

condizioni limite per i diversi modi di cedimento è tuttavia possibile solamente in alcuni casi e quindi per poter garantire il rispetto dei vincoli progettuali di resistenza o di rigidità mantenendo il minimo peso della struttura è spesso necessaria, in parallelo, anche una fase di ottimizzazione.

Un esempio di FMM è riportato in [Fig. 8] dove è possibile individuare la variazione delle modalità di cedimento al variare del rapporto relativo tra densità del core e spessore delle pelli. In corrispondenza del punto comune alle tre zone i tre modi di cedimento, rottura o instabilità delle pelli e rottura del core, hanno lo stesso grado di criticità.

È opportuno ricordare come la resistenza ai carichi applicati non rappresenti l'unico obiettivo progettuale, ma come invece i limiti di rigidità imposti alla struttura dalle condizioni di esercizio costituiscano generalmente il vincolo più stringente. Molto spesso, inoltre, viene richiesto il minimo peso della struttura pur garantendone la resistenza oppure una predefinita rigidità.

In [Fig. 9] viene presentato un esempio di ottimizzazione: una volta fissate le proprietà dei materiali costituenti le pelli e l'anima è possibile esprimere le condizioni relative ai diversi modi di cedimento e la rigidità della struttura in funzione dello spessore, ad esempio, dell'anima e determinare il valore dello spessore minimo delle pelli per garantire il rispetto della condizione più critica tra quelle imposte (punto A in [Fig. 9], spessore anima 68.4 mm spessore pelli = 0.3 mm). La combinazione di spessori così ottenuta, pur rispettando i limiti di resistenza e/o di rigidità, può tuttavia non essere la configurazione che garantisce il minor peso alla struttura ed è quindi necessario effettuare un ulteriore passaggio per arrivare ad individuare la combinazione ottimale dei parametri geometrici

(punto B in [Fig. 9], spessore anima 35.2 mm spessore pelli = 1.18 mm).

Inizia a questo punto la seconda fase del processo progettuale, solitamente la più sofisticata e onerosa in termini di tempo, per l'esigenza di analizzare con un adeguato grado di dettaglio le limitazioni alla resistenza della struttura dovute agli effetti locali (carichi e vincoli localizzati, zone di interfaccia pelle-anima, presenza di inserti, brusche variazioni geometriche). Una trattazione esaustiva di questa complessa fase progettuale non è compatibile con le finalità del presente lavoro. È opportuno solamente ricordare l'esigenza imprescindibile di una determinazione accurata dello stato di tensione locale e per fare questo è indispensabile l'utilizzo di adeguate metodologie analitiche o numeriche come discusso in precedenza e come ben documentato dai numerosi lavori sull'argomento sviluppati da Thomsen (13-14).

### Bibliografia / References

- (1) Zenkert D. The Handbook of Sandwich Construction, EMAS Publishing, 1997.
- (2) Gibson, L.G., Ashby, M.F., Cellular Solids - Structures and Properties, Pergamon Press, Oxford, 1988.
- (3) Caprino, G., Teti, R., Sandwich Structures Handbook, Edizioni Il Prato, Padova, 1989.
- (4) Allen, H.G., Analysis and Design of Structural Sandwich Panels, Pergamon Press, 1969.
- (5) Frostig, Y., Baruch, M., Vilnai, O., Sheinman, I., High-Order Theory for Sandwich-Beam Behaviour with Transversely Flexible Core, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 118, No. 5, 1992, pp. 1026-1043.
- (6) Cook, G.M., Tessler, A., A {3,2}-order bending theory for laminated composite and sandwich beams, Composites Part B, Vol. 29B, 1998, pp. 565-576.
- (7) Van Straalen, I.J.J., Comprehensive Overview of Theories for Sandwich Panels, Workshop on "Modelling of sandwich structures and adhesive bonded joints" DOGMA Project: <http://www.dogma.org.uk>
- (8) Krueger R. A Shell/3D modeling technique for delaminations in composite laminates, Proc. of the

14th ASC Technical Conference, Technomic Publishing, 1999, pp. 843-852.

(9) Quaresimin M., Michelazzo L., Numerical modelling and experimental analysis of composite sandwich structures (Enginsoft Conference and Users' Meeting 2002 - Vol. I pp. 111-124, September 2002, Bergamo-Italy).

(10) Quaresimin M., Covini S., Un programma per l'analisi di strutture sandwich in materiale composito, Rapporto interno DTG - Università di Padova - Dicembre 2003.

(10) Gibson, L.J., Triantafillou, T.C., "Failure Mode Maps for Foam Core Sandwich Beams", Materials Science and Engineering, Vol. 95, 1987, pp. 37-53.

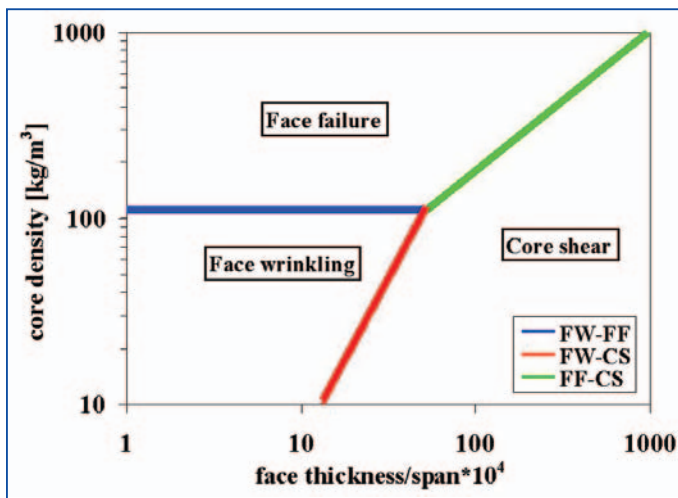
(12) Petras, A., Sutcliffe, M.P.F., "Failure Mode Maps for Honeycomb Sandwich Panels", Composites Structures, Vol. 44, 1999, pp. 237-252.

(13) Bozhevolnaya E., Thomsen O. T., Kildegaard A. and Skvortsov V., Local effects across core junctions in sandwich panels, Composites Part B: Engineering, Vol. 34, 2003, pp. 509-517.

(14) Thomsen O.T., Sandwich plates with 'through-the-thickness' and 'fully potted' inserts: evaluation of differences in structural performance, Composite Structures, Vol. 40, 1997, pp.159-174.

Per ulteriori informazioni contattare la redazione.

[Fig. 8] - Mappa dei modi di cedimento per un pannello sandwich con pelli in laminato vetro/epossidica ( $\sigma_{uts} = 150$  MPa e  $E_{laminato} = 15000$  MPa) e anima in schiuma espansa sottoposto a flessione a 3 punti / Failure mode map for a sandwich panel with glass/epoxy skins ( $\sigma_{uts} = 150$  MPa e  $E_{laminato} = 15000$  MPa) and polymeric foam core under three-point bending



[Fig. 9] - Ottimizzazione resistenza-rigidità-peso di un pannello sandwich 1000x300 mm sottoposto a flessione a 3 punti, carico 5000 N, rigidità = luce/50, pelli in laminato vetro/epossidica  $\sigma_{uts} = 200$  MPa e  $E_{laminato} = 25000$  MPa, anima in schiuma polimerica  $\rho = 250$  kg/m³ / Stiffness-strength-weight optimisation for a 1000x300mm sandwich panel under three-point bending, load 5000 N, stiffness = span/50, glass/epoxy skins ( $\sigma_{uts} = 200$  MPa e  $E_{laminato} = 25000$  MPa) polymeric foam core  $\rho = 250$  kg/m³

