | C 2 | P 4 | F 2 | C 2 |
| R.P. LA CHIUSURA LATERALE DELL'ABITACOLO CENTRALMENTE |  Montanti B estrusi | | |  Montanti B stampati | | |  Montanti B pressofusi | | |
| | P 2 | F 4 | C 4 | P 4 | F 2 | C 2 | P 4 | F 1 | C 2 |
| R.P. LA COPERTURA DELL'ABITACOLO |  Traverse estruse | | |  Traverse stampate | | | | | |
| | P 5 | F 4 | C 4 | P 5 | F 3 | C 2 | | | |



| | | | | | | | | | |
|---|---|-----|-----|---|-----|-----|--|-----|-----|
| R.P. LA COPERTURA DELL'ABITACOLO | SRR estrusi | | | SRR idroformati | | | SRR tubolari | | |
| | P 4 | F 5 | C 4 | P 5 | F 2 | C 2 | P 4 | F 3 | C 4 |
| R.P. LA PROTEZIONE DA URTI ANTERIORI | Barra paraurti anteriore estrusa rettilinea | | | Barra paraurti anteriore estrusa curvata | | | | | |
| | P 4 | F 5 | C 5 | P 5 | F 3 | C 4 | | | |
| R.P. LA PROTEZIONE DA URTI POSTERIORI | Barra paraurti posteriore estrusa rettilinea | | | Barra paraurti posteriore estrusa curvata | | | | | |
| | P 5 | F 5 | C 5 | P 5 | F 3 | C 4 | | | |
| R.P. L'ASSORBIMENTO DI URTI ANTERIORI | Puntoni anteriori estrusi connessi a membri longitudinali | | | Puntoni anteriori estrusi connessi al pianale | | | Puntoni anteriori scatolati assialsimmetrici | | |
| | P 5 | F 4 | C 4 | P 3 | F 5 | C 4 | P 5 | F 3 | C 3 |
| R.P. L'ASSORBIMENTO DI URTI POSTERIORI | Puntoni posteriori estrusi connessi a membri longitudinali | | | Puntoni posteriori estrusi connessi al pianale | | | | | |
| | P 5 | F 4 | C 3 | P 3 | F 2 | C 4 | | | |



| | | | | | | |
|---|---|-----|-----|--|-----|-----|
| R.P. LA PROTEZIONE DELLE GAMBE DEI PASSEGGERI DA URTI LATERALI |  Longheroni estrusi monocella | | |  Longheroni estrusi multicella | | |
| | P 4 | F 5 | C 5 | P 5 | F 4 | C 4 |

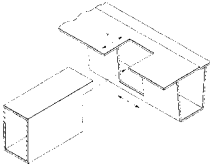
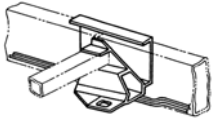
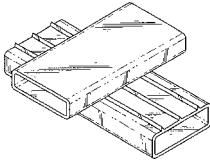
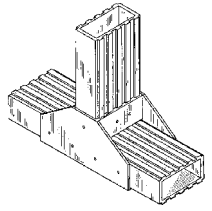
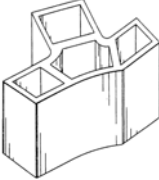
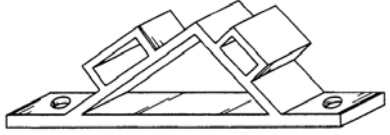
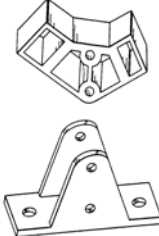
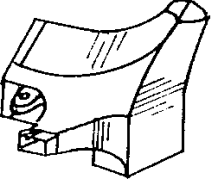


Nodi strutturali

La Tabella Morfologica vista fa riferimento ai singoli Moduli Funzionali del telaio.

Nella Tabella 5.3.4 sono riportate a titolo indicativo le principali possibilità di realizzazione dei nodi di connessione tra i vari elementi, con una valutazione analoga a quella utilizzata precedentemente.

Tabella 5.3.4 - Soluzioni alternative per nodi strutturali

| TIPO DI NODO | SOLUZIONI COSTRUTTIVE ALTERNATIVE | | | | | |
|--------------|--|-----|-----|--|-----|-----|
| Nodi 2D a T |  Giunto ad innesto | | |  Estruso di collegamento | | |
| | P 3 | F 3 | C 3 | P 4 | F 2 | C 2 |
| |  Giunzione adesiva diretta tra profilati | | |  Piastra stampata di collegamento | | |
| | P 4 | F 2 | C 2 | P 3 | F 2 | C 4 |
| Nodi 3D a T |  Nodo estruso | | |  Nodo estruso con piastra incorporata | | |
| | P 3 | F 4 | C 5 | P 3 | F 3 | C 5 |
| |  Nodo estruso e piastra (regolabile) | | |  Nodo pressofuso | | |
| | P 2 | F 4 | C 4 | P 5 | F 2 | C 2 |



5.3.3 - Schemi di Principio

In questa fase vengono effettuate, sulla base della matrice morfologica, delle combinazioni di scelte costruttive che portano alla definizione di schemi di principio differenti.

Nella fase di chiarimento del compito il campo di applicazione è stato definito in maniera abbastanza dettagliata: le decisioni in questa fase non riguardano quindi il tipo di veicolo, bensì i singoli componenti dello Space Frame.

Vengono elaborati **due schemi di principio**:

1. Una **struttura “ibrida”** che impiega i principi dello Space Frame per un numero limitato di componenti, mantenendo alcuni **componenti stampati**;
2. Uno **Space Frame vero e proprio** costituito esclusivamente da **profilati estrusi**.



Schema di Principio n.1

Nel primo Schema di Principio sono utilizzati diversi elementi stampati, specie nella zona dell'abitacolo e dei passaruota, mentre per il pianale vengono adottati profilati estrusi (vedi Figura 5.3.1).

La struttura che si ottiene è un “ibrido” tra uno Space Frame vero e proprio e una scocca stampata tradizionale, ed è analoga a quella utilizzata su alcune City Car di attuale produzione (come la Grecav EKE).

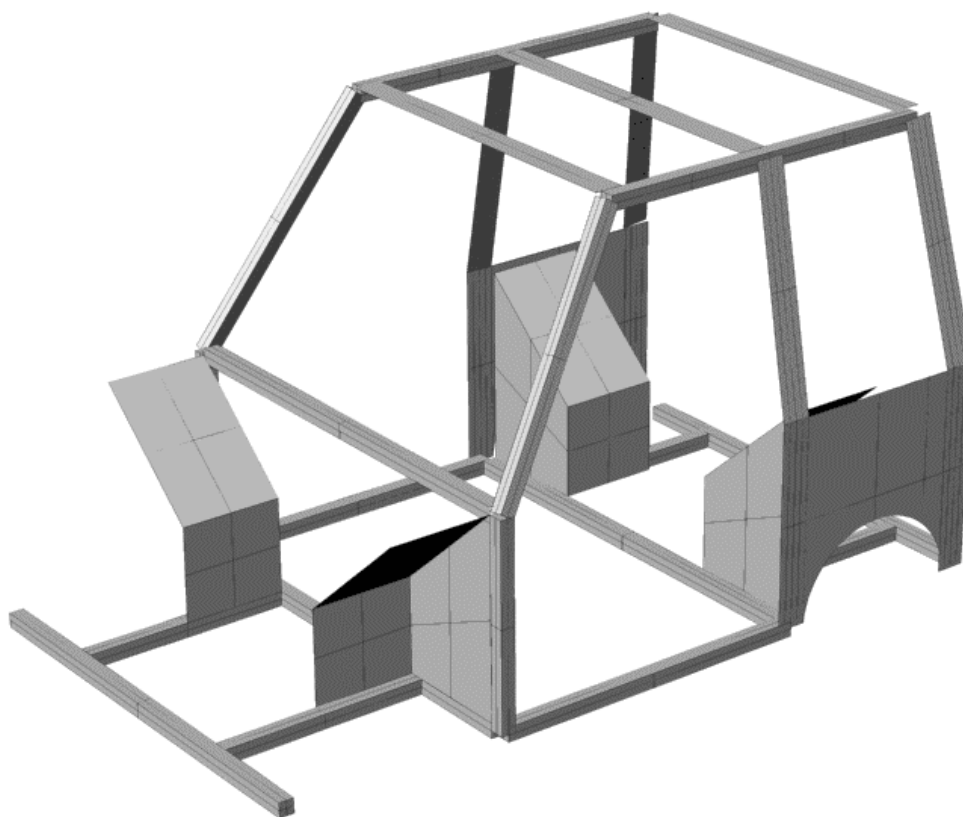


Fig. 5.3.1 - Schema di Principio n.1

Le scelte per i singoli elementi sono riportate nella Tabella 5.3.5.

**Tabella 5.3.5 - SP 1: Moduli funzionali, soluzioni costruttive e loro valutazione**

| FUNZIONE | MODULO FUNZIONALE E SOLUZIONE COSTRUTTIVA | VALUTAZIONE | | |
|--|--|-------------|-----------|-----------|
| | | P | F | C |
| R.P. LA PROTEZIONE DA RIBALTAMENTO | Cella abitacolo estesa | 5 | 3 | 3 |
| R.P. L'ANCORAGGIO DEL GRUPPO PROPULSORE | Supporti a mensola | 5 | 2 | 2 |
| R.P. IL SUPPORTO DEL GRUPPO PROPULSORE | Elementi longitudinali stampati | 4 | 4 | 4 |
| R.P. IL SUPPORTO DEI PASSEGGERI E DEI COMPONENTI INTERNI | Pianale a longheroni e traverse | 3 | 5 | 4 |
| R.P. L'ANCORAGGIO ED IL SUPPORTO DELLE SOSP. ANT. | Passaruota-duomi anteriore stampati | 5 | 2 | 2 |
| R.P. L'ANCORAGGIO ED IL SUPPORTO DELLE SOSP. POST. | Passaruota-duomi posteriori stampati | 5 | 3 | 2 |
| R.P. LA CHIUSURA LATERALE DELL'ABITACOLO ANTERIORM. | Montanti A inferiori stampati | 4 | 3 | 2 |
| R.P. LA CHIUSURA LATERALE DELL'ABITACOLO CENTRALM. | Montanti B stampati | 4 | 2 | 2 |
| R.P. LA COPERTURA DELL'ABITACOLO | Traverse stampate | 5 | 3 | 2 |
| | SRR estrusi | 4 | 5 | 4 |
| R.P. LA PROTEZIONE DA URTI ANTERIORI | Barra paraurti anteriore estrusa curvata | 4 | 3 | 4 |
| R.P. LA PROTEZIONE DA URTI POSTERIORI | Barra paraurti posteriore estrusa rettilinea | 5 | 5 | 5 |
| R.P. L'ASSORBIMENTO DI URTI ANTERIORI | Puntoni anteriori estrusi connessi a membri longitudinali | 5 | 4 | 4 |
| R.P. L'ASSORBIMENTO DI URTI POSTERIORI | Puntoni posteriori estrusi connessi a membri longitudinali | 5 | 4 | 3 |
| R.P. LA PROTEZIONE DELLE GAMBE DEI PASSEGGERI DA URTI LATERALI | Longheroni estrusi monocella | 4 | 5 | 5 |
| VALUTAZIONE COMPLESSIVA | | 67 | 53 | 48 |



Schema di Principio n.2

Nel secondo Schema di Principio vengono adottati quasi integralmente profilati estrusi, possibilmente rettilinei o curvati secondo un piano.

Si ottiene uno Space Frame vero e proprio, teso alla massimizzazione della modularità del veicolo.

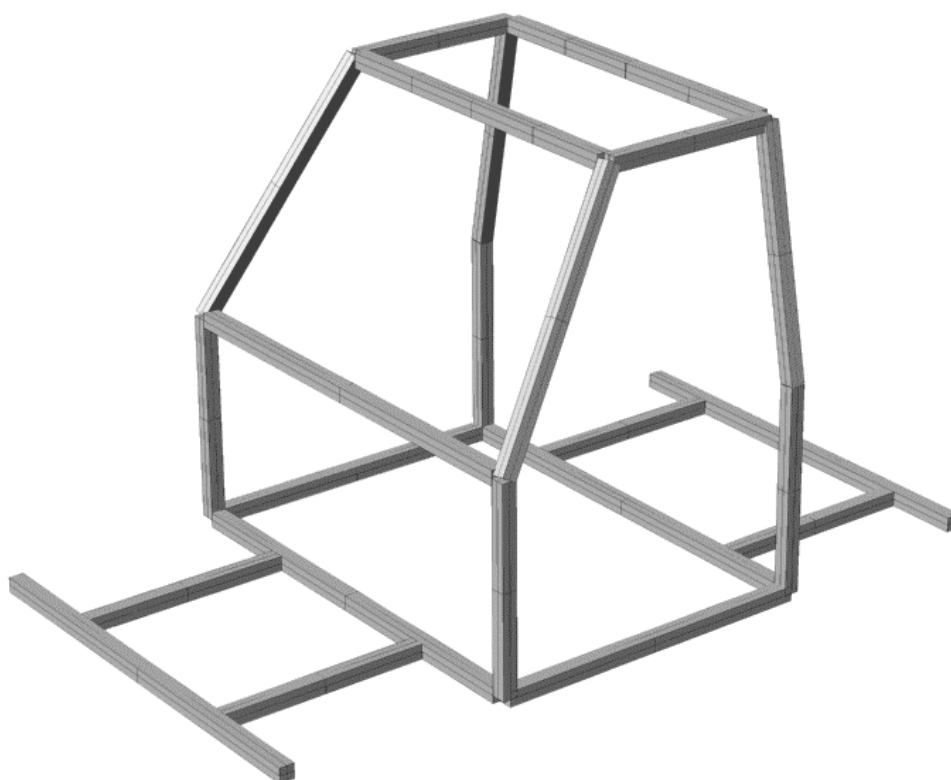


Fig. 5.3.2 - Schema di Principio n.2

Le scelte per i singoli elementi sono riportate nella Tabella 5.3.6.

**Tabella 5.3.6 - SP 2: Moduli funzionali, soluzioni costruttive e loro valutazione**

| FUNZIONE | MODULO FUNZIONALE E SOLUZIONE COSTRUTTIVA | VALUTAZIONE | | |
|--|---|-------------|-----------|-----------|
| | | P | F | C |
| R.P. LA PROTEZIONE DA RIBALTAMENTO | Cella anteriore | 2 | 5 | 5 |
| R.P. L'ANCORAGGIO DEL GRUPPO PROPULSORE | Supporti a mensola | 4 | 4 | 4 |
| R.P. IL SUPPORTO DEL GRUPPO PROPULSORE | Elementi longitudinali estrusi | 4 | 5 | 4 |
| R.P. IL SUPPORTO DEI PASSEGGERI E DEI COMPONENTI INTERNI | Pianale a longheroni e traverse | 3 | 5 | 4 |
| R.P. L'ANCORAGGIO ED IL SUPPORTO DELLE SOSP. ANT. | Lamiera stampata su elementi estrusi | 2 | 4 | 3 |
| R.P. L'ANCORAGGIO ED IL SUPPORTO DELLE SOSP. POST. | Lamiera stampata su elementi estrusi | 4 | 4 | 4 |
| R.P. LA CHIUSURA LATERALE DELL'ABITACOLO ANTERIORM. | Montanti A estrusi | 3 | 4 | 4 |
| R.P. LA CHIUSURA LATERALE DELL'ABITACOLO CENTRALM. | Montanti B estrusi | 2 | 4 | 4 |
| R.P. LA COPERTURA DELL'ABITACOLO | Traverse estruse | 5 | 4 | 4 |
| | SRR estrusi | 4 | 5 | 4 |
| R.P. LA PROTEZIONE DA URTI ANTERIORI | Barra paraurti anteriore estrusa rettilinea | 4 | 5 | 5 |
| R.P. LA PROTEZIONE DA URTI POSTERIORI | Barra paraurti posteriore estrusa rettilinea | 5 | 5 | 5 |
| R.P. L'ASSORBIMENTO DI URTI ANTERIORI | Puntoni estrusi connessi a membri longitudinali | 5 | 4 | 4 |
| R.P. L'ASSORBIMENTO DI URTI POSTERIORI | Puntoni estrusi connessi a membri longitudinali | 5 | 4 | 3 |
| R.P. LA PROTEZIONE DELLE GAMBE DEI PASSEGGERI DA URTI LATERALI | Longheroni estrusi multicella | 5 | 4 | 4 |
| VALUTAZIONE COMPLESSIVA | | 57 | 66 | 61 |



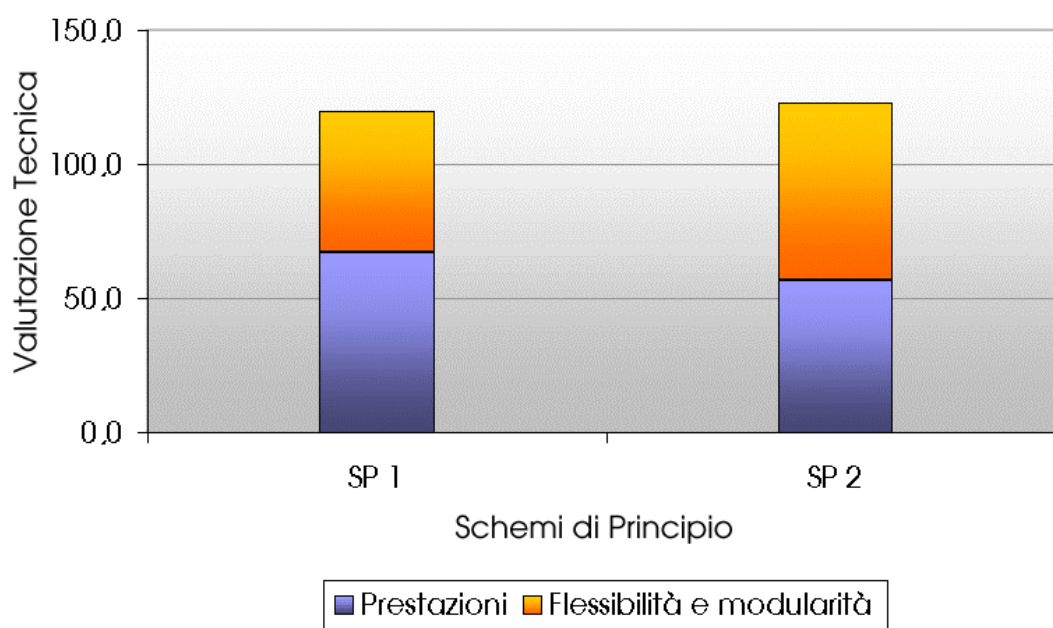
5.3.4 - Valutazione

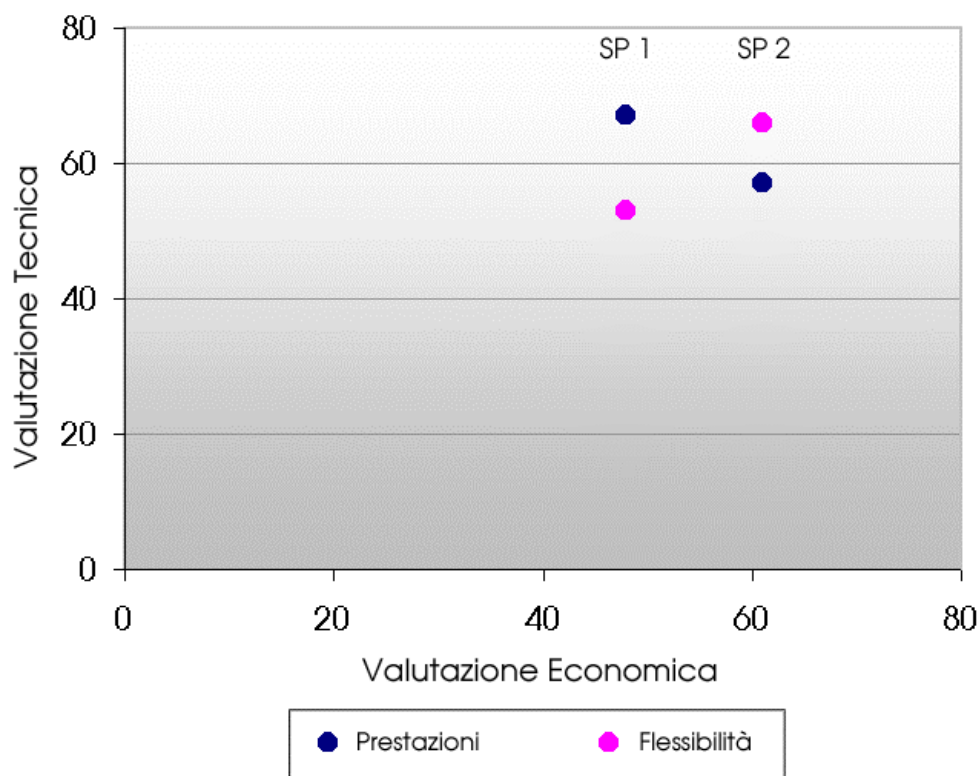
Si osserva che lo Schema di principio n.1 presenta prestazioni molto buone in termini di resistenza, rigidità e riduzione di peso. Il pianale realizzato con estrusi ne aumenta la flessibilità e modularità a livelli medi, mentre economicamente la soluzione si rivela meno competitiva.

