

## Treball final de grau

**Estudi: Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials**

**Títol:** Modelització micromecànica de l'ondulació de les fibres i el seu efecte en les propietats del compost

**Document:** Resum

**Alumne:** Eduard Nierga Carreiro

**Tutor:** Dr. Albert Turón Travesa / Sr. Oriol Vallmajó Martín  
**Departament:** Enginyeria mecànica i de la construcció industrial  
**Àrea:** Mecànica de medis continus i teoria de les estructures

**Convocatòria (mes/any):** Setembre 2022



En l'actualitat, els materials compòsits són usats en molts àmbits diferents gràcies a les seves bones propietats mecàniques i a la seva lleugeresa en comparació als materials tradicionals. Estan conformats per uns reforços, els quals tenen la funció de suportar les tensions del material i una matriu que té una funció de protecció dels agents reforçants, i a més a més, transmet les tensions entre ells. En aquest projecte, els materials que s'analitzen són només els compòsits reforçats amb fibres, els quals són els més comuns i utilitzats.

Durant la fabricació apareixen defectes a l'estructura del material compòsit, com poden ser: els porus, la desalineació de les fibres o l'ondulació de les fibres, els quals, teòricament, comporten la disminució de les seves propietats mecàniques, especialment a compressió. Per tant, per obtenir un disseny fiable i segur del material és necessari quantificar l'efecte dels defectes del material. En aquest estudi, només es quantifica i qualifica l'ondulació, ja que és el tipus de defecte que produeix uns canvis més severos en les propietats mecàniques efectives del compòsit. Existeixen dos tipus d'ondulació, l'ondulació de les fibres "en el pla", quan aquesta es produeix a l'amplada del material i l'ondulació de les fibres "fora del pla", quan aquesta es produeix en el gruix.

Així doncs, l'objecte d'aquest treball és poder construir un model micromecànic tridimensional paramètric d'un material compòsit amb fibres ondulades, per tal de conèixer quin és l'efecte de l'ondulació en les propietats mecàniques efectives del material, mitjançant una anàlisi lineal-elàstic amb elements finits. S'utilitza el *software* Abaqus per obtenir el model i els seus resultats.

En l'anàlisi micromecànic s'analitza una petita porció del material, el qual s'anomena RVE (Representative Volume Element). L'RVE és el menor volum amb el qual es pot descriure tot el material. Aquest volum ha de ser periòdic i continu en totes les direccions x, y i z.

Per obtenir un RVE amb les fibres ondulades que mantingui les condicions de periodicitat i poder obtenir-ne els resultats, cal seguir una sèrie de procediments:

- **Generació topològica de l'RVE:** L'objectiu és trobar una descripció topològica de l'RVE amb la presència de fibres ondulades. Les fibres es modelen com a corbes de Bézier, les quals permeten obtenir la periodicitat en la direcció longitudinal de les fibres en l'RVE i modelar l'ondulació. La generació topològica es duu a terme mitjançant un algoritme implementat amb el Matlab anomenat *GenerateOptimizedRVENew*.
- **Generació del CAD 3D de les fibres i la matriu:** Un cop s'obté la descripció topològica és necessari generar els models CAD 3D de les fibres i de la matriu. Abans, però, s'ha d'aconseguir la periodicitat de les fibres en les direccions transversals de l'RVE, mitjançant l'ajustament de la posició de les fibres. Per tal d'obtenir els CAD es fa servir el SolidWorks, amb el qual s'executen unes *macros* programades amb VBA.

- **Obtenció dels punts de les superfícies exteriors de les fibres:** La utilització de les corbes de Bézier per modelar les fibres dificulta l'obtenció dels punts interiors de la corba perquè aquesta només és coincident al seu punt de control inicial i al seu punt de control final. Per aplicar les propietats cohesives, posteriorment amb la generació del model d'elements finits amb l'Abaqus, les quals defineixen les interaccions entre les fibres, i la matriu, és necessari obtenir algun punt de la superfície exterior de cadascuna de les fibres. Per tal de poder adquirir aquests punts és necessari duu a terme un procés algebraic i geomètric.

Per poder adquirir els punts de les superfícies exteriors de les fibres, i alhora la generació dels CAD 3D de les fibres i la matriu, es fa servir un *script python* anomenat *RVE\_CAD\_Surfaces.py*, que quan aquest és executat executa alhora les macros del SolidWorks.

