

9

LA CONSTRUCTION NAVALE OPTIMISEE. LE CHOIX DE MATERIAUX D'AME ET LA FABRICATION SONT ETROITEMENT LIES* .

E. von GELLHORN¹, G. MITTELMANN²

Résumé - Les panneaux sandwich avec des peaux de stratifiés en plastique renforcé par fibres sont des matériaux maintenant reconnus dans le domaine de la construction navale. Ces dernières années, ils ont commencé à remplacer le métal et le bois, traditionnels pour la construction marine. Les matériaux d'aujourd'hui sont habituellement sélectionnés sur la base d'un coût minimum et de la simplicité de construction. Ceci est souvent contraire aux demandes du propriétaire qui veut un bateau bon marché, sûr, facile à entretenir et qui dure longtemps. Les exigences du constructeur de bateau et de l'utilisateur peuvent facilement être satisfaites si une combinaison du meilleur choix de matériaux, des méthodes de construction nouvelles et rationnelles sont pris en considération. A partir de l'exemple de la construction du bateau "Sandwich" nous montrons l'importance croissante des matériaux d'âme en PVC linéaire ductile et rigide et comment cette propriété est utilisée à son avantage dans une construction inversée intégrale.

Mots clés : âme, sandwich PVC linéaire, production, coûts.

NOUVEAUX MATERIAUX POUR LA CONSTRUCTION DE BATEAUX

En plus des technologies de l'air et de l'espace, les composites (GRP) sont fermement établis sur le marché du bateau de loisir. Ceci comprend la construction de bateaux pour ceux où la surface des panneaux sandwichs à peaux GRP peut donner au propriétaire le maximum de confort et de sécurité. Cette troisième génération de matériau a remplacé le métal, qui avait supplanté le bois depuis des décennies. Comme les composites ne sont sur le marché que depuis quelques années et que beaucoup d'ingénieurs travaillent encore avec les règles appliquées aux matériaux classiques, le passage aux panneaux sandwichs prend souvent la forme d'un simple échange 1/1 du métal contre le sandwich.

* traduit de l'anglais.

¹Airex, Sins, Suisse.

²Airex, Kappeln, Allemagne.

Beaucoup de problèmes ayant pour origine les coûts ou les propriétés des matériaux se font jour car la construction n'est pas adaptée à 100% à ces matériaux.

La critique "quelque chose de nouveau avec une âme bien trop faible à l'intérieur qui va seulement me causer des problèmes" est encore entendue fréquemment. A part cette opinion insoutenable techniquement, plusieurs autres propriétés inhérentes particulièrement importantes pour la construction de bateaux, sont complètement ignorées : suppression du bruit des vagues ; isolation thermique contre la condensation ; accroissement simple de la taille des panneaux ; réduction massive des coûts de construction ; gain considérable de poids.

Une des raisons majeures de ces réserves envers les panneaux sandwichs est probablement liée au fait que, pendant l'étape de la construction, le constructeur doit avoir une connaissance détaillée des *fibres, résines et âmes en combinaison avec les techniques de fabrication possibles*.

Cette combinaison de propriétés de matériau et de technique est primordiale parce que le matériau final est produit pendant l'étape de construction, et les propriétés sont créées en fonction des exigences par la combinaison appropriée des trois composants mentionnés ci-dessus. Pour ce dernier point, la création active des propriétés de matériau pose un problème particulier au débutant pour qui rien ne semble constant. Le nombre incroyable de possibilités est déroutant, et ceci, combiné avec une mauvaise connaissance, conduit à la crainte de la nouveauté. La combinaison de ces deux facteurs conduit alors à un rejet émotionnel.

En fait, les panneaux-sandwichs sont les alternatives qui, de tous les matériaux, satisfont le mieux les exigences d'une attitude pro-écologique.

SELECTION DES MATERIAUX

Les matériaux doivent être sélectionnés suivant les critères suivants :

- production la plus simple et la plus rationnelle dans le but de minimiser les coûts totaux de construction ;
- tolérance importante vis-à-vis de l'usure et des avaries. Matériau "indulgent".