In modo opposto si comporta lo Schema di Principio n.2, che presenta però dei costi più competitivi.

Il confronto viene rappresentato graficamente mediante i Diagrammi 5.3.5 e 5.3.6.

Diagramma 5.3.5 - Valutazione degli Schemi di Principio: ripartizione della Valutazione Tecnica



**Diagramma 5.3.6 - Valutazione degli Schemi di Principio: diagramma a dispersione**

Le valutazioni possono essere espresse anche con punteggi percentuali rispetto ai massimi ottenibili (pari a 75). Si ottengono i risultati riportati nella Tabella 5.3.7.

Tabella 5.3.7 - Valutazioni percentuali degli Schemi di Principio

| SCHEMA DI PRINCIPIO | VALUTAZIONE TECNICA | | VALUTAZIONE ECONOMICA |
|---------------------|---------------------|-------|-----------------------|
| | P (%) | F (%) | C (%) |
| SP 1 | 89,3 | 70,7 | 64,0 |
| SP 2 | 76,0 | 88,0 | 81,3 |

Come prevedibile, la valutazione non si rivela completamente a favore di una delle due soluzioni proposte.

La scelta deve tenere conto dell'importanza delle varie caratteristiche all'interno del progetto globale del veicolo.



Queste considerazioni possono essere integrate nel metodo di progettazione assegnando dei **coefficienti di ponderazione** ai due aspetti prestazionali (in termini assoluti e di flessibilità).

Nel caso particolare in studio, viste le necessità di **contenere i costi**, di avere adattabilità a **volumi di produzione ridotti** e di ottenere una **struttura flessibile e modulare**, e visto l'impiego prevalentemente urbano del veicolo, occorre dare maggior importanza (ed assegnare quindi un coefficiente di ponderazione maggiore) alla flessibilità più che alle prestazioni statiche e dinamiche.

Da tale valutazione può essere indicato come **ottimale** lo **Schema di Principio n.2**.

Si decide cioè di escludere l'impiego di componenti pressofusi e di parti stampate con geometrie complesse, in quanto, pur garantendo prestazioni ottimali per resistenza, contenimento del peso e ottimizzazione dello spazio, comportano costi di lavorazione elevati, sono poco adattabili a bassi regimi produttivi e prevedono un'elevata integrazione tra le parti che limita la flessibilità e la modularità.



5.4 - SVILUPPO DEL PROGETTO

5.4.1 - Progetto preliminare

Schematizzazione strutturale

Le due esigenze principali da tenere in considerazione sono:

- **Semplicità costruttiva**
- **Modularità del veicolo**
- **Costi di produzione ridotti**

Si intende rispondere a queste esigenze mediante un esteso utilizzo di **profilati estrusi rettilinei**.

L'impiego esteso di questo tipo di componenti trova anche una giustificazione relativa al **calcolo numerico**: la schematizzazione matematica di tali elementi risulta molto più rapida e meno onerosa dal punto di vista computazionale, in quanto si sfruttano elementi-trave tridimensionali già predefiniti negli applicativi utilizzati, senza la necessità di modellare nodi con complesse geometrie. Questo consente la drastica riduzione dei tempi di calcolo e la possibilità di effettuare analisi di sensibilità e modifiche alla struttura mediante semplici operazioni, essendo ogni elemento-trave abbinato ad una determinata sezione nel database del modello.

Per quanto riguarda il layout costruttivo, si può osservare come i profilati rettilinei siano particolarmente adatti alla realizzazione del pianale nei suoi vari elementi costitutivi: longheroni, traverse, puntoni anteriori e posteriori e barre paraurti.

Il pianale così realizzato, inoltre, consente facili modifiche dimensionali mediante l'impiego degli stessi profilati con lunghezza variabile, senza dover intervenire sui nodi strutturali e su eventuali pezzi stampati o pressofusi.



Appare quindi una scelta appropriata lo sviluppo di una struttura in cui buona parte della rigidità complessiva è fornita dal pianale, mentre la cella abitacolo costituisce prevalentemente un completamento funzionale. Ciò risulta tra l'altro in accordo con progetti recenti di City Car sperimentali, come per la Pininfarina Metrocubo, la Ford Think e le Maggiore City Magg 1 e 2.

Materiali utilizzati

Il **materiale di base** è la **lega di alluminio AA 6061T6**, scelta soprattutto per l'eccellente estrudibilità e le buone caratteristiche meccaniche.

Per i componenti meno sollecitati può essere adottata la lega 6063, che presenta minore resistenza ma estrudibilità più elevata, ed è compatibile con la 6061 ai fini della **riciclabilità** della vettura a fine vita.

Anche i pochi componenti in **lamiera stampata** è opportuno adottare una lega della serie 6000, come la **6015**.

Le proprietà meccaniche di queste leghe sono riportate nella Tabella 5.4.1.

Tabella 5.4.1 - Proprietà meccaniche dei materiali utilizzati

| Lega | Stato | Spessore [mm] | UTS [MPa] | R _{p0.2} [MPa] | A50 [%] | Estrudibilità (EAA Rating) |
|-------|-------|---------------|-----------|-------------------------|---------|----------------------------|
| 6061 | T4 | n.d. | 215 | 125 | 16 | 60 |
| | T6 | n.d. | 305 | 265 | 9 | |
| 6063A | T4 | <25 | 150 | 90 | 10 | 100 |
| | T5 | <25 | 190 | 150 | 4 | |
| | T6 | <25 | 220 | 180 | 4 | |
| 6015 | T4 | n.d. | 190 | 115 | 20 | - |



Ipotesi di calcolo

Nel condurre le simulazioni di calcolo cui si fa riferimento in questo Capitolo, si sono introdotte le seguenti ipotesi:

- **Materiale omogeneo, elastico lineare, isotropo ed omogeneo;**
- **Massa della struttura trascurabile** nella determinazione delle sollecitazioni.
Ciò rende l'analisi indipendente dal valore assoluto dei carichi applicati.
- Profilati connessi tra loro mediante **nodi infinitamente rigidi**.
Questa ipotesi di prima approssimazione è giustificata dal fatto che nella strutture reali i nodi risultano essere effettivamente i componenti dotati di maggiore rigidità.
- **Massa totale della struttura** nelle varie configurazioni determinata mediante la formula:

dove:

- ρ è la densità della lega 6061, considerata pari a $2,7 \text{ kg/dm}^3$;
- n è il numero totale dei componenti
- l_i è la lunghezza del componente i-esimo, calcolata come distanza geometrica tra i nodi estremi;
- A_i è l'area della sezione del componente i-esimo.

Essa non tiene conto della sovrapposizione dei profilati in corrispondenza ai nodi, introducendo un errore in eccesso nei risultati, compensato tuttavia dall'effettiva presenza di nodi strutturali e dall'effettivo aumento dello spessore in corrispondenza ad essi che si hanno in una struttura reale.



Metodo numerico di calcolo

In questo Sottoparagrafo è illustrata per linee generali la base teorica del metodo di calcolo utilizzato, analogo al **metodo degli spostamenti per telai piani**, ma applicato nelle tre dimensioni.

La struttura dello Space Frame può essere considerata in prima approssimazione un generico telaio tridimensionale, costituito da elementi-trave connessi tra loro mediante nodi perfettamente rigidi.

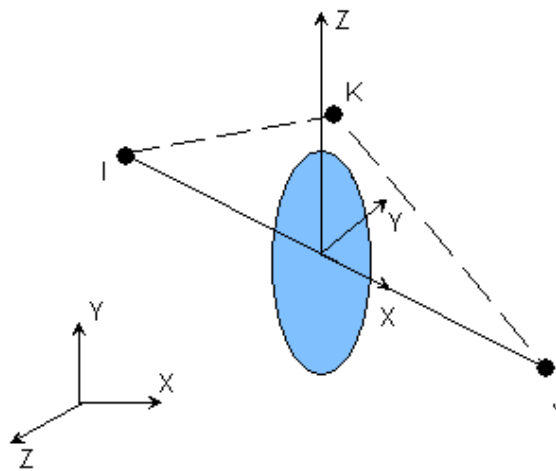


Fig. 5.4.1 - Schematizzazione dell'elemento-trave

Ogni elemento trave viene schematizzato mediante:

- I due nodi estremi I e J;
- La sezione dell'elemento perpendicolarmente all'asse della trave stessa;
- Un terzo nodo K che individua il **sistema locale di coordinate** $\{x, y, z\}$ della trave e determina l'orientamento della sezione con riguardo alla rotazione intorno all'asse della trave.

Dalle coordinate dei nodi I, J e K può essere costruita la **matrice di trasferimento** $[\lambda]$ che permette il passaggio dal sistema locale di coordinate a quello globale $\{X, Y, Z\}$.



La connessione perfettamente rigida tra elementi equivale ad imporre che gli estremi connessi abbiano spostamenti e rotazioni relative nulle: ciò può essere facilmente schematizzato utilizzando un solo nodo come estremo comune degli elementi trave convergenti nello stesso.

Ogni **nodo** ha **6 gradi di libertà**: 3 traslazioni e 3 rotazioni (vedi Figura 5.4.2).

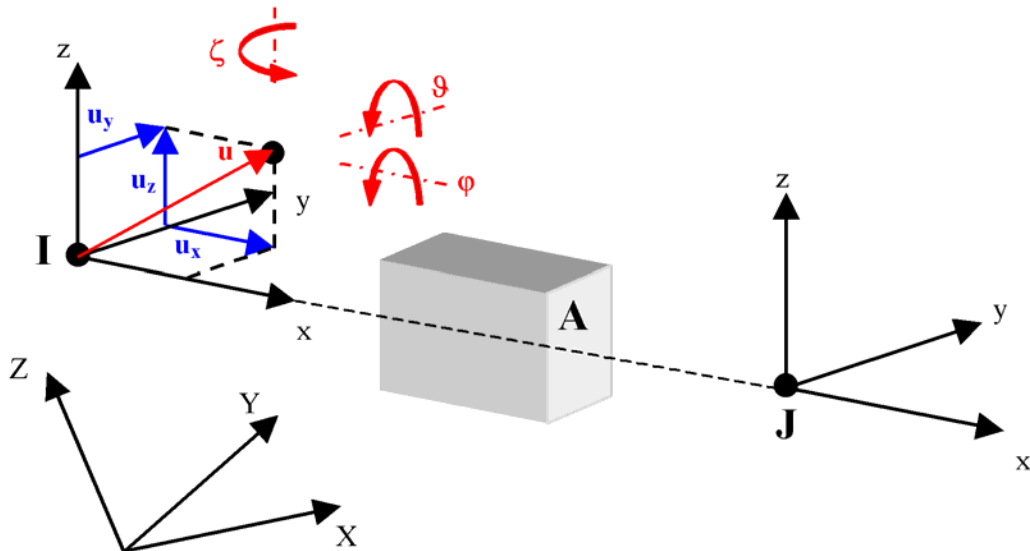


Fig. 5.4.2 - Schematizzazione degli spostamenti dei nodi

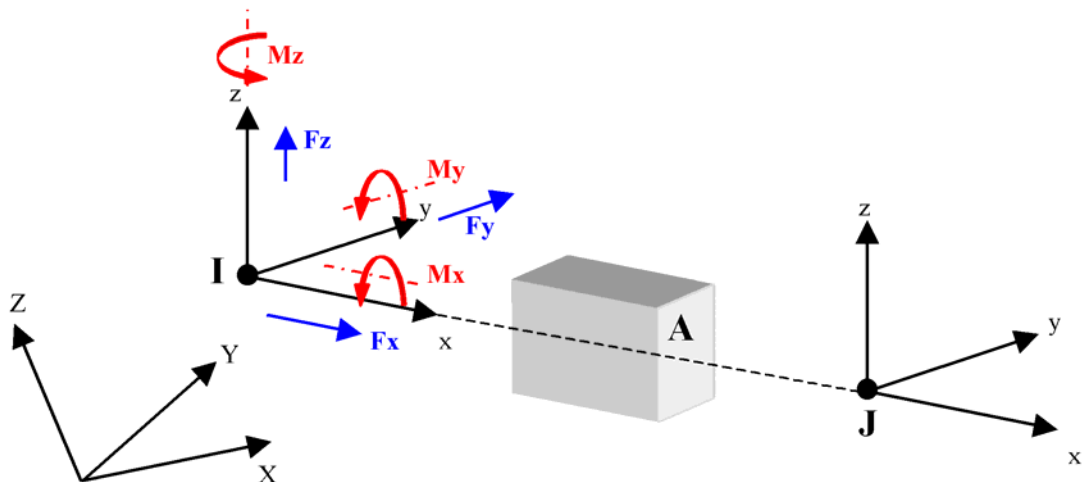


Fig.5.4.3 - Schematizzazione delle sollecitazioni sui nodi



In forma matriciale si definiscono i seguenti vettori:

;

Le componenti dei **vettori spostamento $\{u\}$** sono:

- u spostamento lungo l'asse delle x;
- v spostamento lungo l'asse delle y;
- w spostamento lungo l'asse delle z;
- φ rotazione intorno all'asse delle x;
- θ rotazione intorno all'asse delle y;
- ζ rotazione intorno all'asse delle z.

Le componenti dei **vettori sollecitazione $\{f\}$** sono:

- F_x Forza normale, diretta lungo l'asse dell'elemento-trave;
- F_y Taglio sul piano xz;
- F_z Taglio sul piano xy;
- M_x Momento torcente intorno all'asse x;
- M_y Momento flettente intorno all'asse y;
- M_z Momento flettente intorno all'asse z.

Per il singolo elemento la relazione tra sollecitazioni applicate sui nodi estremi I e J e gli spostamenti degli stessi è espressa mediante l'**equazione costitutiva** dell'elemento stesso, nella forma:

valida sotto l'ipotesi di **comportamento elastico lineare**.



I suoi termini sono:

- vettore delle sollecitazioni;
- vettore degli spostamenti;
- matrice di rigidezza dell'elemento.

In particolare la **matrice di rigidezza** contiene i termini di rigidezza che legano le sollecitazioni alle deformazioni, direttamente dipendenti dalle assunzioni fatte circa il comportamento della trave (ipotesi del De Saint-Venant).

Per essa vale una relazione del tipo:

Per passare al sistema globale di coordinate occorre premoltiplicare le grandezze per la matrice di trasferimento dell'elemento:

- ;
- ;
-



con

Il sistema nel suo complesso è costituito da N_{nodi} nodi e da N_{elem} elementi, per ognuno dei quali vale quanto detto.

E' quindi possibile costruire, nei sistemi locali di coordinate, un unico vettore di forze $\{f\}$ ed un unico vettore di spostamenti $\{u\}$ aventi entrambi dimensioni $(1 \times 12N_{elem})$.

Analogamente viene costruita una unica matrice di rigidezza $\{k\}$ di dimensioni $(12N_{elem} \times 12N_{elem})$.

Per passare al **sistema globale di coordinate** viene costruita la **matrice di trasferimento** $[T]$ avente dimensioni $(12N_{elem} \times 12N_{nodi})$.

Utilizzando le relazioni fin qui viste, si ha:

Risulta quindi:

In definitiva la risoluzione del problema consiste nel determinare le deformazioni dei nodi $\{U\}$ date le sollecitazioni $[F]$ ed è quindi ottenibile mediante l'inversione della matrice $[K]$, cioè la risoluzione di un sistema di dimensioni $(N_{nodi} \times N_{nodi})$.

Tale matrice è nel caso degli Space Frame (reticolo non fitto) una **matrice sparsa**, e quindi dal punto di vista computazionale il calcolo è molto agevole, e permette di ottenere risultati validi con tempi di elaborazione molto brevi.

Questo consente l'effettuazione di un elevato numero di simulazioni per procedere al confronto di diverse soluzioni e successivamente all'ottimizzazione della struttura.



La schematizzazione presenta ovviamente dei **limiti**:

- Non consente la modellazione dei nodi strutturali;
- Non rende conto del reale comportamento degli elementi in prossimità degli estremi vincolati;
- Non fornisce risultati precisi per elementi-trave che non soddisfano le ipotesi del DSV (es. travi corte).

In definitiva si può pensare di applicare questo metodo per il **calcolo di massima** della struttura, relativamente alla geometria ed alla ripartizione delle sezioni per i vari elementi, eventualmente implementando metodi automatici di ottimizzazione, data la leggerezza del calcolo computazionale.

E' necessario tuttavia prevedere, una volta ottenuta una configurazione completa dello Space Frame, la sua modellazione solida agli elementi finiti, che consenta lo studio in dettaglio degli stati di tensione, specialmente nei giunti di connessione.

Con lo stesso modello agli elementi finiti sarà anche possibile studiarne il **comportamento a fatica, a crash** e la risposta a rumore e vibrazioni mediante un'**analisi in frequenza**.

Nel presente Lavoro ci si è limitati al primo calcolo di massima, utilizzato per ottenere una struttura con adeguate caratteristiche di resistenza e rigidezza, su cui approfondire le potenzialità date dalla flessibilità e dalla modularità.

Per il calcolo numerico sono stati utilizzati un PC con processore Pentium II 350 MHz e 256 Mb Ram ed i pacchetti applicativi **Ansys 5.7** e **SAP 2000 Plus**.

Entrambi i programmi comprendono il tipo di schematizzazione visto in questo Sottoparagrafo, ed hanno numerose opzioni aggiuntive relativamente alle ipotesi di calcolo, al dettaglio della schematizzazione, all'elaborazione e alla visualizzazione dei risultati.



Si è preliminarmente verificata mediante confronto la coerenza delle ipotesi e dei risultati tra i due applicativi: in una serie di simulazioni effettuate con diverse configurazioni le differenze si sono mantenute inferiori allo 0,5%.

