





Acciaio inossidabile strutturale

Elevate caratteristiche di resistenza meccanica, capacità di assorbire energia, duttilità che significa facilità di fabbricazione, resistenza a fatica e resistenza alla corrosione sono alcune delle proprietà degli acciai inox, che li rendono in grado di soddisfare specifiche richieste di diversi sottoassemblati strutturali dell'auto

Fausto Capelli, Vittorio Boneschi,
Paolo Viganò, Centroinox
info@centroinox.it

Lo scopo di questo articolo è di illustrare le applicazioni strutturali degli acciai inossidabili austenitici nel settore automotive, partendo dalle prime esperienze con le strutture degli autobus (a partire dagli anni '90) fino alle ultime esperienze con il telaio delle cosiddette 'microcar' e alcuni critici componenti per la sicurezza.

Le tecniche di formatura a freddo, combinate con l'elevata deformabilità dell'acciaio inossidabile austenitico, permettono l'ottimizzazione di componenti strutturali.

In caso di urto, l'ottimizzazione della forma associata alla sensibilità alla velocità di applicazione sforzi-deformazioni favorisce il collasso degli elementi laterali per progressivo impaccamento invece che per inflessione, aumentando la capacità di assorbire energia.

Acciai inossidabili austenitici: caratteristiche meccaniche e resistenza alla corrosione

E' un dato di fatto che le proprietà di incrudimento degli acciai inossidabili austenitici durante le operazioni di formatura e la sensibilità alla velocità di applicazione sforzi-deformazioni hanno un pronunciato e combinato effetto sul comportamento meccanico di queste leghe

metalliche. Ciò significa che il comportamento meccanico degli acciai inossidabili è fortemente influenzato dal processo di formatura a freddo e dalla sensibilità alla velocità di applicazione carichi-deformazioni.

Con gli acciai inossidabili austenitici un incremento dello stato di incrudimento porta a due effetti:

- un incremento della tensione di snervamento (σ_y) in funzione della deformazione (%) a freddo subita;
 - solo una moderata diminuzione della duttilità (ϵ),
- mentre un aumento della velocità di applicazione degli sforzi ha due effetti importanti:
- un incremento del valore dello sforzo (σ) in funzione della velocità di deformazione ($\epsilon' = d\epsilon/dt$);
 - solo una moderata diminuzione della duttilità (ϵ).

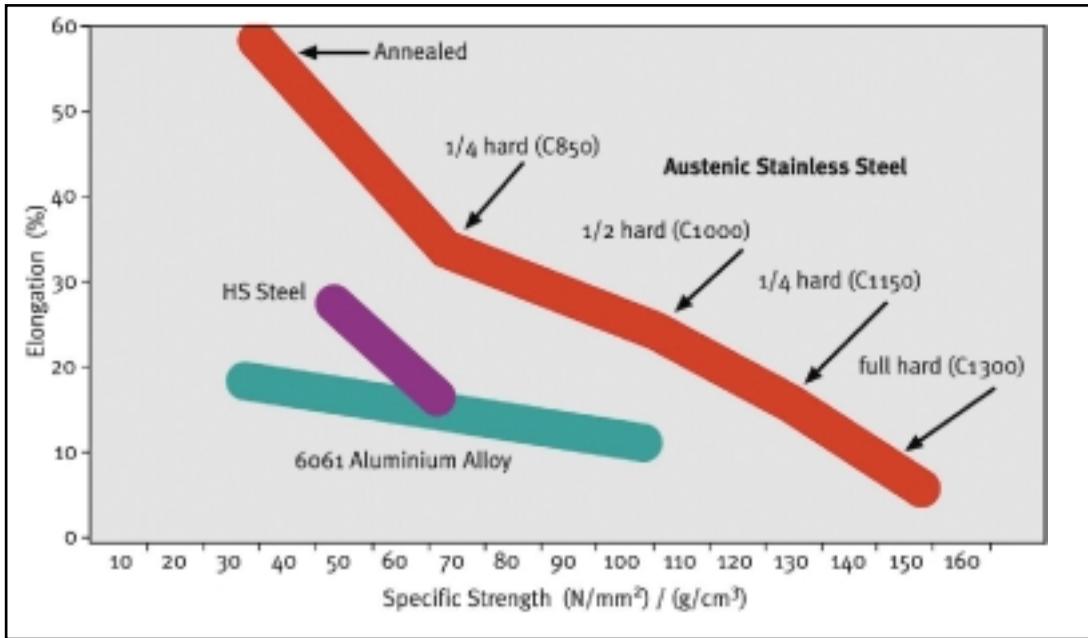
La tabella 1 riporta le principali caratteristiche meccaniche e fisiche dell'acciaio inossidabile Cr-Ni-(N) (EN 1.4318 - X2CrNiN18-7) che negli ultimi anni è stato studiato per determinarne le applicazioni in campo automobilistico. Altri tipi di acciaio sviluppate espressamente per questi impieghi danno prestazioni simili se non migliori.

