

MODÈLES MICROMÉCANIQUES DU DOMMAGE INTRA-LAMINAIRE DANS LES STRATIFIÉS AVEC COUCHES FINES

L. Di Stasio^{1,2}, Z. Ayadi¹, J. Varna²

¹EEIGM, Université de Lorraine, Nancy, France

²Division of Materials Science, Luleå University of Technology, Luleå, Suède

Journée de l'Équipe 304, Nancy (FR), 5 juillet 2017



Education and Culture

Erasmus Mundus



Sommaire

- Les composites stratifiés avec couches extrêmement minces
- Objectifs & Approche
- Les modèles micromécaniques
- Résultats préliminaires & Perspectives
- Conclusions
- Annexes & Bibliographie

LES STRATIFIÉS AVEC COUCHES MINCES

Introduction à la technologie *Spread Tow*

- Développée initialement au Japon entre 1995 et 1998
- Au cours de la dernière décennie, son domaine d'application s'est élargi à partir des équipements sportifs jusqu'à structures primaires, comme *Solar Impulse 2*
- Un nombre réduit de producteurs: NTPT (USA-CH), Oxeon (SE), Chomarat (FR), Hexcel (USA), Technomax (JP)

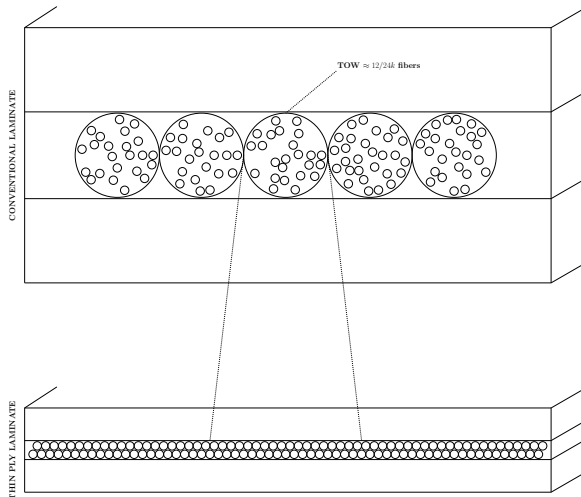


(a) By North Thin Ply Technology.

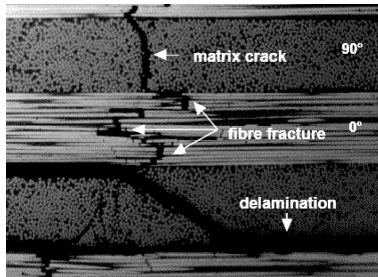


(b) By TeXtreme.

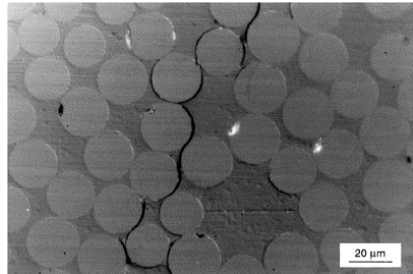
Fondements de la technologie *Spread Tow*



Une définition visuelle des fissures transversales



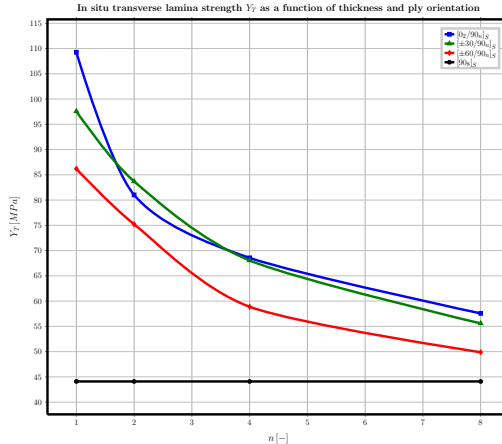
(c) Par Dr. R. Olsson, Swerea, SE.



(d) Par Prof. Dr. E. K. Gamstedt, KTH, SE.

Pour une définition visuelle des fissures transversales.

L'effet *thin ply*



Mesures de la contrainte transversale maximale *in-situ* par D. L. Flaggs & M. H. Kural, 1982 [1].