Verifica preliminare di resistenza ai carichi statici

Prima di procedere alla ripartizione delle sezioni occorre innanzitutto effettuare una verifica preliminare sulla resistenza della struttura ai carichi di esercizio statici e dinamici, indipendentemente dalle deformazioni conseguenti.

Si ricerca la sezione più sollecitata e la corrispondente tensione equivalente.

La verifica è fatta confrontando tale valore con il limite elastico σ_l del materiale, diviso per un coefficiente di sicurezza n .

Nel caso della lega di alluminio 6061 T6 risulta $\sigma_l = 265$ MPa.

Il coefficiente di sicurezza è considerato pari a 2, seguendo le indicazioni di Mazzolani [4] relative alla progettazione statica con profilati in alluminio.

In definitiva deve risultare $\sigma_{max} < 132$ Mpa.

Condizioni di carico

I carichi di esercizio possono essere classificati in:

- **Carichi statici;**
- **Carichi dinamici.**

In questa verifica preliminare si considereranno **solo i carichi statici**.

Quelli **dinamici** verranno studiati una volta raggiunto un **maggior dettaglio** nella descrizione dello Space Frame.



I carichi statici cui è soggetta la struttura sono suddivisibili principalmente in:

- Peso proprio della struttura;
- Peso dei componenti del veicolo;
- Peso dei passeggeri;
- Peso della merce trasportata.

Si considera il solo pianale costituito da due longheroni, due traverse, i puntoni anteriori e posteriori e le barre paraurti (vedi Figura 5.4.4). Ciò risulta in favore di sicurezza in quanto la struttura complessiva avrà molti elementi strutturali aggiuntivi. Per tutti i profilati è adottata una **unica sezione quadrata scatolata** con dimensioni esterne di **50x50 mm** e spessore pari a **3 mm**.

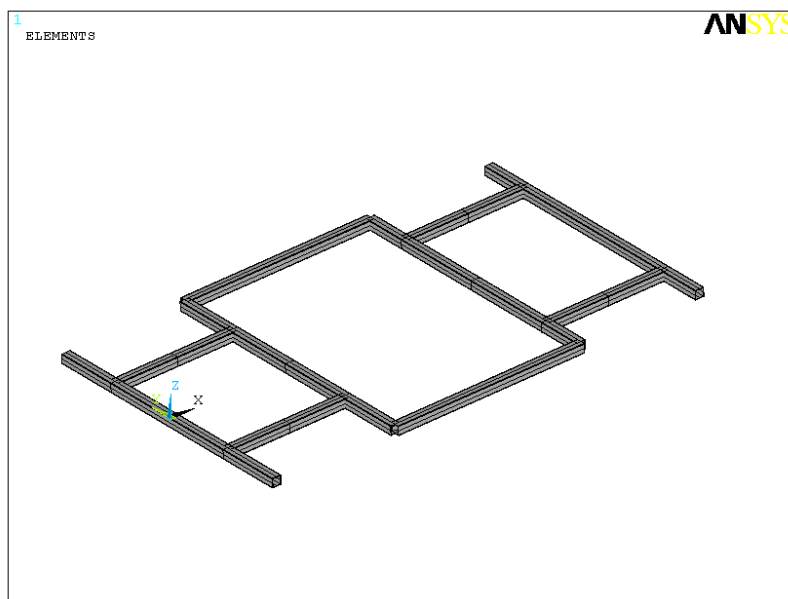


Fig. 5.4.4 - Pianale per la verifica statica preliminare

- **Longheroni anteriori:** carico uniformemente distribuito di **500 N** su ogni longherone (**carico lineare di 0,71 N/mm**), corrispondente ad un carico complessivo di circa 100 kg dovuti al motore (60 kg), al gruppo trasmissione-sterzo e ad altri sistemi ausiliari;



- **Longheroni posteriori:** carico uniformemente distribuito di **750 N** su ogni longherone (**carico lineare di 1,07 N/mm**), corrispondente ad un carico sul retrotreno pari a 150 kg circa dovuto a merce trasportata, ad un eventuale terzo passeggero, al serbatoio del carburante ed alla struttura stessa della vettura;
- **Pianale centrale:** carico totale di **3000 N** uniformemente distribuito tra i due longheroni e le due traverse del telaio base (**carico lineare 0,58 N/mm**), corrispondente ad un carico complessivo di circa 300 kg, corrispondente al peso dei due passeggeri trasportati, alla struttura della vettura ed ai componenti interni dell'abitacolo.

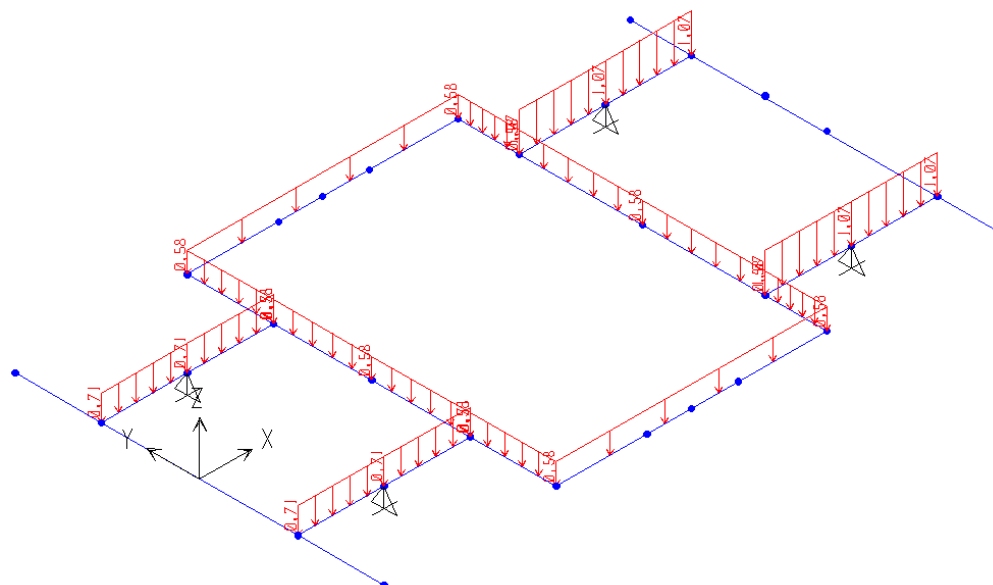


Fig. 5.4.5 - Carichi statici e vincoli sul pianale di base

Condizioni di vincolo

Sono vincolati i nodi in corrispondenza delle sezioni di mezzeria dei puntoni anteriori e posteriori, con tutti i gradi di libertà impediti **eccetto la rotazione intorno all'asse di rollio**.



Risultati della verifica

I punti più sollecitati sono le sezioni di mezzeria dei longheroni posteriori, con un **momento flettente massimo** intorno all'asse di beccheggio pari a **320 Nm**, e le sezioni di mezzeria dei longheroni anteriori, con un momento flettente massimo pari a 287 Nm.

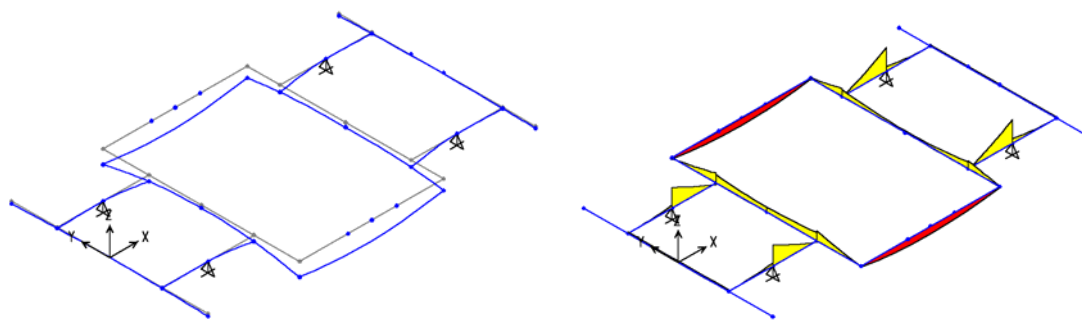


Fig. 5.4.6 - Deformazione del pianale e andamento dei momenti flettenti intorno all'asse di beccheggio

Considerando che la sollecitazione prevalente è quella flessionale, le tensioni massime sono date dalla relazione:

dove M_f è il momento flettente massimo, y è la distanza massima della sezione dall'asse neutro corrispondente e J è il momento di inerzia della sezione intorno all'asse di beccheggio.

La tensione massima nei puntoni posteriori ed anteriori risulta pari rispettivamente a **38 e 34 MPa**, ampiamente al di sotto della soglia indicata.

Anche considerando uno **spessore inferiore**, pari a 2 ed 1 mm si ottengono valori massimi di tensione pari rispettivamente a **53 e 101 MPa**, ancora inferiori alla soglia precedentemente indicata.



Questo ci conferma che nel progetto del telaio il vincolo più stringente è quello della rigidezza, e che a partire dalla struttura di base la resistenza statica non pone problemi.

Misurazione della rigidezza torsionale

Non esistono in letteratura procedure standard relative a prove di torsione di strutture automobilistiche, avendo ogni Casa sviluppato le proprie procedure interne.

Poiché la rigidezza torsionale è direttamente collegata in primo luogo con il comportamento dinamico del veicolo, si possono **applicare i carichi** ed i vincoli nei nodi in corrispondenza o in prossimità dei **punti di attacco delle sospensioni**.

In particolare, i vincoli limitano tutti i gradi di libertà eccetto la rotazione intorno all'asse di rollio, mentre la sollecitazione è fornita mediante una coppia di forze verticali applicata ai due punti di attacco non vincolati ed avente come risultante un momento torcente parallelo all'asse di rollio.

Ciò è in accordo con lo studio effettuato da L.L.Thompson et al. [5.4].

Per la determinazione della rigidezza torsionale occorre **misurare le rotazioni** intorno all'asse longitudinale del veicolo (**asse di rollio**).

La prima **variabile di output** considerata è la **rotazione dei nodi** di applicazione delle forze (uguali ed opposte per le simmetria della struttura e dei vincoli e per l'antisimmetria dei carichi).

Occorre però considerare che questa variabile, da sola, non è completamente indicativa del comportamento a torsione.

La rigidezza torsionale è necessaria per garantire il corretto comportamento dinamico della vettura, con riferimento alle sospensioni. Questo è quantificabile mediante la misurazione delle deformazioni dei punti di attacco delle sospensioni stesse. Tali deformazioni hanno come componenti principali la **rotazione intorno all'asse di rollio** e la **traslazione secondo l'asse verticale**. A seconda della configurazione della struttura le due variabili possono aumentare e/o diminuire in modo indipendente.



Per ovviare a questo problema si è quindi considerata una seconda variabile di output, costituita dall'angolo di rotazione del **nodo di mezzeria della traversa anteriore del pianale**.

Essa, oltre a rendere conto della traslazione verticale dei punti di attacco delle sospensioni, descrive anche il comportamento a torsione della cella abitacolo e del corpo vettura.

I due corrispondenti valori di rigidezza torsionale, rispettivamente riferiti alle **sospensioni** e all'**abitacolo**, sono dati dal rapporto tra il momento torcente applicato e gli angoli di rotazione dei nodi, e sono espressi in Nm/rad.

Struttura di base

Si parte da una struttura di base costituita dal pianale a traverse e longheroni già visto e da una semplice cella abitacolo formata da due montanti (A e B) che definiscono la cornice delle portiere laterali, il tetto (costituito da due traverse e dagli elementi laterali SRR) e la traversa base del parabrezza.

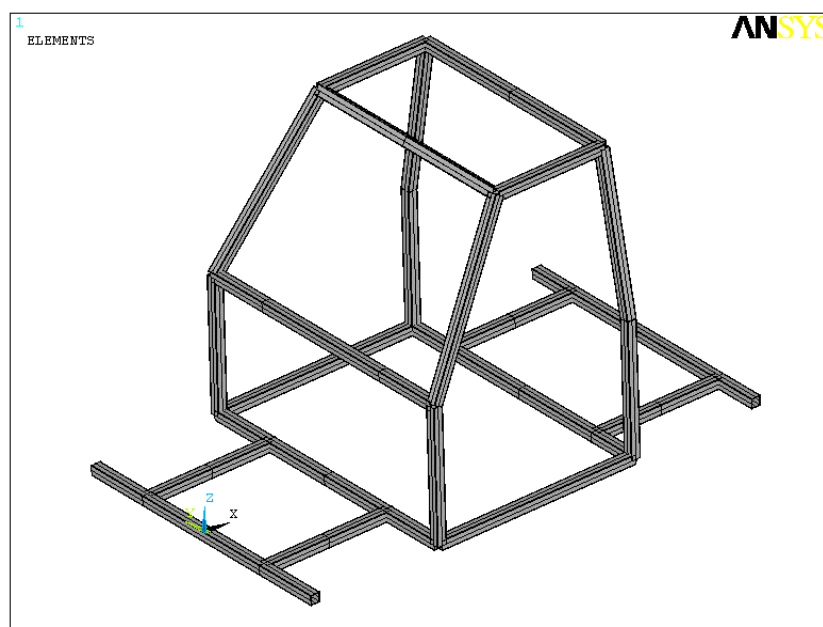


Fig. 5.4.7 - Struttura di base schematizzata con Ansys 5.7



La marcata indipendenza strutturale tra pianale e cella dell'abitacolo risulta dal basso livello di collegamento tra i due sistemi, attuato solo mediante i montanti A e B e non, come negli Space Frame convenzionali, anche attraverso le zone dei passaruota anteriori e posteriori e nelle zone delle barre paraurti.

In particolare è da prevedere una struttura di sostegno nella zona anteriore per la pannelleria (parafanghi e cofano motore) e per eventuali sistemi ausiliari.

Essa potrà eventualmente conferire ulteriore rigidità anche se in questa fase il suo contributo non viene considerato.

Si nota inoltre l'assenza di profilati nella zona posteriore della cella abitacolo. Questo è giustificabile in quanto tra le varie configurazioni del veicolo sono da prevedere quella "pick-up" in cui la parte posteriore è occupata da una cassa di carico aperta senza funzioni strutturali e quella a furgone in cui la parte di abitacolo adibita al carico può essere pensata anche amovibile.

L'ottimizzazione è quindi effettuata sulla struttura di base; nelle versioni con abitacolo esteso i membri aggiuntivi potranno fornire un'ulteriore incremento di rigidità torsionale.

Inizialmente è assegnata una sola sezione scatolata 50x50 mm a tutti i profilati, con spessore delle pareti pari a 3 mm.

Condizioni di carico e di vincolo

Sono vincolati i nodi in corrispondenza delle sezioni di mezzzeria dei puntoni posteriori

Sui nodi caricati sono applicate due forze opposte di intensità pari a 1000 N e dirette secondo l'asse Z (verticale).

Il braccio tra i punti di applicazione è pari a 800 mm, per cui si ha un momento torcente totale pari a 800 Nm.



Analisi di sensibilità

Per comprendere l'influenza dei singoli componenti della struttura nel suo comportamento a torsione, vengono effettuate delle analisi di sensibilità consistenti nell'adozione di sezioni maggiorate per singoli componenti o combinazioni di componenti.

Ogni configurazione è stata valutata rispetto alle conseguenti **variazioni percentuali** di **rigidezza torsionale** e di **massa** relative all'intera struttura: è infatti necessario riferirsi al sistema nel suo insieme e non al comportamento del singolo componente.

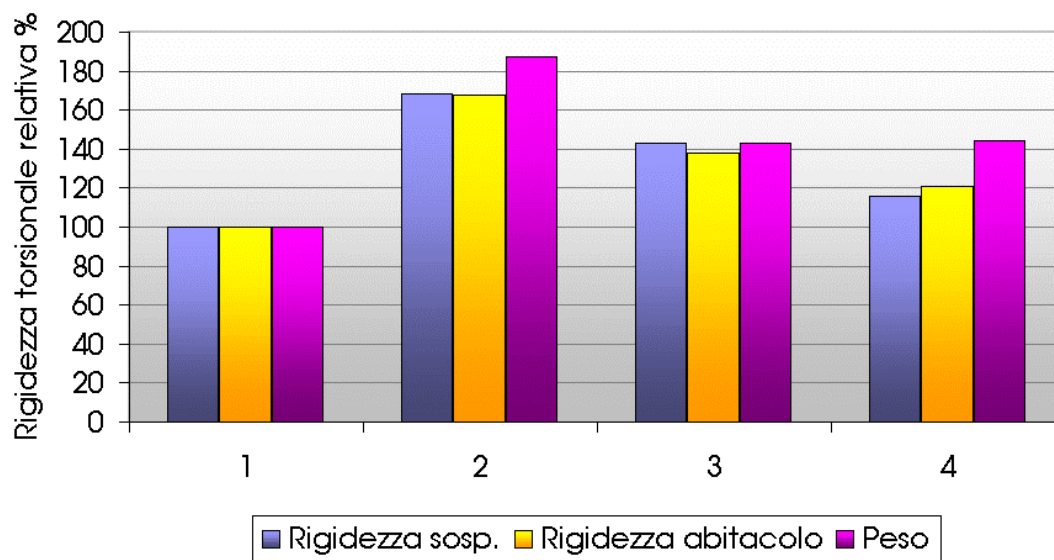
In questa fase le sezioni vengono maggiorate rispetto a quella base portando lo spessore delle pareti a 6 mm.

L'importanza di un componente o di un insieme di componenti è indicata dal **rapporto tra incremento percentuale di rigidezza e di massa**.



Ripartizione della rigidità

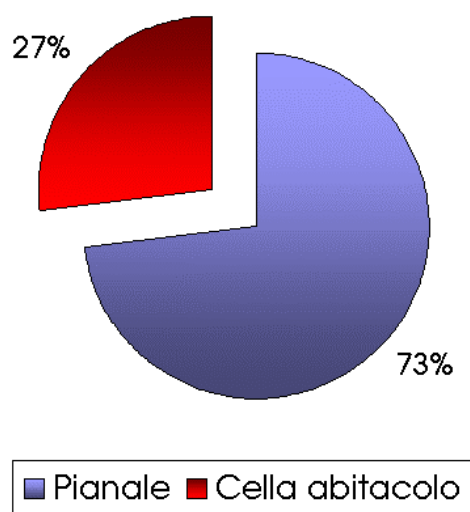
Diagramma 5.4.1 - Rigidità relativa per sezioni maggiorate



| | | | |
|---|-------------------------------|---|-----------------|
| 1 | Struttura base (spessore 3mm) | 3 | Pianale |
| 2 | Struttura completa | 4 | Cella abitacolo |

La disposizione dei carichi e dei vincoli direttamente sul pianale rende quest'ultimo il principale membro di rigidità, in accordo con le premesse fatte.

