

# Micromechanical models of transverse cracking in ultra-thin Fiber-Reinforced Composite laminates

Luca Di Stasio<sup>1,2, a</sup>, Janis Varna<sup>2, b</sup> and Zoubir Ayadi<sup>1, c</sup>

<sup>1</sup>Université de Lorraine, EEIGM, 6 Rue Bastien Lepage, FR-54010 Nancy, France

<sup>2</sup>Luleå University of Technology, University Campus, SE-97187 Luleå, Sweden

<sup>a</sup>luca.di-stasio@univ-lorraine.fr, <sup>b</sup>janis.varna@ltu.se, <sup>c</sup>zoubir.ayadi@univ-lorraine.fr

**Keywords:** Representative Volume Elements, micromechanical modeling, thin ply effect

## Abstract

Introduced around 20 years ago, the so-called *spread tow technology* has allowed the production on industrial scale of extremely thin fiber-reinforced prepreg plies. The few manufacturers of this kind of composite material, such as *North Thin Ply Technology* [1] in Switzerland and *Oxeon* [2] in Sweden, are nowadays capable of providing prepreps with thicknesses up to 2-4 times the reinforcement's diameter for high performance carbon and glass E fibers.

The employment of thin plies in laminates for structural applications has been proven beneficial in terms of increased mechanical performance and improved tolerance to damage with concurrent savings in weights, particularly in cross- and angle-ply stacking configurations. The key factor underpinning the success of this technology is a phenomenon first experimentally observed around 40 years ago, known as the *thin ply effect* in the composite community. The main observation is that the transverse strength at failure measured for unidirectional composites (UD) is not applicable to a thin layer inside a laminate. Its real strength, known as the *in-situ strength*, is in fact much higher [3].

Damage propagation in thin and thick plies has been extensively studied experimentally and modeled by analytical and numerical techniques. Simulations with the Finite Elements Method have been proven to be valuable tools to model transverse fracture processes at the micromechanical level, as in [4]. Many models of damage propagation recast the complexity of the phenomenon into a greater set of material parameters; unfortunately, several of them are inaccessible to the experimenter and thus cannot be reliably measured. Indirect methods of estimation have been proposed, as for example in [5], but the applicability of such parameters outside the domain of training is still an open question.

On the other hand, crack initiation in thin plies has been mostly neglected and still represents a field ripe for investigation. Understanding is still lacking about the dependence of energy release rate with respect to debond size and position, adjacent plies' orientation and thickness. Furthermore, the influence of fiber volume fraction, material selection, boundary conditions, load type and distribution should be considered in order to grasp the inner workings of this phenomenon. Detailed knowledge of the mechanisms underlying the initiation of fracture inside a single ply is useful in a twofold way: from the designer's perspective, by providing guidelines on optimal laminate design; from the modeler's perspective, by highlighting the best strategies to simulate crack initiation in terms of solver selection, mesh quality, boundary conditions, load type and distribution. To address these issues, several 2-D models of Representative Volume Elements (RVEs) have been developed by combining together different variations of the aforementioned elements. Energy release rates are computed for different debond position and size, as well as contact stresses and displacements at fiber/matrix interface and elastic strains and stresses along selected radial and circumferential sections.

# Modèles micromécaniques du dommage intra-laminaire dans les composites stratifiés avec couches extrêmement fines

Luca Di Stasio<sup>1,2, a</sup>, Janis Varna<sup>2, b</sup> and Zoubir Ayadi<sup>1, c</sup>

<sup>1</sup>Université de Lorraine, EEIGM, 6 Rue Bastien Lepage, FR-54010 Nancy, France

<sup>2</sup>Luleå University of Technology, University Campus, SE-97187 Luleå, Sweden

<sup>a</sup>luca.di-stasio@univ-lorraine.fr, <sup>b</sup>janis.varna@ltu.se, <sup>c</sup>zoubir.ayadi@univ-lorraine.fr

**Keywords:** Volume élémentaire représentatif, modélisation micromécanique, effet de taille et d'échelle

## Résumé

Introduit il y a environ 20 ans, la technologie dite en anglais *spread tow technology* a permis la production au niveau industriel des composites stratifiés avec couches extrêmement minces. Les producteurs de ce type de composite, comme *North Thin Ply Technology* [1] en Suisse et *Oxeon* [2] en Suède, sont aujourd'hui capables d'offrir des plis pré-imprégné avec épaisseurs entre 2 et 4 fois le diamètre du renfort, dans les cas des fibres de carbone à haut performance ou verre E.

