

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol: Projecte d'optimització de la trajectòria de la fibra de materials compostos fabricats per impressió 3D en peces que presenten discontinuïtats de forma.

Document: Memòria i Annexos

Alumne: Ferran Juncà Juanola

Tutor: Norbert Blanco Villaverde

Departament: Enginyeria mecànica i construcció industrial

Àrea: Enginyeria Mecànica

Convocatòria (mes/any): Setembre 2020

ÍNDEX

ÍNDEX	2
1. INTRODUCCIÓ	4
1.1. Antecedents.....	4
1.2. Objecte del projecte.....	4
1.3. Requeriments i abast.....	4
1.3.1. Requeriments	4
1.3.2. Abast	5
2. SITUACIÓ I INFORMACIÓ	6
2.1. Context	6
2.1.1. Propietats dels materials	6
2.1.2. Discontinuitats en peces.....	7
2.2. Fabricació additiva.....	8
2.2.2. Introducció a la impressió 3D.....	8
2.2.3. Software d'impressió	9
2.3. Entorn considerat per l'estudi	9
3. METODOLOGIA.....	10
4. BASES DE L'ESTUDI	11
4.1. Enfocament de la solució.....	11
4.1.1. Punt de partida	11
4.1.2. Aplicació a aquest treball.....	13
4.2. Possibilitats i límits d'impressió.....	13
4.2.1. Cas isotròpic.....	13
4.2.2. Cas concèntric.....	14
4.2.3. Cas mixt	15
5. DISSENY DE LES PROVETES	17
5.1. Primeres proves	17
5.1.1. Cas inicial	18
5.1.2. Cas article Lincy Pyl	19
6. SIMULACIÓ PER ELEMENTS FINITS	22
6.1. Característiques comunes	22
6.2. Cas isotròpic.....	28
6.3. Cas concèntric.....	29
6.4. Cas mixt	32
7. RESULTATS	36
7.1. Cas isotròpic.....	37
7.2. Cas concèntric.....	40

7.2.1.	Anells concèntrics.....	40
7.2.2.	Anells concèntrics + reforç del contorn	43
7.3.	Cas mixt	46
7.4.	Anàlisi dels resultats	49
7.4.1.	Tensions.....	49
7.4.2.	Ràtio Tensió/VF.....	53
7.4.3.	Ràtio RF/VF.....	56
7.4.4.	Ràtio RF/Tensió.....	57
8.	CONCLUSIONS	59
9.	BIBLIOGRAFIA.....	61
10.	GLOSSARI.....	62
11.	RELACIÓ DE DOCUMENTS.....	63
	ANNEXOS	64
	ANNEX A:.....	65
A.	INICIACIÓ I PROVES DE DISSENY DE LES PROVETES.....	66
A.1	Familiarització amb l'abaqus cae	66
A.1.1	Abaqus/CAE.....	66
A.1.2	Input file.....	70
A.2	Cas article Haoqi Zhang	72
	ANNEX B :.....	73
B.	FITXERS DE DISSENY I CÀLCUL DE L'ESTUDI.....	74
B.1	Descripció fitxer input	74
B.2	Descripció fitxer python	79
	ANNEX C :.....	128
C.	CARACTERÍSTIQUES D'IMPRESSIÓ	129
C.1	Paràmetres d'impressió	129
C.1.1	Pantalla principal	129
C.1.2	Configuració d'impressió	131
C.1.3	Configuració interna de la peça	136
C.2	FITXA TÈCNICA MARKFORGED MARK TWO	141
	ANNEX D:.....	142
D.	RESULTATS DEL CÀLCUL AMB ELEMENTS FINITS	143
D.1	Cas isotròpic.....	143
D.2	Cas concèntric.....	153
D.3	Cas mixt.	166

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Antecedents

L'àmbit de la fabricació additiva és un camp en fase de desenvolupament i amb molta projecció de futur, concretament en l'àmbit industrial i en materials relativament recents com la fibra de carboni. Generalment és utilitzada per realitzar peces amb una geometria complexa ja que en facilita la producció respecte altres mètodes, però els materials utilitzats més comuns ofereixen una baixa resistència. Degut això ha sorgit interès pel desenvolupament d'aquesta tecnologia emprant materials composts els quals ofereixen millors propietats estructurals.

La tecnologia de la impressió 3D ens permet poder ajustar la trajectòria del filament segons els nostres interessos, per tal d'optimitzar-lo en situacions de discontinuïtats com forats, i així millorar la rigidesa i la resistència del material. És important, però, optimitzar la quantitat del filament emprat en la peça, sobretot si s'utilitzen materials de reforç com la fibra de carboni, ja que poden tenir un elevat cost.

1.2. Objecte del projecte

L'objectiu del projecte es basa en l'anàlisi del comportament del material en termes de rigidesa i de resistència, i en la optimització de la trajectòria de la fibra de materials compostos fabricats per impressió 3D. Adaptant-se a les discontinuïtats de la peça, en aquest cas un forat, per tal de millorar la resistència i la rigidesa a tracció i això sense que el pes es vegi especialment afectat. Aquesta optimització està recolzada per un procés de càlcul estructural amb elements finits de diferents provetes, partint de la caracterització del comportament real del material.

1.3. Requeriments i abast

1.3.1. Requeriments

Es considerarà que les provetes només poden ser fabricades per impressió 3D i han d'estar compostades únicament pels materials que permet imprimir la impressora Mark Two de Markforged®, és a dir fibra de carboni i niló. S'han d'especificar els paràmetres de disseny que permetin la fabricació de les provetes de la manera més eficient. Es compararan els resultats de les diferents simulacions per finalment arribar a un disseny òptim.

1.3.2. Abast

Inicialment el projecte preveia el disseny, la fabricació i l'assaig de diferents configuracions de provetes de laboratori, però degut a la situació causada per la COVID-19, es van haver de redefinir els objectius i abast del projecte.

Finalment s'ha dut a terme un projecte que inclou el disseny de provetes de laboratori estàndard les quals puguin ser fabricades en impressió 3D, per a la caracterització del comportament del material sotmès en les condicions donades. També inclou el desenvolupament d'una estructura de simulació apropiada per l'estudi amb les corresponents simulacions amb elements finits amb el programari Abaqus CAE®, i les optimitzacions de la trajectòria de la fibra per a un millor comportament mecànic segons la geometria de la proveta.

2. SITUACIÓ I INFORMACIÓ

2.1. Context

2.1.1. Propietats dels materials

El material de construcció per excel·lència en màquines i moltes estructures és l'acer. L'acer és un material isotròpic. Per definició un material isotròpic implica que les seves propietats són independents de la direcció en què s'avaluen. És a dir si s'aplica un esforç a tracció a un cub d'acer, aquest tindrà la mateixa resposta independentment del costat en què se li apliqui.

Per altra banda existeixen els materials anisotròpics, com la fusta o els compòsits. Aquests tipus de materials veuen les seves propietats variades segons la direcció en què són avaluats. Una subcategoria dels materials anisotròpics són els ortotròpics. Aquests tenen propietats diferenciades al llarg de tres eixos mútuament ortogonals. Per exemple si el cub anterior en comptes d'acer és de fusta, aquest aguantarà millor l'esforç en la direcció de la cara on apuntin les seves betes i serà més propens a la fractura en la direcció de les cares ortogonals a aquesta.

Una variació que es troba dels materials ortotròpics són els materials transversalment isotròpics, com els compòsits. Aquesta variació implica que en dues de les seves tres direccions ortogonals es considera que el material es comporta d'igual forma. Tal i com es pot veure en la figura 1, el material es pot considerar isotròpic en la direcció de l'eix z (pla xy) i en la direcció de l'eix y (pla xz). Conseqüentment igual que passa amb la fusta, aquesta peça ofereix millors propietats mecàniques en la direcció de els fibres (x) que en les altres dues.

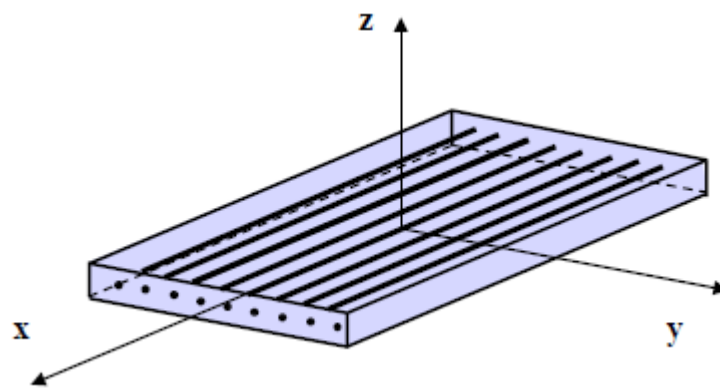


Figura 1. Esquema material transversalment isotròpic. Norbert Blanco. *Design and Analysis of Composites with Finite Elements*. AMADE. Universitat de Girona. 01/08/2020

2.1.2. Discontinuitats en peces

Un dels principals factors a tenir en compte durant el disseny de peces estructurals són els forats o discontinuïtats que tenim en l'estructura. Aquests punts generen zones on s'hi concentren els esforços i les tensions i per tant són punts dèbils en l'estructura propensos a generar fractures que poden desenvolupar en falles greus. Per això en moltes aplicacions sorgeix la necessitat de controlar aquests forats i prendre les mesures necessàries per disminuir aquest risc.

En un procés clàssic de fabricació d'una peça, es parteix d'un brut que es va modificant fins a obtenir la peça desitjada, per exemple, o a partir d'un motlle amb una forma determinada. Aquests processos ofereixen poc marge per millorar aquests punts crítics.

Per aquests motius entra en joc la impressió 3D, ja que a l'hora que s'està generant el material de la peça, també se'n genera la geometria. Gràcies a això i a la possibilitat de combinar materials amb bones propietats mecàniques com la fibra de carboni, amb una matriu d'un polímer com el niló, permet variar la concentració i el tipus de material segons interressi en determinades zones de la peça. I així poder orientar la fibra per tal que aquesta ajudi a disminuir les tensions en la zona del forat aprofitant el seu bon comportament en la direcció de la tensió.

A diferència de mètodes de fabricació convencionals de polímers reforçats amb fibra de carboni "Carbon Fibre Reinforced Polymer" (CFRP), on un cop feta la peça s'ha de foradar si es dona el cas. Amb impressió 3D el forat es pot crear directament en la fase d'impressió, evitant així que s'hagi de foradar posteriorment.

Si es genera el forat posteriorment a la fabricació de la peça (fig. 2), comporta una discontinuïtat en la direcció de les fibres de carboni i una disminució de la resistència de la peça especialment a la zona del forat, en comparació a la mateixa peça amb el forat directament imprès, el qual les seves fibres si que són contínues ja que no han estat foradades ni tallades. (Haoqi Zhang, 2018 [5]).

