

L'AUTO SICURA

un Nido di acciaio inox saldato laser



Un esempio di sapiente utilizzo dei materiali dimostra quanta strada può ancora fare la sicurezza

VITTORIO BONESCHI
RICCARDO MAJOCCHI
WALTER PERACCHIOTTI

La sicurezza dell'auto è quanto mai materia di studio per ricercare soluzioni innovative. La Nido, prototipo di vettura presentato da Pininfarina in anteprima al Salone Mondiale dell'Auto di Parigi 2004, propone un sistema innovativo di gestione dell'impatto, specificamente pensato per una vettura di piccole dimensioni, ma riproponibile anche su vetture standard. Inoltre, il progetto ha visto la scelta di soluzioni costruttive innovative tra cui il materiale impiegato per il telaio (acciaio inox EN 1.4301 - Aisi 304), la tecnologia di unione (saldatura laser) e il formato di alcune delle lamiere (lamiere sandwich cellulari).

IL PRINCIPIO DEL NIDO

Quando si parla di sicurezza, è importante non considerare solo gli effetti del crash sulla singola vettura. I problemi di compatibilità tra veicoli con massa ridotta e veicoli con massa elevata stanno diventando basilari nell'engineering della sicurezza automobilistica. Questa considerazione è sempre più valida se osserviamo gli attuali sviluppi delle autovetture, che tendono a diventare più grandi e pesanti per soddisfare i sempre più severi regolamenti e per offrire più spazio interno. In questo contesto la sicurezza di un'auto piccola e leggera diventa sempre più rilevante, oltre che critica. Per questi motivi il progetto Nido si concentra sullo studio e la prototipazione di nuove soluzioni che coinvolgono sia l'aspetto strutturale che quello di design di una piccola vettura 2 posti, con l'obiettivo di incrementare sia la sicurezza interna degli occupanti che quella esterna, al fine di limitare i danni verso i pedoni in caso di urto. Il principio normalmente applicato per la protezione degli occupanti in caso di crash frontale è quello di garantire lo spazio vitale e di soddisfare i parametri biomeccanici dei passeggeri assorbendo con deformazioni controllate l'energia di impatto, in parte tramite la deformazione della parte anteriore della struttura, in parte trasferendo i rimanenti carichi alla struttura posteriore (attraverso pavimento, longheroni, porte e la struttura in genere) e in parte tramite sistemi di ritenuta attivi (cinture e airbag).

Applicare questo principio a una vettura compatta risulta più critico rispetto a una vettura di dimensioni maggiori in quanto gli spazi di deformazione sono molto ridotti. Ciò comporta problematiche di progettazione dei componenti strutturali, in uno scenario di normative sempre più severe. La struttura resiste a un impatto violento, ma proprio la rigidità del suo telaio, unitamente allo spazio limitato, fa sì che una rilevante parte di energia

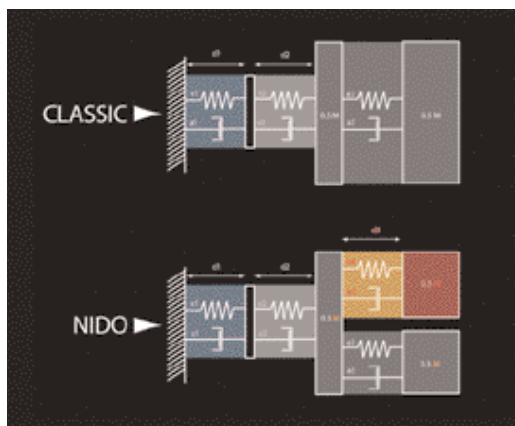


Fig. 1
La struttura della Nido (in alto), interamente in acciaio inox EN 1.4301 (AISI 304), e la ripartizione delle masse in caso di urto (in basso).

sia trasferita sugli occupanti. Non potendo aumentare le dimensioni della parte anteriore del veicolo, occorre trovare un'altra soluzione per ridurre le decelerazioni degli occupanti stessi a valori comparabili con vetture di classe maggiore.