Objectifs & Approche

Objectifs

- Étudier les effets de la fraction volumétrique des fibres, l'épaisseur du pli mince et des plis proches sur l'initiation des fissures
- Inférer une relation comme

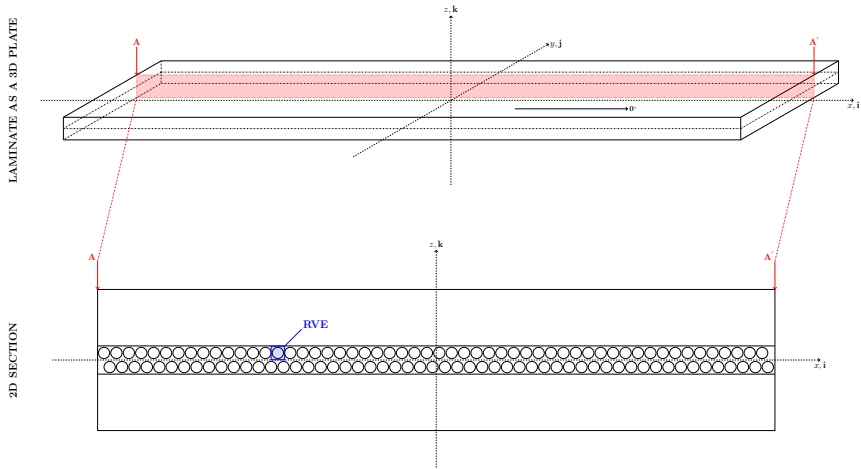
$$G_{*c} = G_{*c} \left(\theta_{\text{decollement}}, \Delta\theta_{\text{decollement}}, E_{(\cdot)}, \nu_{(\cdot)}, G_{()}, VF_f, t_{pli}, \frac{t_{pli}}{t_{plis \text{ proches}}} \right)$$

Approche

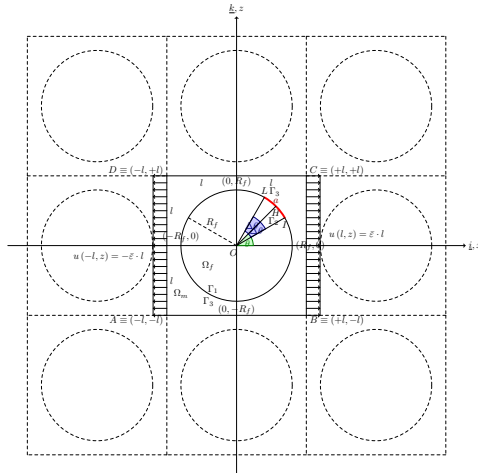
- Conception et catégorisation des Volumes Élémentaires Représentatifs (VERs)
- Génération automatique de la géométrie et du modèle aux Éléments Finis
- Simulation avec la Méthode aux Éléments Finis (avec Abaqus)

➤ LES MODÈLES

De l'échelle macroscopique à l'échelle microscopique



Volumes Élémentaires Représentatifs (VERs)



- ✓ Espace 2D
- ✓ Solide élastique linéaire
- ✓ Piloté en déplacement
- ✓ Conditions aux limites de Dirichlet
- ✓ Mécanique linéaire élastique de la rupture
- ✓ Interactions de contact

Conception et génération du maillage

Pourquoi un bon maillage est fondamental

1. La discrétisation géométrique a un effet très fort sur la solution des problèmes MEF non-linéaires
2. Le dommage génère changements de la géométrie, avec génération des surfaces et division du domaine
3. Les variables descriptives du dommage dépendent de la topologie locale et du raffinement du maillage

Procédure à 4 étapes pour la génération du maillage

1. La frontière est générée avec représentations analytiques
2. La frontière est divis en 4 coins (c_i) et 4 bords (e_i)
3. Application de la méthode de *transfinite interpolation* avec polynômes multidimensionnelle de Lagrange

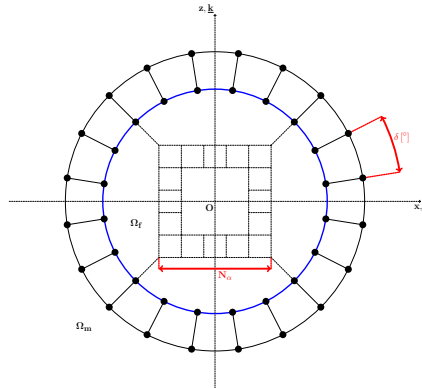
$$P_1(x, p_j) = \sum_{j=1}^n p_j \prod_{k=1, k \neq j}^n \frac{x - x_k}{x_j - x_k} \quad P_2(x, y, p_j, q_j) = P_1(x, p_j) \otimes P_1(y, q_j)$$

$$r(\xi, \eta) = P_1(\xi, e_2, e_4) + P_1(\eta, e_1, e_3) - P_2(\xi, \eta, c_1, c_2, c_3, c_4)$$