Come si può vedere, la rigidità specifica (E/r

Tab. 1 • Mechanical and physical properties of various metallic materials

Property	Austenitic Stainless Steel EN 1.4318 - X2CrNiN 18-7					Aluminium Alloy 6061		High Strength Steel (HSS)
	Annealed	C850 (1)	C1000 (2)	C1150 (3)	C1300 (4)	T4 (5)	T6 (6)	
Density ρ (g/cm ³)	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	2,7	2,7	7,83
Density relative to steel	1	1	1	1	1	0,35	0,35	1
Yield strength σ_y (N/mm ²)	370	600	880	1100	1200	130	275	410
Tensile strength σ_t (N/mm ²)	800	900	1160	1300	1400	225	310	480
Specific strength σ_y / ρ	46,8	76,0	111,4	139,2	151,9	48,1	101,8	52,4
Specific strength relative to HSS	0,9	1,45	2,12	2,66	2,9	0,92	1,90	1,0
Elongation El(%)	53	35	20	15	10	15	8	22
Specific Elongation relative to HSS	2,41	1,59	0,91	0,68	0,45	0,68	0,36	1,0
Young's modulus (E) (kN/mm ²)	200	200	190	190	190	69	69	200
Specific Stiffness E/ ρ	25	25	24	24	24	25,5	25,5	25

(1) work hardened C850 (1/4 hard); (2) work hardened C1000 (1/2 hard); (3) work hardened C1150 (3/4 hard); (4) work hardened C1300 (4/4 hard); (5) T4: annealed; (6) T6: after ageing treatment



1) Allungamento percentuale in funzione della resistenza specifica

rapporto tra modulo di Young ed elasticità) dell'acciaio inossidabile è molto simile a quello di una lega di alluminio o di un acciaio HSS ad alta resistenza, mentre la resistenza specifica (r_y/r) dell'inossidabile austenitico lavorato a freddo è molto più alta di quella degli altri materiali.

Un altro importante fattore è la formabilità. La figura 1 fornisce l'allungamento (El%) in funzione della resistenza specifica (r_y/r) e dimostra che gli inossidabili austenitici si prestano benissimo alle lavorazioni a freddo quali stiro, imbottitura profonda e idroformatura.

In termini di capacità di assorbire energia, tenendo presente che questa si può valutare

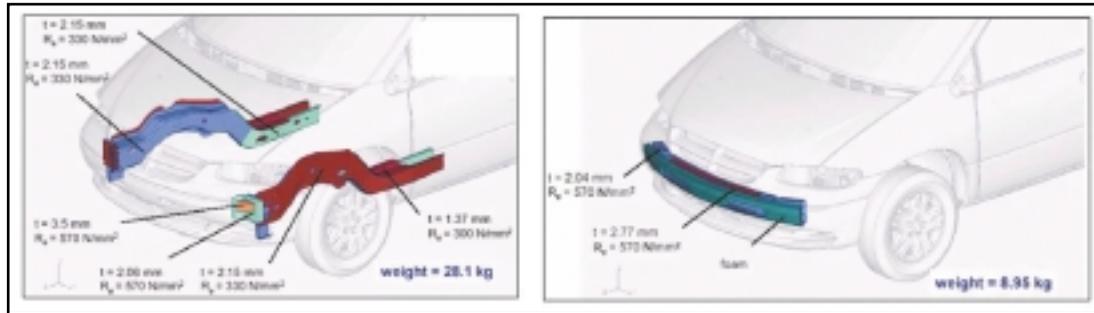
integrando l'area sottesa dalla curva carichi-deformazioni, la tabella 2 fornisce l'energia assorbita per i diversi materiali oggetto di questa ricerca.