- **Obtenció del model d'elements finits:** Un cop s'han efectuat tots els processos anteriors, es pot obtenir el model d'elements finits de l'RVE. S'importen les fibres i la matriu i se'ls assignen els materials. Existeixen diferents tipus de materials per les fibres i la matriu. Mitjançant els punts de les superfícies exteriors de les fibres obtinguts en el procediment anterior, es pot assignar l'element cohesiu entre les fibres i la matriu. A continuació, es procedeix a mallar l'RVE. S'utilitzen hexaedres en el mallat de totes les fibres i tetraedres en el mallat de la matriu. El cas òptim seria poder mallar tot el component amb el mateix tipus d'elements, però no és possible perquè l'Abaqus només permet mallar la matriu amb elements tetraèdrics. L'elecció del mallat és un aspecte molt important per optimitzar el temps de càlcul i la precisió dels resultats. Seguidament, s'apliquen les condicions de contorn en el model. Primerament, és necessari encastar un node qualsevol del model per evitar el moviment de sòlid rígid de l'RVE. En segon lloc, s'apliquen les condicions de contorn periòdiques, les quals permeten convertir la porció de volum en una làmina de material, mitjançant una sèrie d'equacions cinemàtiques per relacionar els graus de llibertat dels nodes emparellats. En el cas que es vulgui obtenir l'anàlisi en un estat de càrregues determinat (deformacions, tensions i desplaçaments) s'apliquen les càrregues exteriors mitjançant un tensor de deformacions globals ( $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}, \epsilon_{xy}, \epsilon_{yz}$  i  $\epsilon_{xz}$ ) de tot l'RVE i es duu a terme l'anàlisi lineal-elàstic amb elements finits. En el cas que es vulguin obtenir els valors de les propietats elàstiques homogeneïtzades i dels coeficients de Poisson, és necessari efectuar tot un seguit de procediments.

L'obtenció del model d'elements finits de l'RVE amb l'Abaqus es duu a terme mitjançant un *script python* anomenat *RVE\_Abaqus.py*.

- **Generació de diversos models d'elements finits:** Aquest procediment és només necessari quan es vol calcular el valor de les propietats elàstiques globals i dels coeficients de Poisson. En aquest procés es generen diferents models d'elements finits, cadascun amb només una de les deformacions globals. Pel càlcul dels valors de les propietats, és només necessari que els

valors de les deformacions globals  $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{yy}$  i  $\varepsilon_{xy}$  no siguin nul·les. A continuació, procedeix a fer l'anàlisi lineal-elàstic dels diferents models creats. El procés de generació dels diversos models s'executa mitjançant un *script python* anomenat *Create\_inps.py*.

- **Adquisició de valors dels resultats de l'anàlisi lineal-elàstic amb elements finits dels diferents models:** Es recullen el valor del volum dels elements de cada punt d'integració, els valors de les deformacions en cada punt d'integració i els valors dels esforços en cada punt d'integració dels resultats de tots els models obtinguts en el procediment anterior. Aquest procediment s'executa a l'Abaqus mitjançant un *script python* anomenat *POST\_abaqus\_script.py*.
- **Obtenció de les propietats elàstiques homogeneïtzades del material:** Mitjançant tot un seguit d'equacions i relacions aplicades als valors obtinguts al procediment anterior i la suposició del compòsit com un material transversalment isotròpic, es poden obtenir els valors de les diferents propietats elàstiques homogeneïtzades (Mòdul de Young longitudinal, mòdul de Young transversal, mòdul de rigidesa longitudinal i mòdul de rigidesa transversal), el valor del coeficient de Poisson transversal i el valor del coeficient de Poisson longitudinal.

En aquest projecte, es duu a terme un estudi de casos, amb un model amb fibres ondulades i amb un model sense ondulació. S'analitzen els dos models, primerament, amb una càrrega a compressió pura i seguidament, amb una càrrega a tracció pura. Mitjançant els resultats obtinguts es pot concloure que a tracció, les tensions internes de les fibres i de la matriu en els dos models són pràcticament iguals, mentre que a compressió, els esforços en la matriu del model amb fibres ondulades són notòriament més elevats que en la matriu del model amb fibres rectes.

Amb els mateixos models també s'obtenen els valors de les propietats elàstiques i dels coeficients de Poisson. S'ha pogut comprovar que l'ondulació té poca afectació en el mòdul de Young longitudinal, però, en canvi, redueix, aproximadament un 10% el valor del mòdul de Young transversal. El mòdul de rigidesa longitudinal i el mòdul de rigidesa transversal també es veuen afectats per l'ondulació, reduint-se, aproximadament, els dos valors, un 10% respecte als seus respectius valors del model sense ondulació. Els valors dels coeficients de Poisson són els mateixos en els dos models, per tant, no es veuen afectats per l'ondulació.