Anziché progettare le prestazioni di sicurezza della vettura in modo tradizionale in funzione della massa, Nido propone un nuovo principio. Nido è composto da tre elementi principali:

- un telaio, la cui massa è pari ai due terzi circa di quella del veicolo e alloggia tutte le componenti tecniche, come le sospensioni anteriori e posteriori, il motore e così via:

TAB. 1 CARATTERISTICHE FISICO-MECCANICHE DI ACCIAIO INOSSIDABILE AUSTENITICO, LEGA DI ALLUMINIO 6061 E ACCIAIO AD ALTA RESISTENZA

Proprietà	Acciaio Inossidabile					Lega di Alluminio 6061		Acciaio ad Alta resistenza (HSS High Strength Steel)
	Annealed (1)	C850 (2)	C1000 (3)	C1150 (4)	C1300 (5)	T4 (6)	T6 (7)	
Densità ρ (g/cm ³)	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	2,7	2,7	7,83
Densità relativa rispetto all'acciaio	1	1	1	1	1	0,35	0,35	1
Tensione di snervamento σ_y (N/mm ²)	370	600	880	1100	1200	130	275	410
Tensione di rottura σ_t (N/mm ²)	800	900	1160	1300	1400	225	310	480
Resistenza specifica σ_t/ρ	46,8	76,0	111,4	139,2	151,9	48,1	101,8	52,4
Resistenza specifica relativa rispetto all'acciaio ad alta resistenza	0,9	1,45	2,12	2,66	2,9	0,92	1,90	1,0
Allungamento percentuale El (%)	53	35	20	15	10	15	8	22
Allungamento specifico relativo rispetto all'acciaio ad alta resistenza	2,41	1,59	0,91	0,68	0,45	0,68	0,36	1,0
Modulo di Young E (kN/mm ²)	200	200	190	190	190	69	69	200
Rigidità specifica E/ ρ	25	25	24	24	24	25,5	25,5	25

(1) Allo stato solubilizzato (ricotto); (2) incrudito a freddo C850 (1/4 crudo); (3) incrudito a freddo C1000 (1/2 crudo); (4) incrudito a freddo C1150 (3/4 crudo); (5) incrudito a freddo C1300 (4/4 crudo); (6) T4: allo stato solubilizzato (ricotto); (7) T6: dopo trattamento termico di invecchiamento.

questo telaio è composto da una parte anteriore deformabile e da una cellula rigida attorno agli occupanti;

– un guscio per gli occupanti, che conta per circa un terzo della massa del veicolo: questo guscio ospita il conducente e il passeggero con gli strumenti di guida; si tratta di una slitta in grado di scorrere orizzontalmente su una guida centrale all'interno della cellula rigida;

– la cellula rigida e la slitta sono collegati in condizioni normali dal terzo elemento, costituito da due assorbitori che agiscono da dissipatori di energia e che sono dimensionati con una rigidità adeguata, mediante l'unione di tre blocchi di honeycomb di diversa densità. In caso di urto frontale, la vettura assorbe parte dell'energia tramite la zona anteriore deformabile del telaio, costituita da due puntoni in lamiera, con due assorbitori interni in foam plastico espanso. Questi sono stati studiati con una particolare forma tronco conica, atta ad assorbire e distribuire l'energia sulla parete parafiamma in lamiera cellulare, la quale a sua volta la trasmette lungo il tunnel centrale e i longheroni laterali. La rimanente energia, dovuta alla massa dei manichini e della slitta, determina il movimento di quest'ultima nella direzione dell'urto, comprimendo i due assorbitori in honeycomb posizionati tra

cellula rigida e slitta nella zona della plancia, permettendo una decelerazione graduale e controllata sui manichini. L'introduzione degli elementi intermedi di assorbimento in honeycomb, tra la cellula rigida e la slitta, permette di ottenere due diverse curve di decelerazione, dove la curva relativa alla slitta è più bassa di quella della cellula rigida.

La slitta può essere dotata di ulteriori assorbitori, di dimensioni più piccole e montati posteriormente tra la slitta e la cellula rigida, in modo da proteggere gli occupanti anche in caso di urto posteriore.

L'applicazione di questo principio su una piccola vettura biposto da città con motore posteriore può essere esteso anche a una vettura sportiva biposto a motore centrale.

LA VALIDAZIONE DEL PRINCIPIO: DAL VIRTUALE AL PROTOTIPO

La validazione del principio di funzionamento del sistema cellula rigida/assorbitore di energia in honeycomb / slitta è stata effettuata attraverso la realizzazione di modelli virtuali semplificati. Simulando con questi modelli diverse tipologie di crash (frontali, laterali, schiacciamento tetto), è stato possibile approfondire la dinamica del principio del Nido durante l'urto. La semplicità iniziale ha permesso di variare di volta in volta alcuni parametri dei tre elementi (per esempio, la rigidità dell'assorbitore) in modo da individuare le loro caratteristiche e le geometrie ideali.

