

Effets de l'ondulation hors-plan sur le comportement mécanique de cornières composites sous flexion 4-point : comparaison essai-calcul

Effects of out-of-plane waviness on the mechanical response of L-angles laminates under 4-point bending: test and simulation comparison

Anton Koenig^{1,2}, Christian Fagiano¹, Frédéric Laurin¹, Florence Saffar¹, Juan Manuel García¹, Martin Desailoud²

1 : DMAS, ONERA, Université Paris-Saclay
92320, Châtillon, France
e-mail : anton.koenig@onera.fr

2 : Airbus Operations SAS
316 route de Bayonne, 31060 TOULOUSE cdx 09
e-mail : martin.desailoud@airbus.com

Résumé

Cette étude propose une méthodologie numérique pour intégrer dans des simulations éléments finis l'effet de défauts d'ondulation hors-plan sur le comportement mécanique en dépliage pur (flexion 4-point) de cornières composites stratifiées à matrice thermdurcissable. Le défaut physiquement observé par micrographie ou tomographie est décrit à l'aide d'un modèle paramétrique via un processus d'optimisation. Le défaut est ensuite explicitement introduit dans un maillage pli à pli représentant fidèlement l'image originale. Des simulations linéaires élastiques avec un critère de rupture hors-plan (Onera Progressive Failure Model – OPFM) sont ensuite réalisées et comparées à des essais menés à l'ONERA, ou des essais partagés par Airbus Operations. Les prévisions de la force à rupture par du délaminage et la localisation de la ruine sont satisfaisantes en comparaison avec les essais. Ceci montre l'intérêt de l'approche de modélisation explicite du défaut dans le maillage pour prévoir l'abatement des propriétés mécaniques liées à la présence d'ondulation hors-plan.

Abstract

This study proposes a numerical methodology to integrate into finite element simulations the effect of out-of-plane waviness defects on the mechanical behavior in pure unfolding (4-point bending) of thermoset L-angle laminates. The defect physically observed by micrography or tomography is described using a parametric model via an optimization process. The defect is then explicitly introduced into a ply-by-ply mesh that faithfully represents the original image. Linear elastic simulations associated with an out-of-plane failure criteria (used in the ONERA's progressive damage model) are then carried out and compared with tests conducted at ONERA, or tests shared by Airbus Operations. The prediction of the failure strength by delamination and its localization are satisfactory in comparison with experimental tests. This shows the interest of the explicit modeling approach of the defect in the mesh to predict the mechanical knock down factors related to the presence of out-of-plane undulations.

Mots Clés : Ondulation hors-plan, Cornière, Délaminage, Défaut de fabrication

Keywords : Out-of-plane waviness, L-angle specimens, Delamination, Manufacturing defect

1. Introduction

1.1 Contexte

Avec l'augmentation de la complexité des pièces composites (pièces one shot), le risque de présence de défauts de fabrication peut être plus important. Un défi majeur réside dans la gestion des ondulations hors-plan qui surviennent lors de nouveaux procédés de fabrication adaptés à ces pièces complexes. Ces ondulations représentent un obstacle significatif, car elles exigent un travail important au niveau du design/procédé pour les éviter, ou la mise en œuvre de campagnes d'essais exhaustives pour assurer les performances mécaniques des pièces en leur présence. Une meilleure compréhension

de l'effet des défauts *via* des simulations permettrait de réduire les coûts associés au développement de nouveaux procédés ou pièces (notamment en réduisant les campagnes d'essai longues et coûteuses parfois associées) et de redéfinir la qualité standard de manière plus large. Les perspectives de ces travaux s'inscrivent donc dans la réduction des coûts de production de pièces composites.

Les travaux présentés dans cet article s'inscrivent dans ce cadre, *via* une thèse CIFRE en collaboration entre l'ONERA et Airbus Operations. Celle-ci est dédiée à l'étude des effets des ondulations hors-plan dans les cornières stratifiées à matrice therm durcissable. Ce type de défaut est courant lors du développement de nouveaux procédés ou composants, et leur traitement est long en raison de l'absence de méthode numérique précise pour l'évaluation de leur influence. Les méthodes actuelles sont empiriques, basées sur les essais réalisés au fil des années, et conservatives. Enfin, le défaut d'ondulation hors-plan a un impact négatif important sur les propriétés mécaniques hors-plan d'un stratifié de plis unidirectionnels [1], qui sont fortement sollicités dans le rayon d'une cornière subissant un effort de dépliage [2]. Une méthode numérique fiable est ainsi souhaitable pour améliorer le traitement (temps, précision) de ces cas, mais aussi afin de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents.

