

# Étude expérimentale de la rupture et des effets d'échelle en compression dans les structures composites tissées 3D à matrice organique

## *Progressive failure of 3D woven structures by kink-band propagation and investigation of size effect*

Arthur MONTAZEL<sup>1,2,3</sup>, Frédéric LAURIN<sup>1</sup>, Johann RANNOU<sup>1</sup>, Sylvain MOUSILLAT<sup>2</sup> et Julien YVONNET<sup>3</sup>

1 : Département Matériaux et Structures, Onera  
29 avenue de la Division Leclerc, 92322 Chatillon Cedex, France,  
e-mail : [arthur.montazel@onera.fr](mailto:arthur.montazel@onera.fr), [frederic.laurin@onera.fr](mailto:frederic.laurin@onera.fr) et [johann.rannou@onera.fr](mailto:johann.rannou@onera.fr)

2 : Safran Aircraft Engines  
Rond-point René Ravaut, 77550 Moissy-Cramayel, France  
e-mail : [sylvain.mousillat@safrangroup.com](mailto:sylvain.mousillat@safrangroup.com)

3 : Laboratoire de Modélisation et de Simulation Multi-Échelle, CNRS UMR 8208  
Université Gustave Eiffel, 77454 Marne-la-Vallée, France  
e-mail : [julien.yvonnet@univ-Eiffel.fr](mailto:julien.yvonnet@univ-Eiffel.fr)

### Résumé

Dans ce travail, nous étudions la présence d'effets d'échelles liés à la rupture en compression par kinking de fibres au sein d'un composite tissé 3D à matrice organique. Afin de garantir l'établissement d'une kink-band de fibres, des géométries d'essai de type Compact Compression sont testées. Pour exhiber l'existence d'un effet d'échelle, plusieurs tailles d'éprouvettes sont testées. La multi-instrumentation de ces essais révèle la complexité du faciès de rupture en compression, rendant complexe l'estimation d'une longueur de fissure. En conséquence, l'utilisation des méthodes classiques d'estimation de taux de restitution d'énergie critique n'est plus suffisante. De plus, l'analyse de ces essais révèle l'importance de la prise en compte de la contrainte résiduelle de crushing qui doit être caractérisée afin d'estimer précisément un taux de restitution d'énergie critique en compression et de conclure sur l'existence d'un effet d'échelle sur le taux de restitution d'énergie critique. Le lancement d'une nouvelle campagne d'essais au début de l'année 2025, plus diversifiée en géométries d'essais, apportera de nouveaux éléments de réponses pour l'estimation d'un  $G_c$  en compression, et pour la construction d'une loi d'échelle énergétique.

### Abstract

This work presents an experimental approach for the comprehension of a structural size effect in 3D woven composites failing by fiber kink-band propagation under compressive load. Compact Compression specimens were tested in order to obtain a stable propagation of fiber kink-band. To investigate a potential size effect on the compressive strength to failure, 14 specimens of various sizes were tested. The use of a multi-instrumentation setup for the campaign testing has led to the conclusion that the crack profile along the specimen is too complex to allow the measurement of crack length with accuracy. As a result, one cannot use the classical methods for the measurement of the critical energy release rate anymore. Furthermore, the knowledge of the residual compression stress seems to be crucial for the accuracy of the measurement of the critical energy release rate and for the rigorous investigation of the energetic size effect on the critical energy release rate. The upcoming experimental campaign of early 2025 will propose results with various specimens' shapes and sizes. It will give more data for the measurement of a critical energy release rate in compression and for the construction of a energetic size effect law.