En relation avec le premier point, un conflit d'intérêt se fait souvent jour entre l'acquéreur de matériau et le concepteur, qui ne voient chacun que leur domaine spécifique. Ceci est illustré par les chiffres réalistes pour une production en série de huit types équivalents de bateaux.

La comparaison des coûts totaux entre un bateau en aluminium et un bateau GRP (construction sandwich) montre une diminution globale

de 17% (tableau 2). Du point de vue de l'acquéreur de matériau, le bateau semble extrêmement coûteux et, de par sa position, l'acquéreur ou le concepteur auront du mal à présenter leurs arguments parce que seuls les coûts directs des matériaux sont pris en considération, sans tenir compte des coûts considérablement réduits de production (main-d'œuvre).

Le passage d'une construction sandwich monolytique conduira également à un ajustement de prix (tableau 3), bien que le coût total reste le même. C'est précisément ce partage de responsabilité qui rend difficile pour nous, fournisseurs d'âme, l'évolution des innovations, parce que d'entrée, ce sont toujours les coûts immédiats des matériaux qui se font remarquer. Les économies résultant de la production ne sont ni relevées, ni admises.

Le second point concerne le concepteur et le constructeur de bateau. Le concepteur voit seulement en premier lieu les valeurs mécaniques concernant la résistance et la rigidité. Puisque dans la réglementation, seuls les facteurs de sécurité généraux existent dans leurs grandes lignes, et ne tiennent compte en aucune façon de la résilience et du mode de rupture du matériau d'âme (figure 1), les matériaux possédant des valeurs élevées de résistance et de rigidité seront préférés, même s'ils sont fragiles. Le fait que des matériaux plus résilients soient plus faciles à travailler pour des surfaces de forme sphérique - en d'autres termes, ils ne présentent pas de taux de rejet catastrophique - ne l'intéresse pas dans le cas présent.

Il y a une situation similaire dans la construction quand seule la production de base est de première importance. Beaucoup de chantiers navals n'ont que de la main-d'œuvre semi-qualifiée, et le propriétaire de chantier naval manque de temps pour la former correctement.

Alors, les matériaux ont tendance à être sélectionnés pour leur simplicité et leur facilité de travail, sans tenir compte de si cela est justifiable techniquement. Deux exemples de production de bateau en sandwich l'illustrent.

Pour la construction de bateau en sandwich-GRP, les quatre matériaux principaux utilisés comme âme pour les parties structurales sont : le balsa distribué par Batek ; le nid d'abeille distribué par Ciba Geigy et Hexel ; la mousse-PVC réticulée distribuée par Airex, Barracuda Technology, Polimex, Vega and Alphacan Group ; la mousse-PVC linéaire distribuée par Airex.

Le matériau le plus robuste est le balsa, préféré des concepteurs aussi à cause de sa résistance et de sa rigidité. Ceux-ci semblent ignorer que le balsa est au moins 50% plus lourd que des âmes en mousse comparables et qu'il absorbe une grande quantité de résine pendant la production. A cause d'une faible déformation à la rupture combinée avec une rigidité élevée, il se délamine sur de larges surfaces en cas de surcharge ou de collision avec des objets flottants ou un appontement, de telle sorte que la structure entière peut être affaiblie par le choc. La forme dans laquelle il est fourni joue aussi un rôle. Le balsa peut être fourni

sous forme de matériau profilé pour qu'il puisse épouser les formes du bateau. Ceci simplifie considérablement la production mais conduit souvent à de larges discontinuités entre les blocs individuels. Ceci signifie que si le sandwich est utilisé à l'extérieur de la coque, du pont, etc, tout endommagement de la couche externe - comme des fissures - permettra à l'eau de pénétrer les discontinuités. Cette eau, qu'il est pratiquement impossible de retirer, accroît considérablement le poids du bateau et causera, à terme, le lent pourrissement de l'âme du sandwich. Un accroissement de poids de 200 kg ou plus pour un bateau de 37 pieds est facilement envisageable. Ces effets à long terme ne sont pas pris en considération par les autorités, dans les directives d'interprétation ou de production.