4. Le maillage est raffiné avec l'application d'un opérateur elliptique global

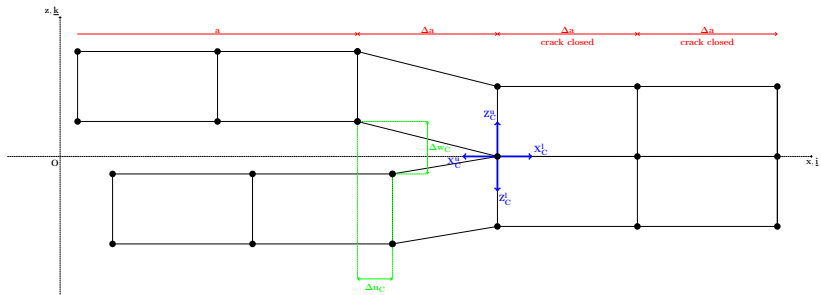
$$g^{11}r_{,\xi\xi} + 2g^{12}r_{,\xi\eta} + g^{22}r_{,\eta\eta} = 0$$

Discrétisation angulaire



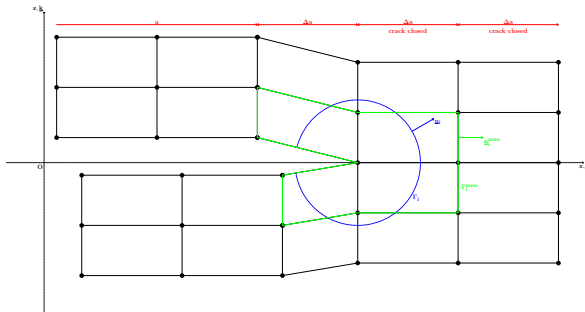
Discrétisation de l'interface fibre/matrice: $\delta = \frac{360^\circ}{4N_\alpha}$.

Technique de fermeture virtuelle de fissure (VCCT)



$$G_I = \frac{Z_C \Delta w_C}{2B\Delta a} \quad G_{II} = \frac{X_C \Delta u_C}{2B\Delta a} \iff \text{Logiciels internes et fonction *DEBOND en Abaqus}$$

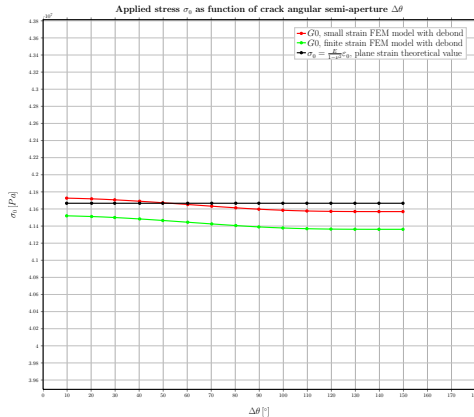
Évaluation de l'intégrale J



$$J_i = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{\Gamma_\varepsilon} \left(W(\Gamma) n_i - n_j \sigma_{jk} \frac{\partial u_k(\Gamma, x_i)}{\partial x_j} \right) d\Gamma \iff \text{*CONTOUR INTEGRAL en Abaqus}$$