**Mots Clés :** rupture, compression, kink-band de fibre, tissé 3D, effet d'échelle.

**Keywords :** Failure, compression, fiber kink-band, 3D woven, size effect.

## 1. Introduction

### 1.1 Contexte

Depuis de nombreuses années, Safran développe et produit des matériaux composites à matrice organique tissés 3D (CMO T3D), pour la fabrication des pièces critiques de moteurs, telles que les aubes de soufflantes ou le carter de rétention du moteur LEAP. Le choix d'un matériau de type composite pour la réalisation de telles pièces se justifie par les excellentes propriétés mécaniques spécifiques qu'il offre, et la possibilité de réaliser « one-shot » des pièces de formes complexes. Le parti pris d'une architecture composite dite tissée 3D se justifie par l'amélioration de la résistance au délaminage qu'elle offre. En conséquence, les pièces réalisées en CMO T3D bénéficient d'une meilleure résistance à l'impact par rapport aux composites stratifiés classiques.

L'innovation de nouvelles pièces structurales réalisées en CMO T3D pour les prochains programmes moteur se base sur une méthode de dimensionnement semi-empirique, qui s'appuie encore majoritairement sur des campagnes d'essais. Pour contribuer à améliorer les méthodes de dimensionnement du bureau d'études de Safran Aircraft Engines, il est nécessaire de mieux comprendre le comportement du matériau afin de proposer des modèles matériau qui permettent de décrire fidèlement le comportement de ces pièces soumises à des chargements complexes (impact d'oiseau, perte aube). Dans le cas des aubes FAN, une sollicitation de flexion alternée peut générer de forts gradients de contraintes en traction et en compression, induisant successivement des endommagements, puis une rupture progressive de la pièce. Dans le cas du CMO T3D, la rupture en compression, précédée de faibles endommagements, est un point clé pour le dimensionnement de pièces moteur de prochaine génération.

Pour l'étude en compression du CMO T3D, les travaux de thèse d'Antoine Hurmane [1] ont permis de mieux comprendre le comportement élastique puis endommagé du matériau, en allant jusqu'aux mécanismes provoquant la ruine instantanée. Notre étude s'inscrit dans la continuité de ces travaux de recherche, afin de mieux comprendre la rupture progressive des torons de fibres en compression, qui se manifeste par l'établissement d'une kink-band au sein du matériau (*i.e. rupture locale par plissement des fibres*).

### 1.2 Rupture en compression et effets d'échelle

La rupture au sein d'un matériau composite peut être décrite à l'aide d'une approche énergétique en terme de taux de restitution d'énergie, telle que proposée historiquement par Griffith [2]. Cette approche, dite de la Mécanique Linéaire Élastique de la Rupture (MLER), définit  $G_c$ , le taux de restitution d'énergie critique, comme le paramètre décrivant la capacité d'un matériau à résister à l'avancée d'une fissure. Dans le cadre de la MLER,  $G_c$  est considéré comme étant une propriété matériau indépendante de la taille et de la forme de la structure, et peut donc être caractérisé par des essais de fissuration sur éprouvette. Cette théorie n'est valide que lorsque les sources de dissipation (autres que la création de nouvelle surface de fissure) liées aux concentrations de contrainte en pointe de fissure sont confinés dans une Fracture Process Zone (FPZ) dont la taille est négligeable devant celle de la structure considérée et de la fissure elle-même. Or, les travaux de Victor Médeau [3] ont montré que pour le matériau composite de notre étude, la zone de non-linéarité en pointe de fissure n'est pas négligeable devant la taille des pièces testées. Ainsi, il en résulte un effet d'échelle sur la mesure du  $G_c$  en traction : la taille et la forme de la structure influent sur la mesure du  $G_c$  apparent, et invalide le cadre de la MLER. En conséquence, l'identification de  $G_c$  sur des éprouvettes est plus complexe.

Puisque des essais de caractérisation à l'échelle de la pièce ne sont pas envisageable, Médeau et al. [3] ont proposé d'exploiter des règles de similitude afin d'identifier le  $G_c$  du CMO T3D en traction.

A l'aide d'essais sur des éprouvettes de tailles variables, les paramètres d'une loi d'échelle sont identifiés. Cette même loi permet ensuite d'extrapoler une valeur de  $G_c$  pour les structures de grandes tailles.