Il en est autant pour les nids d'abeille. Les concepteurs tendent à les recommander pour leurs valeurs mécaniques élevées. Ils sont également faciles à travailler, mais la couche superficielle tend à délaminer de l'âme sur des surfaces importantes et, quand ils sont utilisés à l'extérieur, laissent pénétrer une importante quantité d'eau dans la coque quand celle-ci est endommagée. Cette eau est pratiquement impossible à éliminer.

Les mousses PVC sont complètement différentes. Leur grande surface de contact avec la peau externe leur confère une bonne résistance au pelage. Elles ont l'avantage de n'absorber que très peu de résine à leur surface et résistent bien au pourrissement au cas où l'eau pénétrerait dans la coque.

Comme conséquence d'un nombre accru de dommages ces dernières années, la discussion à propos des calculs et les règlements des sociétés de classification s'est intensifiée, et les conclusions ci-dessus mentionnées sont basées sur les recherches effectuées sur les mousses réticulées et linéaires ces deux dernières années par le KTH, Stockholm (2), le Bureau Veritas, Stockholm (3), l'Université de Floride, Prof. Reichard (4), l'EMPA de Dübendorf, Suisse (5), le DLR de Stuttgart, Allemagne (6). Les résultats de cette recherche ne seront pas décrits en détail, mais ils peuvent être résumés comme suit :

Bien que la mousse PVC réticulée présente une résistance et une rigidité meilleures que la mousse linéaire de façon statique, sous charges dynamiques telles que celles qui se produisent dans le bateau tout entier, la mousse PVC linéaire est bien supérieure à celle réticulée parce que :

- elle ne se rompt pas, même sous des charges de fatigue dynamique ($R = 0,1$), dont la valeur maximum est 80 % de la résistance statique, figure 2 (3,5) ;
- elle se régénère totalement après la charge (9) ;
- elle garde sa résilience aux vitesses de déformation élevées (6) ,
- elle ne rompt pas spontanément et complètement aux joints, figure 3 (9) ;
- elle présente une résistance élevée au pelage (10).

Ces joints se trouvent dans les âmes en mousse tous les 2 à 5 cm pour une mousse prédécoupée, appelée "contoured". Cette forme peut

réduire la résistance de la structure entière par un facteur allant jusqu'à 2 (tableau 1). Tout délaminage se produit alors sur des surfaces importantes.

On peut retenir quelques points de ces résultats pour un bateau ou un navire sûrs :

- des "âmes prédécoupées" sous forme de matériaux "contoured" ne devraient pas être utilisés. De larges plaques de mousse sont préférables. Le moulage aux contours du bateau peut être réalisé aisément et en partie plus rapidement par thermoformage en combinaison avec la méthode de vide ;

- les mousses PVC linéaires devraient être utilisées en particulier pour la coque, où les contraintes dynamiques élevées se produisent, parce qu'elle a de meilleures propriétés dynamiques. Pour des rayons de courbure plus élevés, il y a aussi la possibilité d'un moulage à froid.

La méthode de moulage sous vide est recommandée pour le collage de l'âme dans le sandwich car, comparée aux autres méthodes, elle garantit une adhésion plus sûre, applique moins de contrainte sur le moule et permet une production plus rapide une fois ajustée.

METHODE DE PRODUCTION

Malencontreusement, les conclusions correctes sont rarement tirées de la règle établie dans plusieurs études de coût, qu'en moyenne *la phase de conception coûte un maximum de 20% des coûts totaux alors qu'elle occasionne jusqu'à 80% du coût total.*

Les habitudes ou d'autres raisons font que les méthodes traditionnelles sont appliquées pour la construction de bateaux en FRP, et des efforts sont faits pour réduire les coûts en rationalisant la production. La production de GRP, avec ses possibilités multiples (figure 4) de production de pièces, offre un potentiel important d'économie.

Par exemple, il est possible de réduire les durées et coûts de production dans la construction de bateau en combinant le pressage de panneaux plans, les tables de vide pour les petites pièces intégrées et en utilisant simultanément la construction inversée intégrale.