Diverse esperienze in proposito, alcune delle quali illustrate in questo articolo, confermano il buon comportamento degli acciai inossidabili in termini di sicurezza e possibilità di ridurre il peso. Recentemente, Euro Inox, l'Associazione Europea per lo Sviluppo degli Acciai Inossidabili, ha commissionato uno studio eseguito da FKA, istituto di ricerca in campo automobilistico strettamente associato con l'Università di Aquisgrana.

Tab. 2 • Absorbed energy for the different materials

Material	σ_y (N/mm ²)	$\sigma_{0.2}$ (N/mm ²)	n (1)	Density ρ (g/cm ³)	Absorbed Energy W_2 (J/g)
Stainless Steel X2CrNiN18-7/1.4318					
Annealed	370	800	0,60	7,9	38,0
C 850 (2)	600	900		7,9	33,5
C 1000 (3)	880	1160		7,9	25,9
Aluminium alloy 6061 - T4					
	145	240	0,22	2,7	20,4
High Strength Steel (HSS)					
	410	480	0,15	7,83	12,5

(1) Strain-hardening coefficient; (2) In the cold-worked condition: C850 ($850 < \sigma_1$ (N/mm²) < 1000); (3) In the cold worked condition: C1000 ($1000 < \sigma_1$ (N/mm²) < 1150)



2) In alto la fiancata e la traversa paraurti esaminate



3) Al centro l'aspetto di una struttura in acciaio inossidabile dopo 3 anni di esposizione all'ambiente stradale

Scopo dello studio era determinare la potenziale riduzione di peso degli elementi laterali e della traversa paraurti di un'autovettura usando in sostituzione acciaio inossidabile. Il fattore limitante la potenziale riduzione di peso di questi componenti erano le norme di sicurezza antiurto, dato che questi componenti sono parte della struttura anteriore della vettura. Oltre alla sostituzione del materiale, i componenti sono stati riprogettati. Per il paraurti si è tenuto conto delle norme di sicurezza per i pedoni. La prima parte della ricerca riguardava le fiancate. Si sono prese in esame due condi-

zioni di urto, ad alta e a bassa velocità.

La riduzione possibile del peso per urti ad alta velocità variava tra 9% (stato 2B) e 28% (lavorato a freddo). A bassa velocità la riduzione possibile era 12% (stato 2B) e 49% (lavorato a freddo). La dipendenza dalla velocità di deformazione non era un fattore di altri benefici rispetto agli acciai al carbonio ad alta resistenza. Risulta dalle analisi che il potenziale di riduzione del peso è molto superiore per gli urti a bassa velocità che ad alta velocità. Quindi, l'urto ad alta velocità limita la riduzione possibile.

Un altro aspetto della ricerca sulle fiancate era riprogettarle sostituendo alla struttura composta un solo elemento idroformato. La riduzione di peso possibile usando acciaio inossidabile, in caso di urti ad alta velocità, variava tra 19% (allo stato 2B) e 34% (incrudito a freddo); a bassa velocità, da 41% (allo stato 2B) a 50% (incrudito a freddo). Anche qui, l'urto ad alta velocità è il fattore limitante.

La seconda parte dello studio riguardava la traversa paraurti. Si è determinata dapprima la possibile riduzione di peso senza tener conto della salvaguardia dei pedoni. Si è eseguito uno studio parametrico per individuare il modello



4) A lato i coperchi dei vani ruota in lamiera di EN1.4301 (AISI 304), spessore 1,5 mm

più efficiente. In un secondo tempo, si è studiata una traversa paraurti di larghezza ridotta e che assicurasse protezione per i pedoni. Anche tenendo conto di ciò, è stato possibile ridurre il peso di 38,8%, riprogettando il componente e usando in sostituzione acciaio inossidabile. Questa ricerca ha dimostrato possibili notevoli riduzioni del peso, fino a 34% per le fiancate e 38,8% per la traversa paraurti. Dovrebbe quindi valer la pena di studiare ulteriormente la formabilità e lavorabilità dei componenti in acciaio inossidabile (per altre informazioni in proposito, Euro Inox: www.euro-inox.org).

Per quanto riguarda la resistenza a corrosione, è ben nota la stabilità degli inossidabili nei più diversi ambienti. L'auto-passivazione dà loro la capacità di resistere alla corrosione uniforme che colpisce gli acciai al carbonio, e, se scelti con cura, anche alla corrosione localizzata. Nel settore trasporti si hanno molti esempi del buon comportamento di queste leghe in varie condizioni:

- alta temperatura: valvole, scarichi, collettori, dispositivi di fissaggio, guarnizioni teste cilindri...
- atmosfere: scarichi, impianti di frenatura, strutture di autobus, elementi decorativi...