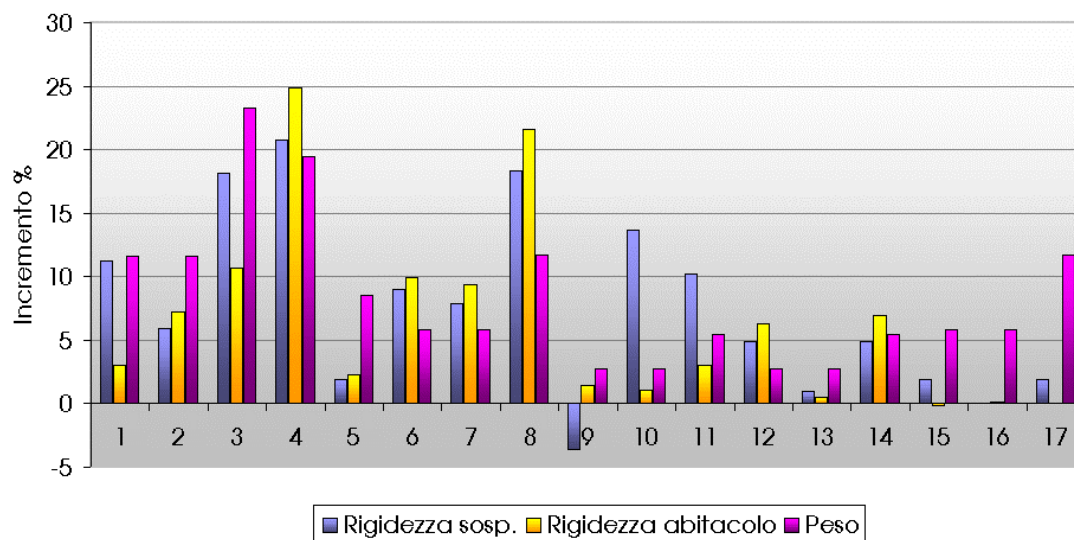
Diagramma 5.4.2 - Ripartizione dell'incremento complessivo di rigidità





Componenti del pianale

Diagramma 5.4.3 - Influenza dei componenti del pianale



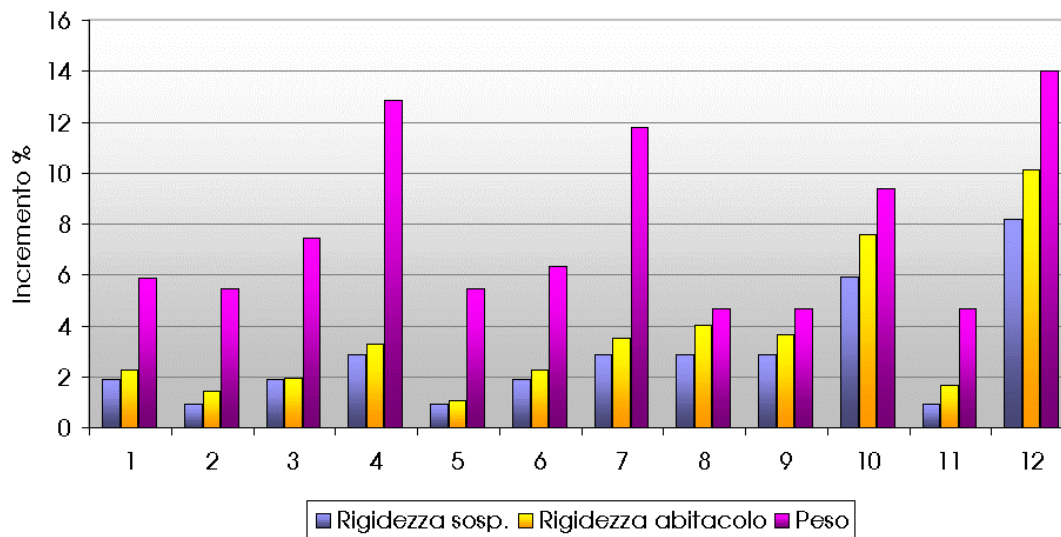
| | | | |
|---|-----------------------------------|----|--------------------------------|
| 1 | Sottotelaio anteriore | 10 | Puntoni anteriori parte 2 |
| 2 | Sottotelaio posteriore | 11 | Longheroni anteriori completi |
| 3 | Sottotelai anteriore e posteriore | 12 | Longheroni posteriori parte 1 |
| 4 | Longheroni e traverse pianale | 13 | Longheroni posteriori parte 2 |
| 5 | Longheroni | 14 | Longheroni posteriori completi |
| 6 | Traversa anteriore | 15 | Barra paraurti anteriore |
| 7 | Traversa posteriore | 16 | Barra paraurti posteriore |
| 8 | Traverse anteriore e posteriore | 17 | Barre paraurti ant. e post. |
| 9 | Puntoni anteriori parte 1 | | |

La zona di maggior influenza è quella centrale che permette gran parte del trasferimento dei carichi tra il loro punto di applicazione ed i punti di vincolo.



Componenti della cella abitacolo

Diagramma 5.4.4 - Influenza dei componenti della cella abitacolo



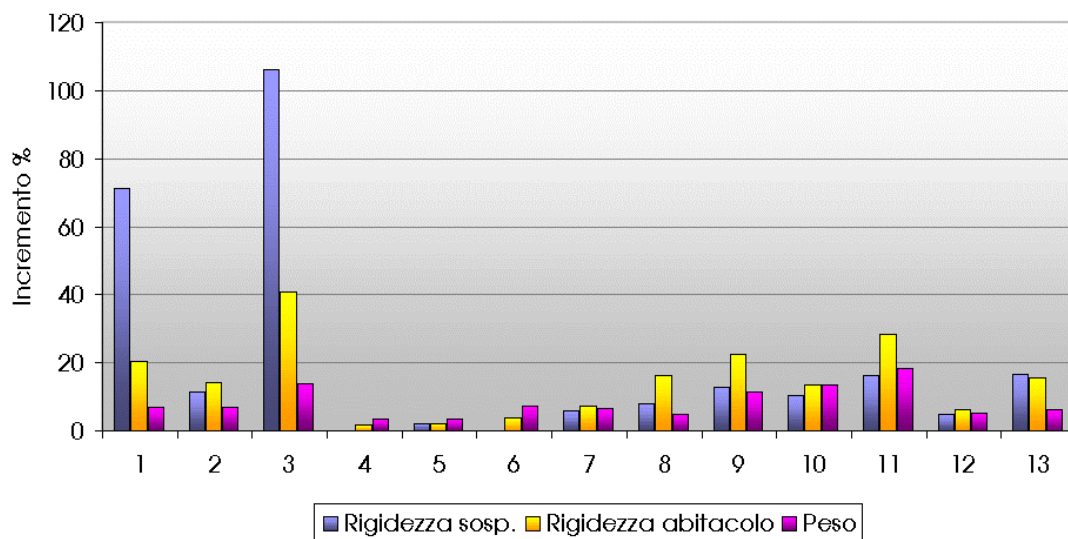
| | | | |
|---|--------------------------|----|-----------------------------|
| 1 | Traversa base parabrezza | 7 | Montanti B completi |
| 2 | Montanti A inf. | 8 | Traversa tetto anteriore |
| 3 | Montanti A sup. | 9 | Traversa tetto posteriore |
| 4 | Montanti A completi | 10 | Traverse tetto ant. e post. |
| 5 | Montanti B inf. | 11 | SRR |
| 6 | Montanti B sup. | 12 | SRR e traverse tetto |

Per quanto riguarda l'abitacolo si può notare come, ad esclusione dei componenti del tetto, la maggiorazione dei profilati sia poco vantaggiosa ai fini del rapporto rigidezza/massa.



Profilati aggiuntivi

Diagramma 5.4.5 - Influenza di profilati aggiuntivi



| | | | |
|---|---------------------------------|----|--|
| 1 | Elementi diagonali anteriori | 8 | Longherone centrale pianale |
| 2 | Elementi diagonali posteriori | 9 | Traversa e longherone centrale pianale |
| 3 | Elementi diagonali ant. e post. | 10 | Doppia traversa pianale |
| 4 | Traversa puntoni anteriori | 11 | Doppia traversa e longherone centrale |
| 5 | Traversa puntoni posteriori | 12 | Traversa tetto |
| 6 | Traverse puntoni ant. e post. | 13 | Elementi verticali parafrangimento |
| 7 | Traversa pianale | | |

I risultati conseguiti mediante l'aggiunta di elementi supplementari evidenziano come la zona di maggior influenza sia quella di collegamento tra il sottotelaio anteriore e la cella dell'abitacolo (passaruota anteriori), dove l'aggiunta di membri diagonali di collegamento permette da sola un incremento della rigidezza superiore al 70%.

Anche i passaruota posteriori permettono incrementi sostanziali di rigidezza, sebbene questi siano di entità inferiore principalmente per le condizioni di carico e di vincolo scelte.



Viene quindi ridisegnata la parte della struttura relativa ai passaruota, anche in funzione della reale disposizione dei punti di attacco degli ammortizzatori (duomi anteriori e posteriori).

Struttura di base modificata

La nuova struttura di base presenta rinforzi nella zona dei passaruota anteriori e posteriori, disposti prevalentemente secondo assi ortogonali a formare un reticolo.

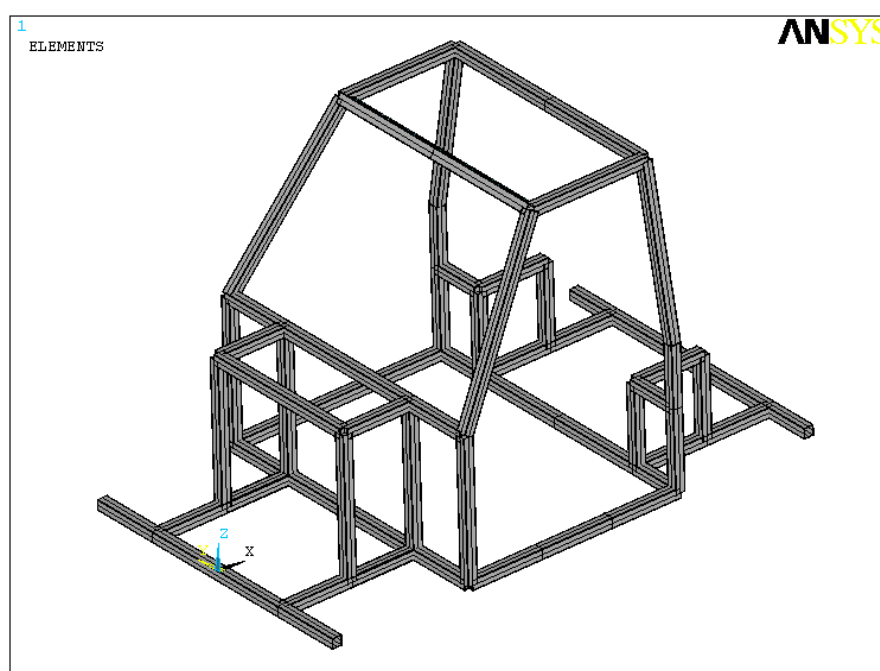


Fig. 5.4.8 - Struttura di base modificata

Condizioni di carico e di vincolo

Sono analoghe a quelle utilizzate per la struttura di base, ma i punti di applicazione vengono spostati dal pianale ai nodi corrispondenti ai duomi degli ammortizzatori.

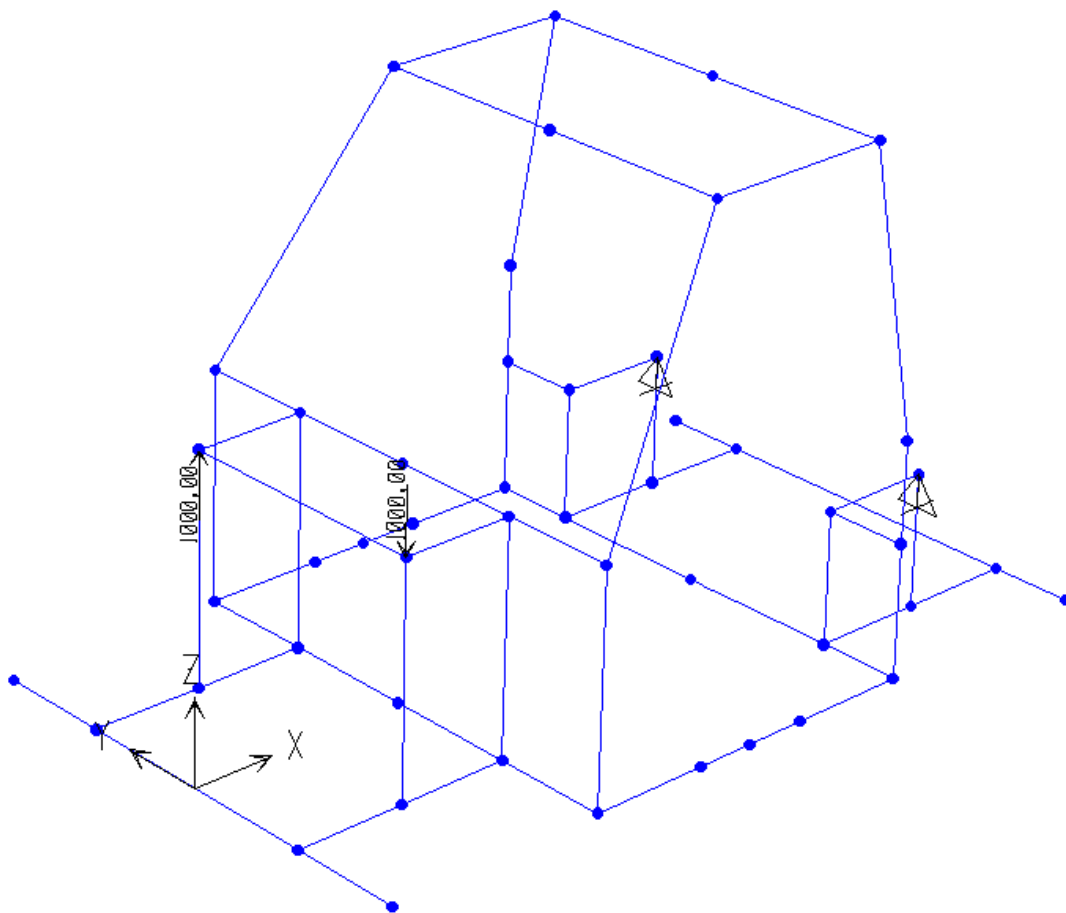
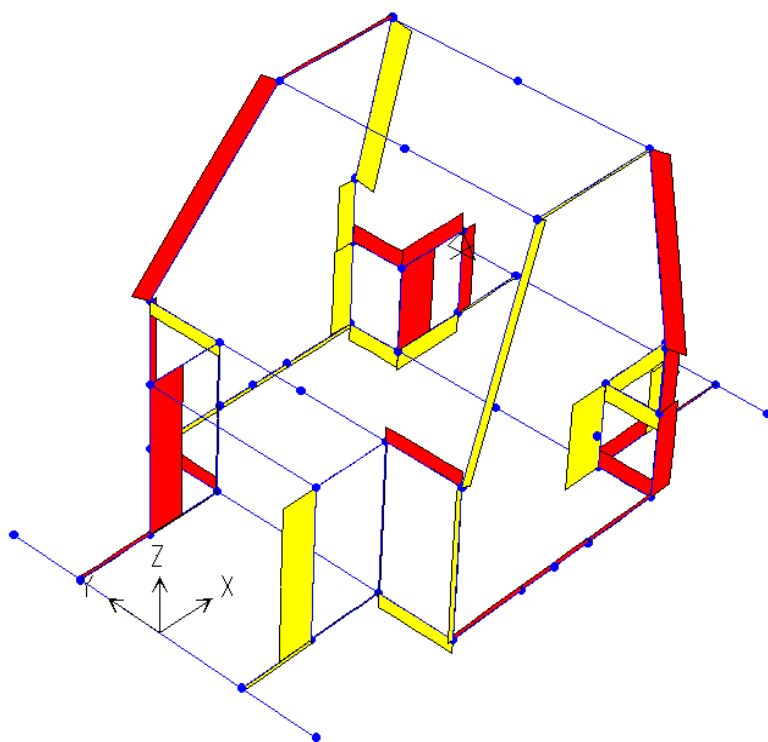
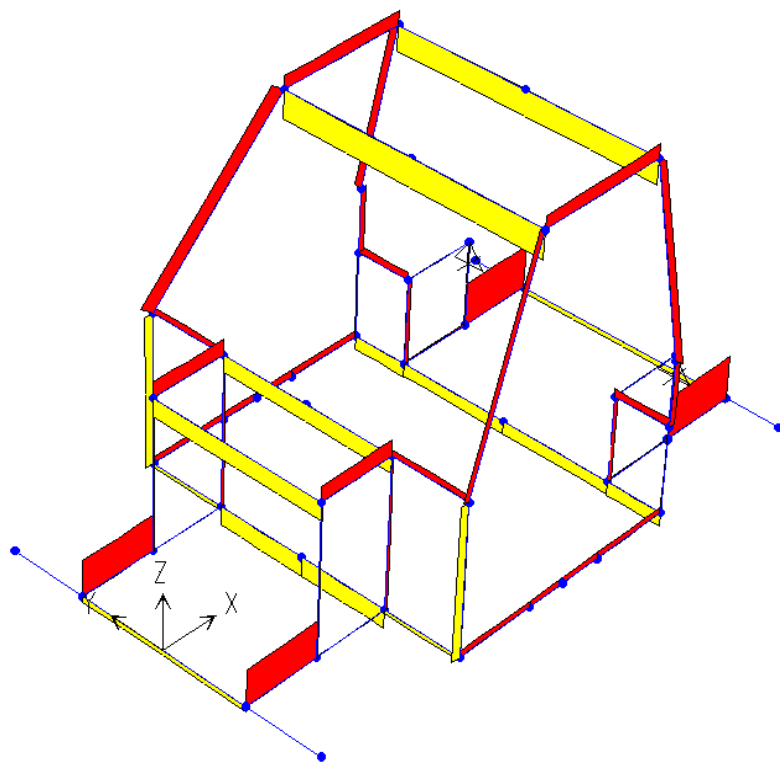


Fig. 5.4.9 - Carichi e vincoli sulla struttura di base modificata

Distribuzione delle sollecitazioni

Nei seguenti Diagrammi è riportata la distribuzione delle varie componenti di sollecitazione.