Cette idée, déjà adoptée dans quelques chantiers navals (7), a été utilisée avec logique pour la construction du yacht "sandwich" (8). Le yacht entier a été construit à l'envers depuis le début. D'abord, le pont complet a été disposé sur le sol (figure 5) et le lambrissage intérieur construit (figure 6). A l'intérieur de ceci, les panneaux sandwichs préparés pour les cloisons latérales et longitudinales ont été insérés (figure 7). Comme l'assemblage du pont et des cloisons a été effectué à ce stade, le difficile travail en hauteur, traditionnel dans la construction de bateau, n'a pas été nécessaire.

Les cloisons jouent le rôle des raidisseurs dans la construction traditionnelle de bateau. Les dimensions exactes de ces cloisons ont été

établies à l'aide de la CAO. Tous les autres équipements de taille importante sont construits à ce stade. Ensuite, les cloisons sont reliées par des barres en GRP à sections rectangulaires et les espacements remplis avec de la mousse (figure 8). Puis, les stratifiés intérieurs sont montés, et l'âme en sandwich est appliquée sous forme d'unités complètes par la méthode de thermoformage sous vide (figure 9). Après le montage du stratifié externe et la finition de son apparence externe, le bateau est redressé dans l'eau et est prêt pour l'aménagement intérieur.

La technique de construction décrite nécessite une planification et une logistique détaillées pour le constructeur de bateau, prenant en compte la connaissance des matériaux et des procédés, mais elle simplifie grandement la tâche des employés et réduit les erreurs car les procédures difficiles dans des conditions malaisées sont réduites.

1. BARNES F., 1991, Findings of the construction and building of a type of lifeboats with various materials, SP- technology, communication personnelle, Southampton.
2. ZENKERT D., 1990, Damage tolerance of foam core sandwich construction, presentation at the KTH Stockholm, Department of Aeronautical Structures and Materials, Stockholm, juillet 1990.
3. BUENE L., ECHTERMEYER A.T., HAYMAN B., SUND O.E., ENGH B., 1992, Shear properties of on GRP sandwich beams subjected to slamming loads, 2nd International Conference on Sandwich Construction, Gainesville, Florida, 9-12 mars 1992.
4. WILLIAMS G.P., Response of marine composites panels to hydrodynamic shock loadings, presentation at the University of Florida, Department of Oceanography and Ocean Engineering, Florida, juillet 1991.
5. KRAMER H., FLÜLER P., 1990, Statische und dynamische Biegeversuche an Kernverbunden mit Hartschaumstoffkern, EMPA/Dübendorf, interner Untersuchungsbericht N° 120 82 février 1990.
6. KINDERVATER Ch., 1991, 1992, Ermittlung von geschwindigkeitsabhängigen Materialdaten von Schaumstoffen, DLR-Stuttgart, Interner Untersuchungsbericht.
7. CARDIS. Bau der Alalunga 21, Yachtwerft Decision, Morges/Suisse, communication personnelle.
8. N.N., Big Mac aus Arnis, Yacht 23/89, pp 108-112.
9. BUENE L., ECHTERMEYER A.T., SUND O.E., ENGH B., 1992, Long term effects of slamming loads, Main Test Program, DNV project report, n°2.10.
10. OLSSON K.A., LÖNNÖ A., 1992, Sandwich construction - Recent research and development : GRP sandwich technology for high-speed marine vessels, 2nd International Conference on Sandwich Construction, Gainesville, Florida, 9-12 mars 1992.

Tableau 1 : Résultats d'essai sur poutre. Charges moyennes à la rupture par unité de largeur.

	P_{pred} (N/mm)	P_{crit} (N/mm)	$P_{ss\ def.}$ (N/mm)	$P_{crit} / P_{ss\ def.}$
Densité 60 kg/m ³ espacement vide	17,7	20,8	32	0,65
Densité 100 kg/m ³ espacement vide	42,3	46,4	81	0,57
Densité 200 kg/m ³ espacement vide	87,3	85,5	195	0,44
Densité 200 kg/m ³ espacement vide charge sur face en traction	---	127,6	195	0,65
Densité 200 kg/m ³ espacement vide charge sur face en compression	119,3	119,8	195	0,61

P_{pred} : résistance théorique du panneau sandwich.