Si può stimare che un medio veicolo europeo contenga circa 20 kg di acciaio inossidabile destinato a queste applicazioni.

La figura 3 mostra l'aspetto delle strutture in EN1.4301 (AISI 304) di un fuori strada in servizio normale per tre anni, esposto all'azione dei sali antighiaccio.

La possibilità di fare a meno di trattamenti protettivi della superficie porta a considerazioni economiche ed ambientali che sono state esaminate dall'industria dell'acciaio inossidabile in termini di LCC e LCA, ricordando anche che gli acciai inossidabili sono riciclabili al 100%.

L'esperienza dell'industria degli autobus

Per quanto riguarda gli autobus, per esempio,



5) A lato un esempio di applicazione strutturale dell'acciaio inossidabile

circa 12 anni fa una ditta con sede a Udine, richiese al Centro Inox un corso tecnico 'su misura' sugli acciai inossidabili. Lo scopo era realizzare una scocca di autobus in acciaio inossidabile. Da qui si sviluppò una reazione a catena e diversi altri costruttori di autobus cominciarono ad usare acciaio inossidabile. In questo caso si è approfittato della prima ditta già sensibilizzata. Come risultato, mentre 20 anni fa l'acciaio inossidabile non era usato negli autobus, oggi l'80% degli autobus costruiti in Italia ha una scocca formata per la maggior parte da acciaio inossidabile.

In Italia, l'impiego di acciai inossidabili per costruire tanto i pannelli esterni che i componenti strutturali della scocca degli autobus in generale è aumentato enormemente.

Inizialmente, laminati piani (lamiere e piattina) si usavano per lo più per la pannellatura sotto la cintura e per i vani ruote, le parti cioè più espo-



6) Sopra le scocche autoportanti costruite con tubi quadri in EN 1.4301 (AISI 304)

ste alla corrosione, su cui si applicava comunque una mano di fondo ed una vernice epossidica (fig. 4).

Per le parti strutturali della scocca, tentativi sperimentali con tubi di acciaio inossidabile a sezione quadra o rettangolare iniziarono 20 anni fa circa. Alcune ditte produssero dei prototipi (soprattutto per la serie turismo) con parti della scocca in acciaio inossidabile e li misero sulle strade italiane a titolo sperimentale.

I risultati furono molto soddisfacenti riguardo alle caratteristiche meccaniche ed alla resistenza a corrosione anche in ambienti estremamente aggressivi. Di conseguenza, questa tecnica fu largamente adottata, ed oggi i principali costruttori italiani di autobus usano regolarmente acciaio inossidabile per i componenti strutturali e le pannellature più esposte a corrosione.

Le pannellature esterne generalmente in acciaio inossidabile sono le seguenti:

Sopra la cintura:

- vani ruota, interno ed esterno;
- pannelli e fiancate esterne;
- fascia posteriore;
- bagagliaio;
- pannelli del comparto di servizio.

Sotto la cintura:

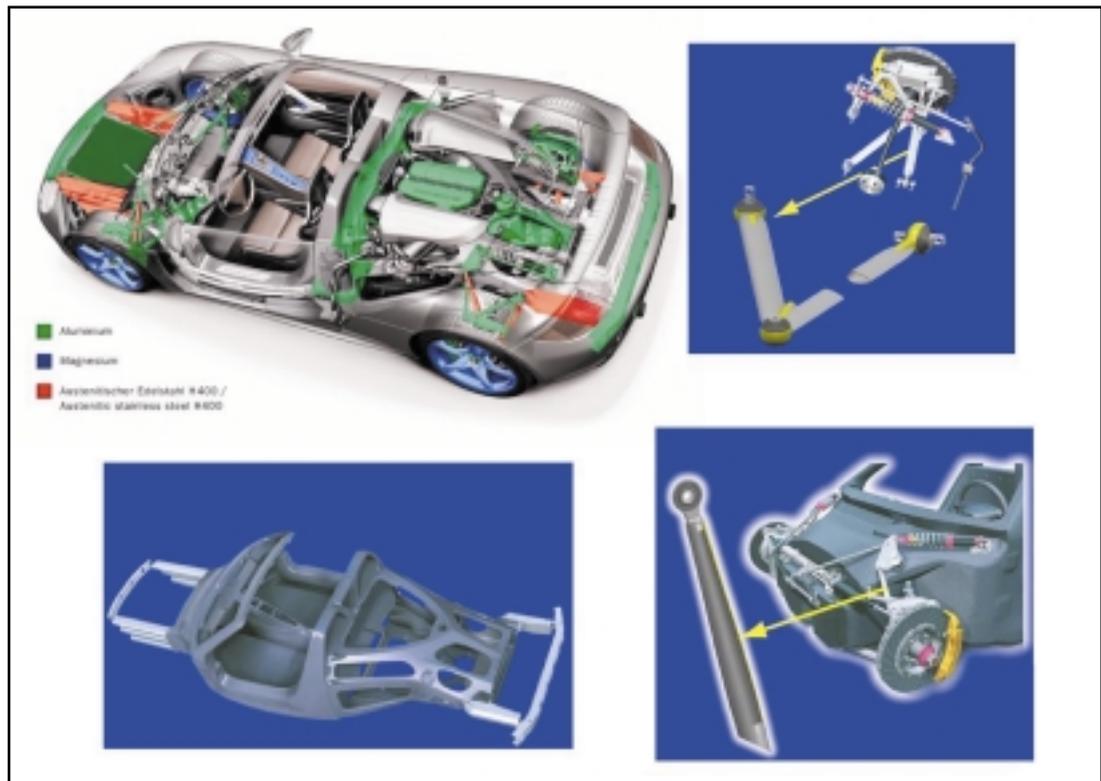
- pannelli e fiancate esterne;
- frontale anteriore;
- frontale posteriore;
- parte del tetto.

L'applicazione più interessante dell'acciaio inossidabile, come indicato sopra, è nella parte strutturale. Esso viene usato per due tipi di struttura: quelle in cui la scocca 'collabora' con il telaio portante e quelle a scocca portante.

La maggioranza dei veicoli è del primo tipo: si usa un telaio su cui è saldato un reticolo di tubi quadri o rettangolari in acciaio inossidabile (fig. 5). Alcune ditte fabbricano invece veicoli a scocca portante (fig. 6).

Alcune hanno ridisegnato completamente la scocca per il nuovo materiale, ricorrendo talvolta al metodo di calcolo strutturale a elementi finiti. Altre hanno adattato all'acciaio inossidabile i criteri di costruzione usati per l'acciaio al

7) L'acciaio inossidabile H400 è stato usato nella Porsche GT per alcuni componenti strutturali: per le strutture anti-collisione anteriori, posteriori e laterali; per i bracci di spinta interni pressocolati degli assi anteriore e posteriore; per il braccio oscillante inferiore dell'asse posteriore nel flusso aerodinamico d'aria dal diffusore





carbonio, riducendo soltanto lo spessore dei tubi in certe zone.

Non v'è dubbio che l'uso di acciaio inossidabile comporta vantaggi tecnici, che sono maggiori se la struttura viene riprogettata completamente.

Tali vantaggi sono riassumibili come segue:

- minore peso totale della struttura;
- struttura più resistente;
- più spazio utile all'interno;
- praticamente nessuna manutenzione.

L'aspetto sicurezza derivante dalla maggior resistenza meccanica è particolarmente importante. In certi casi, la resistenza a deformazione dell'intera struttura del vano passeggeri è aumentata del 10-15% rispetto alla tradizionale struttura in acciaio al carbonio. Inoltre, la riduzione di spessore delle sezioni tubolari e il conseguente alleggerimento di tutta la struttura, che va dal 12 al 14%, consente sensibili economie di combustibile e sollecita meno le parti meccaniche. È stato anche possibile eseguire un'analisi dei costi basata sull'esperienza di un fabbricante di autobus. Come risulta dal calcolo LCC, anche il costo iniziale (non solo quello di 20 anni dopo) è minore per le strutture in acciaio inossidabile (tab. 3).

Conclusioni

Gli acciai inossidabili austenitici, ben noti per la loro resistenza alla corrosione, possiedono anche una combinazione di altre eccellenti caratteristiche, che li rende particolarmente interessanti per il settore automotive. Nella forte competizione tra i materiali, i componenti in acciaio inossidabile presentano vantaggi significativi in termini di resistenza alla corrosione, resistenza alla fatica, sicurezza in caso di crash rispetto alle leghe di alluminio e acciaio alto-

resistenziali basso-legati.