Il livello di decelerazione ottimale della vettura è stato definito dopo aver analizzato le prestazioni di crash di vetture analoghe. Ogni componente strutturale è stato valutato singolarmente all'interno di modelli semplificati e ottimizzato per il raggiungimento del target stabilito.

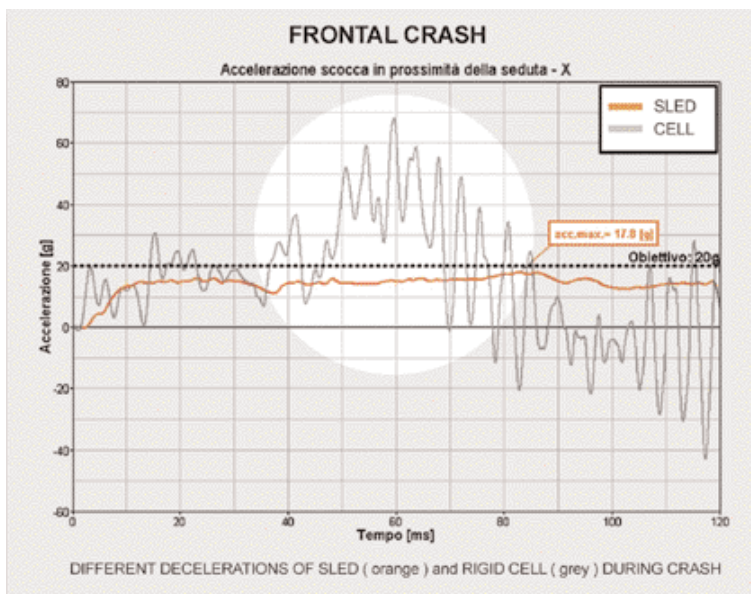
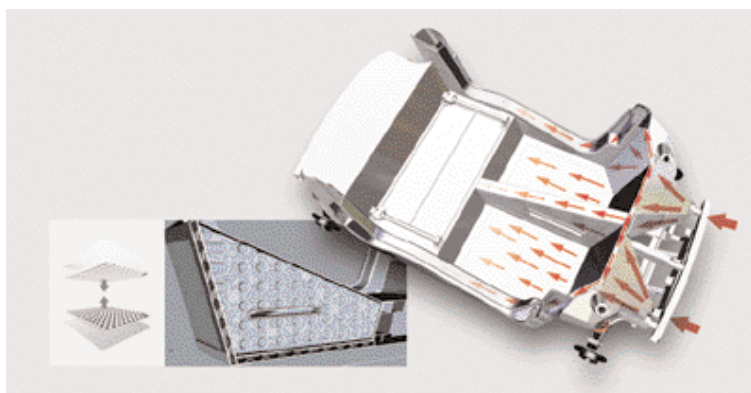
Dalle simulazioni virtuali si è riscontrato che, grazie al concetto della slitta mobile, le basse decelerazioni misurate sugli occupanti possono rendere non indispensabile l'uso degli air-bag frontali, ovvero se ne può riconsiderare la modalità di impiego.

Partendo dagli elementi strettamente legati al funzionamento del principio Nido, sono stati costruiti due "muletti" per effettuare una correlazione numerico-sperimentale tra il modello fisico e quello virtuale. Si è poi proceduto alla realizzazione del prototipo in scala 1:1, costruito applicando sia le soluzioni ideate specificamente per questo progetto, sia le soluzioni al momento già note e consolidate.

PERCHÉ L'ACCIAIO INOSSIDABILE

Quando si parla di acciaio inossidabile, viene di solito alla mente un materiale estremamente nobile, costoso e, soprattutto, destinato ad

Fig. 2
Schema del flusso di ripartizione dell'energia in caso di urto frontale (a sinistra) e il grafico della decelerazione della slitta e della cellula rigida in caso di crash frontale (a destra): si noti che la decelerazione della slitta è al di sotto della soglia obiettivo.



applicazioni molto specifiche, per le quali si richiede aspetto estetico inalterato e ottima resistenza ai fenomeni corrosivi.