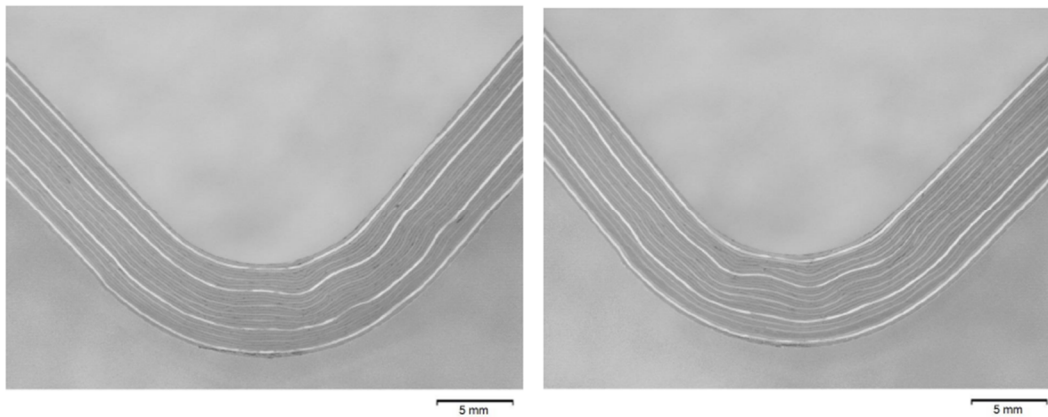


Fig. 1. Exemples de cornières avec ondulation hors-plan (©Airbus). Ces défauts ne sont pas représentatifs de la qualité standard industrielle.

1.2 Etat de l'art

La volonté de prévoir la résistance au dépliage d'une cornière sans, puis avec défaut d'ondulation, n'est pas nouvelle. Ainsi, différentes approches analytiques [3] et numériques [2] ont été proposées pour évaluer l'occurrence du premier délaminage d'une cornière composite saine. Les études s'intéressant à l'influence du défaut d'ondulation hors-plan dans les cornières sont plus récentes [4-8] et sont toutes basées sur le principe d'introduire explicitement le défaut dans un maillage éléments finis, via une approche basée image ou via un modèle paramétrique. La pertinence de cette approche est renforcée par les comparaisons aux essais réalisés dans certaines de ces études. La méthode présentée dans ce manuscrit prolonge cette approche, avec un soin particulier apporté à la transférabilité industrielle (outils utilisés, simplicité d'utilisation, adaptabilité pour des échelles plus grande ou d'autres cas de charge).

2. Description du défaut

La représentation géométrique du défaut peut être obtenue avec différentes approches, que l'on peut séparer en deux catégories : les représentations directement issues de la géométrie observée expérimentalement, et les représentations géométriques paramétrisées. L'approche utilisée dans ces travaux se place dans la deuxième catégorie. Dans cette approche, les paramètres caractérisant le

défaut sont identifiés à l'aide d'un processus d'optimisation pour représenter au mieux l'observation expérimentale.

Le modèle choisi est celui développé par Fougereuse [9] dans ses travaux (Eq. 1). Ce modèle a été développé pour décrire des ondulations hors-plan situées à cœur d'une plaque plane thermoplastique. Il consiste en une sinusoïde modulée par trois gaussiennes, et a démontré une meilleure capacité à décrire des ondulations complexes que des modèles sinusoïdes plus simples.

$$z_{waviness}(x, y, z) = z + A \cos\left(2\pi \frac{(x - (x_0 - \Delta))}{\lambda}\right) \exp\left(-0.5 \frac{(x - x_0)^2}{(L_x/6)^2}\right) \exp\left(-0.5 \frac{(y - y_0)^2}{(L_y/6)^2}\right) \exp\left(-0.5 \frac{(z - z_0)^2}{(L_z/6)^2}\right) \quad (\text{Eq. 1})$$

Où (x_0, y_0, z_0) le centre 3D du défaut, (L_x, L_y, L_z) l'étendue dans les trois directions de l'échantillon, A l'amplitude, λ la longueur d'onde, Δ l'offset de la phase en x .