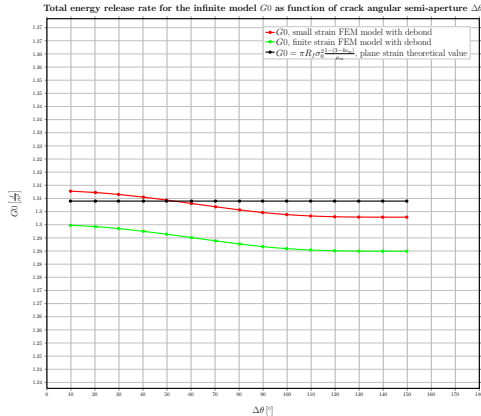
➤ RÉSULTATS

σ_0 pour $Vf_f = 0.001$, $\frac{L}{R_f} \sim 28$ et $\delta = 0.4^\circ$



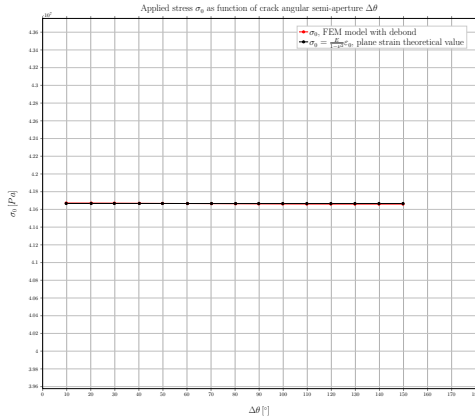
En rouge MEF en petites déformations, en vert MEF en grands déformations, en noir
 $\sigma_0 = \frac{E}{1-\nu^2} \epsilon$.

G_0 pour $Vf_f = 0.001$, $\frac{L}{R_f} \sim 28$ et $\delta = 0.4^\circ$



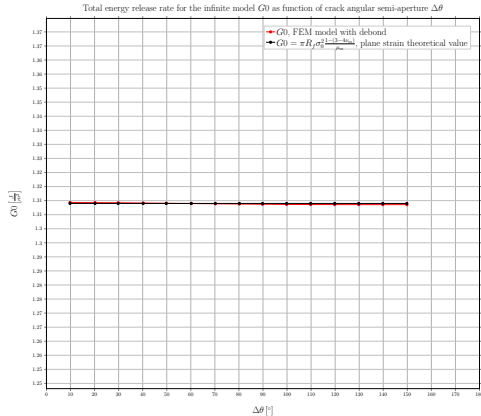
En rouge MEF en petites déformations, en vert MEF en grands déformations, en noir G_0 avec $\sigma_0 = \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon$.

σ_0 pour $Vf_f = 0.000079$, $\frac{L}{R_f} \sim 100$ et $\delta = 0.4^\circ$



En rouge MEF en petites déformations, en noir $\sigma_0 = \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon$.

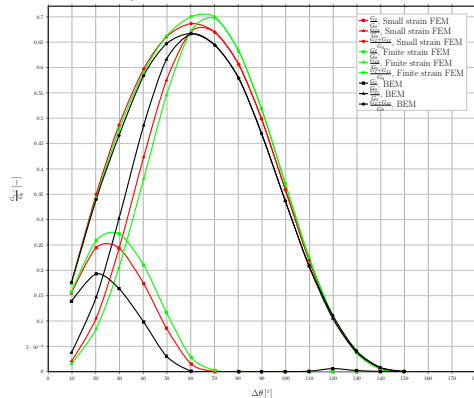
G_0 pour $Vf_f = 0.000079$, $\frac{L}{R_f} \sim 100$ et $\delta = 0.4^\circ$



En rouge MEF en petites déformations, en noir G_0 avec $\sigma_0 = \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon$.

$\frac{G(\cdot)}{G_0}$ pour $V_f = 0.001$, $\frac{L}{R_f} \sim 28$ et $\delta = 0.4^\circ$

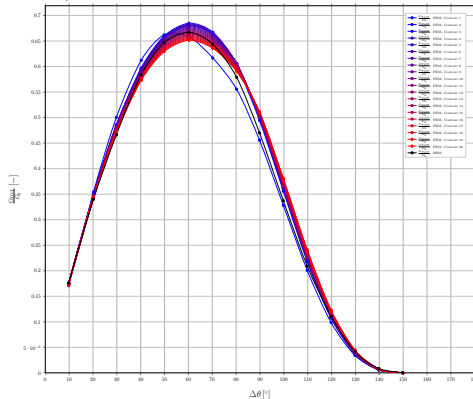
Normalized energy release rate $\frac{G(\cdot)}{G_0}$ as function of crack angular semi-aperture $\Delta\theta$, calculated with in-house VCCT post-processing routine



En rouge MEF en petites déformations, en vert MEF en grands déformations, en noir résultats BEM.