La tendenza, negli ultimi anni, è invece quella di considerare tale materiale in tutti i suoi molteplici aspetti e non solamente come "metallo nobile" che resiste alla corrosione; vengono perciò sfruttate in modo specifico le caratteristiche fisiche e meccaniche.

Ecco perché gli acciai inossidabili stanno aumentando notevolmente la loro presenza in alcuni settori che, fino a qualche tempo fa, erano considerati di esclusiva pertinenza di materiali tradizionali come, ad esempio, gli acciai al carbonio e le leghe di alluminio.

Il settore dei trasporti è un esempio di tale fenomeno. Si è registrato, negli ultimi anni, un notevole incremento dell'applicazione degli acciai inox, non solamente per quelle parti dove è necessario garantire un buon aspetto estetico nel tempo o una elevata resistenza alla corrosione e all'ossidazione a caldo, ma anche in parti strutturali, dove vengono utilizzate le proprietà meccaniche del materiale: carico di snervamento, allungamento a rottura, resilienza (come tralicci di autobus).

In particolare nel settore dell'auto, dove l'inox vede un impiego consolidato per sistemi di scarico, valvole, finizioni e così via si riscontra un crescente interesse per questo materiale in virtù di alcune peculiarità, oltre alla ben nota resistenza alla corrosione, che lo rendono ideale per parti strutturali: levate caratteristiche di resistenza meccanica, capacità di assorbire energia, duttilità, facilità di fabbricazione, resistenza.

Nel caso della NIDO la scelta dell'acciaio inox per la struttura è legata alle caratteristiche di questo materiale, che possiede elevate caratteristiche di assorbimento di energia in caso di urto e di incremento di resistenza meccanica in funzione della variazione della deformazione (*strain hardening*).

Non richiedendo trattamenti superficiali anticorrosione, l'acciaio inox rende inoltre più flessibile il processo industriale, permettendo di evitare il passaggio in cataforesi. È stata altresì sviluppata una nuova concezione di telaio sostituendo le consolidate geometrie di pianale, tunnel e parete parafiamma con una struttura realizzata in lamiera cellulare inox. Il vantaggio di questa tecnologia sta nella buona capacità di assorbimento degli urti e nell'ottima prestazione in termini di rigidità torsionale, oltre che nell'aver consentito una struttura molto lineare e leggera.

La tecnologia della lamiera cellulare prevede un sandwich composto dall'unione di 4 o più lamiere inox sovrapposte di spessore ridotto: per gli esterni è stata utilizzata una lamiera piana, all'interno due o più lamiere inox

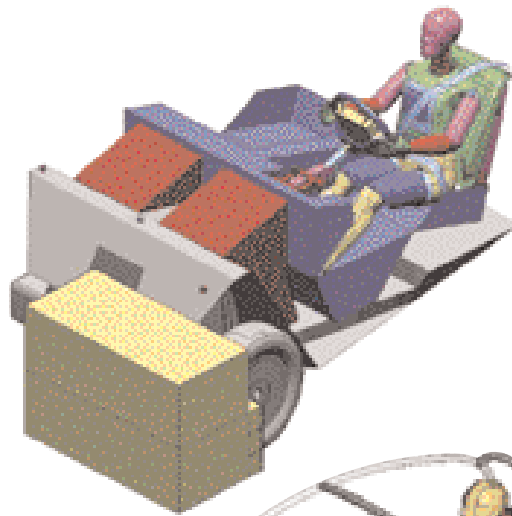
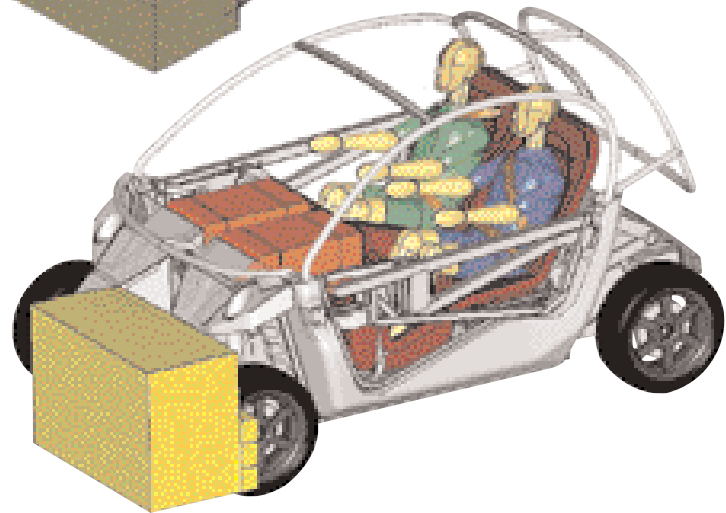


Fig. 3
Le fasi di simulazione per la validazione del principio alla base della sicurezza della Nido.



bugnate e assemblate a bugnatura contrapposta.