Conscients de l'existence d'un effet d'échelle notable sur le  $G_c$  en traction, cet article a pour objectif de présenter les premiers résultats expérimentaux permettant de statuer sur l'existence d'effets d'échelle pour la rupture en compression sur le CMO T3D, et d'adapter la démarche d'identification de  $G_c$  développée pour le cas de la traction, au cas de la sollicitation de compression.

Pour cela, une première campagne expérimentale d'essais de propagation stable a été réalisée à l'Onera, avec différentes tailles d'éprouvettes. Les essais de fissuration sont réalisés en sens chaîne et en sens trame, mais seuls les résultats en sens trame seront discutés dans la prochaine partie (Tab.1). Une nouvelle campagne d'essais de compression sera lancée à l'Onera au début de l'année 2025. Focalisée sur la fissuration par kink-band en sens trame, cette campagne permettra de tester différentes tailles et formes d'éprouvettes, afin de caractériser au mieux les effets d'échelles.

## 2. Campagne d'essais de Compact Compression

Le mode de rupture par l'établissement d'une kink-band de fibres dans les matériaux composites est connu depuis de nombreuses années ([4-6]) et a surtout été étudié pour les bétons armés, les composites stratifiés de plis unidirectionnels ou tissés 2D. En revanche, il a très peu été étudié dans le cas des composites tissés 3D ([7, 8]). Ainsi, afin de garantir l'observation d'une kink-band stable au sein de notre matériau, nous avons fait le choix d'utiliser des éprouvettes de type Compact Compression, telles que proposés par Pinho [10]. Cette géométrie d'essai doit permettre de propager de manière stable une kink-band de fibres, perpendiculairement à la direction de l'effort appliqué, afin de mesurer l'évolution des grandeurs à rupture avec la longueur de fissure, et de remonter à une estimation de la courbe-R.

Pour l'investigation des effets d'échelles, plusieurs tailles d'éprouvettes ont été considérées. Toutes les géométries sont homothétiques dans le plan, et leur taille est identifiée par un facteur d'échelle, variant de 1 à 1.5 pour les éprouvettes en sens trame. Le matériau testé est un composite tissé 3D de ratio chaîne/trame de 70/30, à fibre de carbone et matrice époxyde.

Tailles	CC 1	CC 1.25	CC 1.5
Eprouvettes	3	2	4
Largeur (mm)	65	81.25	97.5

Tab. 1. Spécimens testés en sens trame

Le montage d'essai des éprouvettes disponible à l'Onera est présenté sur la Fig. 1 (a). Les essais ont été effectués sur une machine électromécanique de capacité maximale 150kN. Une consigne de vitesse de déplacement de 0.5 mm/min est imposée à la traverse supérieure, qui transmet le déplacement à l'éprouvette via un système de goupille. La traverse inférieure reste statique durant l'essai. Aucune amorce de fissure n'a été usinée en fond d'entaille. Pour les différentes tailles testées, une propagation stable de kink-band est obtenue.

Les essais sont richement instrumentés avec : deux caméras CCD 12 bits (2048x2048 pixels) permettant la stéréo-corrélation d'images (avec le logiciel Vic3D<sup>®</sup>) observant une face de l'éprouvette sur laquelle un mouchetis a été préalablement déposé. Une caméra (2048x2048 pixels) sur la face opposée permet de réaliser de la mono-corrélation (observation du champ avec Vic2D<sup>®</sup>, ou DeepFlow) sur une face peinte en blanc. Deux à quatre capteurs d'émission acoustique nano30 fournis par MISTRAS sont disposés sur la face opposée, afin d'enregistrer les événements acoustiques associés à la rupture de torons de fibres en compression. Le traitement des signaux acoustiques est

effectué à l'aide du logiciel commercial AEdwin. Certaines éprouvettes sont observées par tomographie-X post-mortem.