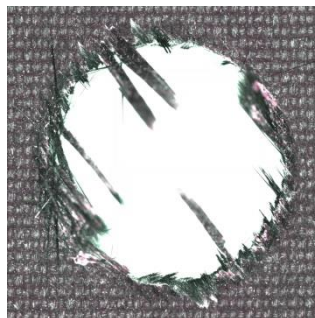


Figura 2. Forat generat posteriorment a la fabricació de la peça. Imatge trobada a la web: ([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Drilled_hole_in_carbon_fiber_reinforced_polymer_\(CFRP\)_sample.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Drilled_hole_in_carbon_fiber_reinforced_polymer_(CFRP)_sample.jpg)). 01/08/2020

2.2. Fabricació additiva

2.2.2. Introducció a la impressió 3D

En els seus inicis la impressió 3D o fabricació additiva estava destinada a la impressió de polímers per crear prototips i models. A mesura que s'ha anat desenvolupant actualment ja es porta a terme la fabricació directa de peces funcionals mitjançant aquest mètode i amb una varietat de materials molt extensa.

Aquest nou mètode de fabricació permet crear objectes en 3 dimensions a partir de models creats per programes de disseny assistit per ordinador. Aquests dissenys són posteriorment laminats i interpretats per programes d'impressió, els quals generen el format d'arxiu per tal que la impressora els pugui llegir i imprimir.

El procés d'impressió de les peces es porta a terme depositant capes de material i orientant el filament fins a obtenir la geometria desitjada. Aquest procés s'anomena Modelatge per deposició fosa, o "Fused Deposition Modelling" (FDM) segons el comitè F42 de l'ASTM [3]. Aquest procés comença amb una bobina de material, el qual gràcies a la temperatura de l'extrusor es fon, per posteriorment depositar-lo capa a capa, sobre el llit, a una certa velocitat i així anar formant la peça a mesura que el material es torna a solidificar (fig. 3).

Actualment es troba una varietat de materials molt extensa que poden ser utilitzats per imprimir amb aquest mètode, començant per termoplàstics i fins a metalls. Cal destacar que cada impressora està dissenyada per imprimir amb uns certs materials i condicions, ja que la temperatura que necessita l'extrusor pot variar molt segons el punt de fusió del material que es vulgui tractar.

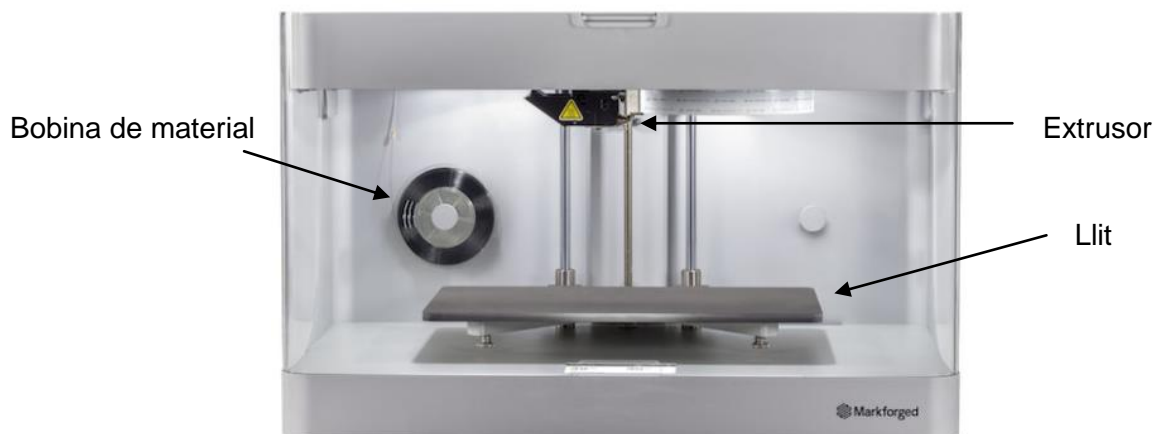


Figura 3: Components bàsics de la impressora Markforged Mark two. Imatge trobada a la web: (<https://www.creat3d.shop/3d-printers/mark-two-composite-3d-printer.html>), 01/08/2020

2.2.3. Software d'impressió

El programa que s'utilitzarà per establir els paràmetres desitjats d'impressió és l'Eiger [7]. Aquest permet dividir el model en capes segons el gruix del fil extruït de què es disposa. A més genera la trajectòria del filament i per tant permet escollir diverses opcions a l'hora de depositar-lo, per tant l'estudi es basarà en les possibilitats que aquest ofereix i les combinacions de niló i carboni que es poden obtenir.

També permet conèixer la quantitat de material que s'utilitzaria en cas d'imprimir la peça i per tant serà un dels paràmetres que es tindran en compte per determinar el model de proveta més òptim.

En l'annex C.1 s'especifiquen les característiques d'aquest programa i els passos a seguir per utilitzar-lo.

2.3. Entorn considerat per l'estudi

Per la realització d'aquest projecte s'utilitza el programa d'elements finits Abaqus/CAE. S'ha agafat com a model d'impressora la Mark Two de la marca Markforged ®. Aquesta impressora permet imprimir diversos materials, com el niló, la fibra de carboni, la fibra de vidre o el kevlar. Però aquest estudi es basarà íntegrament en la utilització del material compost format pel niló reforçat amb fibra de carboni.

S'adjunta fitxa tècnica de la impressora Mark Two en l'annex C.2.

Tal i com s'ha comentat anteriorment, aquest estudi ha estat basat en les possibilitats d'impressió que ofereix el software Eiger associat a aquesta impressora.

3. METODOLOGIA

Per tal de dur a terme aquest projecte es seguiran els passos següents:

Primerament s'estudiaran les possibilitats d'impressió que ens permet el software d'impressió Eiger comentat anteriorment i l'entorn de treball del programa de simulació d'elements finits Abaqus CAE ®. A continuació es valoraran les opcions que ofereix per tal d'ajustar el mètode més adequat per realitzar l'estudi i simulació de les provetes. Seguidament es desenvoluparà el mètode per generar les geometries i dur a terme la simulació dels diferents casos que es pretenen estudiar, d'una manera eficient i que permeti la variació dels paràmetres de càlcul d'una manera senzilla. Finalment es generaran les diferents provetes i el càlcul seguint les condicions i els límits que ofereix el software d'impressió i s'extrauran els resultats.

L'estudi ha de ser adequat per tal que les provetes puguin ser impreses i provades en un futur, si s'escau, amb la finalitat de comparar els resultats experimentals amb els resultats teòrics que s'hagin extret d'aquest estudi.

4. BASES DE L'ESTUDI

4.1. Enfocament de la solució

4.1.1. Punt de partida

Per a la realització d'aquest projecte primerament s'han pres com a referència dos articles que estudien la orientació de la trajectòria de la fibra en provetes que contenen un forat. D'aquesta manera s'ha pogut veure quins mètodes s'han valorat per millorar el comportament de la proveta i han servit de punt de partida per la realització d'aquest estudi.

El primer estudi (Haoqi Zhang et al., 2018.)[\[5\]](#) és un cas teòric sobre la possibilitat d'imprimir fibres de carboni contínues esquivant la geometria del forat intentant seguir les trajectòries de la tensió. És a dir, es fa un estudi sobre la variació del comportament de les provetes si es corba la trajectòria de la fibra per sortejar la discontinuïtat que suposa el forat, i així tenir fibres contínues que van d'un costat a l'altre de la proveta i no queden interrompudes (fig. 4). Aquesta manera d'imprimir les provetes es compara amb la manera més estàndard d'impressió de fibres amb una trajectòria recta en la direcció de la càrrega. Cal dir que no s'imprimeixen les provetes ni es té en compte cap paràmetre ni limitació que pot oferir una impressora.

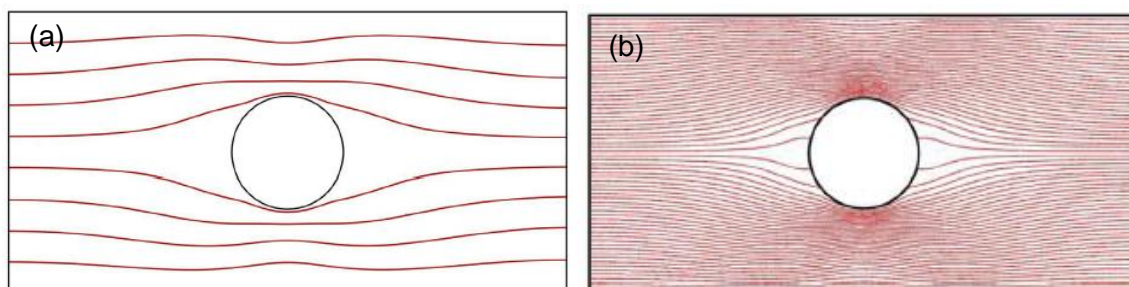


Figura 4. (a) Trajectòries de la tensió. (b) Trajectòria del filament de fibra de carboni. Haoqi Zhang, et al. Performance-driven 3D Printing of continuous curved carbon fibre reinforced polymer composites: A preliminary numerical study. School of Civil Engineering, University of Leeds. Leeds. 2018. 04/08/2020

També s'estudia la possibilitat d'orientar de dues maneres diferents les 4 capes de la proveta, amb les dues capes del mig amb la mateixa orientació i la superior i inferior amb una altra. Els casos que considera són 3; una orientació a 90° de les capes superior i inferior i a 0° les del mig, orientar la capa superior i inferior a -45° i les del mig a 45° i per últim considera la fibra amb una trajectòria corbada al voltant del forat.

Els resultats d'aquest article mostren dos conclusions importants que més endavant comprovarem en aquest projecte.

Primerament destaca com la resposta de la proveta empitjora si tenim diferents orientacions entre les 4 capes (90/0 o -45/45) en comparació a tenir totes les capes orientades a 0° en la direcció de la sol·licitació. Per altra banda mostra com la orientació de les fibres amb una trajectòria corbada reparteix molt més la tensió per tota la proveta a diferència dels altres casos on queda molt concentrada en certs punts al voltant del forat.

El segon estudi que s'ha tingut en compte (Lincy Pyl et al.,2018.) [6] ens mostra la possibilitat d'imprimir fibres concèntriques o amb una trajectòria rectangular al voltant del forat per tal de reforçar-lo. En aquest estudi si que s'imprimeixen les provetes i es comparen els resultats obtinguts amb les simulacions. També compara la possibilitat de imprimir la proveta amb el forat o el de foradar la proveta un cop ja està impresa.

Extreu tres conclusions molt interessants que es tindran en compte per aquest projecte:

Primerament mostra com les provetes amb el forat foradat posteriorment, tot i tenir disruptions en les fibres degut al tall d'aquestes amb la broca, aguanten més que les provetes amb el forat imprès. Això és degut a que les provetes totalment impreses, la trajectòria de la fibra un cop s'apropa al forat fa un gir de 180° "U turn" per fer la següent passada (fig. 5). Aquests girs fan que la fibra a aquella zona estigui a 90° respecte la tensió i es trenqui més fàcilment. Això juntament a la característica de la impressora que obliga a tenir una passada de niló a tots els contorns exteriors de la peça, fa que la última passada al voltant del forat al ser de niló sigui més dèbil i provoca que el forat es faci més gran sotmès a esforç i falli abans.