Infine, si vuole ricordare che l'inox è un materiale completamente riciclabile; unitamente all'impiego di materiali plastici colorati per le pannellature che permettono di evitare i cicli di verniciatura, ciò denota anche l'elevato carattere ecologico del progetto Nido.

L'ACCIAIO INOX: UN MATERIALE STRUTTURALE "SICURO"

A conferma di quanto precedentemente affermato di seguito si riportano alcuni dati e considerazioni relativi a studi già effettuati su acciaio inossidabile austenitico, destinati al settore dell'auto.

Le caratteristiche fisico-meccaniche di tale materiale sono paragonate in tab. 1 con quelle delle leghe di alluminio 6061-T4 e T6 e con quelle di un acciaio ad alta resistenza (Hss). Per un materiale metallico il legame sforzi deformazioni $s = f(e)$, nella sua parte lineare, è descritto dal modulo di Young E secondo la nota relazione $E = s/e$, dove s e e sono rispettivamente lo sforzo e la deformazione reali. La rigidità specifica, ovvero il rapporto E/r tra modulo di Young e densità r (g/cm^3), è un affidabile indicatore delle prestazioni del materiale. Un semplice confronto tra le rigidità specifiche fornisce una prima informazione sul comportamento dei tre diversi materiali. Come si può vedere, la rigidità specifica dell'acciaio

TAB. 2 - VALORI DI ENERGIA ASSORBITA PER DIVERSE LEGHE METALLICHE A TEMPERATURA AMBIENTE

Materiale	σ_y (N/mm ²)	σ_1 (N/mm ²)	n (1)	Densità ρ (g/cm ³)	Energia Assorbita W_2 (J/g)
Acciaio Inossidabile Austenitico Solubilizzato	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
Leghe di Alluminio 6061 - T4	145	240	0,22	2,7	20,4
Acciaio ad alta resistenza (HSS)	410	480	0,15	7,83	12,5

(1) Coefficiente di incrudimento; (2) allo stato incrudito: C850 ($850 < \sigma_1$ (N/mm²) < 1000); (3) allo stato incrudito: C1000 ($1000 < \sigma_1$ (N/mm²) < 1150)

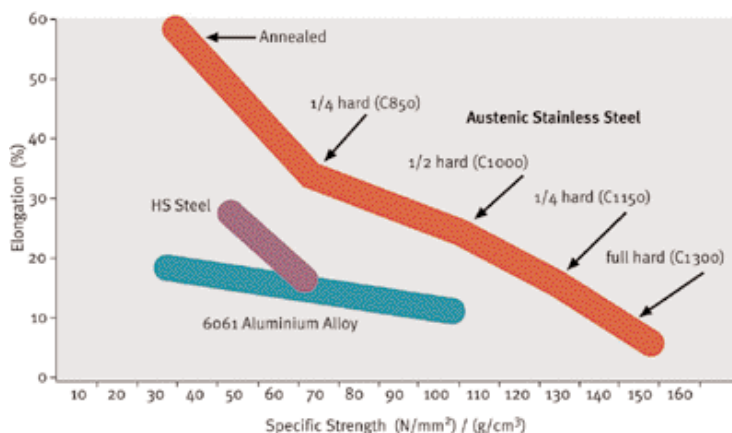
inossidabile è molto simile a quella della lega di alluminio e dell'acciaio ad alta resistenza (Hss). La resistenza specifica, ovvero il rapporto s_y/r tra la tensione di snervamento (s_y) e la densità (r) è un'altra relazione che caratterizza i differenti materiali da un punto di vista ingegneristico. Nella tab. 1 si evidenzia che la resistenza specifica dell'acciaio inossidabile austenitico è molto più elevata di quella degli altri materiali considerati. La tab. 1 e la fig. 4 mostrano l'andamento dell'allungamento percentuale El(%) in funzione della resistenza specifica s_y/r , tale per cui $El = F(s_y/r)$ per vari materiali strutturali. L'allungamento combinato con la resistenza specifica è un fattore importante che andrebbe considerato prima di operazioni di formatura freddo quali: stiratura, profondo stampaggio e idroformatura. In termini di assorbimento dell'energia, l'intento è quello di gestire l'energia dovuta a una collisione in modo affidabile, al fine di garantire la massima sicurezza dei passeggeri del veicolo nell'eventualità di un incidente. L'urto comporta carichi dinamici e ciò significa che la conoscenza degli effetti della variazione della velocità di deformazione è basilare per prevedere il comportamento di una struttura. In questo processo è coinvolto in modo fondamentale il legame sforzi-deformazioni $s = f(e)$, attraverso il quale è possibile determinare l'energia assorbita. L'energia assorbita per unità di volume (W_1) o per unità di massa (W_2) di una lega, può essere valutata