$\frac{G(\cdot)}{G_0}$ pour $V_f = 0.001$, $\frac{L}{R_f} \sim 28$ et $\delta = 0.4^\circ$, petites déformations

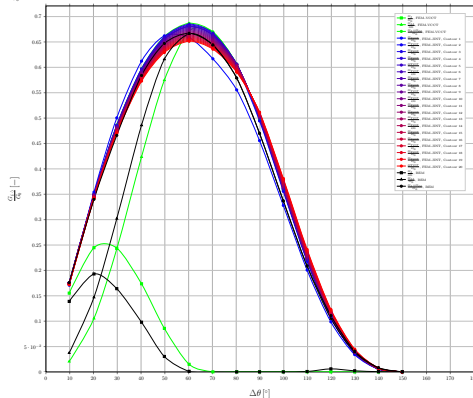
Normalized total energy release rate $\frac{G_{tot}}{G_0}$ as function of crack angular semi-aperture $\Delta\theta$, calculated with Abaqus built-in J-Integral post-processing routine (*CONTOUR INTEGRAL)



De bleu jusqu'à rouge intégrales J calculées sur contours plus loin de l'extrémité de la fissure, en noir résultats BEM.

$\frac{G(\dots)}{G_0}$ pour $V_f = 0.001$, $\frac{L}{R_f} \sim 28$ et $\delta = 0.4^\circ$, petites déformations

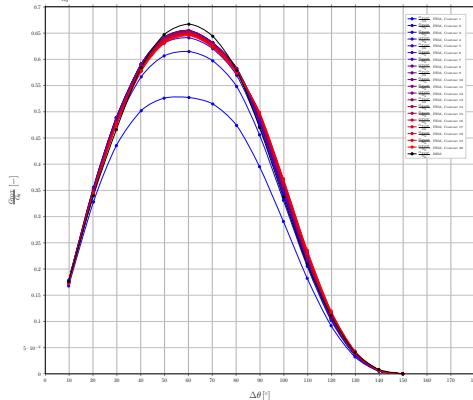
Normalized energy release rate $\frac{G_{I,3}}{G_0}$ as function of crack angular semi-aperture $\Delta\theta$, calculated with in-house VCCT and Abaqus built-in J-Integral (*CONTOUR INTEGRAL) post-processing routines



De bleu jusqu'à rouge intégrales J calculées sur contours plus loin de l'extrémité de la fissure, en vert méthode VCCT par le logiciel interne, en noir résultats BEM.

$\frac{G(\cdot)}{G_0}$ pour $V_f = 0.001$, $\frac{L}{R_f} \sim 28$ et $\delta = 0.4^\circ$, grands déformations

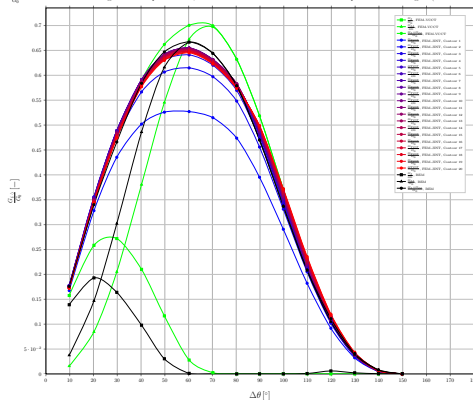
Normalized total energy release rate $\frac{G_{tot}}{G_0}$ as function of crack angular semi-aperture $\Delta\theta$, calculated with Abaqus built-in J-Integral post-processing routine (*CONTOUR INTEGRAL)



De bleu jusqu'à rouge intégrales J calculées sur contours plus loin de l'extrémité de la fissure, en noir résultats BEM.

$\frac{G(\dots)}{G_0}$ pour $V_f = 0.001$, $\frac{L}{R_f} \sim 28$ et $\delta = 0.4^\circ$, grands déformations

Normalized energy release rate $\frac{G_{I,II}}{G_0}$ as function of crack angular semi-aperture $\Delta\theta$, calculated with in-house VCCT and Abaqus built-in J-Integral (*CONTOUR INTEGRAL) post-processing routines



De bleu jusqu'à rouge intégrales J calculées sur contours plus loin de l'extrémité de la fissure, en vert méthode VCCT par le logiciel interne, en noir résultats BEM.