P_{crit} : résistance du panneau sandwich avec assemblage bout à bout dans l'âme remplie jusqu'à 50%.

$P_{ss\ def.}$: résistance du panneau sandwich avec assemblage bout à bout dans l'âme remplie jusqu'à 100%.

Tableau 2 : Comparaison des coûts entre une conception intégrale en composite et une conception en aluminium pour une embarcation de sauvetage de 11 m.

élément	Conception 1 composite intégrale	Conception 2 aluminium	écart conc.1 à conc.2
outillage	8 000 £	---	---
matériaux de construction	65 000 £	10 500 £	+ 619 %
main d'œuvre construction	70 000 £	175 000£	- 60 %
main d'œuvre équipement	312 500 £	362 500 £	- 14 %
coût total*	455 500 £	548 000 £	- 17 %

**Ces prix s'entendent sans les 260 000 £ de coût d'équipement pour chacun.*

Tableau 3 : Comparaison de coût entre une conception intégrale en composite et une conception en GRP conventionnel pour une embarcation de sauvetage de 15 m.

élément	Conception 1 composite intégrale	Conception 2 GRP conventionnel	écart conc.1 à conc.2
poids	5 234 kg	6 890 kg	- 24 %
outillage	70 000 £	70 000 £	---
matériaux	89 870 £	65 717 £	+ 37 %
main d'œuvre	103 000 £	134 140 £	- 23 %
coût total	192 870 £	199 857 £	- 3,5 %

Le coût total exclut les coûts d'équipement.

Figure 1. Comportement à la rupture de pièces en sandwich avec différents âmes.

Fracture behaviour of sandwich components with various core materials.

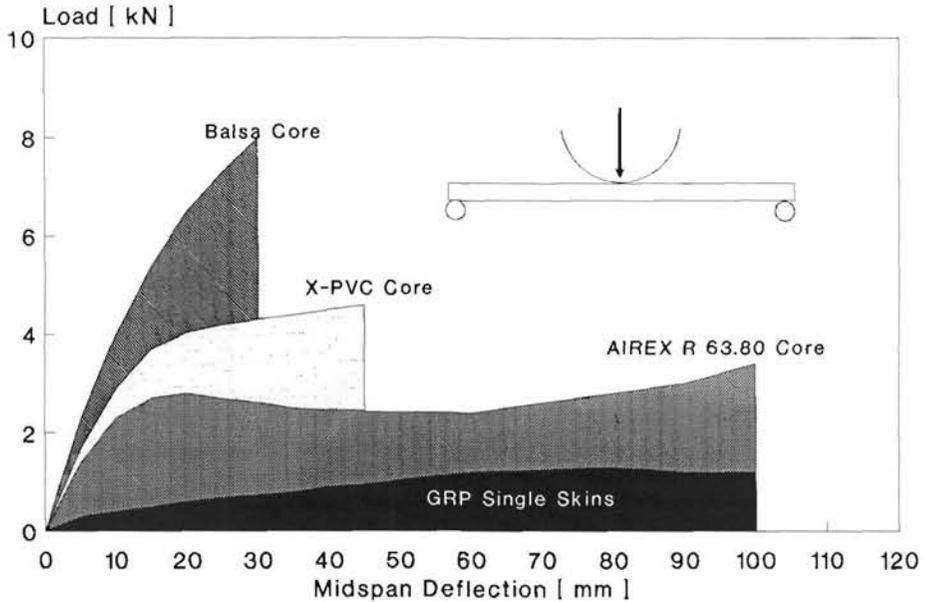


Figure 2. Résistance en fatigue d'Airex R 63.80. Température ambiante. Essais réalisés à l'EMPA, Suisse.

Fatigue strength of Airex R 63.80, RT. Tested at EMPA, Switzerland.