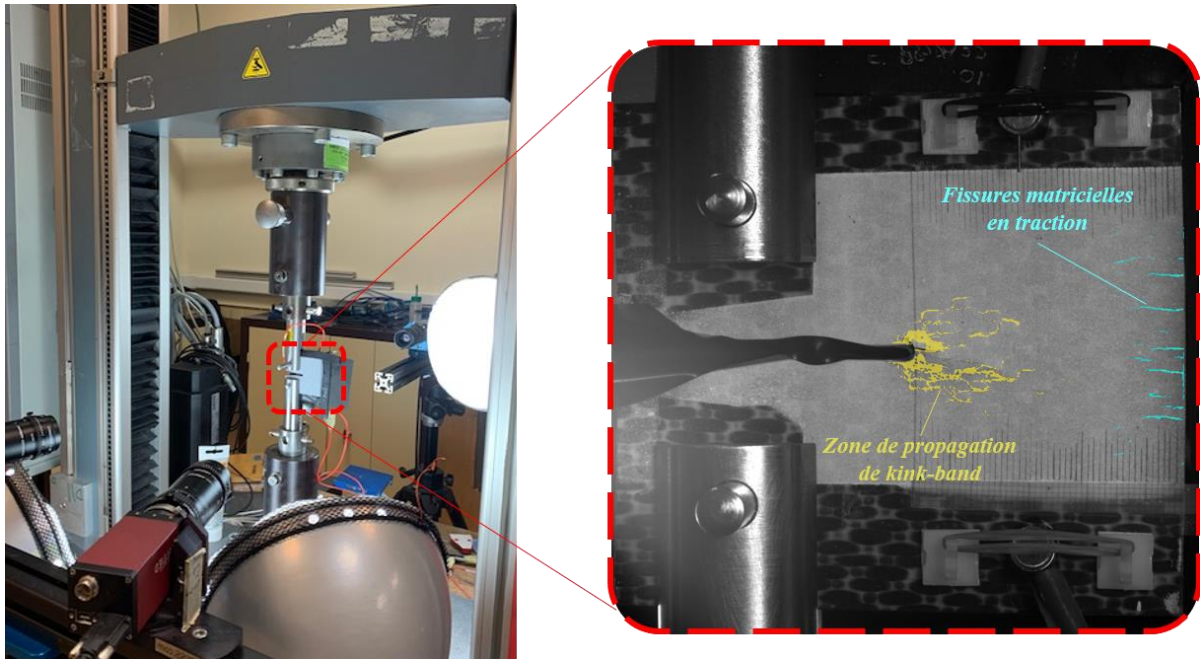


Fig. 1. (a) Montage d'essai sur la machine électromécanique de capacité maximale 150kN et (b) utilisation du logiciel DeepFlow pour l'observation du profil de fissure sur une éprouvette en sens trame

Les courbes force/déplacement pour les différentes tailles testées sont présentées en Fig. 2. Dans un premier temps, la réponse des éprouvettes est linéaire élastique. On note une légère non-linéarité de la courbe avant les premiers événements acoustiques conséquent. Cette non-linéarité est associée à la décohésion des torons de trame, qui s'observent par un gonflement de l'éprouvette en pointe d'entaille. Quelques instants après, l'enregistrement d'une forte activité acoustique, coïncidant avec le pic d'effort observé, indique le premier instant de rupture de fibres en compression, par kinking de fibres. Une phase de propagation stable de macro-fissure (rupture des torons en compression), illustrée par le caractère adoucissant de la courbe force/déplacement est ensuite observée. L'essai est arrêté dès lors que les lèvres de l'entaille initiale se retrouvent en contact. En face arrière de l'éprouvette, on note l'apparition de fissures matricielles, qui témoignent de la présence d'un endommagement parasite en traction. L'énergie associée à ce mode de dissipation d'énergie ne doit pas être prise en compte dans le bilan des énergies dissipées pour la rupture de torons en compression. Cette énergie dissipée par ces fissures matricielles en traction reste cependant négligeable devant l'énergie associée à la rupture en compression par kinking de torons. Ces phénomènes s'accroissent avec la longueur de kink-band grandissante, et l'estimation d'un taux de restitution d'énergie en compression ne peut être effectué qu'avant l'apparition des fissures matricielles.