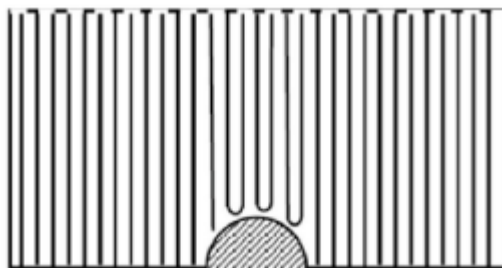


Figura 5. Trajectòria de la fibra realitzant un canvi de sentit en arribar al forat. Lincy Pyl, et al. Exploration of the design freedom of 3D printed continuous fibre-reinforced polymers in open-hole tensile strength tests. Department of Mechanics of Materials and Construction. Vrije Universiteit Brussel (VUB). Brussel-les. 04/08/2020

Per altra banda demostra com les passades de carboni concèntriques al forat redueixen les tensions màximes i les reparteixen més uniformement fent que les ruptures s'originin fora de la zona reforçada, més lluny del forat. També mostra com el reforç rectangular al voltant del forat ofereix millor resistència a la tracció ja que té les fibres orientades en el sentit de la càrrega.

4.1.2. Aplicació a aquest treball

Seguidament s'exposen algunes conclusions i idees basades en els dos articles anteriors que es consideren d'interès per al realització d'aquest projecte.

Per tal de realitzar el nostre estudi es valorarà la possibilitat d'orientar les fibres al voltant del forat dintre de les limitacions que ofereixi el programa d'impressió, ja que s'ha vist que dona resultats molt favorables el fet de mantenir la trajectòria de la fibra al llarg de tota la peça sense que aquesta quedi interrompuda pel forat. És important intentar evitar les trajectòries on la fibra hagi de fer molts canvis de sentit de 180° , ja que cada gir suposarà un punt dèbil en l'estructura de la proveta on serà propensa la ruptura d'aquestes fibres.

També es provaran de fer reforços al voltant del forat ja que ha quedat demostrat que milloren molt la dissipació dels esforços en aquesta zona i la disminució de les tensions.

És important també tenir en compte el cas on les fibres són totalment contínues sense variació de la seva trajectòria ja que és la forma més fàcil i simple d'impressió i de la qual s'està intentant buscar una alternativa més òptima. D'aquesta manera podrem comparar aquest cas amb els altres casos que es proposin.

4.2. Possibilitats i límits d'impressió

Tal i com s'ha comentat en apartats anteriors els límits dels casos que estudiarem els estableix el programa Eiger de MarkForged®. Ja que en un principi es volia arribar a imprimir les provetes i assajar-les per tal de comparar-les amb els resultats que s'obtinguin del càlcul d'elements finits. Però degut a la situació no s'ha pogut dur a terme. Per aquests motius s'agafen com a base les opcions d'impressió d'aquest programa.

Seguidament s'exposen aquestes opcions que ofereix el programa i les relacions que s'han trobat d'aquests amb els casos que es valoren en l'apartat anterior.

Per a una explicació detallada de cada funció del programa i el procés per tal d'obtenir cada cas cal veure l'annex C.1.

4.2.1. Cas isotròpic

Primerament un dels casos d'estudi que es vol realitzar és el que es troben totes les fibres contínues i orientades a la mateixa direcció a cada capa. És un cas senzill i que el programa d'impressió permet fer sense problemes. Aquest cas se li ha donat el nom d'isotròpic, degut a que totes les fibres tenen la mateixa orientació.

Tal i com es pot observar en la figura 6 següent es pot generar un cas dins el programa Eiger amb les fibres contínues i aplicant variacions d'inclinació d'aquestes fibres entre capes.

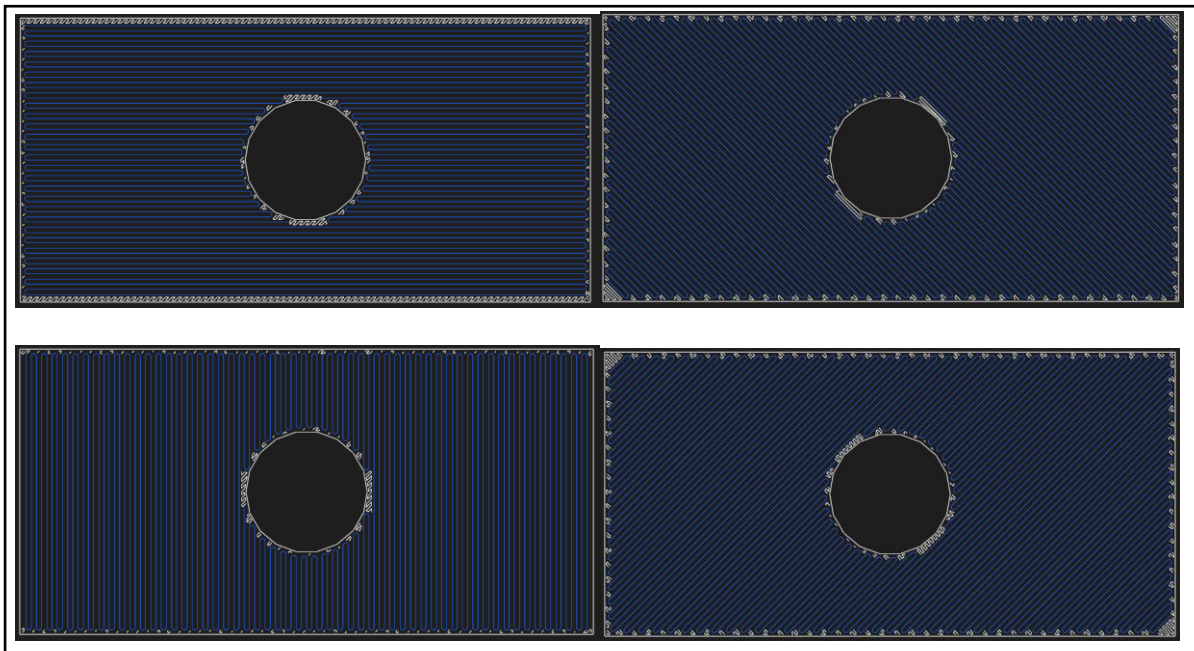


Figura 6. Exemple de la disposició de fibra contínua variant l'angle d'inclinació entre capes 0,45,-45,90 graus. Eiger.io. Markforged.

Aquesta disposició pot tenir punts dèbils a la fibra en els canvis de sentit “U turns” que genera la impressora en arribar al forat. Aquest fet pot provocar que la fibra es trenqui en aquestes zones tal i com s'ha explicat en apartats anteriors. A l'hora de generar el càlcul no es tindrà en compte, però si s'imprimeix i es prova la proveta pot ser una causa de disminució de la resistència d'aquesta.

El fet de variar la orientació dels filaments de reforç entre capes és degut a que en una aplicació real, tenir només filaments orientats en un sentit, per exemple a 0°, milloraria molt la resistència a la peça en esforços sotmesos només en la direcció d'aquestes fibres. Per contra en gairebé qualsevol aplicació hi haurà esforços aplicats en diferents direccions i plans, per tant una peça amb només una única orientació seria molt dèbil sotmesa a esforços amb altres direccions. Per aquest motiu es varia la orientació del filament entre capes, per millorar la resposta de la proveta sota esforços en diferents sentits.

4.2.2. Cas concèntric

El següent cas que es pretén realitzar, és el d'una disposició de les fibres concèntriques al voltant del forat. Segons s'ha explicat anteriorment i es parla en l'estudi comentat en

apartats anteriors (Lincy Pyl et al.,2018.) [6], la opció de crear anells concèntrics al forat millorar molt la resistència en aquesta zona i ajuda a dissipar els esforços.

El programa d'impressió incorpora una funció de generar fibres concèntriques al voltant de contorns, tant interiors com exteriors. A més permet combinar aquestes concentricitats amb fibres isotròpiques com les del cas anterior o bé sense elles tal i com es pot observar en la següent figura 7.

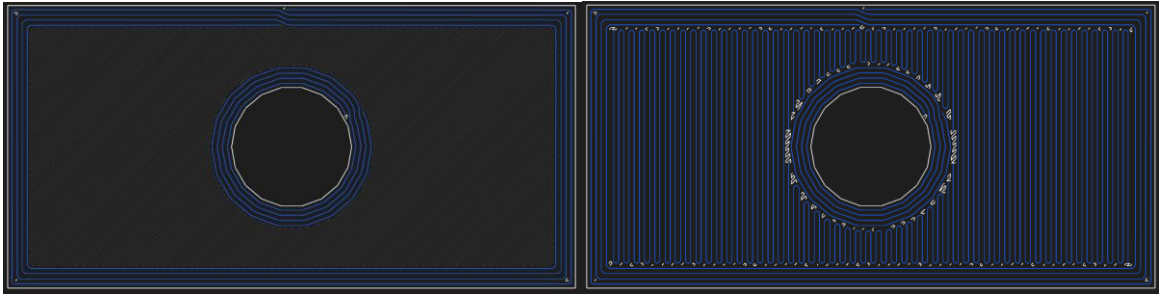


Figura 7. Exemple de la disposició de fibra concèntrica a tots els contorns a l'esquerra i afegint fibra isotròpica a la dreta. Eiger.io. Markforged.

Per tant aquest serà un altre dels casos que s'estudiaran en aquest projecte.

4.2.3. Cas mixt

L'últim cas que es tindrà en compte en aquest projecte, és el cas que s'ha anomenat "Mixt". Això és a degut a que aquest cas incorporarà una sèrie de fibres orientades concèntricament al forat, però estaran combinades amb fibres isotròpiques orientades a 0° . Aquest cas es basa en l'estudi explicat anteriorment (Haoqi Zhang et al., 2018.) [5] on s'ha vist que la orientació de fibres reproduint la trajectòria de les tensions principals millorava molt el comportament de la proveta, sobretot la seva rigidesa i resistència.

Per tal de realitzar aquest cas en el programa d'impressió s'ha hagut de fer una modificació a la geometria de la peça, ja que no és possible realitzar-ho amb la geometria mostrada fins ara. S'ha hagut de considerar mitja proveta partida pel seu eix longitudinal. D'aquesta manera el contorn del forat passa a esdevenir un contorn exterior i així el programa permet la deposició de fibra continua enllaçada amb la concèntrica del forat, tal i com es pot veure en la figura 8 següent.

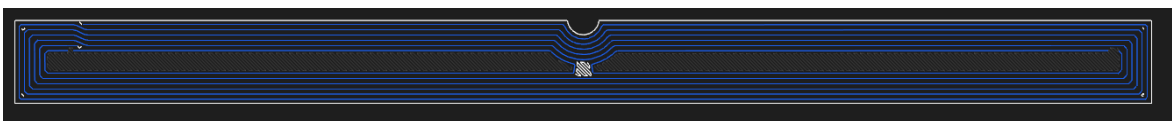


Figura 8. Exemple de la disposició de fibra concèntrica combinada amb fibra isotròpica (Cas mixt). Eiger.io. Markforged.