mediante calcolo integrale dell'area sottesa dalla curva sforzi-deformazioni, vale a dire:

$$W_1 = k_1 \int s(e) de \quad \text{oppure} \quad W_2 = k_2 \int s(e) de$$

I valori di energia assorbita per i diversi materiali considerati sono riportati nella tab. 2. In conclusione, circa gli acciai inossidabili possiamo dire che possiedono una combinazione di altre eccellenti caratteristiche, che li rende particolarmente interessanti per il settore dell'automobile. La forte tendenza all'incrudimento ($n=0,6/0,7$) degli acciai inossidabili austenitici (leghe Fe-Cr-Ni) li rende adatti a garantire elevati livelli di resistenza meccanica per effetto di deformazioni plastiche a freddo. Calibrando opportunamente il grado di incrudimento a freddo, la variazione della duttilità come pure della resistenza meccanica possono si possono ottimizzare per le successive operazioni di formatura come l'imbutitura profonda, la stiratura e l'idroformatura. In molte applicazioni del settore auto, la combinazione di resistenza e formabilità è decisiva; in poche parole, il binomio ideale risulta essere l'elevata resistenza meccanica e l'ottima duttilità dell'acciaio inossidabile. Tra i diversi materiali strutturali, l'acciaio inossidabile soddisfa le restrittive esigenze del problema dell'assorbimento energia in caso di urto. La rispondenza a tali esigenze si basa essenzialmente sugli elevati allungamenti percentuali (si registrano spesso valori dell'ordine del 60%) unitamente alla notevole sensibilità alla velocità di carico e alle elevate caratteristiche meccaniche (resistenza specifica s_y/r dell'ordine di $150 \text{ (N/mm}^2\text{)}/\text{(g/cm}^3\text{)}$ tipici di acciai inossidabili ad alta resistenza. Tali caratteristiche, oltre che la resistenza alla corrosione, la resistenza a fatica e la facilità delle lavorazioni, rendono gli acciai inossidabili materiali ideali per applicazioni di strutture di automobili sicure in caso di urto.

Fig. 4
L'allungamento percentuale in funzione della resistenza specifica per acciaio inossidabile austenitico, acciaio ad alta resistenza e lega di alluminio 6061.



IL LASER: UN FASCIO DI LUCE AL SERVIZIO DELL'AUTO

Le applicazioni del laser nel settore auto sono ormai numerose; tale tecnologia offre notevoli opportunità nello sviluppo del prodotto:

ottimizzazione geometrica delle sezioni, definizione dei nodi strutturali, prestazioni dei giunti saldati. Certamente rispetto alle tecnologie classiche richiede un'ottimizzazione sulla base di aspetti tecnologici ed economici. A livello industriale le tipologie di sorgenti più diffuse sono: Nd:YAG e CO₂; in particolare la prima sempre di più sta acquistando spazio grazie agli incrementi di potenza e alla maggiore adattabilità su sistemi antropomorfi. Da un punto di vista strutturale, la saldatura laser consente un aumento della rigidità torsionale, in virtù della continuità del giunto e della possibilità di componenti con maggiore momento di inerzia (nelle tecniche classiche di saldatura a punti l'accessibilità delle le pinze vincola le dimensioni di progetto). Inoltre non richiedendo un accesso bilaterale, consente la realizzazione di sezioni chiuse caratterizzate da una maggiore rigidità.