Le modèle étant valable pour des géométries planes, alors que ces travaux s'intéressent aux cornières, une adaptation est donc nécessaire. Celle-ci consiste à ramener la paramétrisation d'un défaut d'une géométrie courbe (cornière) à celle d'une géométrie plane. Sous l'hypothèse que les plis dans le rayon d'une cornière ont le même centre de courbure, et que celle-ci respecte la contrainte géométrique (Eq. 2), il est possible de « déplier » ce rayon vers une géométrie plane, *via* un changement de coordonnées (Fig. 2). Il faut noter que les hypothèses ci-dessus sont respectées pour la très grande majorité des pièces industrielles, de par les règles de design et d'inspection imposées.

$$e = R_e - R_i \quad (\text{Eq. 2})$$

Où e l'épaisseur, R_e et R_i les rayons externes et internes respectivement.

Par ce changement de coordonnées, il est ainsi équivalent d'étudier une cornière ou une plaque plane, sans nécessiter de nouveau modèle paramétrique. Le modèle paramétrique choisi, couplé avec l'approche décrite ci-avant, est capable de décrire fidèlement la géométrie de la plupart des ondulations hors-plan présente dans la base d'image de cornières transférée par Airbus (Fig. 3). L'ajustement des paramètres est réalisé par un algorithme d'optimisation globale (recuit simulé) dont la fonction objectif est la maximisation de la mesure de similarité SSIM [10] entre une image fictive créée à l'aide du modèle paramétrique, et l'image réelle.

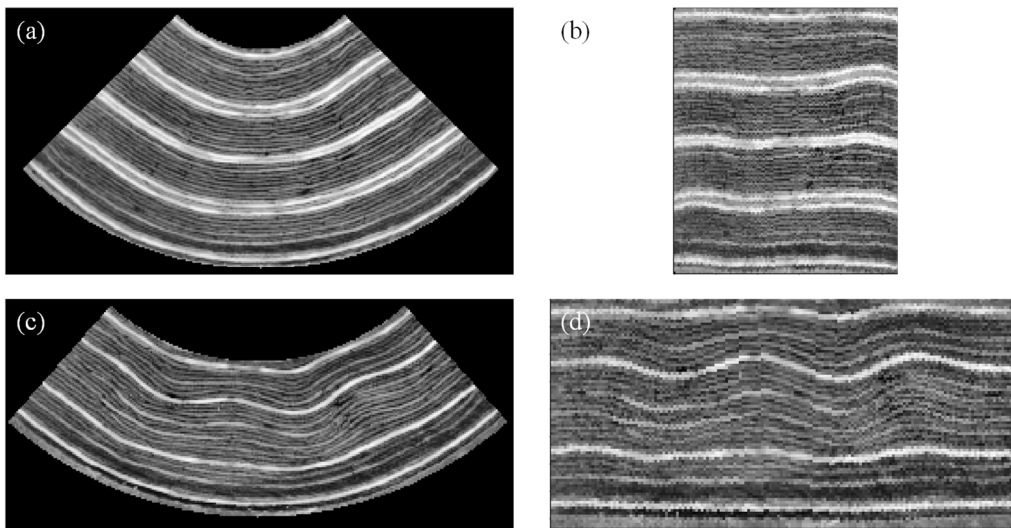


Fig. 2. Rayons de cornières et leur géométrie dépliée correspondante : (a,b) Cornière saine, (c,d) Cornière avec ondulation hors-plan

3. Maillage du défaut

Le défaut paramétrisé est introduit explicitement dans un maillage en déformant les nœuds d'un maillage sain suivant le champ de déplacement donné par le modèle paramétrique. Comme souligné ci-avant, cette approche est cohérente avec le reste de la littérature.