CONCLUSIONS

Conclusions

Conclusions

- Développement des modèles VER pour l'étude du processus de fissuration
- Procédure numérique pour la création automatique de la géométrie et modèle MEF
- Analyses avec $VF_f \rightarrow 0$ (matrice infinie) pour la validation des modèles

Actions à suivre

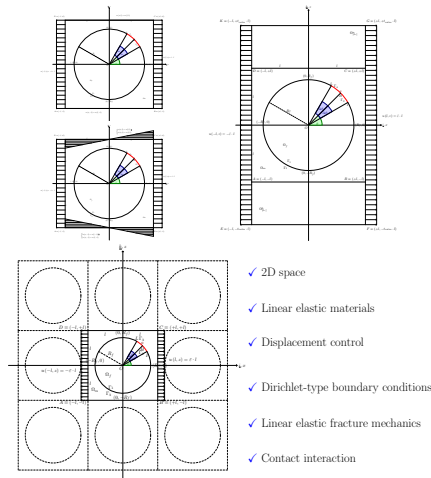
- Étudier les effets de VF_f , t_{pli} , $\frac{t_{pli}}{t_{plis\ proches}}$ et propriétés du matériau
- Étudier l'effet des différentes conditions limites

➤ ANNEXES & BIBLIOGRAPHIE

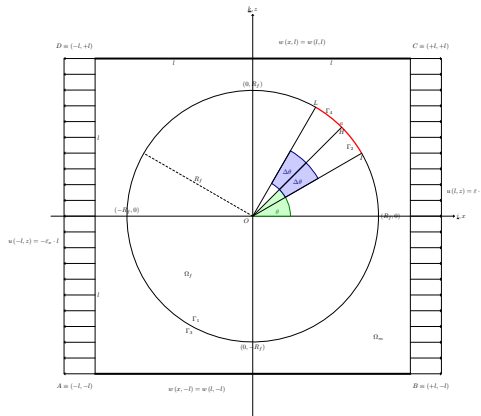
Spread Tow Technology: Implications

- Strong reduction in ply's thickness and weight
- Reduction in laminate's thickness and weight
- Higher fiber volume fraction and more homogeneous fiber distribution
- Ply thickness to fiber diameter ratio decreases of at least 1 order of magnitude, from > 100 to ≤ 10
- Increased load at damage onset and increased ultimate strength, in particular for transverse cracking

RVEs: Variations on a Theme

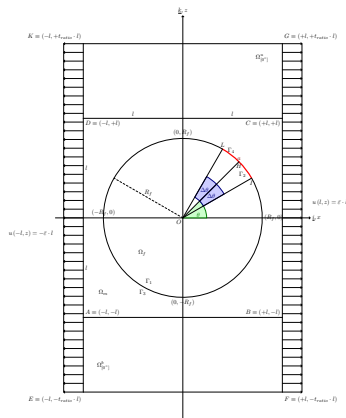


RVEs: First Variation on a Theme



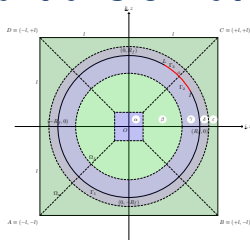
Isolated RVE with zero vertical displacement BC.

RVEs: Third Variation on a Theme

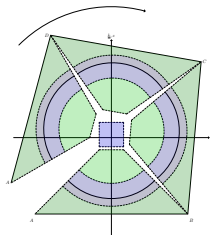


Bounded RVE.

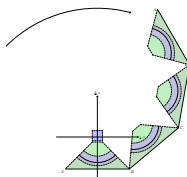
Topological transformation



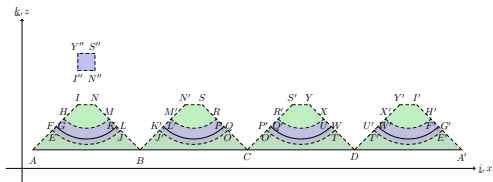
(a)



(b)

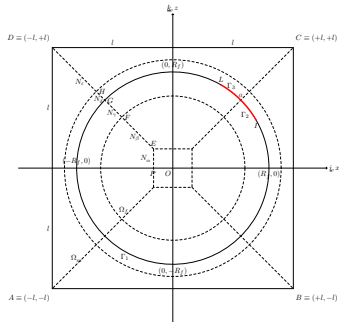


(c)



(d)