*Fig. 5.4.10 A - Sollecitazione assiale**Fig. 5.4.10 B - Torsione*

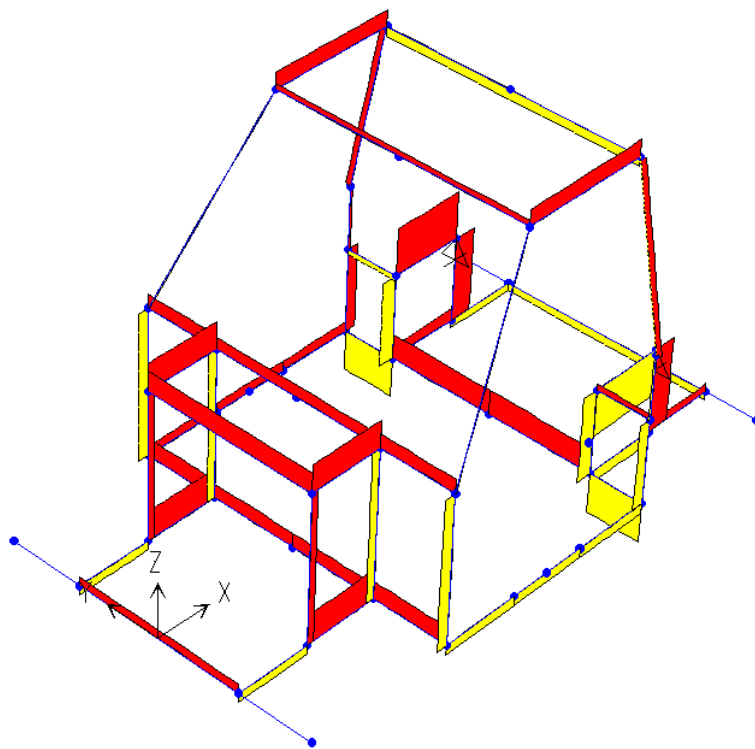


Fig. 5.4.10 C - Taglio secondo i piani XZ e YZ

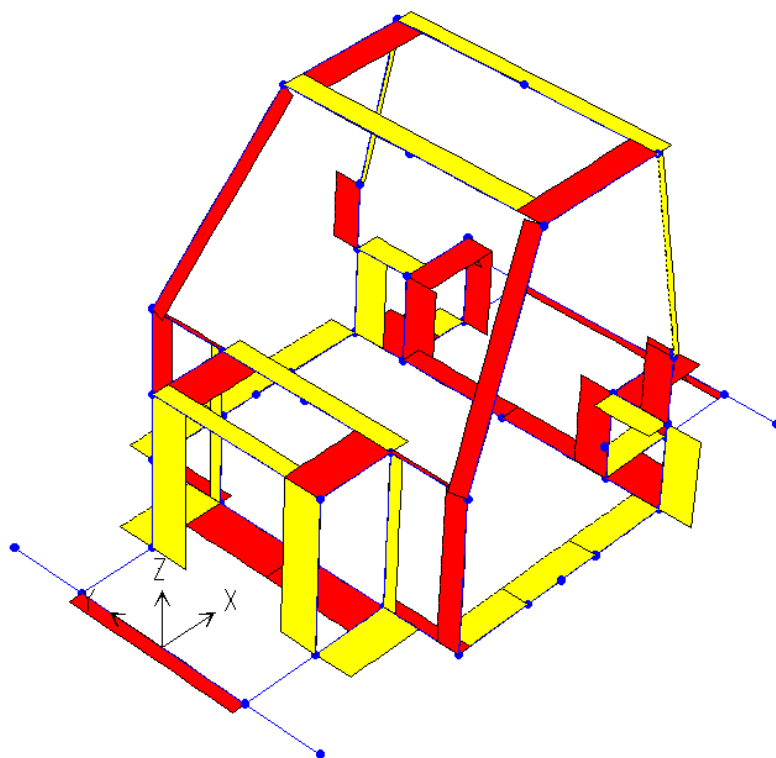


Fig. 5.4.10 D - Taglio sui piani XY e YZ

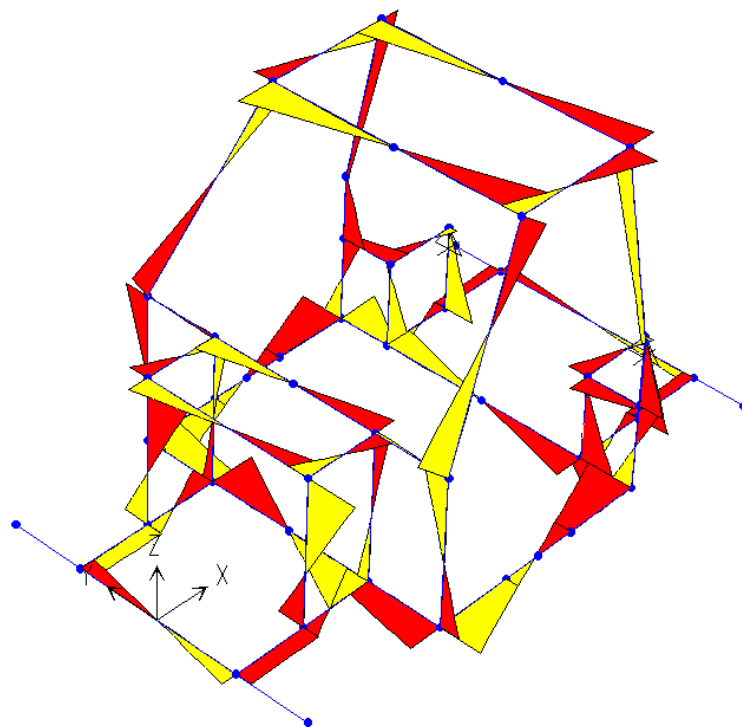


Fig. 5.4.10 E - Momento flettente sui piani XY e YZ

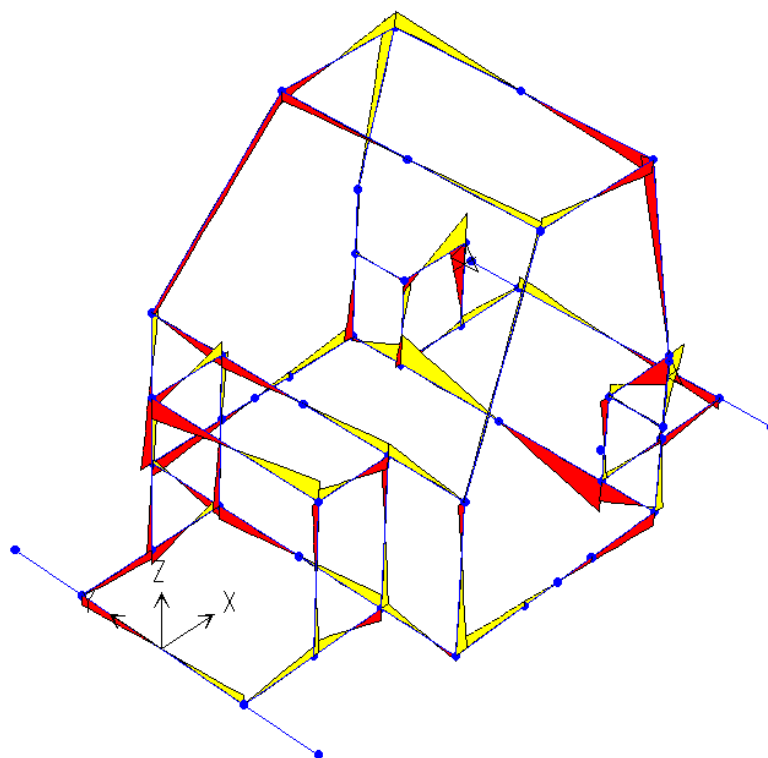


Fig. 5.4.10 F - Momento flettente sui piani XZ e YZ

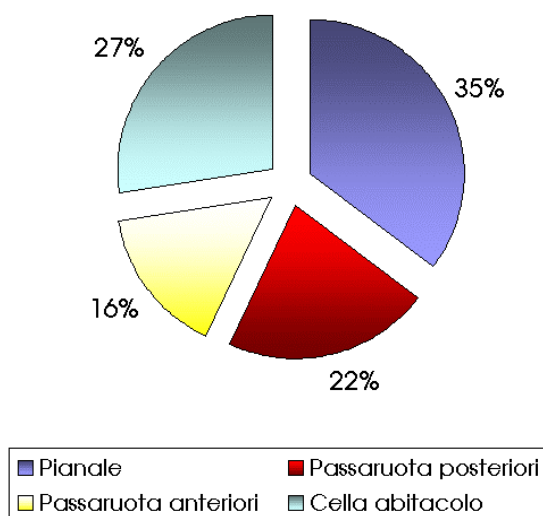


Analisi di sensibilità

Dalla prima analisi di sensibilità si ottiene immediatamente una ripartizione generale delle zone di influenza.

Ripartizione della rigidità

Diagramma 5.4.6 - Ripartizione dell'incremento complessivo di rigidità

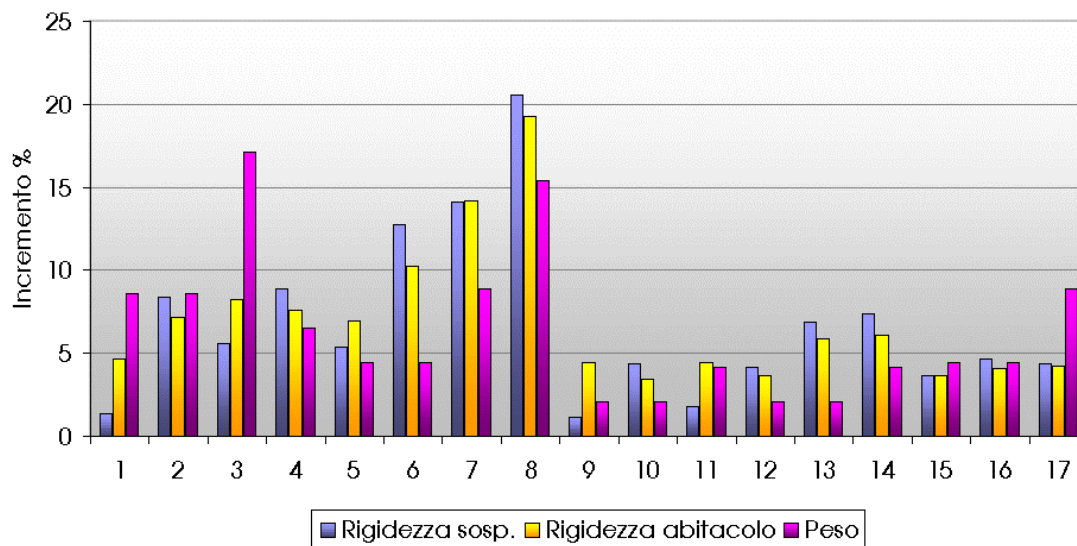


Va notato che in questo caso la parte inferiore dei montanti A e B è parte integrante dei gruppi passaruota.



Componenti del pianale

Diagramma 5.4.7 - Influenza dei componenti del pianale



| | | | |
|---|-----------------------------------|----|-----------------------------|
| 1 | Sottotelaio anteriore | 10 | Puntoni anteriori parte 2 |
| 2 | Sottotelaio posteriore | 11 | Puntoni anteriori completi |
| 3 | Sottotelai anteriore e posteriore | 12 | Puntoni posteriori parte 1 |
| 4 | Longheroni | 13 | Puntoni posteriori parte 2 |
| 5 | Traversa anteriore | 14 | Puntoni posteriori completi |
| 6 | Traversa posteriore | 15 | Barra paraurti anteriore |
| 7 | Traverse ant. e post. | 16 | Barra paraurti posteriore |
| 8 | Longheroni e traverse pianale | 17 | Barre paraurti ant. e post. |
| 9 | Puntoni anteriori parte 1 | | |

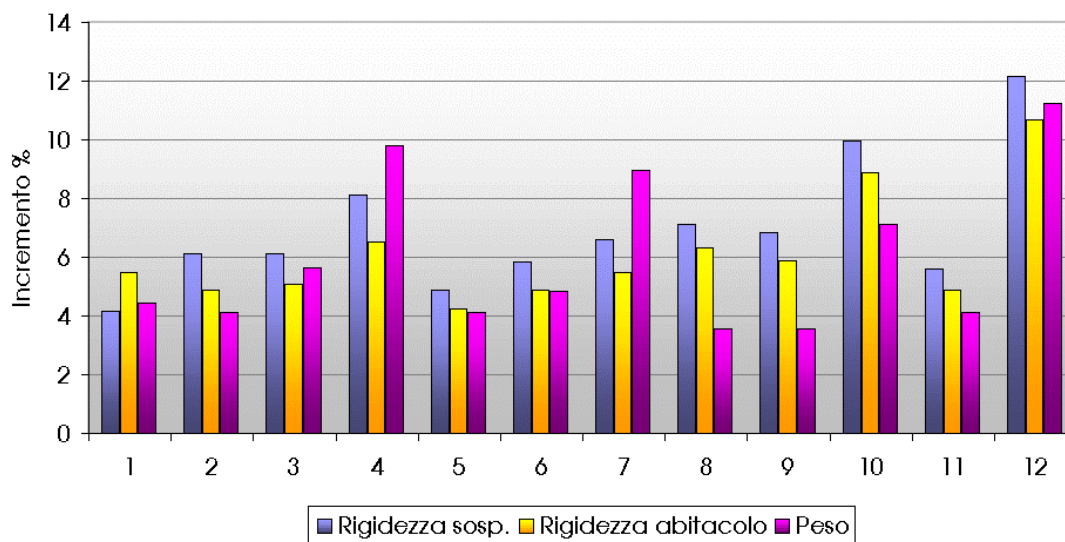
In questo caso si nota come siano meno influenti i puntoni anteriori e posteriori, essendo solo parte del collegamento tra sottotelai anteriore e posteriore e pianale centrale.

In generale l'elevata influenza dei membri del pianale e le considerazioni fatte inizialmente giustificano l'adozione di una soluzione meno elementare, con l'adozione di membri aggiuntivi, riportata successivamente.



Componenti della cella abitacolo

Diagramma 5.4.8 - Influenza dei componenti della cella abitacolo



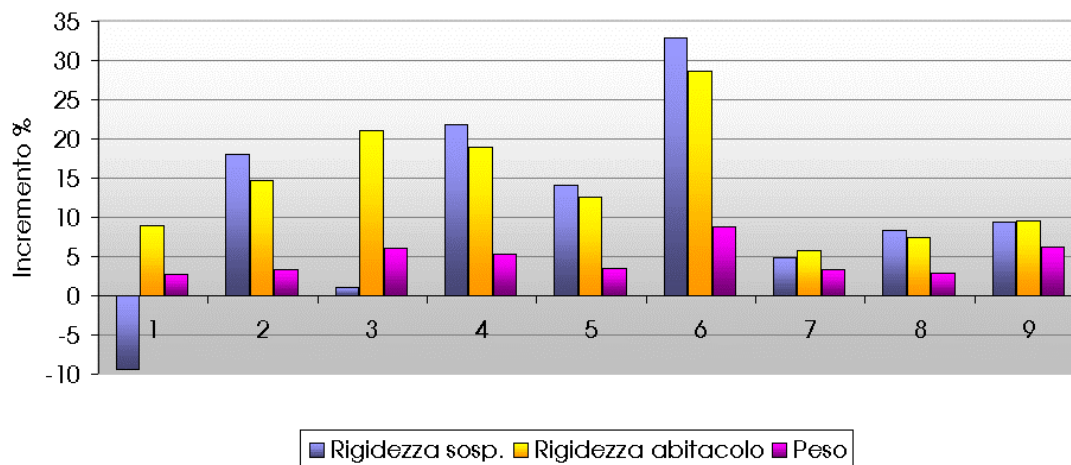
| | | | |
|---|--------------------------|----|-----------------------------|
| 1 | Traversa base parabrezza | 7 | Montanti B completi |
| 2 | Montanti A inferiori | 8 | Traversa tetto anteriore |
| 3 | Montanti A superiori | 9 | Traversa tetto posteriore |
| 4 | Montanti A completi | 10 | Traverse tetto ant. e post. |
| 5 | Montanti B inferiori | 11 | SRR |
| 6 | Montanti B superiori | 12 | SRR e traverse tetto |

In questo caso l'influenza degli elementi della cella abitacolo è maggiore, in quanto i carichi vengono trasferiti in notevole entità ai montanti A e B attraverso i gruppi passaruota.



Profilati aggiuntivi

Diagramma 5.4.9 - Influenza di profilati aggiuntivi



| | | | |
|---|------------------------------------|---|--|
| 1 | Traversa inf. puntoni anteriori | 6 | Rinforzi laterali anteriori e posteriori |
| 2 | Traversa inf. puntoni posteriori | 7 | Elem. diagonali sup. passaruota ant. |
| 3 | Traverse inf. puntoni ant. e post. | 8 | Elem. diagonali sup. passaruota post. |
| 4 | Rinforzi laterali anteriori | 9 | Elem. diagonali sup. passaruota ant. e post. |
| 5 | Rinforzi laterali posteriori | | |

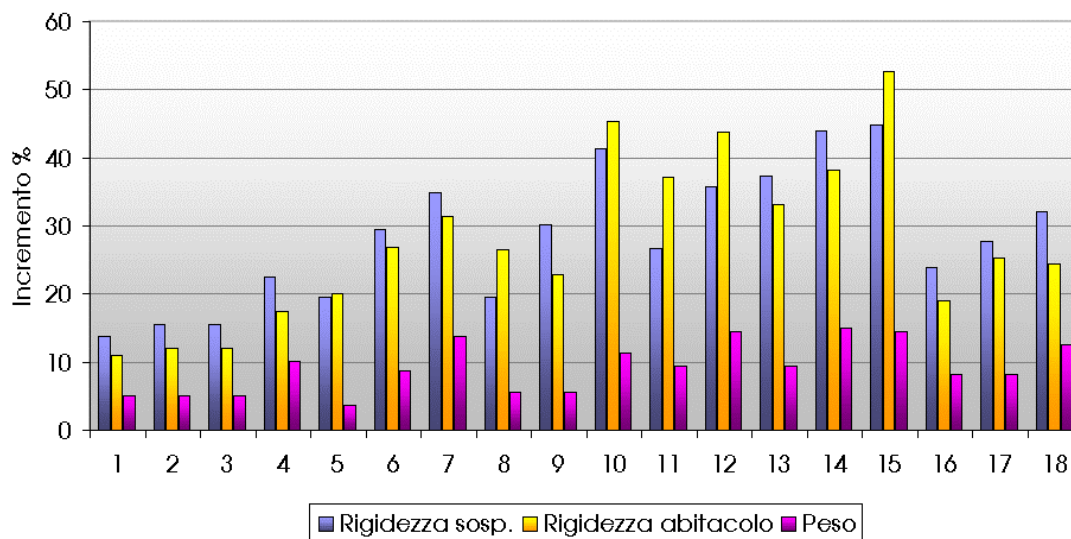
In questo Diagramma non si sono considerati profilati aggiuntivi nella zona del pianale.

Si osserva come l'adozione di rinforzi laterali in corrispondenza del collegamento tra longheroni e montanti inferiori porti a buoni incrementi di rigidità, sebbene comporti maggiore complessità costruttiva ed una diminuzione dell'accessibilità all'abitacolo.



Configurazioni del pianale

Diagramma 5.4.10 - Confronto tra differenti configurazioni di pianali



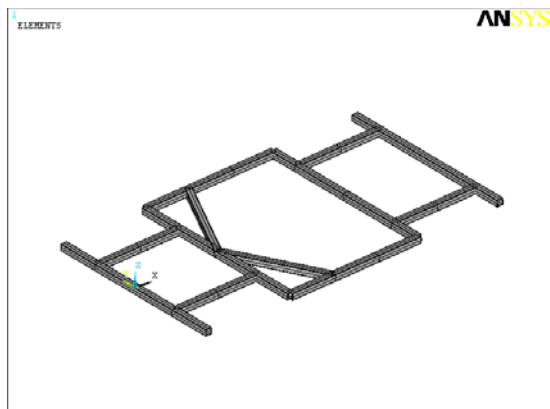
| | | | |
|---|---|----|---|
| 1 | Traversa anteriore | 10 | Elementi diagonali anteriori e posteriori |
| 2 | Traversa centrale | 11 | Freccia avanti |
| 3 | Traversa posteriore | 12 | Freccia avanti e traversa |
| 4 | Doppia traversa | 13 | Freccia indietro |
| 5 | Longherone centrale | 14 | Freccia indietro e traversa |
| 6 | Traversa centrale e longherone centrale | 15 | Doppia freccia |
| 7 | Doppia traversa e longherone centrale | 16 | Y avanti |
| 8 | Elementi diagonali anteriori | 17 | Y indietro |
| 9 | Elementi diagonali posteriori | 18 | Doppia Y |

Nel Diagramma sono riportati i risultati conseguiti con l'adozione di differenti configurazioni per il pianale.

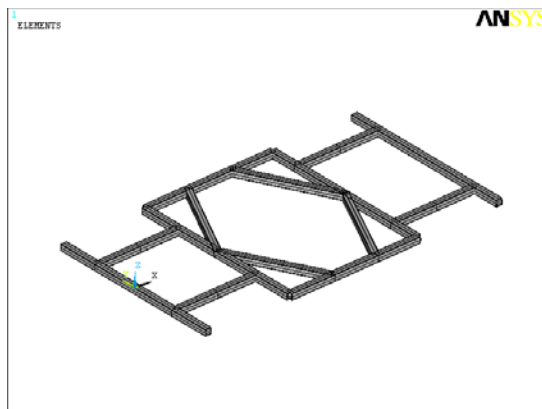
Si nota come le più efficaci siano quelle che comprendono membri diagonali “a freccia”, soluzione adottata anche sul pianale dell'Audi A2 nella parte anteriore.