Nel progetto NIDO la tecnologia laser è stata ampiamente impiegata viste le scelte costruttive innovative della scocca frontale (a forma tronco conica, per massimizzare l'assorbimento di energia in caso di urto) e del pianale (costituito, come già accennato da lamiera sandwich cellulari inox).

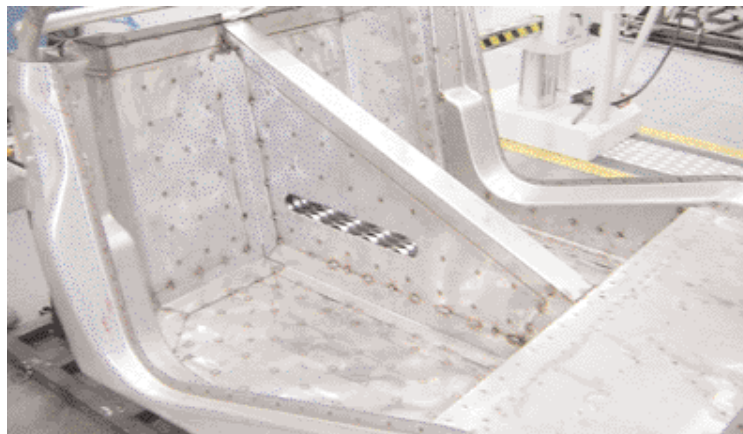
Il pianale cellulare è stato unito con circa 400 saldature laser di forma circolare con diametro di 10 mm, mentre per le cornici laterali si sono effettuate saldature lineari continue.

Per il longherone lo sviluppo totale dei percorsi di saldatura è stato di circa 9 m, mentre 5 m di saldatura lineare hanno consentito la connessione dei puntoni anteriori.

La sorgente utilizzata è una Nd:YAG montata su un robot antropomorfo. Il regime di funzionamento è stato di tipo continuo con velocità media di avanzamento di 3-4 m/s, per gli spessori maggiori fino ad arrivare a 6 m/1', per quelli più sottili. Il valore della potenza è di 1,5 kW. Una tecnologia alternativa avrebbe



Fig. 5
Dettagli relativi alle saldature laser ampiamente impiegate in fase di assemblaggio



potuto essere quella degli adesivi strutturali; l'impiego dell'acciaio inox rende però superfluo il processo di cataforesi, che è generalmente sfruttato per attivare la polimerizzazione degli adesivi epossidici monocomponenti.

Altro aspetto importante che ha favorito l'impiego della tecnologia laser è il fatto che nella NIDO tutte le saldature sono del tipo a giunto sovrapposto, evitando così le problematiche di giunzioni ad angolo. In ogni caso particolare cura si è dovuta prestare alle tecniche di tranciatura e piegatura, al fine di consentire il migliore controllo della luce tra i lembi sovrapposti.

CONCLUSIONI

Il progetto Nido rappresenta sicuramente un perfetto mix di scelte tecnologiche e progettuali che hanno dato vita a una vettura che costituisce sicuramente un grosso passo in avanti in termini di sicurezza. L'ultimo step del progetto consisterà nello studio di fattibilità industriale relativo all'ipotesi di produzione di 100-120 vetture al giorno per un totale di 20.000 unità all'anno per 5 anni. Pininfarina ha coperto con alcuni brevetti le soluzioni innovative di Nido in tema di sicurezza. **L**

Ringraziamenti

Si ringraziano ThyssenKrupp Acciai Speciali Terni, Itta Inox e Acciaierie Valbruna per aver fornito l'acciaio inossidabile e il Centro Sviluppo Materiali di Roma per i dati supplementari relativi alle simulazioni sull'inox.

Vittorio Boneschi svolge la propria attività presso il Centro Inox di Milano, Riccardo Majocchi e Walter Peracchiotti presso la Pininfarina di Cambiano (TO).

LE SPECIFICHE TECNICHE DELLA NIDO

Lunghezza: 2890 mm
Larghezza: 1674 mm
Altezza: 1534 mm
Massimo movimento slitta in avanti: 350 mm
Massimo movimento slitta indietro: 120 mm
Passo: 2068 mm
Carreggiata anteriore: 1363 mm
Carreggiata posteriore: 1457 mm
Pneumatici anteriori: 175/50 16"
Pneumatici posteriori: 205/45 16"
Carrozzeria: in materiale plastico
Telaio: inox, a trazione posteriore
Motore: posteriore
Cambio: automatico
Drive by wire