Le maillage sain initial est un modèle 3D pli à pli représentant la cornière (angle, empilement), et raffiné aux endroits les plus critiques : contact avec les rouleaux du montage de flexion 4-point, et dans le rayon. Le maillage est composé d'éléments hexaédriques linéaires (C3D8), et évolue de manière structurée. Le maillage déformé hérite ainsi des mêmes qualités. Les orientations locales des plis sont mises à jour après le déplacement des nœuds pour rendre compte de la désorientation locale induite par l'ondulation.

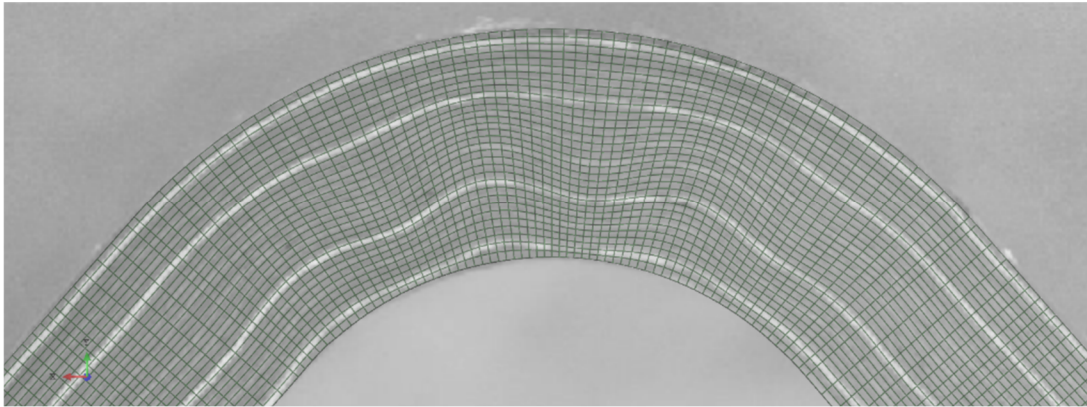


Fig. 3. Superposition du maillage obtenu avec l'image initiale

La comparaison du résultat avec l'image initiale (Fig. 3) montre une description géométrique adéquate du défaut. Quelques imperfections peuvent être soulignées par un œil averti, mais le but est que le maillage soit mécaniquement représentatif du coupon, et non pas géométriquement parfaitement conforme. Ce point est vérifié à l'issue des simulations, par comparaison aux résultats d'essais.

4. Comparaison essais/calculs pour la flexion 4-point de cornières

Des simulations numériques sont réalisées sur Abaqus®/Standard. Le modèle est un jumeau numérique de l'essai de flexion 4-point expérimental, avec contact sans friction au niveau des rouleaux. Des calculs avec des propriétés matériaux linéaires élastiques sont réalisées, et le critère de rupture interfibre hors-plan du modèle d'endommagement de l'ONERA (OPFM) [11] est calculé à chaque incrément. L'apparition d'endommagement en traction hors-plan (correspondant au critère (Eq. 3)) est considérée comme l'amorçage du délaminage observé expérimentalement. La force et le déplacement machine simulé à cet incrément sont comparés aux résultats d'essais fournis par Airbus. Il est également possible de comparer la localisation de l'endommagement prévu avec le faciès de rupture observé post-essai.

$$f_3^+ = \left(\frac{\sigma_{33}}{Z_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 \geq 1 \quad (\text{Eq. 3})$$