L'impiego di questi componenti si scontra con una maggiore complessità costruttiva nella realizzazione dei nodi di collegamento.

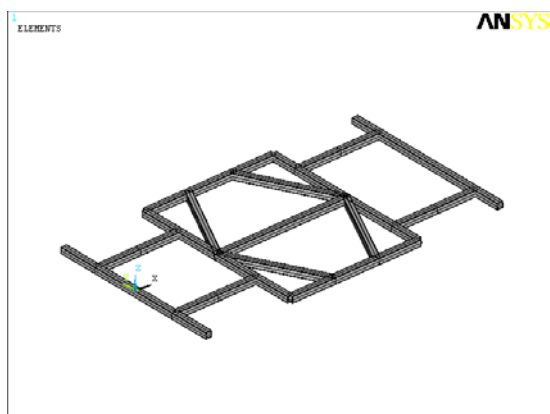
Alcune delle configurazioni adottate sono riportate nella Tabella 5.4.2.

**Tabella 5.4.2 - Varie configurazioni di pianale per la struttura di base**

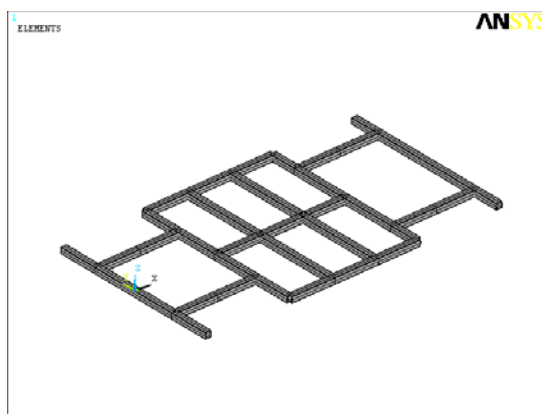
8 - Elementi diagonali anteriori



10 - Elementi diagonali anteriori e posteriori



15 - Doppia freccia

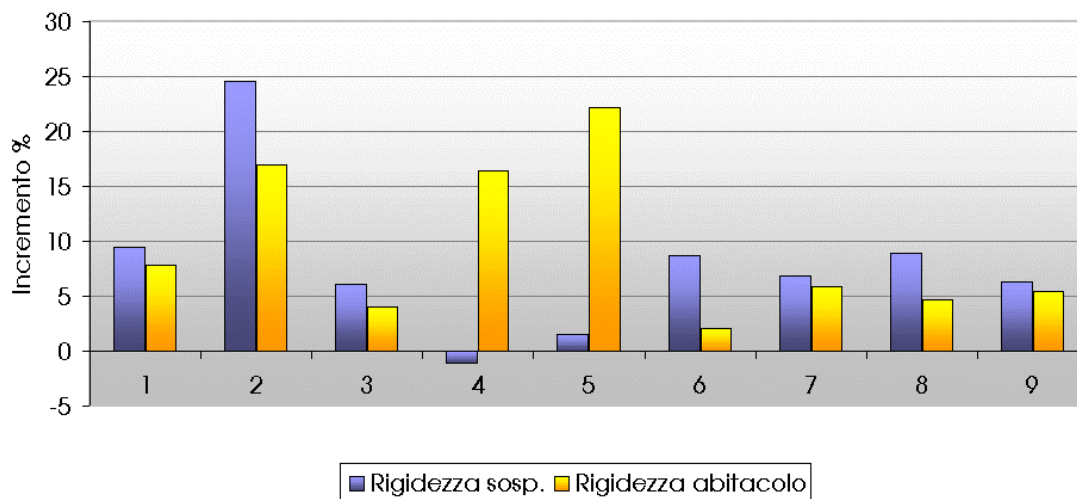


7 - Doppia traversa e longheroni



Lamiere aggiuntive

Diagramma 5.4.11 - Influenza di lamiere aggiuntive



| | | | |
|---|---------------------------------|---|--------------------------------|
| 1 | Tetto | 6 | Passaruota anteriori completi |
| 2 | Pianale | 7 | Passaruota posteriori completi |
| 3 | Lamiere laterali paraframma | 8 | Pianale sottotelaio anteriore |
| 4 | Lamiera centrale paraframma | 9 | Pianale sottotelaio posteriore |
| 5 | Paraframma completo (3 lamiere) | | |

In questo Diagramma si sono considerate delle lamiere di lega di alluminio con spessore pari a 2 mm, descritte geometricamente da 3 o 4 vertici costituiti da nodi strutturali.

In generale la struttura reticolare adottata risulta abbastanza “fitta” da non risentire in maniera eccessiva dell’aggiunta di questi elementi di rinforzo.

Si osserva come sia confermata l’importanza strutturale del pianale e come la modifica del paraframma porti ad un differente comportamento a deformazione torsionale dell’avantreno, con un aumento della rotazione relativa tra i punti di attacco delle sospensioni e la traversa anteriore del pianale.

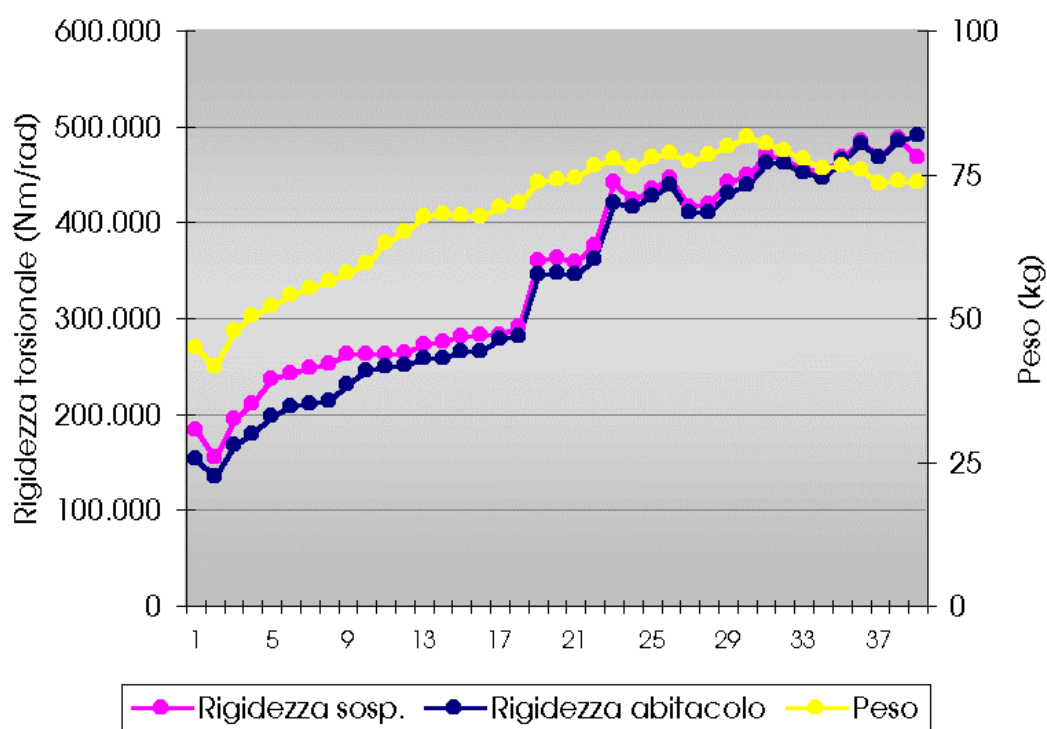


Ottimizzazione

Le considerazioni sin qui effettuate consentono di procedere con una ottimizzazione della struttura, effettuata mediante l'adozione di sezioni differenziate per i vari profilati.

Per quanto riguarda il pianale si è scelta la soluzione con doppia traversa e longherone centrale, che pur non essendo la migliore in assoluto ai fini della rigidezza torsionale, risulta abbastanza semplice dal punto di vista costruttivo, con profilati rettilinei e giunzioni a 90° che possono essere realizzate senza problemi mediante saldature o mediante nodi a T.

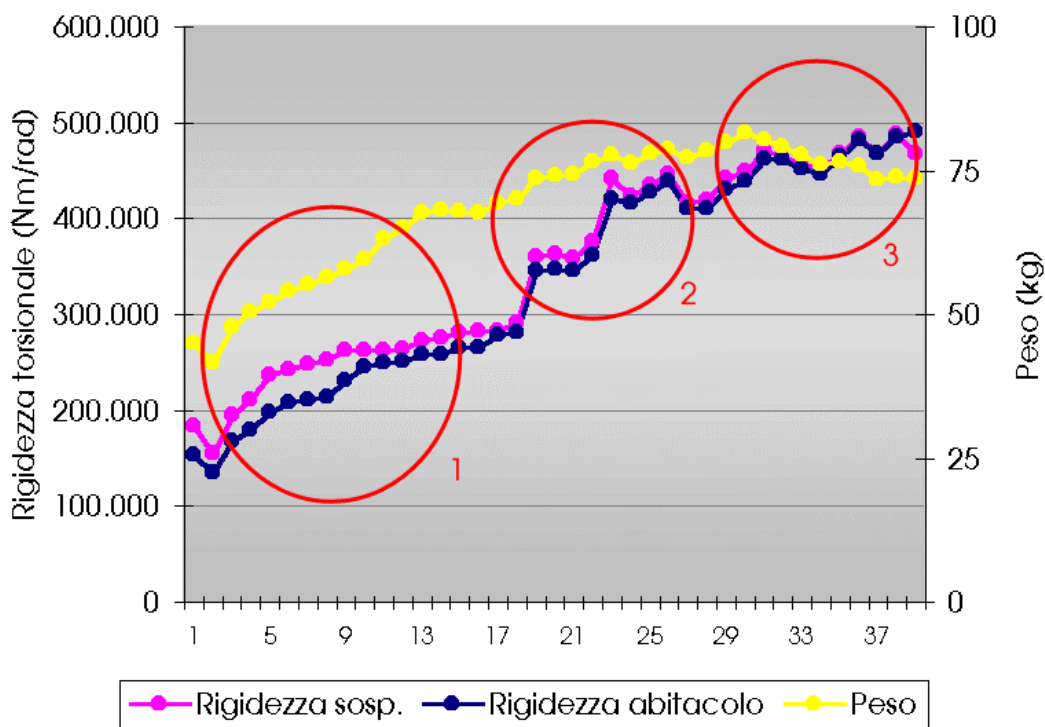
Diagramma 5.4.12 - Ottimizzazione mediante ripartizione delle sezioni dei profilati



Dall'andamento del Diagramma possono essere osservate le diverse fasi dell'ottimizzazione (vedi Diagramma 5.4.12).



Diagramma 5.4.13 - Distinzione delle varie fasi di ottimizzazione



In particolare le tre fasi individuabili sono:

1. Aggiunta degli elementi del pianale, aumento dello spessore e delle dimensioni delle sezioni dei principali profilati strutturali del pianale;
2. Maggiorazione dei profilati della cella abitacolo;
3. Aumento delle dimensioni delle sezioni, con riduzione degli spessori.

In particolare la **fase 3** è quella più interessante, e costituisce l'applicazione dei criteri alla base della progettazione con profilati in lega di alluminio.

L'adozione di **complesse sezioni multicella** con **limitati spessori** porta a sensibili **incrementi di rigidezza** ed alla contemporanea **riduzione di peso** della struttura.

L'unico **inconveniente** risulta **l'aumento di volume** occupato dagli stessi profilati, con una riduzione dello spazio abitabile e/o un aumento delle dimensioni esterne del veicolo.



In definitiva, con le modifiche attuate si sono ottenuti i risultati riportati nella Tabella 5.4.3.

Tabella 5.4.3 - Sintesi dei risultati ottenuti mediante l'ottimizzazione

| | Valore iniziale | Valore finale | Incremento (%) |
|---|-----------------|---------------|----------------|
| Rigidità torsionale sosp. (Nm/rad) | 184000 | 468000 | 155% |
| Rigidità torsionale abitacolo (Nm/rad) | 153000 | 491000 | 220% |
| Peso (kg) | 45 | 74 | 64% |

Nella Figura 5.4.11 è riportato lo schema strutturale finale, ottenuto dopo le modifiche effettuate.

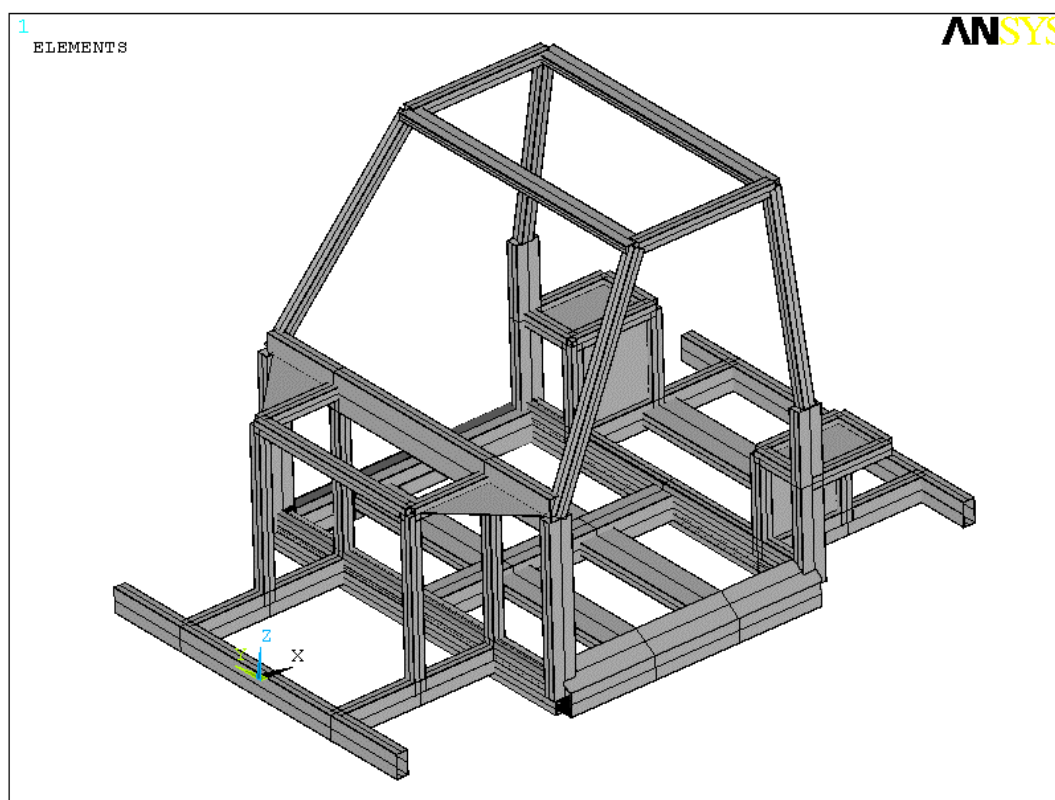


Fig. 5.4.11 - Schema strutturale finale



Verifica di resistenza ai carichi dinamici

I carichi dinamici cui è soggetta la struttura sono dovuti principalmente a:

- **Accelerazioni verticali** dovute a dossi;
- **Accelerazioni longitudinali** durante l'accelerazione e la **frenata**;
- **Accelerazioni centrifughe** laterali durante la percorrenza di curve;

La schematizzazione dei carichi dinamici può essere effettuata secondo la trattazione di **J.Pawlowski** [5.1], che permette una analisi preliminare semplificata.

Essa consiste fondamentalmente nella rappresentazione dei vari carichi dinamici come prodotto tra i carichi statici e dei coefficienti moltiplicativi “inerziali” differenti a seconda dei casi considerati.

(a) Carichi verticali simmetrici

Si generano quando le ruote di uno stesso assale incontrano un dosso contemporaneamente.

Le ruote subiscono accelerazioni verticali dipendenti dalla velocità, dall'altezza e dalla forma dei dossi e dal tipo di sospensioni. I valori medi dei coefficienti sono pari a 1.5-2.5 g verso l'alto e di 1.0 g verso il basso.

Si considera quindi un coefficiente di maggiorazione del carico statico pari a 2.5, in favore di sicurezza.

(b) Carichi verticali asimmetrici

Si generano quando una ruota incontra un dosso. Nella schematizzazione adottata la reazione corrispondente a tale ruota aumenta, mentre la somma delle reazioni dell'assale resta invariata.

Si suppone che le ruote che incontrano il dosso siano quelle di sinistra e si assume un coefficiente di maggiorazione del carico statico pari a 1.3.

**(c) Carichi longitudinali per trasferimenti di carico**

Sono dovuti alle accelerazioni e decelerazioni subite dal veicolo durante la marcia normale. La forza longitudinale totale agente può essere espressa mediante la relazione $F_L = m_s a_l$, dove m_s è la massa sospesa (supposta pari a 500 kg) e a_l è la massima accelerazione longitudinale (supposta pari ad 1 g, nel caso di brusca frenata).

Tale forza agisce all'altezza del baricentro, supposto a quota 0,8 m.

Il momento risultante, pari a 400 Nm, agisce intorno all'asse di beccheggio e può essere schematizzato, nel caso di frenata, con una maggiorazione dei carichi agenti sull'avantreno ed un alleggerimento del retrotreno, con coefficienti moltiplicativi opposti e pari in valore assoluto a 0,3.

(d) Carichi laterali dovuti ad accelerazioni centrifughe

Durante la percorrenza di un tratto di curva agisce la forza centrifuga F_c applicata al baricentro.

Supponendo che le ruote interne perdano il contatto con il terreno la relazione tra tale forza e la massa sospesa totale è $F_c = m_s \frac{v^2}{r}$, dove r è la carreggiata, supposta pari a 1,3 m.

Il momento risultante, agente intorno all'asse di rollio, è pari a 3200 Nm, e può essere schematizzato mediante dei coefficienti moltiplicativi pari in valore assoluto a 1,2.

I carichi statici visti in precedenza vengono quindi suddivisi in quattro contributi: anteriore e posteriore, destro e sinistro.

Nella Tabella 5.4.4 sono riportati i coefficienti di maggiorazione da considerare nei vari casi.

**Tabella 5.4.4 - Coefficienti di maggiorazione dei carichi statici per l'analisi dei carichi dinamici**

| CONDIZ. DI CARICO | | COEFFICIENTI Moltiplicativi CARICHI STATICI | | | |
|-------------------|-----------------------------|---|---------|----------|----------|
| | | ANT. DX | ANT. SX | POST. DX | POST. SX |
| | Carichi statici | 1 | 1 | 1 | 1 |
| (a) | Dosso su assale anteriore | 2,5 | 2,5 | 0 | 0 |
| | Dosso su assale posteriore | 0 | 0 | 2,5 | 2,5 |
| (b) | Dosso su ruota ant. sx | -1,0 | 1,3 | 0 | 0 |
| | Dosso su ruota post. sx | 0 | 0 | -1,0 | 1,3 |
| (c) | Decelerazione longitudinale | 0,3 | 0,3 | -0,3 | -0,3 |
| (d) | Accelerazione laterale | 1,2 | -1,2 | 1,2 | -1,2 |

Si possono fare due combinazioni di carichi corrispondenti a delle sollecitazioni a prevalenza di **flessione** e di **torsione**.

Combinazione di flessione

Si ottiene ipotizzando che la vettura, a pieno carico ed in fase di brusca frenata, incontri due dossi, sia sull'assale anteriore che su quello posteriore.

