

nima per raggiungimento delle condizioni limite, rispettivamente a trazione/compressione e a taglio. Carichi di compressione eccessivamente elevati possono essere anche la causa di instabilità locale delle pelli, fenomeno che si manifesta a volte anche sulla faccia compressa di pannelli sottoposti a sola flessione.

L'indentazione, cioè lo sfondamento locale dell'anima, può essere dovuto all'applicazione di carichi elevati su aree troppo ristrette del pannello. La presenza di elevate tensioni all'interfaccia pella-anima, in corrispondenza dei bordi liberi del pannello o in prossimità di inserti metallici, può essere la causa di delaminazioni che compromettono la funzionalità della struttura. Questo problema può di solito essere evitato all'interfaccia pelle-anima scegliendo un adesivo adeguato e controllando accuratamente il processo produttivo. In corrispondenza di eventuali inserti metallici, dove una buona adesione risulta più difficile, la possibile delaminazione rimane invece un aspetto critico e viene solitamente analizzato mediante tecniche di meccanica della frattura.

È importante ricordare che, in condizioni di esercizio, le strutture sono normalmente soggette a carichi variabili nel tempo e quindi a sollecitazioni di fatica. In fase di analisi delle diverse modalità di cedimento, risulta quindi necessario considerare opportunamente la ciclicità dei carichi applicati e non solamente i loro effetti statici.

### Analisi tensionale e deformabilità

L'analisi tensionale e di rigidità di strutture sandwich viene svolta tipicamente utilizzando le teorie "classiche" sviluppate a partire dalla teoria della trave e ampiamente discusse da Allen in (4). L'ipotesi principale è che le pelli sopportino, in virtù del-

le maggiori proprietà elastiche, tutta la componente flessionale della sollecitazione, mentre le componenti di taglio siano sopportate completamente dall'anima; sono inoltre ipotizzate eguali deformate per la pelle superiore ed inferiore ed una distribuzione degli spostamenti lineare lungo lo spessore dell'anima. Sulla base di queste ipotesi è possibile giungere a formulazioni semplificate di facile utilizzo (3-4), che però risultano sufficientemente corrette solamente per un'analisi preliminare della struttura.

Infatti, per poter descrivere in maniera esatta la deformabilità e lo stato di tensione di una struttura complessa quale un pannello sandwich e soprattutto per poter considerare gli effetti locali (carichi concentrati, inserti, interfacce anima-pelli) è necessario utilizzare modelli analitici più sofisticati, le teorie di sovrapposizione o le teorie di ordine superiore (5-6), oppure analisi numeriche ad elementi finiti. Le teorie di sovrapposizione e di ordine superiore sono state sviluppate con minori ipotesi semplificative e consentono una migliore e più accurata descrizione, dal punto di vista tensionale, dei fenomeni locali. Tuttavia, il maggiore grado di sofisticazione viene pagato con una notevole complessità formale e di implementazione. Un'interessante analisi comparativa tra le diverse metodologie è stato effettuata da Van Straalen (7) nell'ambito del progetto DOGMA [Design Optimisation and Guidelines for Multimaterial Applications].

Gli strumenti più adeguati per l'analisi di strutture reali realizzate con pannelli sandwich sembrano comunque essere i codici di calcolo agli elementi finiti. Le notevoli potenzialità computazionali dei computer più recenti consentono inoltre l'analisi di strutture a geometria molto complessa con un elevato grado di accuratezza.

*these cases, the analysis of delamination onset and growth is usually made by using fracture mechanics approaches. Eventually, it is important to note that the external loads are always variable in intensity and cyclic in time, therefore inducing fatigue.*

*This fact has to be properly taken into account during the analysis of the different failure modes for the design of the structure.*

### Stress and Stiffness Analysis

*A common approach in the stress and stiffness analysis of sandwich structures is the application of the "classical" theory, adapted from the beam theory and widely discussed by Allen in ref. (4). The main hypothesis is that the skins, due to the higher elastic properties, react to the bending actions, while the shear actions are sustained by the core. Moreover the deformed shape of upper and lower skins are thought to be identical and a linear displacement distribution is assumed through the core. It is thus possible to obtain quite simple, easy to use formulations (3,4); their accuracy, however, is adequate for a preliminary analysis only. In fact, the intrinsic complexity of a sandwich structure requires more sophisticated methodologies for the displacement, strain and stress field assessment.*

*Suitable methods are the superposition approach, the*

*higher-order theories and the Finite Element Analysis. The superposition approach and the higher-order theories were developed under a reduced number of preliminary hypotheses, allowing therefore a greater accuracy in the description of the local phenomena, particularly for the stress distribution. A drawback is represented, however, by the complexity of the analytical formulation and the difficulties in the development of closed form solutions even for simple and common engineering cases. An interesting overview and comparison of the different approaches was presented by Van Straalen (7) in the frame of the DOGMA project [Design Optimisation and Guidelines for Multimaterial Applications]. Considering the complicated geometry of the real sandwich structures, the more suitable tools for the structural analysis seem to be the Finite Element codes.*

*A great accuracy in the analysis can be reached even for large, complicated structures due to the huge computational capabilities of the recent computers. The Finite Element modelling of a sandwich structure can be approached in many different ways. [Fig. 6] shows two possible strategies: the simplest bi-dimensional way, by using layered shell elements and a tri-dimensional model where both skins and honeycomb cells are modelled with shell elements.*

[Fig. 6] - Simulazione mediante analisi ad elementi finiti di una prova di flessione a 4 punti su un pannello sandwich con anima in honeycomb / Finite element simulation of a four-point bending test on a honeycomb core sandwich panel