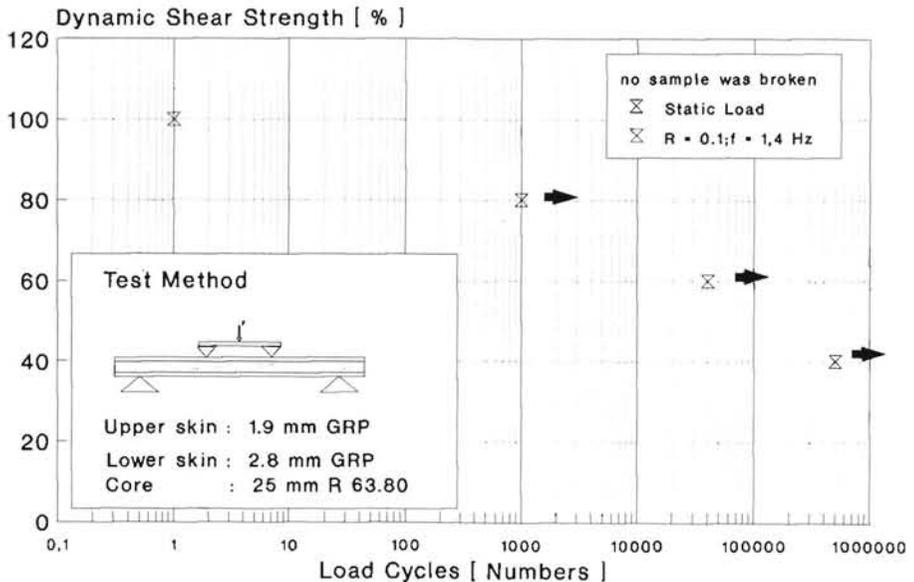


Figure 3. Comportement dynamique de R 63.80. X-PVC comparé à R 63.80 avec joint. Statique et dynamique, température ambiante.
Dynamic properties of R 63.80. X-PVC compared to R 63.80 with joint. Static and dynamic (single slam) at RT. Tested at Veritas Research, Norway.