Si schematizza moltiplicando i carichi statici per i coefficienti riportati nella Tabella 5.4.5.

Tabella 5.4.5 - Coefficienti di maggiorazione per combinazione di flessione

| ANT. DX | ANT. SX | POST. DX | POST. SX |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $1 + 0,3 + 2,5$ | $1 + 0,3 + 2,5$ | $1 + 2,5 - 0,3$ | $1 + 2,5 - 0,3$ |
| 3,8 | 3,8 | 3,2 | 3,2 |

Nelle figure 5.4.12 e 5.4.13 sono riportati i carichi applicati e il diagramma del momento flettente.

Si può assumere che il contributo delle altre componenti di sollecitazione sia trascurabile rispetto al momento flettente intorno all'asse di beccheggio ai fini della determinazione delle tensioni massime.

I momenti più elevati sono quelli agenti sulle sezioni di mezzzeria dei longheroni (**300 Nm**) e quelli nei punti di attacco dei puntoni anteriori alla traversa del pianale



(400 Nm): valori analoghi a quelli massimi ottenuti nella verifica statica preliminare del pianale base.

In questo caso, però, l'elevato momento di inerzia delle sezioni fa scendere il valore delle corrispondenti tensioni rispettivamente fino a **7 MPa** (longheroni) e **26 Mpa** (punti anteriori).

In entrambi i casi si è **al di sotto** dal limite di **132 MPa** (con **coefficiente di sicurezza pari a 5**).

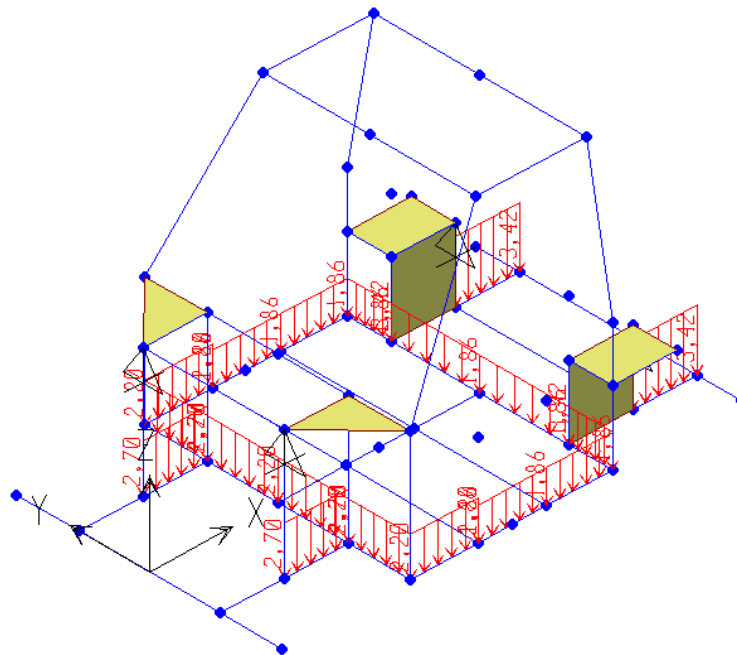


Fig. 5.4.12 - Carichi applicati nella combinazione di flessione

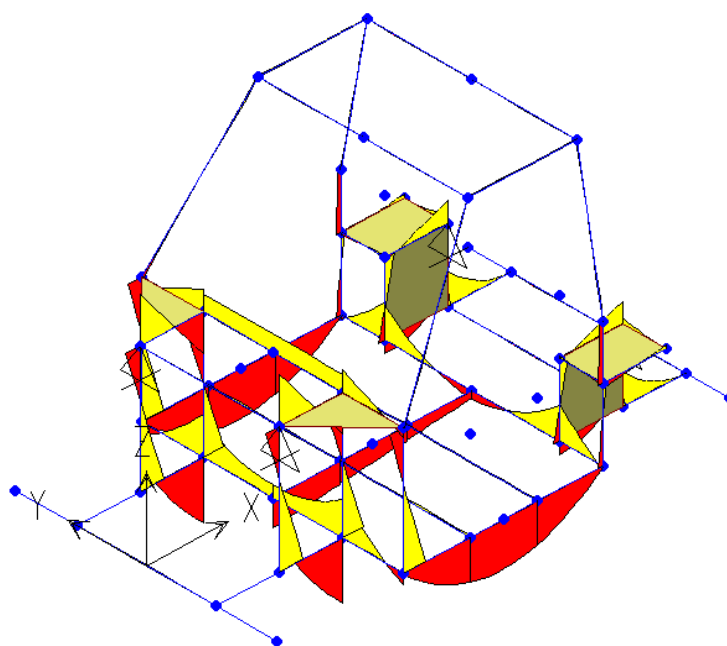


Fig. 5.4.13 - Distribuzione del momento flettente intorno all'asse Y di beccheggio

Combinazione di torsione

Si ottiene ipotizzando che la vettura a pieno carico incontri contemporaneamente un dosso sulla ruota anteriore sinistra ed uno sulla posteriore destra.

Si schematizza moltiplicando i carichi statici per i coefficienti riportati nella Tabella 5.4.6.

Tabella 5.4.6 - Coefficienti di maggiorazione per combinazione di torsione

| ANT. DX | ANT. SX | POST. DX | POST. SX |
|---------|---------|----------|----------|
| 1 - 1 | 1 + 1,3 | 1 + 1,3 | 1 - 1 |
| 0 | 2,3 | 2,3 | 0 |

Nelle Figure 5.4.14 e 5.4.15 sono riportati i carichi applicati e i diagrammi della torsione e del momento flettente intorno all'asse di beccheggio.

In questo caso la verifica è immediata: i **momenti flettenti** massimi non superano i **150 Nm** (sempre in corrispondenza di longheroni e puntoni anteriori), mentre la **tensione tangenziale massima**, corrispondente ad un momento torcente pari a 60 Nm, è limitata a 12 MPa.

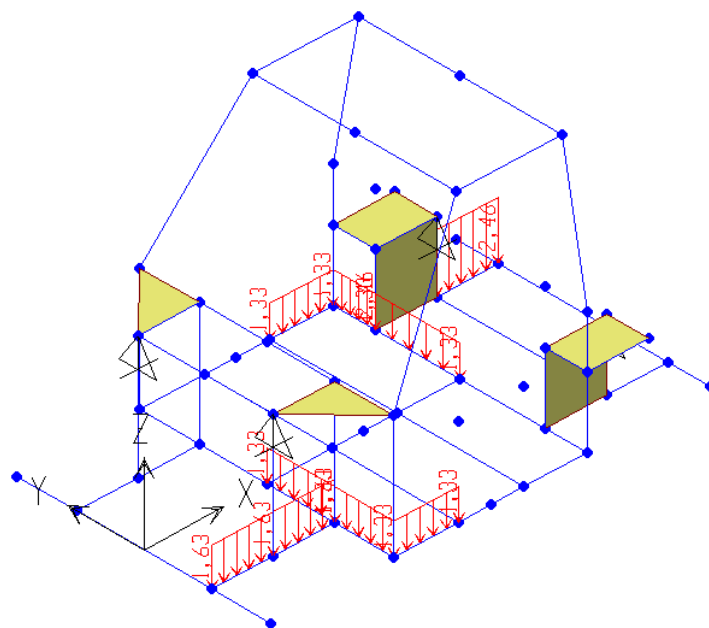


Fig. 5.4.14 - Carichi applicati nella combinazione di torsione

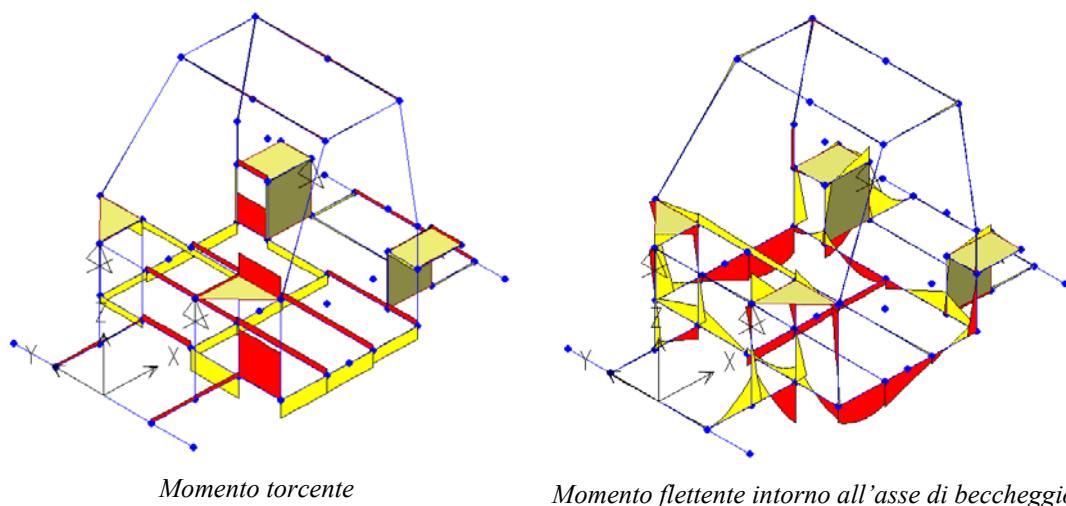


Fig. 5.4.15 - Diagrammi di momento torcente e flettente nella combinazione di torsione

Adottando un qualsiasi **criterio** per la **tensione equivalente** σ_{eq} la verifica è soddisfatta.

In generale, possiamo concludere che la struttura ottimizzata ottenuta è **ben dimensionata** rispetto ai carichi statici e dinamici di esercizio.



5.5 - LAYOUT DEL VEICOLO

In questo Paragrafo finale vengono date delle indicazioni generali sulle possibilità che una struttura come quella sviluppata (vedi Figura 5.5.1) consente ai fini dell'ottenimento di varie configurazioni di veicolo.

Si ipotizza una **vettura multifunzionale**, con delle versioni per il trasporto privato di persone ed altre espressamente pensate per il trasporto di merci, sempre con un utilizzo prevalente nell'area urbana.



Fig. 5.5.1 - Struttura ottimizzata con principale disposizione degli organi meccanici

Fondamentalmente si ottiene un'abitabilità per quattro persone (o in alternativa un incremento del volume di carico) con **l'aumento del passo** da 1800 mm a 2150 mm (vedi Figura 5.5.2).

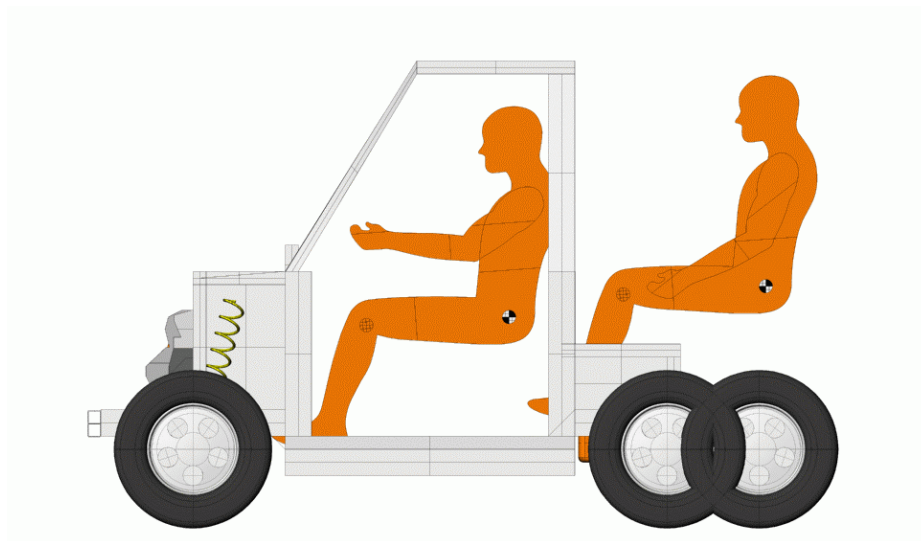


Fig. 5.5.2 - Abitabilità per due e per quattro passeggeri (profilo)

In base a questa distinzione vengono poi elaborate delle proste finalizzate al trasporto di persone o di merci, con le relative considerazioni sulla variazione dei valori di rigidezza torsionale.



Fig. 5.5.3 - Abitabilità per due passeggeri (vista tridimensionale)



5.5.1 - Versioni a passo corto

Versione Cab



Fig. 5.5.4 - Versione Cab a passo corto

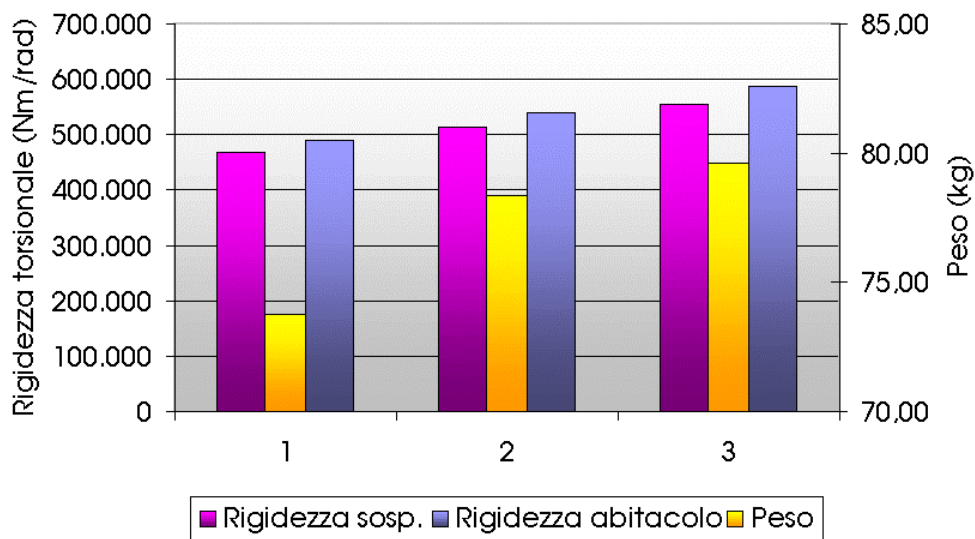
E' la **configurazione base** del veicolo, adibita al trasporto di due passeggeri (vedi Figura 5.5.4).

L'abitacolo viene esteso oltre il montante B.

La struttura di base è rinforzata mediante i seguenti elementi aggiuntivi:

- Montanti C inferiori e superiori;
- Prolungamento dei SRR tra i montanti B e C;
- Aggiunta della traversa posteriore del tetto.

Con l'aggiunta di questi elementi i valori di peso e rigidezza vengono modificati secondo il Diagramma 5.5.1.

**Diagramma 5.5.1 - Rigidezza e peso per la versione Cab a passo corto**

| | |
|---|--|
| 1 | Struttura di base |
| 2 | Montanti C (inferiori e superiori) e SRR posteriori (sez.05) |
| 3 | Come configurazione n.2 con traversa tetto posteriore (sez.14) |

Si osserva come con un peso contenuto entro gli 80 kg si ottiene in entrambi i casi (configurazioni 2 e 3) un sensibile incremento di rigidezza.



Versioni da trasporto

In queste versioni l'abitacolo consente sempre il trasporto di due passeggeri, ma è chiuso in corrispondenza dei montanti B.

Sulla parte posteriore è possibile prevedere:

- Un piano di carico scoperto (versione **Pick-up**);
- Un contenitore asportabile più alto, chiuso e sagomato seguendo il profilo della cella abitacolo della vettura (versione **Pick-up con container**);
- Un volume di carico integrato nella vettura, accessibile tramite portellone posteriore (versione **Furgone**).

Versioni Pick-up a passo corto

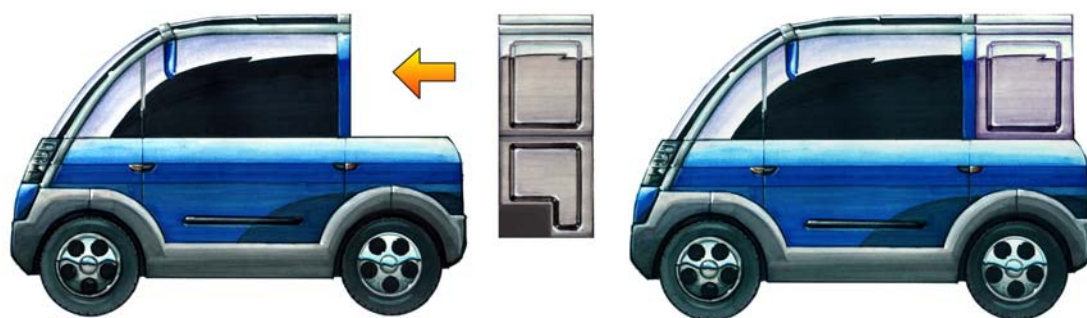
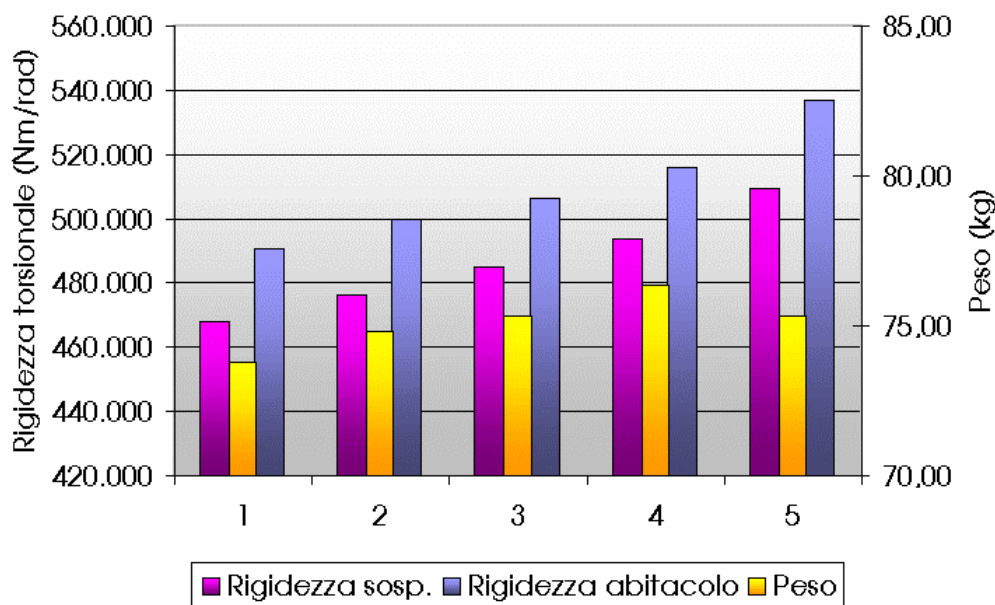


Fig. 5.5.5 - Versione Pick-up a passo corto con cassa asportabile

Nella versione **Pick-up** può essere adottata la struttura di base sviluppata in precedenza, senza elementi aggiuntivi o variazioni dimensionali.

E' tuttavia consigliabile prevedere una o due **traverse di collegamento** tra i montanti B, che oltre a proteggere la cella abitacolo dall'intrusione del carico trasportato, in caso di incidente, aumentano la rigidezza secondo quanto riportato nel Diagramma 5.5.2.