La diferència més significativa de la disposició d'aquest cas respecte el cas anterior on hi ha fibra concèntrica i isotròpica és que en aquest la fibra és continua. És a dir el filament no queda interromput en arribar el forat, aquest segueix resseguint el contorn del forat a diferència del cas concèntric on el filament fa un gir en arribar al forat i per tant no queda enllaçat amb les concentricitats.

Si aquest cas s'hagués d'imprimir, s'han generat les dues meitats de la proveta, la superior i la inferior, les quals s'imprimirien a la vegada solapant el costat on hi ha el forat per tal que el material en depositar-se quedi "soldat" unint les dues parts. El resultat es mostra en la figura 9 següent.

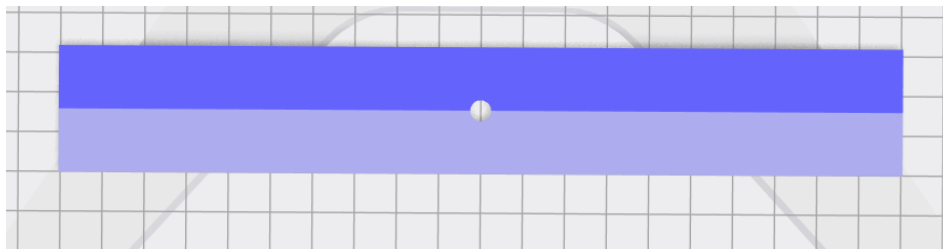


Figura 9. Disposició lleugerament solapada de les dues meitats de la proveta per tal de formar la geometria completa. Eiger.io. Markforged.

Des d'un punt de vista de la simulació es podrien crear molts casos diferents i variats, però com que s'intenta seguir les possibilitats que ofereix el programa d'impressió, aquestes són les 3 opcions que ens permet fer aquest i per tant les que s'estudiaran.

5. DISSENY DE LES PROVETES

5.1. Primeres proves

Per tal de seguir les explicacions d'aquest apartat i els següents correctament, és recomanable consultar tant l'annex A com el B, ja que en aquests s'expliquen primer la familiarització amb el programa Abaqus/CAE i seguidament els dos fitxers que s'utilitzen per a la realització de l'estudi.

Tal com s'ha explicat en l'apartat anterior, per tal de realitzar el càlcul d'una manera menys restrictiva i poder modificar tots els valors que calguin, es farà introduint els paràmetres manualment a partir d'un fitxer input. Per tal de realitzar un estudi amb aquest mètode, també és necessari generar la geometria i el mallat dins el mateix fitxer o d'alguna manera aliena a aquest i després adjuntar-lo de la forma adequada per tal que el programa el pugui entendre un cop s'executa.

Per tal de realitzar el mallat, la geometria general de la peça, i altres paràmetres, es porta a terme creant un fitxer mitjançant codi python (Annex B2). En el cas d'aquestes primeres proves, per tal de realitzar la geometria, els nodes i els elements del forat central de la proveta, s'han fet creant-los amb un document de Excel guardat en format text (.txt.). Tal com es pot veure en les taules 1 i 2 següents, primer s'han generat els nodes i els elements a partir d'una fulla de càlcul d'Excel, tenint en compte el diàmetre que es vol del forat, la quantitat d'elements que es volen tenir en aquesta zona i la seva mida.

Angle (rad)	Nº node	Coord x (mm)	Coord y (mm)	Coord z (mm)
0	1	40	50	0
0,03926991	2	40,00770964	49,60740184	0
0,07853982	3	40,03082666	49,21540904	0
0,11780972	4	40,06931543	48,82462603	0
0,15707963	5	40,12311659	48,43565535	0
0,19634954	6	40,1921472	48,04909678	0
0,23561945	7	40,2763008	47,66554636	0
0,27488936	8	40,37544764	47,2855955	0
0,31415927	9	40,48943484	46,90983006	0

Taula 1. Fragment de taula per la creació dels nodes del forat central de la proveta amb una fulla d'Excel, Excel 2019.

Nº Element	Nº node 1	Nº node 2	Nº node 3	Nº node 4	Nº node 5	Nº node 6	Nº node 7	Nº node 8
70000001	60000085	60000325	60000327	60000087	60000245	60000326	60000246	60000086
70000002	60000087	60000327	60000329	60000089	60000246	60000328	60000247	60000088
70000003	60000089	60000329	60000331	60000091	60000247	60000330	60000248	60000090
70000004	60000091	60000331	60000333	60000093	60000248	60000332	60000249	60000092
70000005	60000093	60000333	60000335	60000095	60000249	60000334	60000250	60000094
70000006	60000095	60000335	60000337	60000097	60000250	60000336	60000251	60000096
70000007	60000097	60000337	60000339	60000099	60000251	60000338	60000252	60000098

Taula 2. Fragment de taula per la creació dels elements del forat central de la proveta amb una fulla d'Excel, Excel 2019.

Cal destacar que cada element està format per 8 nodes ja que s'utilitza un format d'elements S8R.

Seguidament les taules anteriors són passades a format text (fig 10) per tal que puguin ser cridades pel programa.

60000001	39.250	50.000	0
60000002	39.258	49.054	0
60000003	39.281	48.109	0
60000004	39.319	47.166	0
60000005	39.372	46.227	0
60000006	39.440	45.293	0
60000007	39.522	44.365	0
60000008	39.618	43.444	0
60000009	39.727	42.531	0
60000010	39.849	41.626	0
60000011	40.107	40.607	0

Figura 10. Fragment del fitxer ".txt" de nodes.

Finalment una vegada el fitxer python (.py) té tots els paràmetres introduïts, s'executa per l'Abaqus a través de l'interpret de codi de Windows (cmd) i genera l'estudi tal i com si s'hagués fet a partir de la interfície gràfica del mateix programa. Es generen una sèrie de fitxers els quals alguns d'ells es poden obrir amb la interfície gràfica de l'Abaqus per veure els paràmetres de l'estudi i la geometria o obtenir-ne els resultats que s'han calculat.

5.1.1. Cas inicial

Aquest cas és un estudi el qual ha servit de base per la realització de la geometria dels casos que es tracten en aquest projecte. No s'entrarà en detall en la resta de l'estudi.

Pel que fa a l'aplicació en aquest treball, la part que interessa és la manera en què s'ha realitzat la geometria del forat de la proveta i els seus nodes i elements. Mitjançant un fitxer de python es genera l'script que permet l'especificació dels paràmetres geomètrics de la peça i determinar els nodes i la seva posició, així com els elements i la seva estructura.

Inicialment aquest constava d'una proveta rectangular amb mides que varien entre 50 i 80 mm de longitud i amplada, amb un gruix de 2.8 mm i un forat descentrat de 8 mm de diàmetre.

Aquestes mides seguidament es varen modificar per establir una proveta més uniforme de 100x50mm i centrar el forat al mig de la peça. El resultat es mostra en la figura X11 següent:

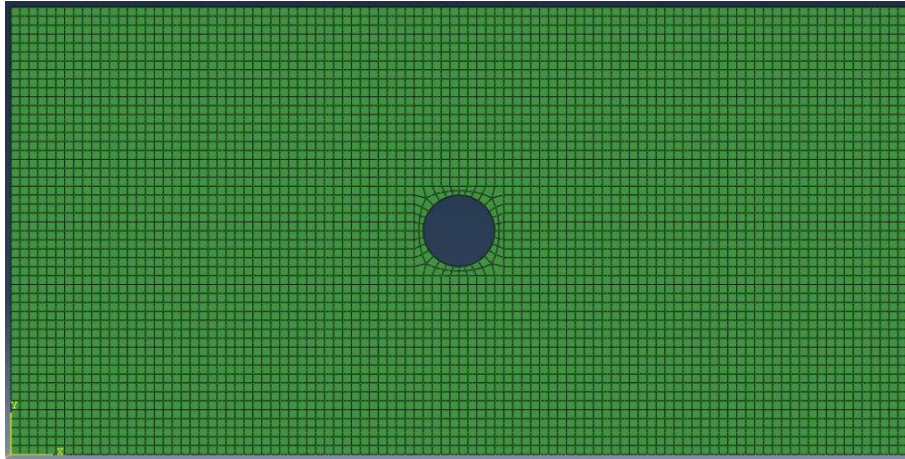


Figura 11. Primera modificació de la geometria de la peça

Els elements que conformen la proveta, són del tipus S8R de 1mm de costat. Per altra banda els elements del voltant del forat estaven creats com s'ha comentat en l'apartat anterior. Aquests estan disposats en 2 concentricitats de 0.5 mm d'amplada al voltant del forat. La concentricitat interior és la que dona forma al forat amb un diàmetre de 8 mm mentre que la concentricitat exterior forma un marc quadrat per tal que la unió amb la resta d'elements de la proveta sigui uniforme i puguin coincidir tots els nodes, tal i com es pot observar en la figura X anterior.

El problema que s'ha trobat amb la configuració del mallat al voltant del forat és que certs elements com els de les cantonades quedaven considerablement més grans que la resta, i per tant causen una disminució de la precisió del càlcul en aquestes zones.

5.1.2. Cas article Lincy Pyl

En abandonar el cas anterior, es passa a prendre com a referència l'article publicat per Lincy Pyl: (Lincy Pyl et al.,2018.) [\[6\]](#). Aquest article varia la geometria de la proveta i del forat respecte l'anterior. Amb un forat de 5mm i una proveta de 200x30mm són unes mides més adequades per aquest estudi.

Degut al canvi de geometria i forat es torna a crear un altre mallat basant-se en els anteriors. Amb aquest nou mallat s'aprofita per reduir la mida dels elements fins a 0.5mm de costat per tal d'obtenir uns resultats més precisos.

En la figura 12 es pot veure la primera nova geometria de la peça i el forat.

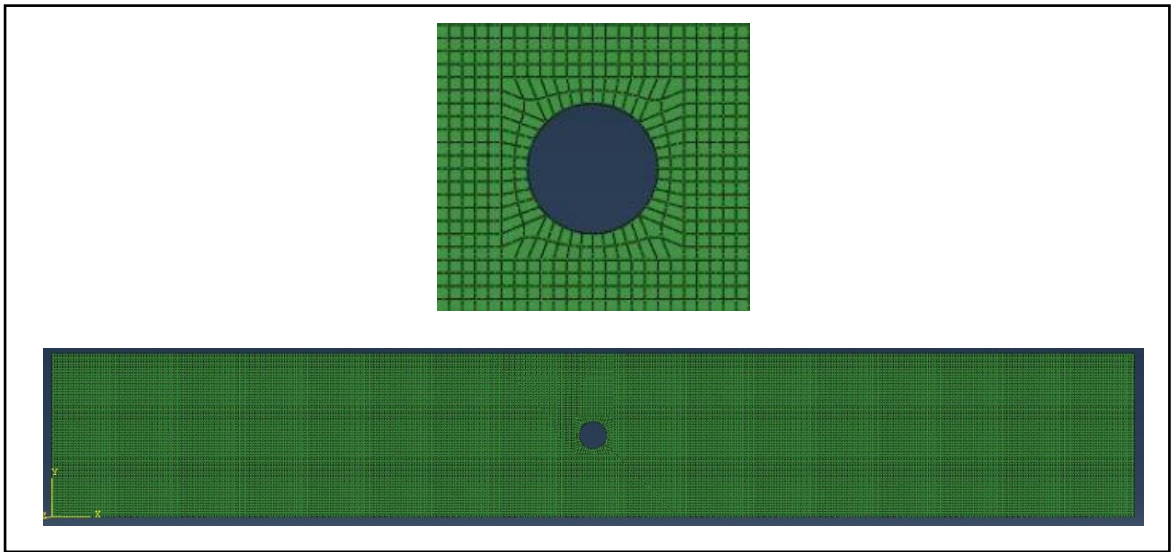


Figura 12. Nova geometria de la provetaseguint i nova disposició del marc del forat.