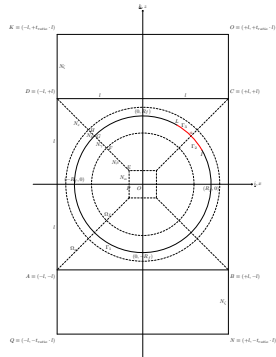
Mesh parameters



$$E = (-f_1 \cdot R_{I1} + f_1 \cdot R_{I2}) \quad F = f_2 R_{I1} (-\cos 45^\circ, \sin 45^\circ)$$

$$G = R_{I1} (-\cos 45^\circ, \sin 45^\circ)$$

$$H = (R_{I1} + f_2 (l - R_{I1})) (-\cos 45^\circ, \sin 45^\circ)$$



$$E = (-f_1 \cdot R_{I1} + f_1 \cdot R_{I2}) \quad F = f_2 R_{I1} (-\cos 45^\circ, \sin 45^\circ)$$

$$G = R_{I1} (-\cos 45^\circ, \sin 45^\circ)$$

$$H = (R_{I1} + f_2 (l - R_{I1})) (-\cos 45^\circ, \sin 45^\circ)$$

Finite Element Model in Abaqus

Method

ABAQUS/STD static analysis + VCCT + J-integral.

Type

Static, i.e. no inertial effects. Relaxation until equilibrium.

Elements

CPE4/CPE8

Interface

Tied surface constraint & contact mechanics

Input variables

R_f , V_f , material properties, interface properties.

Control variables

θ , $\Delta\theta$, $\bar{\epsilon}_x$.

Output variables

Stress field, crack tip stress, stress intensity factors, energy release rates, a .

Evaluation of G_0

$$G_0 = \pi R_f \sigma_0^2 \frac{1 + k_m}{8 G_m} \quad (1)$$

$$k_m = 3 - 4\nu_m \quad (2)$$

$$\sigma_0^{undamaged} = \frac{E_m}{1 - \nu_m^2} \varepsilon_{xx} \quad (3)$$

Bibliographie



Donald L. Flaggs, Murat H. Kural; *Experimental Determination of the In Situ Transverse Lamina Strength in Graphite/Epoxy Laminates*. Journal of Composite Materials, vol. 16, n. 2, 1982.



Parvizi A., Bailey J.E; *On multiple transverse cracking in glass fibre epoxy cross-ply laminates*. Journal of Materials Science, 1978; 13:2131-2136.

Bibliographie







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.



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.

Bibliographie

-  Stephen W. Tsai; *Thin ply composites*. JEC Magazine 18, 2005.
-  Znedek P. Bazant; *Size Effect Theory and its Application to Fracture of Fiber Composites and Sandwich Plates*. in Continuum Damage Mechanics of Materials and Structures, eds. O. Allix and F. Hild, 2002.
-  Robin Amacher, Wayne Smith, Clemens Dransfeld, John Botsis, Joël Cugnoni; *Thin Ply: from Size-Effect Characterization to Real Life Design* CAMX 2014, 2014
-  Ralf Cuntze; *The World-Wide-Failure-Exercises -I and - II for UD-materials*.

Bibliographie



Pinho, S. T. and Pimenta, S.; *Size Effects on the Strength and Toughness of Fibre-Reinforced Composites*.



Pedro P. Camanho, Carlos G. Dávila, Silvestre T. Pinho, Lorenzo Iannucci, Paul Robinson; *Prediction of in situ strengths and matrix cracking in composites under transverse tension and in-plane shear*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 37, n. 2, 2006.

Bibliographie



P.P. Camanho, P. Maimí, C.G. Dávila; *Prediction of size effects in notched laminates using continuum damage mechanics*. Composites Science and Technology, vol. 67, n. 13, 2007.



J. A. Nairn; *The Initiation and Growth of Delaminations Induced by Matrix Microcracks in Laminated Composites*. International Journal of Fracture, vol. 57, 1992.



Joel Cugnoni , Robin Amacher, John Botsis; *Thin ply technology advantages. An overview of the TPT-TECA project*. 2014.

Bibliographie



Donald L. Flaggs, Murat H. Kural; *Experimental Determination of the In Situ Transverse Lamina Strength in Graphite/Epoxy Laminates*. Journal of Composite Materials, vol. 16, n. 2, 1982.