**Diagramma 5.5.2 - Rigidezza torsionale per la versione Pick-up a passo corto**

| | |
|---|--|
| 1 | Struttura di base |
| 2 | Traversa inferiore di collegamento tra montanti B (sez.05) |
| 3 | Traversa superiore di collegamento tra montanti B (sez.05) |
| 4 | Doppia traversa di collegamento tra montanti B (sez.05) |
| 5 | Montanti C inferiori ed elementi longitudinali laterali (sez.05) |

In particolare si osserva come la soluzione più efficace sia il rinforzo mediante elementi longitudinali sui lati del piano di carico: tale soluzione, tuttavia, prevedendo l'estensione longitudinale dei passaruota comporta una notevole diminuzione del volume di carico: le soluzioni 2, 3 e 4 appaiono più funzionali e garantiscono comunque una rigidezza sufficiente.

Versione Furgone a passo corto

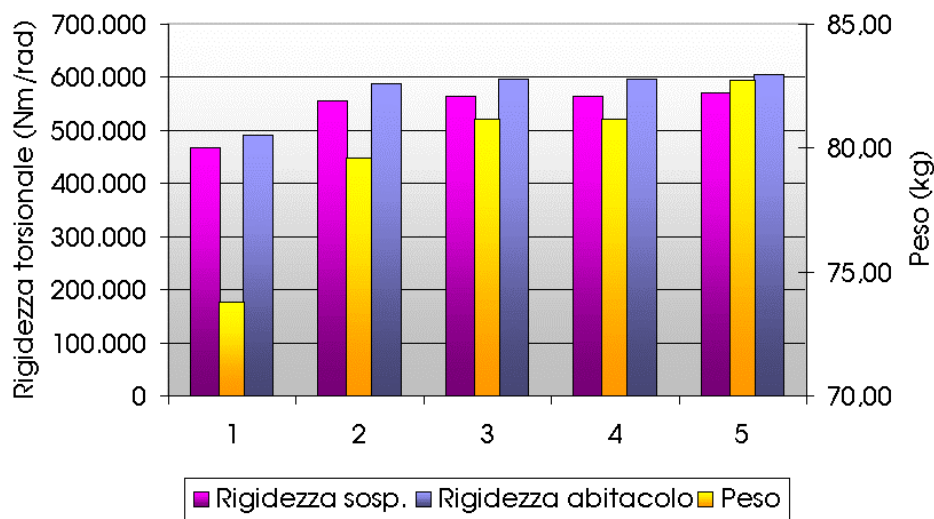
Nella versione **Furgone**, essendo il volume di carico integrato nel corpo vettura, può essere adottata la struttura della versione Cab, con i relativi rinforzi.

Eventualmente si può separare l'abitacolo dal volume di carico mediante una o due traverse di collegamento tra i montanti B, analogamente alla versione Pick-up.



In questo caso si ottengono valori di rigidità ulteriormente incrementati (vedi Diagramma 5.5.3).

Diagramma 5.5.3 - Rigidità torsionale per la versione Furgone a passo corto



| | |
|---|--|
| 1 | Struttura di base |
| 2 | Struttura Cab (con montanti C, SRR post. e traversa post. tetto) |
| 3 | Aggiunta di traversa inferiore di collegamento tra montanti B (sez.05) |
| 4 | Aggiunta di traversa superiore di collegamento tra montanti B (sez.05) |
| 5 | Doppia traversa di collegamento tra montanti B (sez.05) |



Fig. 5.5.6 - Possibile layout con vetratura estesa



5.5.2 - Versioni a passo lungo

Molto interessante è la possibilità di ottenere una configurazione a passo maggiorato mediante un limitato numero di modifiche sulla struttura originale.

In particolare si è ipotizzato un **aumento del passo** (e quindi della lunghezza complessiva) pari a **350 mm**.

Il principale problema da affrontare è la **perdita di rigidità** dovuta all'allungamento del pianale, e pari al **20% circa**.

A questo riguardo le strade percorribili sono due:

1. Si può mantenere la struttura di base e sfruttare gli elementi di rinforzo specifici di ogni versione visti in precedenza per compensare tale perdita;
2. Si possono rinforzare degli elementi della struttura di base: può per esempio essere aumentato lo spessore di alcuni elementi del pianale, come i longheroni.

Successivamente viene illustrata la prima possibilità.

Versione Cab

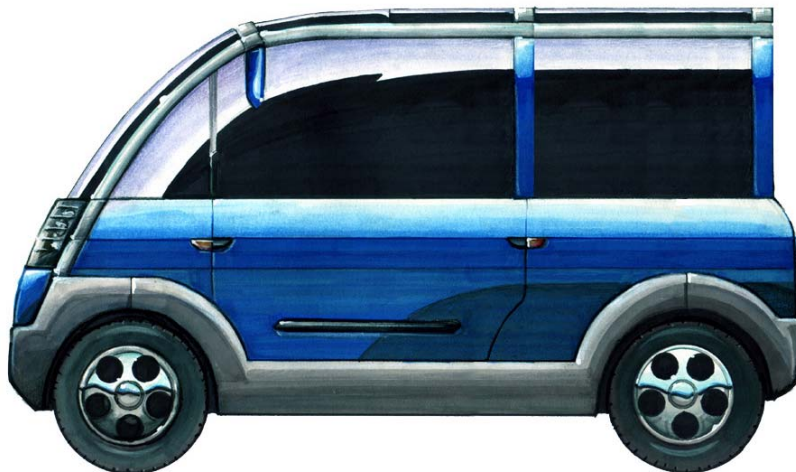


Fig. 5.5.7 - Versione Cab a passo lungo

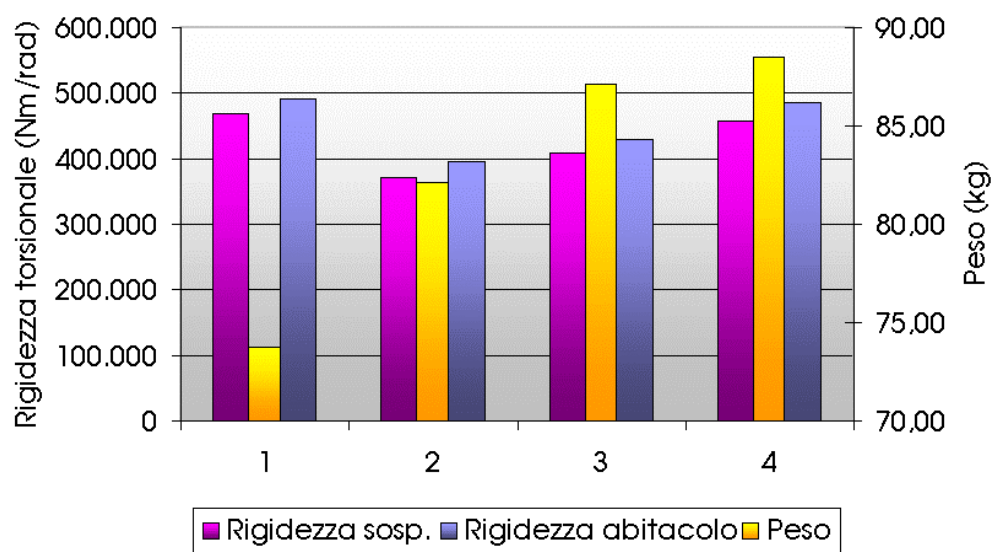
In analogia con la versione Cab a passo corto la struttura è rinforzata mediante i seguenti elementi aggiuntivi:



- Montanti C inferiori e superiori;
- Prolungamento dei SRR tra i montanti B e C;
- Traversa posteriore tetto.

Queste modifiche applicate sulla struttura a passo lungo ne aumentano la rigidità e fino a riportarla ai valori della struttura base a passo corto (vedi Diagramma 5.5.4).

Diagramma 5.5.4 - Rigidità torsionale per la versione Cab a passo lungo



| | |
|---|--|
| 1 | Struttura di base a passo corto |
| 2 | Struttura di base a passo lungo |
| 3 | Montanti C (inferiori e superiori) e SRR posteriori (sez.05) |
| 4 | Come configurazione n.2 con traversa tetto posteriore (sez.14) |



Versioni da trasporto

In analogia con la corrispondente versione a passo corto, anche in questo caso possono essere previste tre configurazioni: Pick-up, Container e Furgone.

Versioni Pick-up e Container a passo lungo

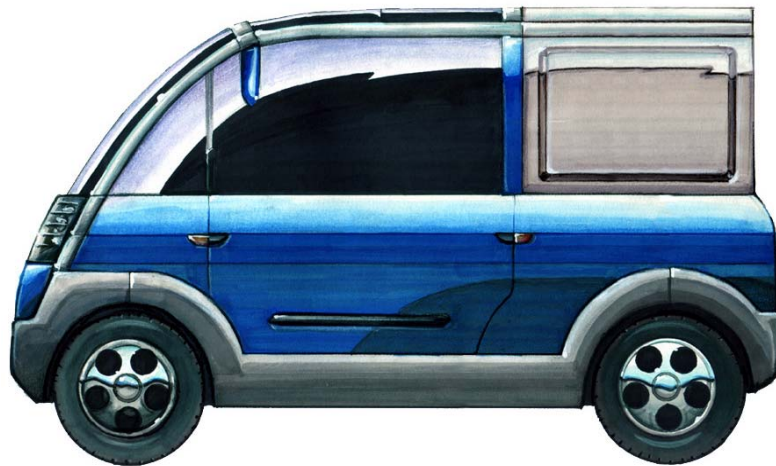
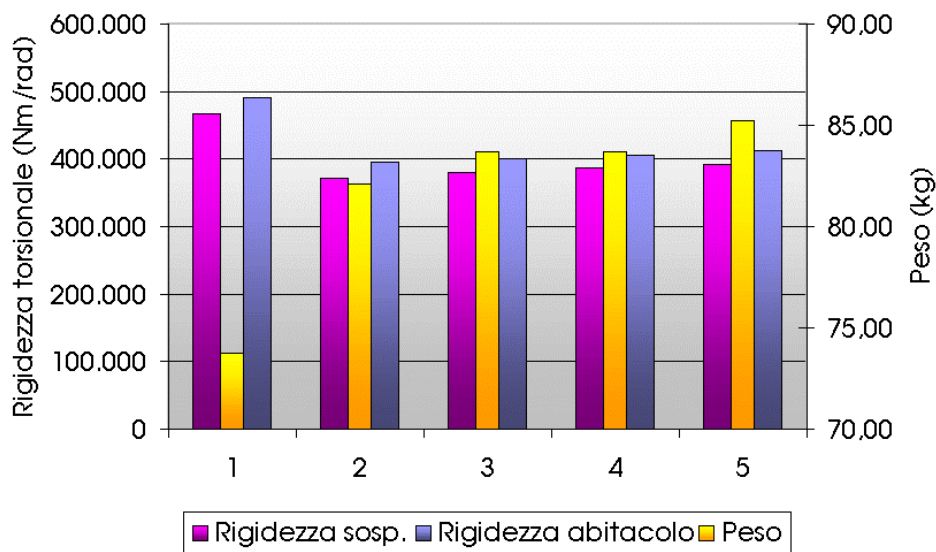


Fig. 5.5.8 - Versione Pick-up a passo lungo

Per compensare la perdita di rigidità dovuta all'allungamento del passo si effettuano le modifiche viste in precedenza per le versioni da trasporto a passo corto.

**Diagramma 5.5.5 - Rigidezza torsionale per la versione Pick-up a passo lungo**

| | |
|---|--|
| 1 | Struttura di base a passo corto |
| 2 | Struttura di base a passo lungo |
| 3 | Traversa inferiore di collegamento tra montanti B (sez.05) |
| 4 | Traversa superiore di collegamento tra montanti B (sez.05) |
| 5 | Doppia traversa di collegamento tra montanti B (sez.05) |

In questo caso la perdita di rigidezza non è totalmente compensata dalle modifiche effettuate.

Possono quindi essere previsti, se necessario dei rinforzi ulteriori, localizzabili nelle zone laterali posteriori, che ripristinerebbero la rigidezza iniziale.

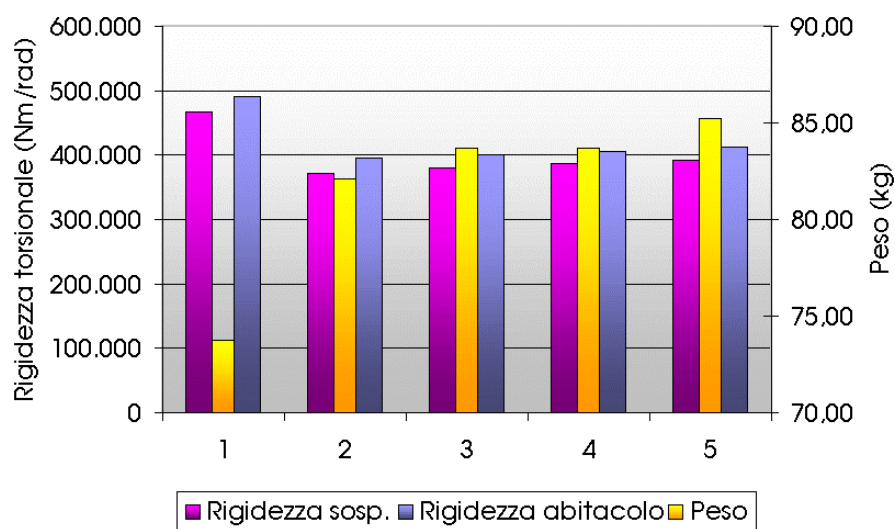


Versione Furgone a passo lungo

In questo caso si può adottare la struttura della versione Cab a passo lungo.

L'eventuale aggiunta di traverse di collegamento tra i montanti B con conferisce sensibili incrementi di rigidità, ed è più che altro da attuare come protezione della cella abitacolo da intrusioni della merce trasportata in caso di incidente.

Diagramma 5.5.6 - Rigidità torsionale per la versione Furgone a passo lungo



| | |
|---|--|
| 1 | Struttura di base a passo corto |
| 2 | Struttura di base a passo lungo |
| 3 | Struttura Cab (con montanti C, SRR post. e traversa post. tetto) |
| 4 | Aggiunta di traversa inferiore di collegamento tra montanti B (sez.05) |
| 5 | Aggiunta di traversa superiore di collegamento tra montanti B (sez.05) |
| 6 | Doppia traversa di collegamento tra montanti B (sez.05) |



CONCLUSIONI

Il veicolo presentato, sebbene in forma di layout generale, mette in luce le possibilità che i telai Space Frame in lega di alluminio offrono dal punto di vista della flessibilità del prodotto.

La ridotta esperienza maturata ed i vincoli economici e produttivi delle Industrie ne hanno finora limitato l'impiego a rare applicazioni.

Tuttavia esso potrà costituire una valida soluzione a medio termine per molti veicoli con regimi produttivi medio-bassi, ed anche per una serie di problemi che oggi affliggono il prodotto "automobile", dall'inquinamento ambientale a quello geometrico, che spesso congestiona i centri urbani più densamente popolati.



BIBLIOGRAFIA CAPITOLO 5

- [5.1] J.Pawlowski, *"Vehicle Body Engineering"*, Business Books, UK, 1969.
- [5.2] P.Dvorak, *"Optimizing study shows how to add structural stiffness while taking off weight"*, Machine Design, September 10, 1998.
- [5.3] L.L.Thompson, P.H.Soni, S.Raju, E.H.Law, *"The effect of chassis flexibility on roll stiffness of a Winston Cup Race Car"*, SAE Technical Paper 983051, 1998.
- [5.4] L.L.Thompson, S.Raju, E.H.Law, *"Design of a Winston Cup Chassis for torsional stiffness"*, SAE Technical Paper 983053, 1998.
- [5.5] L.L.Thompson, J.K.Lampert, E.H.Law, *"Design of a twist fixture to measure the torsional stiffness of a Winston Cup Chassis"*, SAE Technical Paper 983054, 1998.
- [5.6] M.Fattori, *"Progetto di una City-Car con particolare riguardo al problema dell'impatto ambientale"*, Tesi di laurea in Ingegneria Meccanica, rel. Prof. U.Pighini, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", A.A. 2000-2001.



BIBLIOGRAFIA GENERALE

- [1] H.J.Powell, A.Seeds, D.Boomer, D.Biggs, *"Foresight Vehicle - Advanced Materials and Structures Thematic Group (FASMAT) - Mission to the USA Automotive Industry (1999)"*, TWI Report No: 12013/1/99, The Welding Institute, 1999.
- [2] J.P.Clark, *"Future of Automotive Body Materials: Steel, Aluminum and Polymer Composites"*, Massachusetts Institute of Technology, Hoogovens Technology Day, October, 1998.
- [3] E.Moroni, *"Studio sull'applicazione delle leghe leggere nella produzione di autovetture"*, Tesi di laurea in Ingegneria Meccanica, rel. Prof. U.Pighini, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", A.A. 1994-1995.
- [4] F.M.Mazzolani, *"La progettazione delle strutture in leghe di alluminio"*, Liguori Editore, 1986.
- [5] *"TALAT – Training in Aluminium Application Technologies"*, European Aluminum Association, Brussels, 1999.
- [6] *"Automotive Aluminum"*, <http://www.aluminum.org/default2.cfm/2/30>, The Aluminum Association, Inc., 2000.
- [7] *"Cost Modeling as a Tool for Product Design & Materials Selection"*, Materials System Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, IMVP European Cost Modeling Workshop, Lisbon, Portugal, 6 May, 1999.
- [8] T.C.Moore, *"Ultralight Hybrid Vehicles: Principles and Design"*, The Hypercar Center, Rocky Mountain Institute (RMI), 13th International Electric Vehicle Symposium (EVS-13), Osaka, Japan, 1996.
- [9] L.Ola Larsson, N.Palmquist (Volvo Cars), *"High quality aluminum welding – a*



- key factor in future car body production*", FAB Canada, January, 2001.
- [10] U.S. Congress, Office of Technology Assessment, *"Advanced Automotive Technology: Visions of a Super-Efficient Family Car"*, OTA-ETI-638, Washington DC, U.S. Government Printing Office, September, 1995.
- [11] P.Grote, M.Sharp, *"Defining the Vehicle Development Process"*, www.smartsim.org/Documents/Defining%20the%20Vehicle%20Development%20Process.pdf, MTS Systems Corporation, 2000.
- [12] K.Tanabe, K.Hashimoto, M.Tanaka, *"Development of the All-Aluminum Light Body Structure for the Hybrid Electric Vehicle"*, Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, 2000.
- [13] H.Yamashita, M.Hirano, *"Research on the Application of Aluminum Door Beam for Automobiles"*, Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, 2000.
- [14] G.E.Nordmark, J.M.Miller, V.K.Banthia, *"Joint design for aluminum automotive structures"*, SAE Technical Paper 930492, 1993.



INDICE DELLE ABBREVIAZIONI

| | |
|-------|--------------------------------|
| AIV | Aluminum Intensive Vehicle |
| ASF® | Audi Space Frame |
| BIW | Body-in-White |
| BRC | Body Rigidity Centreline |
| CIV | Composite Intensive Vehicle |
| EAA | European Aluminum Association |
| FRP | Fiber Reinforced Polymers |
| FSW | Friction Stir Welding |
| HAZ | Heat Affected Zone |
| HT | Heat Treatable |
| MPV | Multi Purpose Vehicle |
| NVH | Noise, Vibration and Harshness |
| PT | Processo Tecnico |
| RSW | Resistance Spot Welding |
| SF | Space Frame |
| SM | Sistema Meccanico |
| SMC | Sheet Molding Compound |
| SP | Schema di Principio |
| SPF | Super Plastic Forming |
| SPR | Self-Piercing Rivets |
| SRR | Side Roof Rails |
| SUV | Sport Utility Vehicle |
| TWI | The Welding Institute |
| ULSAB | Ultra Light Steel Auto Body |
| UTS | Ultimate Tensile Strength |