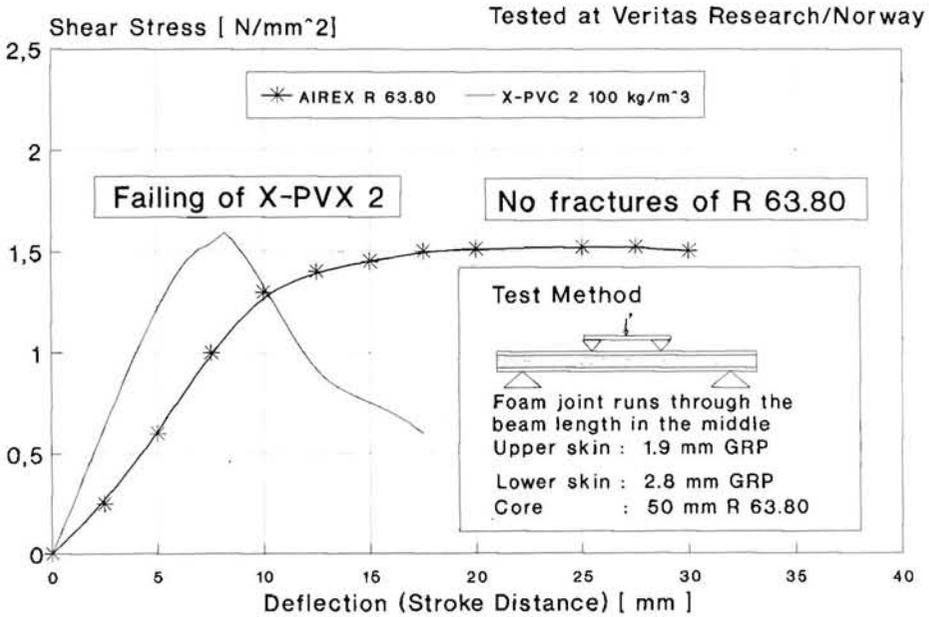


Figure 4

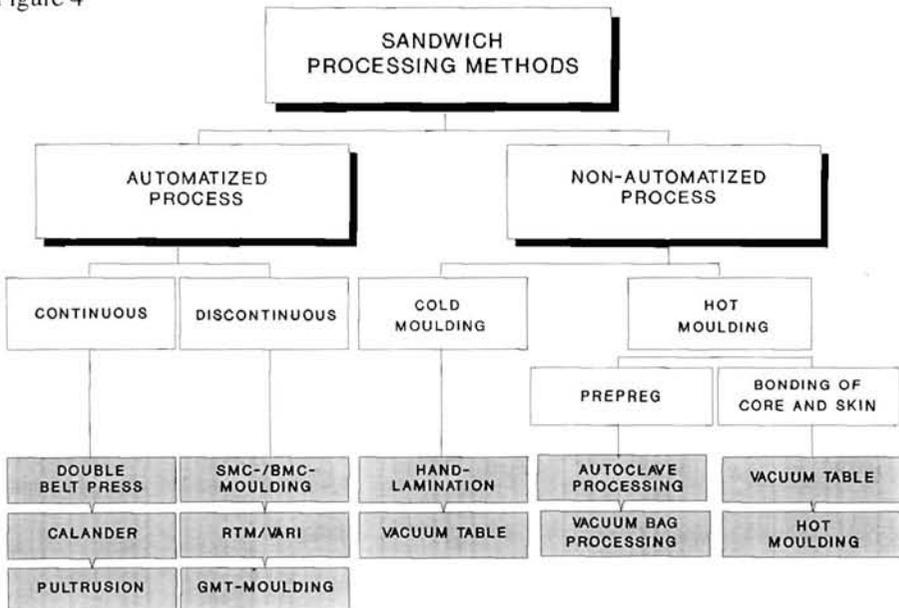




Figure 5

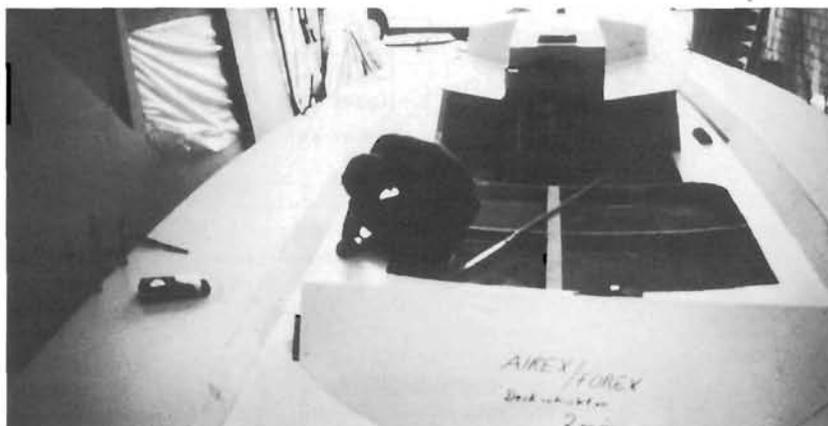


Figure 6

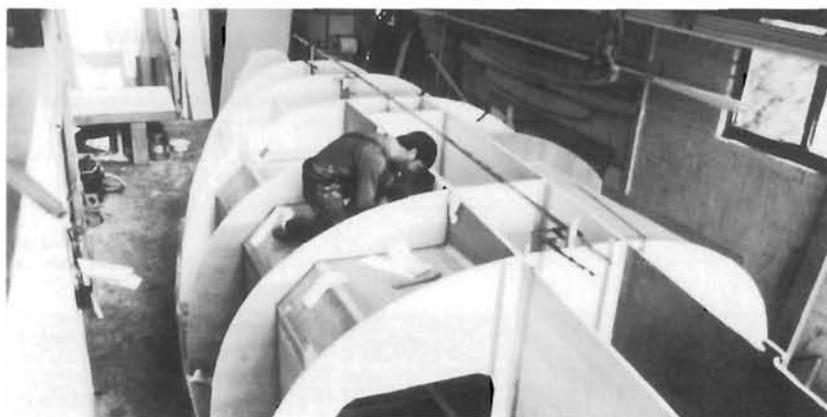


Figure 7



Figure 8



Figure 9