Come mostrato negli esempi riportati in questo articolo, gli acciai inossidabili vantano proprietà che rispondono alle restrittive richieste dell'assorbimento di energia in caso di urto. Tali richieste basate sulla percentuale di allungamento unita associata alla sensibilità alla velocità di applicazione sforzi-deformazioni e all'ele-

8) Per rispettare le rigorose norme americane sulle emissioni, diversi fabbricanti d'auto europei montano serbatoio carburante in acciaio inossidabile sulle vetture destinate agli Usa (p. es. il Volkswagen Maggiolino)

Tab. 3 • LCC calculation for a bus structure

Cost of Capital	10.00%	
Inflation Rate	5.00%	
Real interest rate	4.76%	
Desired LCC duration	20.0 years	
Downtime per maintenance/replacement event	1.0 day	
Monetary unit	US \$	
Value of lost production	101 US \$ / day	
	Stainless Steel	Carbon Steel
Material costs	3.331	1.391
Fabrication costs	25.322	26.582
Other installation costs	2.185	4.050
Total initial costs	30.838	32.023
Maintenance costs	0	1.448
Replacement costs	0	2.897
Lost production	0	57
Material-related costs	0	0
Total operating cost	0	4.402
Total LCC Cost	30.838	36.425

vata resistenza sono tipiche degli acciai inossidabili alto-resistenziali.

E sono tali caratteristiche unite ad altri vantaggi usuali che rendono tali acciai i candidati ideali per applicazioni in campo automotive, essendo anche materiali ecologici, di grande durata e riciclabili.

Structural stainless steel

Fausto Capelli, Vittorio Boneschi, Paolo Viganò - Centro Inox, Milan

Concerning buses, about 12 years ago a company located in the north east of Italy, near Udine, applied to Centro Inox for a tailor made technical course on stainless steel. Their purpose was the realisation of a stainless steel bus frame. This was the first 'development point' which, as a chain reaction, produced a cluster of other bus manufacturers who began to use stainless steel. In this case we took advantage from a first, already sensitive company. The result is that 20 years ago stainless steel was not used for the bus construction. Now the 80% of buses produced in Italy have the frame made for the most part in stainless steel. In Italy, the use of stainless steel to make both the outer panelling and the actual structural parts of the body of motor buses in general has increased enormously.

Originally, flat rolled sections (sheet metal and strip) were mainly used in the 'below-waist' panelling areas and the wheelhouses, i.e. the parts most liable to corrosion. These parts are in any event treated with primer and epoxy paint. As regards the structural part of the body, some tentative experiments began with the use of square and rectangular stainless steel pipes about 20 years ago.

Some companies manufactured prototypes (above all in the Touring series) with part of the body made of stainless steel, and they were sent out onto the Italian roads on an experimental basis. The results were highly satisfactory as regards mechanical performance and corrosion-resistance of the parts, even in extremely aggressive environments.

As a result of these successful experiments the technique began to be used quite widely, and nowadays the major Italian bus manufacturers regularly use stainless steel for the structural parts and panelling most liable to corrosion.

The most interesting application of stainless steel, as stated above, is for structural work. It is used for two types of structure: those with a body which 'collaborates' with the load-bearing chassis (flooring) and those having a self-supporting body.

Most vehicles are made by the first method, using a frame to which a lattice of square or rectangular stainless tubes is welded.

Some companies make vehicles with a self-supporting body. Some companies have entirely redesigned the body around the 'new' material, sometimes using the finite-element method for the structural calculation.

Others have transferred all the construction criteria used for carbon steel structures to stainless steel, merely reducing the thickness of the tubular shapes in some parts. There is no doubt that the use of stainless steel involves technical advantages in the vehicle, which are greatest, when the structure is designed from scratch. These advantages are:

- overall weight of structure lower than that of conventional structures;
- no corrosion under normal operating conditions;
- stronger structure;
- more usable interior space;
- virtually no maintenance.

The safety aspect associated with the greater strength obtained is particularly important.

In some cases, the resistance to deformation of the entire structure in the passenger area has been increased from 10 to 15% over the conventional carbon steel structure.

In addition, the reduction in thickness of the tubular sections and consequent overall lightening of the structure (ranging from 12 to 14%) produces a considerable fuel saving in operation and lower stresses of all mechanical parts.'