L'utilisation de couches minces dans stratifiés pour applications structurales a été prouvé bénéfique en raison de l'amélioration du comportement mécanique avec au même temps une réduction significative du poids. Le facteur clé de ce succès est un phénomène découvert expérimentalement il y a 40 ans, appelé *thin ply effect* dans la communauté des composites polymériques stratifiés. L'observation principale est que la contrainte maximale transversale à rupture mesuré dans un stratifié unidirectionnel n'est pas applicable à une couche très mince dans une stratifié générique. De toute façon, la contrainte maximale réel, connu comme *in-situ strength*, est beaucoup plus grande par rapport aux stratifié unidirectionnel [3].

La propagation du dommage dans stratifiés avec couches minces et épais a été largement étudié à travers moyens expérimentales, analytique et numériques. Un grand nombre des recherches (voir par exemple [4]) a montré l'utilité des simulations par éléments finis pour la modélisation des processus de fissuration transversale à l'échelle micromécanique. Plusieurs travaux proposent une reformulation de la complexité du phénomène avec une extension du nombre des paramètres caractérisants le matériau. Malheureusement, la plupart d'entre eux ne sont souvent pas accessibles à l'expérimentateur et il n'est donc pas possible de les mesurer avec un degré suffisant de confiance. Méthodes indirectes d'estimation ont été proposées, comme en [5], mais la possibilité d'une application fiable en dehors du domaine d'entraînement reste toujours une question ouverte.

Par contre, les mécanismes d'initiation des fissures dans couches minces a été négligé et ils représentent un domaine riche pour l'investigation. Il manque encore une connaissance approfondi de la dépendance du taux de restitution d'énergie par rapport à la position et dimension du décollement initial, l'orientation des plis contigus et leur épaisseur. De plus, pour une pleine description de ce mécanisme, il est important d'étudier les effets dû à la fraction volumique des fibres, les matériaux choisis, les conditions au bord, les caractéristiques de la charge appliquée et sa distribution spatiale. Deux buts principaux peuvent être envisagés : du point de vue du concepteur-projeteur, la production des principes et recommandations pour le projet optimal du stratifié ; du point de vue du numéricien, la définition des meilleures stratégies pour la modélisation de l'initiation des fissures. Pour adresser ces enjeux, plusieurs modèles bidimensionnels de Volume élémentaire représentatif (VER) ont été développés en combinant différents éléments : solveur, conditions au bord, charge appliquée, qualité du maillage. Diverses grandeurs de sortie sont calculés et analysés : les taux de restitution d'énergie, les contraintes et les déplacements à l'interface entre fibre et matrice, l'état de contrainte et de déformation sur sections radiales et circonférentielles.

## References/Références

- [1] *NTPT makes world's thinnest prepreg even thinner*. (2017, February 10). Retrieved from <http://www.thinplytechnology.com/news-159-ntpta-makes-world-s-thinnest-prepreg-even-thinner>
- [2] *oXeon TECHNOLOGIES*. (2017, February 10). Retrieved from <http://oxeon.se/technologies/>
- [3] Donald L. Flaggs, Murat H. Kural; Experimental Determination of the In Situ Transverse Lamina Strength in Graphite/Epoxy Laminates. *Journal of Composite Materials*, 1982; 16(2).
- [4] Miguel Herráez, Diego Mora, Fernando Naya, Claudio S. Lopes, Carlos González, Javier LLorca; Transverse cracking of cross-ply laminates: A computational micromechanics perspective. *Composites Science and Technology*, 2015; 110:196-204.
- [5] Luis Pablo Canal, Carlos González, Javier Segurado, Javier LLorca; Intraply fracture of fiber-reinforced composites: Microscopic mechanisms and modeling. *Composites Science and Technology*, 2012; 72(11):1223-1232.