L'observation du faciès de rupture sur chaque face de l'éprouvette témoigne d'un profil de fissuration complexe, caractérisé par des branchages et l'orientation préférentielle de la fissure dans l'épaisseur. La macro-fissure ne s'observe pas sur les deux faces de l'éprouvette à la même localisation. Les observations en surface de l'échantillon sont corrélées lors de la segmentation de tomographies-X post-mortem et un « vrillage » de la fissure dans l'épaisseur de l'éprouvette, caractéristique de la fissuration par kink-band ([1], [5]), explique le faciès surfacique complexe observé.

Cette complexité du faciès de rupture ne permet plus de repérer précisément la position de la pointe de fissure à l'aide des champs de déplacement CIN ou de l'analyse de flux optique avec DeepFlow.

En conséquence, les méthodes classiques de mesures de  $G_c$  ([11], [12]) qui nécessitent une estimation précise de la position de la pointe de fissure ne semblent plus adaptées.

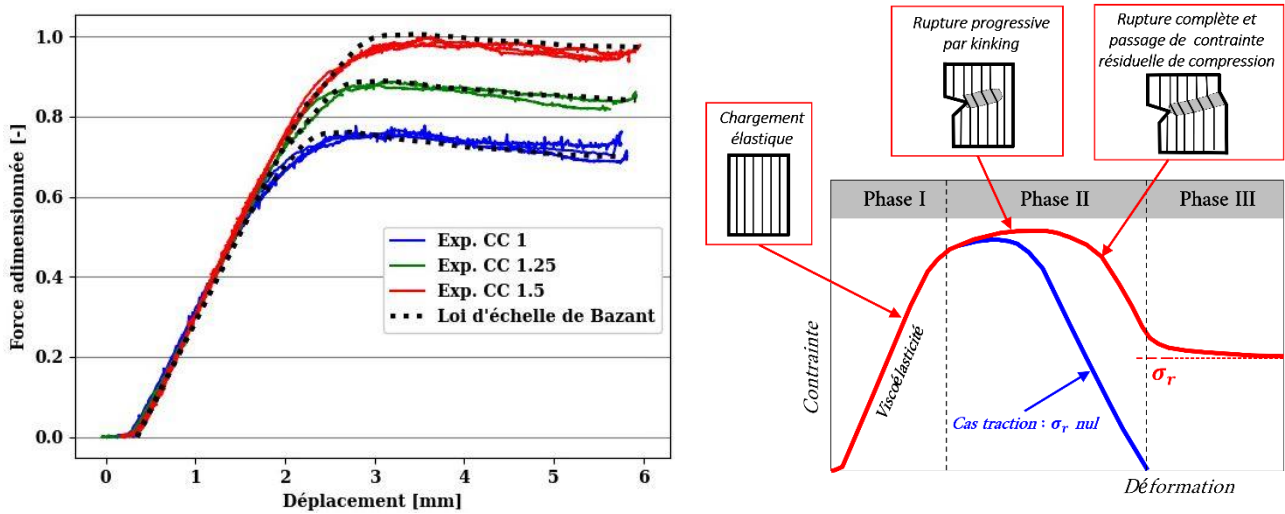


Fig. 2. (a) Courbes Force/déplacement des essais de Compact Compression, comparées à la loi d'échelle à longueur interne proposée par Bazant pour la compression, pour différentes tailles d'éprouvettes et (b) illustration des trois phases de principe du comportement d'un CMO T3D en compression