Tot i reduir la mida dels elements el contorn del forat, aquest planteja problemes amb els elements de les cantonades els quals tenen una forma molt irregular. Degut a això es decideix crear una nova disposició d'aquests elements al voltant del forat, la qual es pot veure en la figura 13 següent.

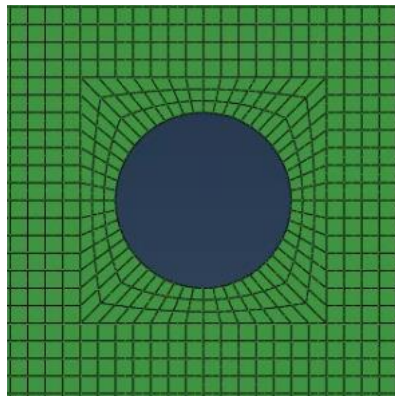


Figura 13. Patró definitiu del marc del forat, amb elements de 0.5 mm de costat

Com es pot apreciar amb aquest nou marc, disposem d'una quantitat d'elements més significativa i a l'hora en reduïm la seva mida. Aquest fet millorarà la fiabilitat dels resultats però augmentarà el temps de càlcul. També es pot observar com els elements de les cantonades són molt més regulars i semblants a la resta. Tot i així segueixen essent més grans que els altres.

Finalment s'ha decidit assignar com a vàlides les mides d'aquesta geometria, i per tant seran les que s'utilitzaran per dur a terme els càlculs amb elements finits dels casos que es plantegen en el capítol a continuació.

A part de la creació de la geometria i del mallat adequat per l'estudi, també s'ha desenvolupat un mètode per establir sistemes de coordenades locals a cada element individualment, a partir del centre de masses de cada un. Així es pot controlar la orientació d'aquests. Aquest procés és molt important per tal de configurar la orientació que es vol donar al filament de fibra de carboni a cada zona de la peça, segons els paràmetres i les configuracions que ofereix l'Eiger.

Cal destacar que no tots els elements són orientats localment a partir d'aquest mètode. Principalment s'ha aplicat a la zona del marc al voltant del forat, on els elements requereixen orientacions molt específiques. Per als elements que van orientats amb salts discrets de 45° o 90° , s'ha aplicat un altre mètode menys complexa.

Per veure la realització d'aquestes qüestions, mirar l'annex B.2, dins l'script de python.

6. SIMULACIÓ PER ELEMENTS FINITS

En aquest capítol es procedirà a descriure tots els casos que s'han estudiat i les seves característiques. Seguidament també es comentaran tots els paràmetres que s'han tingut en compte, per generar la simulació amb elements finits de cada cas en concret i com s'han dut a terme.

6.1. Característiques comunes

A continuació es comentaran alguns dels paràmetres que s'utilitzaran i que són comuns pels tres casos que es simulen.

-Geometria

Les dimensions finals de la proveta són de 200x30mm amb un forat central de 5mm de diàmetre, tal i com s'ha comentat en el capítol anterior.

Pel que fa al gruix, aquest ve donat per la quantitat de capes de material que es dipositaran. En aquest cas són 8 capes que contenen material de reforç, més dues capes addicionals (la superior i la inferior) que només contenen niló. Aquestes dues capes la impressora obliga a tenir-les, com a mínim.

Considerant que cada capa té un gruix de 0.125mm, segons la figura 14 a continuació del programa d'impressió, el gruix total de la proveta és de 1.25 mm.

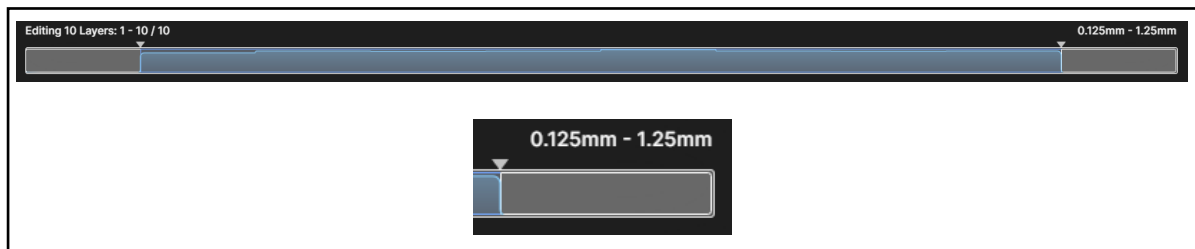


Figura 14. Esquema de la quantitat de capes i el gruix de cada capa segons l'Eiger.io.

Els fragments de color blanc indiquen una capa formada exclusivament per niló, mentre que els trams de color blau combinen niló amb material de reforç.

La geometria de la figura no es crea específicament en un lloc del fitxer input, sinó que ve donada pel conjunt d'elements del mallat. En donar mides a aquests i establir-ne la quantitat de files i columnes, s'obté la geometria global de la peça sense el forat. Per altra banda per generar el forat, es creen els elements del marc i seguidament amb un fragment de codi s'eliminen tots aquells elements de la proveta creats anteriorment situats a la zona del forat i el marc. La geometria final es mostra en la figura 15 següent:

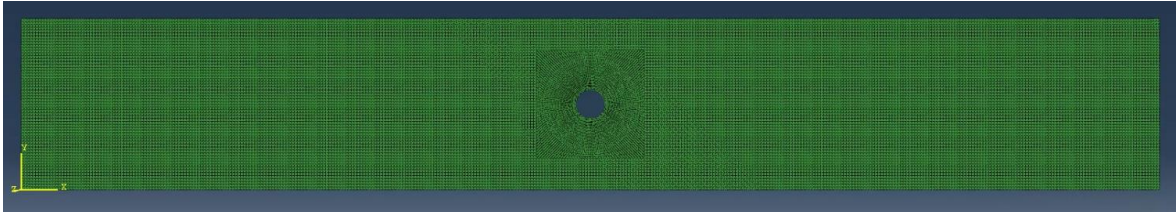


Figura 15. Geometria base de la proveta.

-Característiques dels materials utilitzats

Els dos materials que s'utilitzen en aquest estudi són el filament de fibra de carboni i el niló.

Per una banda el filament de fibra de carboni es comporta com un material transversalment isotròpic, que comporta que les seves propietats en dos dels tres plans són iguals. En l'abaqus es considera com un material elàstic del tipus làmina. A continuació es mostren les propietats que s'han considerat per a la simulació amb elements finits.

$$E1 = 53400 \text{ MPa}; \quad E2 = 6160 \text{ MPa}; \quad \nu_{12} = 0.39; \quad G_{12} = G_{13} = G_{23} = 1910 \text{ MPa}$$

On:

E = Mòdul de Young

N = Coeficient de Poisson

G = Mòdul de Rigidesa

La resistència a la tracció del carboni és la següent: $S_{ut} = 800 \text{ MPa}$

La direcció 1 es considera en el sentit de deposició de la fibra, mentre que la 2 és la perpendicular a aquesta en la mateixa capa, és a dir aguanta els esforços entre filaments en una mateixa capa. La direcció 3 és la que fa referència en aguantar esforços entre filaments de capes adjacents. En la imatge 16 següent s'aclareixen aquestes direccions.

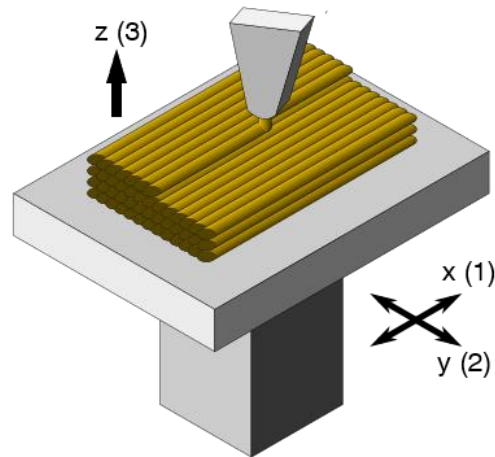


Figura 16. Esquema de les direccions considerades per establir les propietats del material. Imatge trobada a la web: (https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_filament_fabrication#/media/File:FDM_printing_diagram.svg), 18/08/2020

Per altra banda el niló es comporta com un material isotròpic, el seu mòdul de Young i el Poisson es mostren a continuació:

$$E = 940 \text{ MPa}; \quad \nu = 0.3$$

La resistència a la tracció del niló es dona a continuació: $S_{ut} = 75 \text{ MPa}$

Aquests valors corresponen als materials que s'utilitzen amb la impressora MarkTwo de Markforged, els quals s'identifiquen per "Carbon" i per "nylon – End of life".

Totes aquestes propietats excepte la resistència a la tracció, s'introdueixen en el fitxer input i en l'script de python per tenir-les a disposició per assignar-les a les seccions de la peça corresponents.

La resistència a la tracció es dóna per tenir una idea del punt de trencament del material. Però en aquest estudi es considera un comportament únicament elàstic, no es té en compte el comportament fins al trencament.

-Mallat

En avançar amb el desenvolupament de les provetes, ha sorgit el factor d'orientació dels elements que es troben al voltant del forat. Aquest paràmetre ha introduït un conflicte amb la disposició dels elements propers al forat.

Tal i com es té el mallat del contorn del forat en l'últim apartat del capítol anterior, dificulta molt la creació d'orientacions concèntriques al voltant seu ja que més enllà del marc els elements estan disposats de forma lineal. Aquest fet complica molt la selecció dels elements subjectes a orientació, sobretot si es vol fer una orientació circular al voltant del forat.

Degut a això s'ha optat per modificar el marc d'elements del forat respecte el que es tenia al final del capítol anterior, i aquesta vegada s'ha generat directament en l'script de python. Veure l'annex B.2 amb al descripció dels passos.

Aquesta nova disposició introdueix una sèrie d'anells d'elements concèntrics al forat. Això s'ha fet per tal de poder-los orientar més fàcilment, ja que es trobaran formant un cercle, i per tant facilitarà molt la seva orientació agafant com a punt de referència el centre del forat.

S'ha optat per crear 12 anells d'elements concèntrics al forat a més d'un marc. Aquest ajuda a tenir una transició suau entre els elements disposats de forma circular i els elements disposats linealment de la resta de la proveta.