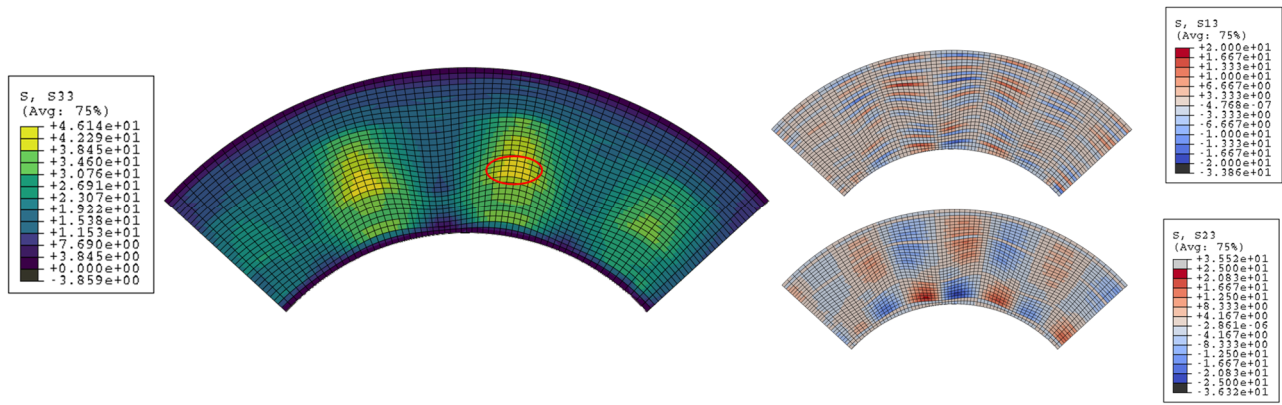


Fig. 4. État des contraintes hors-plan (en MPa) juste avant le premier délaminage (apparition d’endommagement hors-plan, zone entourée en rouge) au niveau de la section médiane (loin des bords)

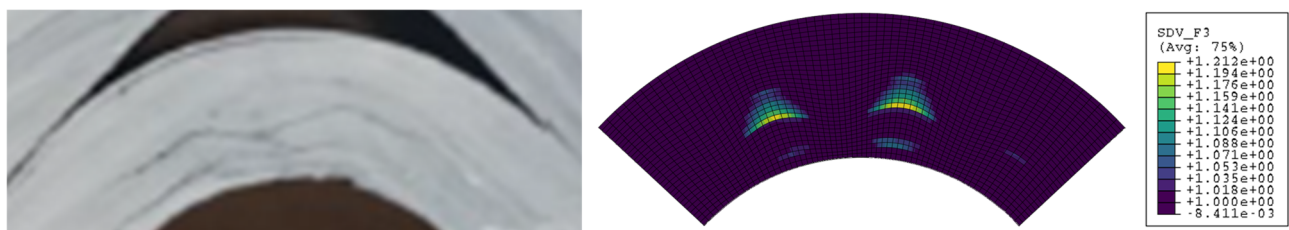


Fig. 5. Comparaison du faciès de rupture expérimental avec la valeur du critère hors-plan f_3 à l’issue de l’essai au niveau de la section médiane (loin des bords)

L’approche entière est ici illustrée pour un cas issu de la base de données d’Airbus (voir (Fig. 3, 4, 5)). Les données matériaux de l’équation (Eq. 3), notamment la résistance à la traction hors-plan Z_t , sont identifiées sur les bases de données de cornières saines transmises par Airbus pour le matériau correspondant et validées sur des essais effectués sur diverses configurations de drapages et d’épaisseurs. On observe sur la (Fig. 4) que l’ondulation génère localement des concentrations des contraintes hors-plan. Ces concentrations de contraintes induisent la ruine prématurée de la cornière par rapport à une cornière sans défaut : -33% sur la force au premier délaminage par rapport à la cornière saine équivalente, générée par éléments finis en l’absence d’essai. La prévision du premier délaminage est, pour ce cas, satisfaisante pour la force (-3% par rapport à l’expérimental), avec une erreur notable sur le déplacement (-15%). Ce déplacement étant celui de la traverse machine, il prend donc aussi en compte la raideur du montage ainsi que les jeux du montage, ce qui pourrait expliquer cette différence. La comparaison de la localisation de l’endommagement à l’issue de l’essai (Fig. 5) est elle aussi satisfaisante : la simulation n’a vocation qu’à prévoir le premier délaminage, et celui-ci correspond qualitativement bien avec un de ceux sur l’image après rupture totale (multiples pics de délaminages).

Dans d’autres cas avec ondulation, la prévision de la force au premier délaminage est un peu plus éloignée de celle mesurée expérimentalement. Ceci peut être expliqué en partie par la dispersion des résultats en flexion 4-point, même pour des cornières saines. La valeur de la résistance à la traction hors-plan Z_t identifiée à drapage constant peut ainsi varier de l’ordre de 10%.