### 3. Déceler des effets d'échelle en compression

Pour l'étude des effets d'échelle sur les grandeurs à rupture, de nombreuses publications font référence aux développements de Z.P. Bazant, aussi bien pour la fissuration en traction ([13]), qu'en compression ([14]). Les lois d'échelles proposées s'expriment en termes de contrainte à rupture ou de taux de restitution d'énergie critique, et permettent notamment de faire le lien entre l'approche locale par critère contrainte, qui est valide pour les structures de petite taille, et l'approche énergétique, valide pour les grandes tailles. Les lois d'échelle de Bazant reposent sur l'introduction de longueurs internes liées à la microstructure du matériau considéré, qui permettent de définir une taille caractéristique de transition dans la loi d'échelle.

Pour l'étude des effets d'échelle en compression sur le CMO T3D, nous nous inspirerons des travaux réalisés par Bazant [15]. Cet article propose une loi d'échelle sur la contrainte nominale  $\sigma_n$  qui représente l'état de contrainte au loin de la fissure (Eq. 1). La forme de cette loi d'échelle à longueur interne fait intervenir la contrainte résiduelle de crushing, notée  $\sigma_r$ . Cette contrainte, absente dans le cas de la traction, est supposée être une grandeur matériau caractéristique de la kink-band à déterminer à partir d'essais spécifiques ([13]). Dans cette loi d'échelle,  $W$  représente la taille caractéristique de la structure,  $E'$  est le module élastique effectif pour un matériau orthotrope [19], et  $c_b$  est une longueur interne liée à la taille de la FPZ.  $\gamma$  et  $g$  sont des fonctions de forme qui traduisent l'influence de la géométrie de la structure sur le champ de contrainte en pointe de fissure.  $G_b$  joue un rôle similaire au taux de restitution d'énergie critique, il correspond à l'énergie consommée pour créer une nouvelle surface lors de la rupture par kinking de fibres.

$$\sigma_n = \frac{\sqrt{G_b E'} + \sigma_r \sqrt{W} (\gamma + \frac{c_b}{W} \gamma')}{\sqrt{W} (g + \frac{c_b}{W} g')} \quad (\text{Eq. 1})$$

Pour l'identification d'un effet d'échelle de type MLER dans le cas de la traction, Médeau *et al.* [3] ont proposé une méthode basée sur les lois de similitudes de Bazant ([16]), qui est invalidée dans le

cas de la compression à cause de l'existence de la contrainte  $\sigma_r$ . Cela indique que, pour l'identification de  $G_b$ , le taux de restitution d'énergie critique de formation de la kink-band, il faut tenir compte non seulement de la taille et de la forme des éprouvettes testées  $W$ , mais aussi de l'influence de  $\sigma_r$ . En ce sens, l'expression de la loi d'échelle proposée en Eq. 1 ouvre la voie à une méthode d'identification de  $G_b$ . L'utilisation de cette loi d'échelle en contrainte a été appliquée sur les essais CC et a permis d'obtenir des résultats prometteurs : pour un triplet de  $(G_b, c_b, \sigma_r)$ , encore à consolider, la concordance entre courbes expérimentales et courbes théoriques semble cohérente (Fig. 2).

#### 4. Conclusion

Une première campagne exploratoire d'essais de Compact Compression a permis de mieux comprendre les mécanismes de rupture progressive en compression des torons de fibres dans les CMO T3D. A partir des lois d'échelles proposées initialement par Bažant, des premiers essais CC ont pu être réalisés et les résultats obtenus semblent prometteurs. De futurs travaux expérimentaux, incluant des essais CC complémentaires (autres tailles), mais aussi des essais DENC [18], permettront de conclure sur l'existence d'effets d'échelles en compression dans les CMO T3D, et de proposer une méthode d'identification des paramètres clé de la loi d'échelle. Il s'agira notamment d'estimer  $\sigma_r$ , paramètre clé pour la compréhension de la rupture en compression.