Els 12 anells concèntrics venen donats per les característiques del programa d'impressió, ja que un dels casos que s'estudien i que s'explica més endavant en aquest capítol, és el cas mixt. Aquest combina fibra concèntrica més fibra disposada linealment tal i com s'explica en l'apartat 4.2.3. Si s'intenta crear aquest cas en el programa Eiger, permet afegir com a màxim 6 concentricitats al voltant del forat. Llavors fent una aproximació prenent les mides de la proveta i la quantitat de passades de fibra que fa el programa, s'obté que cada passada ocupa un espai aproximat d'1mm. Per tant com que tenim 6 passades d'un mil·límetre i els elements de la peça són de 0.5mm, es necessitaran 12 concentricitats d'elements de 0.5mm per contenir les 6 concentricitats de fibra.

En la figura 17 següent es pot veure la disposició definitiva del mallat que s'utilitzarà per tots els casos a calcular.

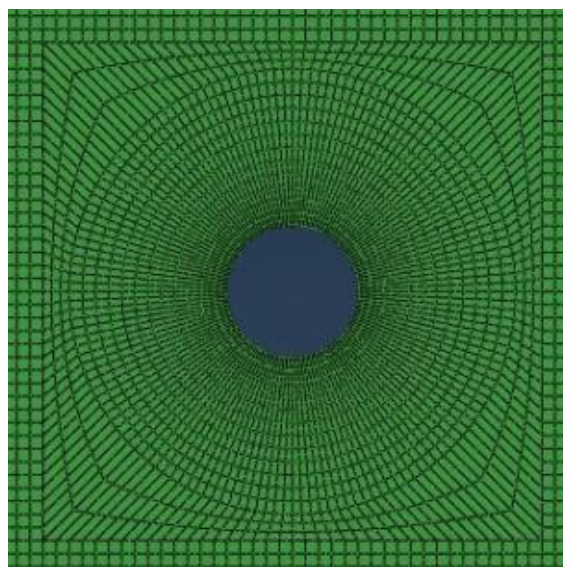


Figura 17. Disposició definitiva dels elements al voltant del forat, formant 12 anells concèntrics de 152 elements cada un més un marc de transició.

Tots els elements de les concentricitats fan 0.5mm d'amplada, però la seva alçada varia ja que la quantitat d'elements a cada concentricitat és constant. Per tant aquest fet obliga a anar augmentant l'alçada dels elements a mesura que les concentricitats s'allunyen del centre del forat. Els elements més propers al forat tenen una alçada de 0.124mm i van augmentant fins a 0.5mm en el marc.

Aquest fet millora la precisió en el càlcul a les zones més properes al forat, però tal i com es pot observar en la figura anterior, els elements de les cantonades del marc són molt més grans que els altres. Això és una conseqüència inevitable deguda a que els elements situats en la horitzontal i en la vertical del forat mantenen una mida en acord a la resta del mallat.

Pels tres casos que es simularan, la primera filera d'elements del contorn de la peça en cada capa, els hi correspon una secció de niló. Això és degut a que el programa d'impressió obliga, com a mínim, a disposar una passada de niló al voltant de la peça, tal com s'explica en l'annex B.1.

-Restriccions i càrrega

Per tal de recrear una simulació el més adequada possible, es considera que la proveta està subjectada per dues grapes com si estigues sotmesa a l'assaig real a tracció.

Degut a això tant les restriccions com la càrrega s'apliquen en una àrea d'un lateral diferent cada una, la qual ocupa tota l'alçada de la proveta (30mm) i un allargada de 25mm.

Pel que fa a les restriccions, aplicades a la zona que es mostra en la imatge 18 següent, restringeixen el desplaçament en X i en Z i la rotació en Y (Eixos globals).

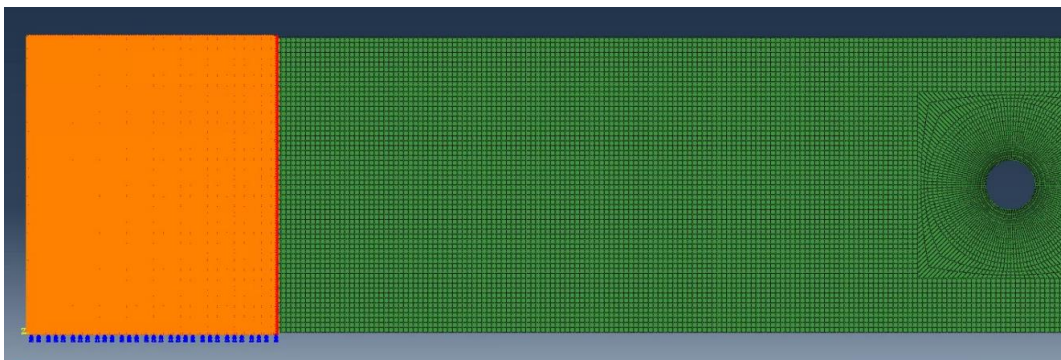


Figura 18. Zona d'aplicació de les restriccions de moviment i rotació.

Per altra banda s'aplica un desplaçament de 1mm en direcció X, a la zona de la peça que es mostra en la imatge 19 a continuació.

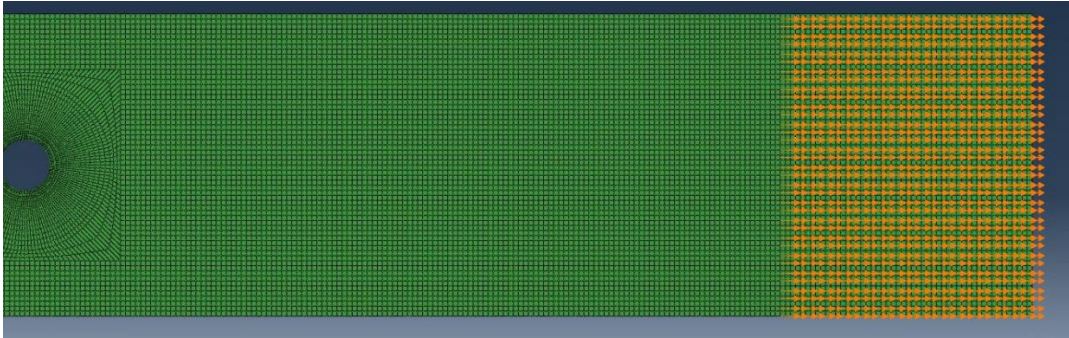


Figura 19. Zona d'aplicació del desplaçament d'1mm en direcció x

-Variables a calcular

Pel que fa a les variables que són d'interès calcular es comenten a continuació.

Les variables que es calculen aplicades a nodes són les següents:

u: desplaçament (mm)

rf: reaction force (força de reacció) (N)

Interessa conèixer el desplaçament de cada node per veure com varia aquest segons les característiques de la peça en la zona indicada.

La força de reacció és un paràmetre que s'utilitzarà per determinar quin dels casos que s'estudien és més òptim. Això s'explica en el capítol dels resultats.

Les variables que es calculen aplicades a elements són les següents:

s: stress (tensió) (MPa)

e: strain (deformació)

La tensió i la deformació són les dues variables més comunes en un càlcul de tracció. La tensió permet conèixer quines zones de la proveta estan sota un major o menor esforç i per tant es poden detectar punts crítics de la peça. Per altra banda la deformació ens indica d'una manera aproximada les dimensions finals de la proveta tenint en compte com s'ha deformat, i per tant poder aplicar mesures per corregir-ho en cas que es deformi massa.

Les tensions que interessin més són les que s'apliquen en direcció X (S11), en direcció Y (S22) i la tallant (S12).

6.2. Cas isotròpic

Aquest és el cas més simple dels tres, ja que les fibres no prenen cap orientació concreta segons la zona de la peça, sinó que cada una de les 8 capes intermèdies de la proveta té una disposició de fibra uniforme i amb una mateixa direcció.

Les orientacions de cada capa estan basades en l'estàndard ASTM D5766/D5766M que estableix 8 capes que han de contenir les orientacions del material de reforç següents: 45/-45/0/90. L'ordre d'aquestes orientacions ha estat modificat per tal que tingui una ordenació simètrica respecte el pla mig de la proveta. Si s'observa la fila 5 de la taula 3 següent, es defineixen les orientacions per un estudi com el d'aquest projecte.

Sl No	Type of Test	Orientations	ASTM Standard
1.	Tensile test(UD)	(0) ₁₂	D 3039
2.	Compression test (UD)		D 3410
3.	Tensile test (QI)	(+45,0,-45,90,+45,0,-45,90)s	D3039/D3039M
4.	Compression test (QI)		D 3410
5.	Open hole tensile test (QI)	(+45,0,-45,90,+45,0,-45,90)s	D5766/D5766M
6.	Open hole compression test (QI)	(+45,0,-45,90,+45,0,-45,90)s	D 3410
7.	In-plane shear test (± 45)ns	(+45,-45,+45-45,+45,-45,+45,-45)s	D3518/D3518M
8.	Open hole shear test ((± 45) ns	(+45,-45,+45-45,+45,-45,+45,-45)s	--
9.	Mode I – Fracture toughness	(0) _{12S}	D 5528-01

Taula 3. Orientacions establertes per l'estàndard ASTM segons el model d'estudi que es vol dur a terme. ResearchGate. Imatge trobada a la web. (https://www.researchgate.net/figure/Laminate-type-and-stacking-sequence-of-laminates_tbl1_283495724, 15/08/2020)

Per tant la distribució del filament de fibra de carboni queda de la següent forma, tal com mostra la taula 4 a continuació:

Material	Thickness	Orientation Angle	Integration Points	Ply Name
NYLON6	0.125	0	3	Ply-1
CFRP	0.125	90	3	Ply-2
CFRP	0.125	45	3	Ply-3
CFRP	0.125	-45	3	Ply-4
CFRP	0.125	0	3	Ply-5
CFRP	0.125	0	3	Ply-6
CFRP	0.125	-45	3	Ply-7
CFRP	0.125	45	3	Ply-8
CFRP	0.125	90	3	Ply-9
NYLON6	0.125	0	3	Ply-10

Taula 4. Distribució, gruix, material i orientació de les capes del cas isotròpic.

Tal com es pot veure, la primera i la última capa són exclusivament de niló tal i com s'ha comentat en apartats anteriors. Les altres 8 capes intermèdies presenten una ordenació simètrica de la direcció de la fibra respecte el punt mig de la peça.

La columna "Integration points" indica la quantitat de punts que es prenen a cada element per realitzar el càlcul d'integració numèric. S'agafa el valor de 3 que és suficient per aquest càlcul.³

També s'afegirà el càlcul de dos variacions d'aquest cas que són interessants per la comparació dels resultats. Un serà el cas de la proveta sense cap reforç de carboni, és a dir, tota fabricada de niló. L'altre cas és la proveta amb totes les 8 capes de fibra orientades isotròpicament a 0 graus.

La disposició de la fibra en les capes orientades a 0° seria com la que es mostra en la figura 20 a continuació.