5. Conclusion

L'approche choisie de paramétrisation du défaut pour déformer un maillage sain permet une correspondance géométrique du maillage avec l'image originale très satisfaisante. Cette correspondance valide le choix du modèle paramétrique et sa capacité à décrire des morphologies de défauts en dehors de celles pour lesquelles il a été créé initialement, moyennant le changement de coordonnées proposé. Pour ce qui est de la représentativité mécanique, le critère de rupture utilisé semble correctement rendre compte de la force à rupture observée expérimentalement. La localisation de l'endommagement simulée est qualitativement bien reproduite en comparaison avec le faciès de rupture expérimental. Réaliser des essais multi-instrumentés à l'ONERA permettra de mieux contrôler les conditions aux limites, et si nécessaire de les mesurer, et une comparaison entre l'essai et les simulations plus avancées. Cette comparaison quantitative est cruciale pour la validation des modèles numériques et améliorer la compréhension des mécanismes caractéristiques d'endommagement et rupture en présence de défauts initiaux.

A la suite de cette étude, l'objectif sera de valider l'approche sur une base de données d'essai de flexion 4-point plus large. Ensuite, il faudra étendre la validité de la méthode à des cas de charge plus complexes (dépliage avec différents rapports de multi-axialité de contrainte σ_{33}/τ_{13}) et si possible d'intégrer les effets d'autres phénomènes améliorant ainsi la précision de la méthode, comme les contraintes résiduelles de cuisson.

Références

- [1] P. Journoud, « Experimental and numerical study of wrinkles defects on curved laminated composite structures », Unpublished PhD thesis, INSA Toulouse, 2022.
- [2] J.-S. Charrier, « Développement de méthodologies dédiées à l'analyse robuste de la tenue de structures composites sous chargements complexes tridimensionnels », PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2013. Consulté le: 17 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: Portail HAL ParisTech - PASTEL. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00966987>
- [3] J. M. González-Cantero, E. Graciani, A. Blázquez, et F. París, « A new analytical model for evaluating interlaminar stresses in the unfolding failure of composite laminates », *Composite Structures*, vol. 147, p. 260-273, juill. 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.03.025.
- [4] F. Laurin, A. Mavel, et E. Dupuy, « Experimental and numerical investigations: effects of defects in laminated L-angles », *JEC Composites Magazine*, vol. 106, p. 26-30, 2016.
- [5] K. Woo, B. F. Nega, D. S. Cairns, et J. Lua, « Delamination behavior of L-shaped composite beam with manufacturing defects », *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 34, n° 9, p. 3709-3720, 2020, doi: 10.1007/s12206-020-0823-y.
- [6] X. Xu, M. I. Jones, H. Ali, M. R. Wisnom, et S. R. Hallett, « Effect of out-of-plane wrinkles in curved multi-directional carbon/epoxy laminates », *Composites Science and Technology*, vol. 197, p. 108282, sept. 2020, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2020.108282.
- [7] H. Hu, D. Cao, Z. Cao, et S. Li, « Experimental and numerical investigations of wrinkle effect on failure behavior of curved composite laminates », *Composite Structures*, vol. 261, p. 113541, avr. 2021, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.113541.
- [8] P. Journoud, C. Bouvet, B. Castanié, et L. Ratsifandrihana, « Numerical analysis of the effects of wrinkles in the radius of curvature of L-shaped CFRP specimens on unfolding failure », *Composite Structures*, vol. 299, nov. 2022, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2022.116107.
- [9] C. Fougereuse, « Understanding and modelling of the effects of out-of-plane waviness defects on the mechanical performance of a thermoplastic matrix laminate », PhD thesis, Université Paris-Saclay, 2023. [En ligne]. Disponible sur: Portail HAL theses - <https://theses.hal.science/tel-04280394>
- [10] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, et E. P. Simoncelli, « Image quality assessment: from error visibility to structural similarity », *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 13, n° 4, p. 600-612, avr. 2004, doi: 10.1109/TIP.2003.819861.
- [11] F. Laurin, N. Carrère, et J.-F. Maire, « A multiscale progressive failure approach for composite laminates based on thermodynamical viscoelastic and damage models », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 38, n° 1, p. 198-209, janv. 2007, doi: 10.1016/j.compositesa.2006.01.018.