#### Références

- [1] A. Hurmane « Analyse par un dialogue essais/calculs de la tenue en compression de structures composites tissées 3D », Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Compiègne, 2015.
- [2] A.A. Griffith “VI. The phenomena of rupture and flow in solids”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*, Vol 221, p163–198
- [3] V. Médeau « Rupture des composites tissés 3D : de la caractérisation expérimentale à la simulation robuste des effets d'échelle », Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, 2019.
- [4] B. W. Rosen “Mechanics of composite strengthening: Fiber Composite Materials”, *American Society for Metals*, Chapter 3, 1965.
- [5] S. Kyriakides, R. Arseculeratne, E.J. Perry, K.M. Liechti, “On the compressive failure of fiber reinforced composites”, *International Journal of Solids and Structures*, Vol 32, p689-738, 1995.
- [6] C. Soutis, P. T. Curtis, N. A. Fleck, « Compressive failure of notched fibre composites”, *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol 440, p241–256, 1993.
- [7] J. Ratcliffe, W. Jackson, “Measurement of fracture energy for kink-band growth in sandwich specimens” (paper no. 24). In: *Composites testing and model identification, CompTest2004*, University of Bristol, 2004.
- [8] W. Li, Y. Qiao, J. Fenner, K. Warren, M. Salviato, Z. P. Bažant, G. Cusatis, “Elastic and fracture behavior of three-dimensional ply-to-ply angle interlock woven composites: Through-thickness, size effect, and multiaxial tests”, *Composites Part C: Open Access*, Vol 4, 2021.
- [9] M.S. Dadkhah, B.N. Cox, W.L. Morris, “Compression-compression fatigue of 3D woven composites, *Acta Metallurgica et Materialia*”, Vol 43, p4235-4245, 1995.
- [10] S. T. Pinho, P. Robinson, L. Iannucci, « Fracture toughness of the tensile and compressive fibre failure modes in laminated composites », *Composites Science and Technology*, Vol 66, p2069-2079, 2006.
- [11] C. Bouvet, « Mécanique de la rupture des composites : délaminage et fissuration », *Techniques de l'ingénieur Systèmes aéronautiques et spatiaux*, 2019.
- [12] M. J. Laffan, S. T. Pinho, P. Robinson, A. J. McMillan, “Translaminar fracture toughness testing of composites: A review”, *Polymer Testing*, vol. 31, p481-489, 2012.
- [13] D. Dalli, L.F. Varandas, T. Scalici, A. Arteiro, G. Catalanotti, “Exploiting intrinsic size effect to overcome specimen scaling limitations in fracture toughness characterisation of composite materials”, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 277, 2023.
- [14] D. Dalli, G. Catalanotti, L.F. Varandas, B.G. Falzon, S. Foster, “Compressive intralaminar fracture toughness and residual strength of 2D woven carbon fibre reinforced composites: New developments on using the size effect method”, *Theoretical and Applied fracture Mechanics*, Vol. 106, 2020.
- [15] Z.P. Bažant, J. J. Kim, I. M. Danie, E. Becq-Giraudon, G. Zi, “Size effect on compression strength of fiber composites failing by kink band propagation”, *International Journal of Fracture*, Vol 95, p103-141, 1999.
- [16] Z.P. Bažant, “Scaling laws in mechanics of failure”, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol 119, p1828-1844, 1993.
- [17] Z.P. Bažant, J. Planas, “Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials”, *CRC Press*, 1997.

- [18] G. Catalanotti, J. Xavier, P.P. Camanho, “Measurement of the compressive crack resistance curve of composites using the size effect law”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 56, p300-307, 2014.
- [19] G. Bao, S. Ho, Z.Suo, B.Fan, “The role of material orthotropy in fracture specimens for composites”, *International Journal of Solid Structures*, Chapter 29(9), p1105–1116, 1992.