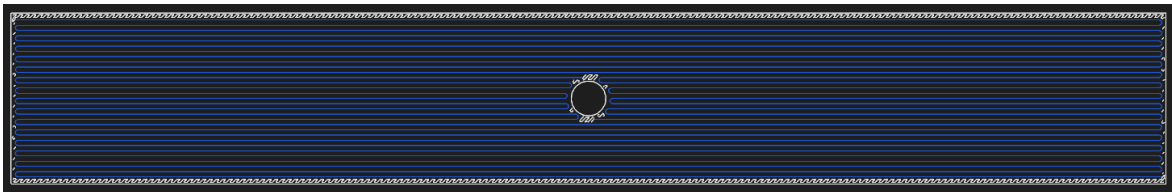


Figura 20. Disposició de la fibra d'una capa a 0°.

6.3. Cas concèntric

El següent cas que es simula en aquest projecte és el cas concèntric. Aquest introdueix una sèrie de canvis significatius respecte el cas anterior.

Primerament s'eliminen les orientacions de fibra variants entre capes. Tant en aquest cas com en el següent les 8 capes intermèdies de la proveta són completament iguals entre elles.

La principal característica d'aquest cas és que incorpora orientacions locals dels elements de les concentricitats al voltant del forat. Aquestes orientacions venen establertes segons la posició de cada element respecte el centre del forat. S'ha pres com a referència el centre de masses de cada element que s'ha d'orientar. Seguidament es calcula l'angle que s'ha de girar l'eix de coordenades X local de l'element, tenint en compte que aquest ha de formar sempre un angle de 90° respecte la línia de radi que uneix el centre de masses de l'element i el centre del forat.

Per veure el càlcul detallat, mirar l'annex A.2, en l'script de Python.

En la següent figura 21 es mostren com queden les orientacions concèntriques al voltant del forat considerant que es tenen 6 anells de fibra de carboni al voltant d'aquest, per tant totes les 12 concentricitats estan orientades.

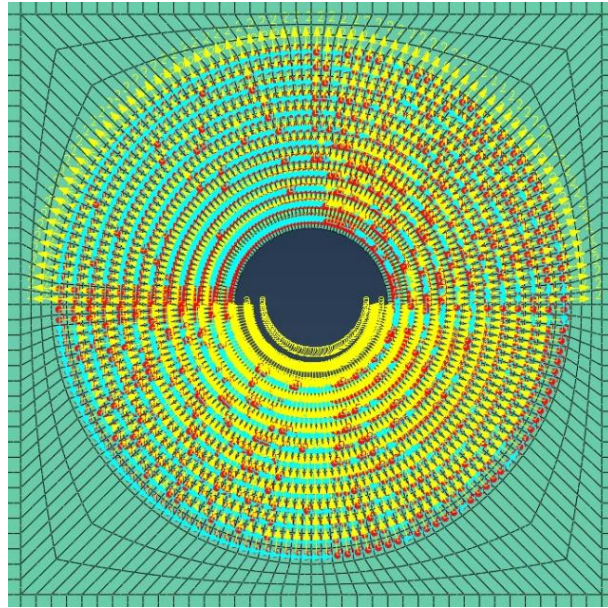


Figura 21. Orientacions locals dels elements concèntrics al forat, considerant 6 concentricitats de fibra de carboni al voltant d'aquest.

Si es mira de més a prop aquestes orientacions en la figura 22 següent, s'observa que la meitat superior dels elements tenen una orientació horària del seu eix local 1 (color blau) i la meitat inferior dels elements tenen una orientació antihorària. Aquesta disposició ve donada pel sentit en què s'aplica el desplaçament a tracció de la proveta, ja que s'intenta que els elements que es troben a 90° i a 270° tinguin una orientació paral·lela i amb la mateixa direcció que el desplaçament. Aquest fet no és rellevant tampoc, ja que les fibres es comportaran igual tant si són estirades per un costat o l'altre de la proveta.

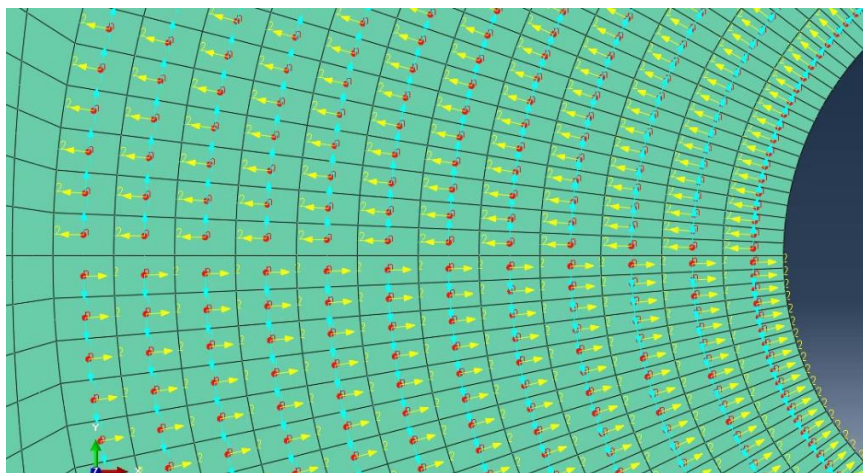


Figura 22. Imatge ampliada de les orientacions locals de les concentricitats, on es pot apreciar la direcció local de l'eix 1 (blau) i 2 (groc) de cada element.

Una altre possibilitat que s'inclou dins d'aquest cas, ja que la permet dur a terme el programa d'impressió, són els reforços amb fibra de les vores de la proveta. Aquesta possibilitat introdueix la necessitat d'orientar els elements exteriors de tot el contorn. Aquest reforç del contorn funciona igual que les concentricitats del forat, per cada passada del filament de fibra de carboni, s'han d'orientar dues fileres d'elements. A més va lligat amb el nombre de concentricitats que es tenen en el forat, és a dir si es fan 5 concentricitats de fibra al voltant del forat, també hi haurà 5 passades de fibra a les vores de la proveta. La figura 23 següent en mostra la disposició.

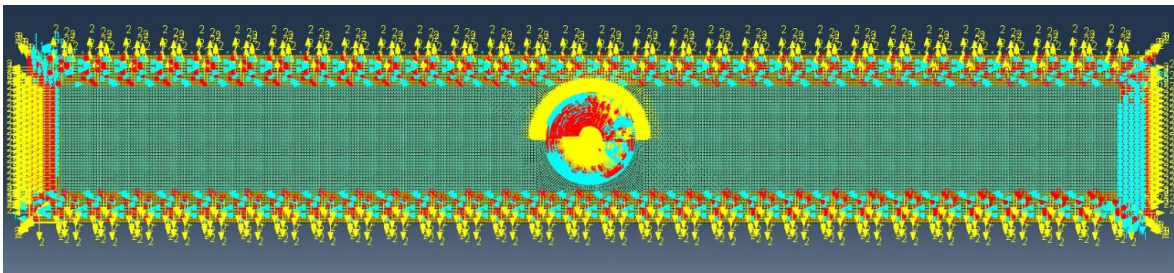


Figura 23. Disposició de les orientacions concèntriques i laterals de la proveta.

La orientació d'aquests elements, tal com es mostra en la figura 24 següent de la cantonada superior esquerra, està formada per una orientació horària. És a dir els elements de la part superior i inferior de la proveta tenen una orientació de 0 i 180 graus respectivament, mentre que una orientació a 90 i 270 graus pels laterals esquerra i dret respectivament. Els elements de les cantonades s'orienten a 45, 135, 225 o 315 graus segons on es trobin per tal de mantenir el sentit de gir en concordança.

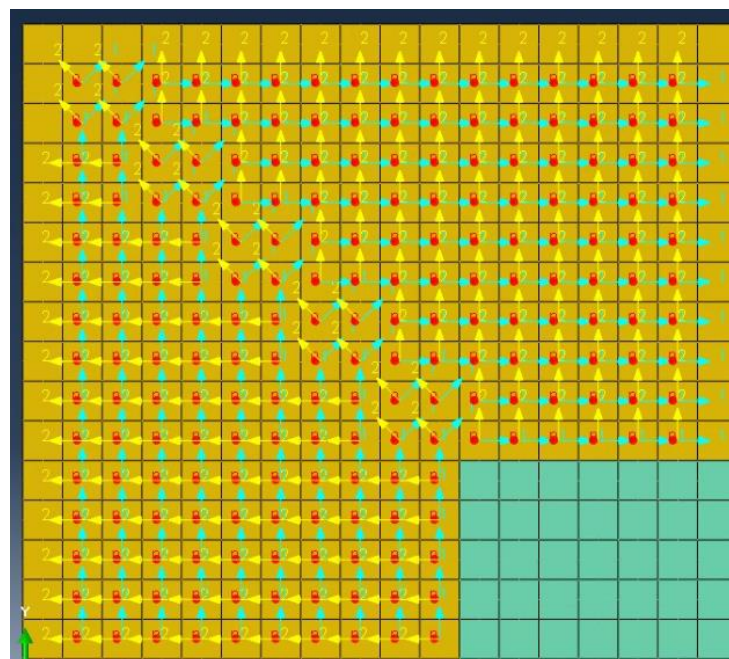


Figura 24. Orientació local dels elements de la cantonada superior esquerra de la proveta considerant 5 concentricitats.

Tal com es pot veure, hi ha 10 files d'elements orientades, això vol dir que s'estan considerant 5 concentricitats de filament. Aquest cas és el màxim de concentricitats que es poden tenir al voltant del forat afegint els reforços de les vores, segons el programa d'impressió. És a dir, si es volen 6 concentricitats al voltant del forat mantenint el reforç de les vores, el programa el que farà serà fer 6 passades de fibra al contorn, però les concentricitats de fibra al voltant del forat es mantindran en 5 que és el màxim que permet.

Per aquest motiu no es farà la simulació del cas de 6 concentricitats al voltant del forat afegint el reforç de les vores de la peça.

Es farà el càlcul d'aquest cas en diversos escenaris possibles:

- Des de 6 anells concèntrics fins a 2, és a dir 5 simulacions.
- Des de 5 anells concèntrics + reforç del contorn fins a 2 + reforç de contorn, és a dir 4 simulacions més.

6.4. Cas mixt

L'últim cas que es simularà serà el cas mixt. Aquest cas tal com s'ha explicat en l'apartat que se'n definien les característiques a partir del programa d'impressió, introdueix una continuació de la fibra lineal que envolta la proveta amb la concèntrica al voltant del forat. Amb l'Eiger s'ha explicat que s'ha d'imprimir la peça dividida en dues meitats, i que s'uneixen solapant-les durant la impressió. Aquí per executar la seva simulació, es seguirà considerant com una peça entera.

Per tal de realitzar les orientacions dels elements, s'ha de tenir en compte que cada meitat de la peça és com si tingués un contorn propi. Per aquest motiu, hi ha una distribució de la fibra en tot el contorn superior en direcció antihorària mentre que en el contorn inferior segueix una orientació horària, com es mostra en la figura 25 a continuació.

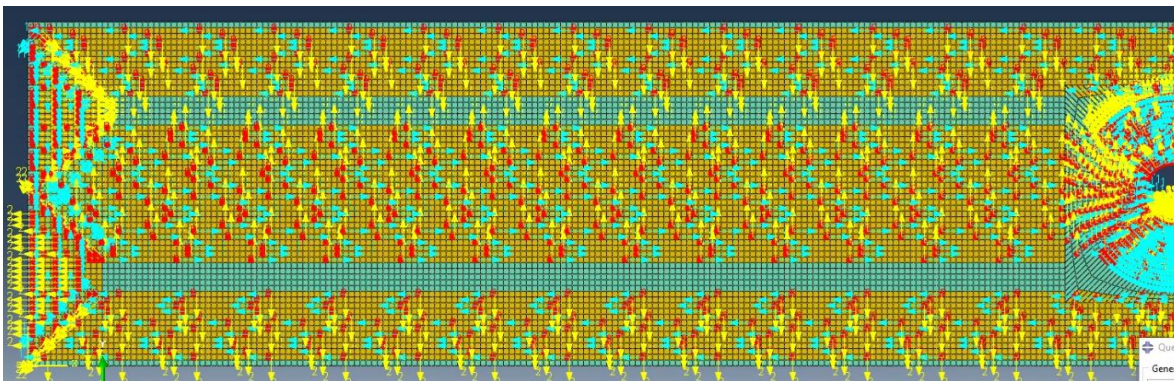


Figura 25. Orientació dels elements del contorn de la proveta i de la zona central considerant el cas de 6 concentricitats.

Els elements del centre de la proveta estan tots orientats a 0 graus, mentre que els de la part superior i inferior ho estan a 180. Els elements dels laterals i les cantonades depenent de la seva localització i el sentit de gir que han de mantenir tenen una orientació de 90 o 270 graus els primers i 45, 135, 225 i 315 els segons. En la figura 26 següent es mostren aquestes orientacions.

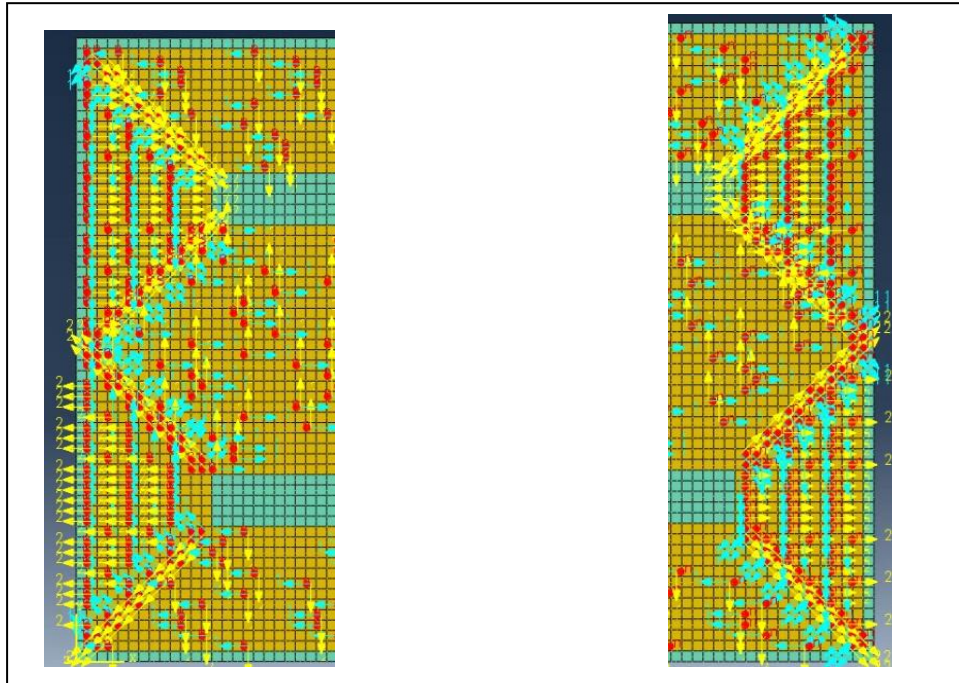


Figura 26. Vista ampliada de les orientacions dels elements dels laterals esquerra i dret de la proveta.

Tal hi com s'ha comentat en l'apartat anterior, el sentit de la orientació dels elements és indiferent tant si estan en la posició actual de l'afigura com girats 180°, ja que el comportament és el mateix tant si s'aplica el desplaçament per un costat o altre de la proveta. També es manté la característica d'afegir el mateix nombre de contorns exteriors que de concentricitats al voltant del forat. Per tant en aquest cas que és el de 6 concentricitats, es tenen 12 fileres d'elements orientades.

Pel que fa a la zona del forat i el seu marc, les orientacions dels elements són les següents mostrats en la figura 27.

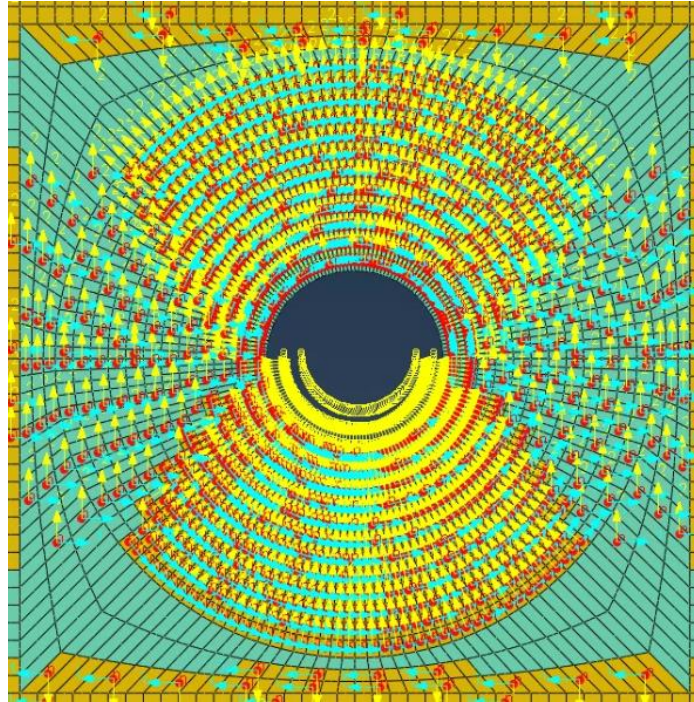


Figura 27. Distribució de les orientacions dels elements en el marc del forat i les concentrícitats.

En la figura 28 següent es compara la orientació donada als elements amb la disposició del filament de fibra que ofereix el programa d'impressió.

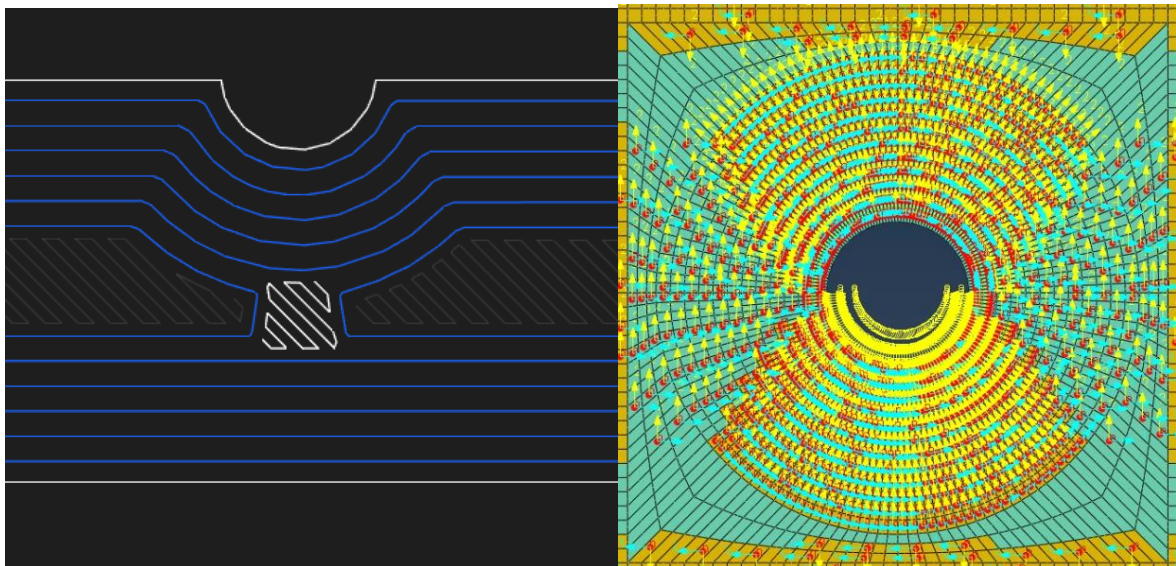


Figura 28. Comparació de les orientacions dels elements del contorn del forat respecte la disposició del filament de fibra que proposa el programa d'impressió Eiger.

S'observa que en aquest cas no tots els elements de les concentrícitats estan orientats seguint la geometria del forat. Si es compara amb la distribució que ofereix el programa d'impressió, es distingeix que el filament de carboni que forma la primera concentrícitat, ve totalment horitzontal fins que arriba en el contorn del forat i llavors és quan gira. Per

tant per la zona del centre de la proveta, els elements estan orientats horitzontalment, per simular la fibra que arriba fins a la seva concentricitat corresponent.

S'observa que l'Eiger genera una zona de niló al mig de la última concentricitat. Aquest factor s'ha omès en el càlcul d'elements finits ja que no s'ha considerat que sigui un element important pel càlcul.

També es pot veure que a la part superior i inferior del marc d'elements, alguns es troben orientats horitzontalment. Això és degut a que en aquest cas, el cas de 6 concentricitats, una petita franja dels elements del contorn que van orientats horitzontalment passarien per aquesta zona del marc. Per aquest motiu s'orienten aquests elements.

Es farà el càlcul d'aquest cas en sis escenaris possibles, de 6 concentricitats fins a 1 concentricitat. Aquest cas a diferència dels altres, el programa d'impressió si que permet fer només una concentricitat.

7. RESULTATS

En aquest apartat s'exposaran els resultats obtinguts del càlcul d'elements finits dels casos explicats en el capítol anterior.

Cal destacar que els resultats que es mostren són els de les capes intermèdies, les que contenen fibra de reforç. Però en el cas isotròpic que té 4 configuracions de capes diferents (90/45/-45/0), es donaran els resultats de les tensions en les quatre capes individualment.

Les tensions que es prenen per fer l'anàlisi dels resultats són les que es donen a la zona del forat i el seu marc, ja que és la part que interessa estudiar. Si en algun cas es donessin tensions més elevades a altres zones de la proveta, es comentaran, però aquestes no es tindran en compte ja que no són d'aplicació per l'estudi.

Un cop explicats els resultats individuals de cada cas, es compararan entre ells a través del càlcul de 3 ràtios.

Una comparació serà la ràtio de volum de filament de fibra de carboni utilitzat per imprimir cada cas respecte la tensió màxima experimentada en cada cas, tant en S11, S22 i S12. El valor de volum de filament el dona el programa d'impressió.

La segona comparació serà la ràtio del total de la força de reacció que apareix en els nodes restringits en direcció X (RF11) calculada en cada cas, respecte el volum de fibra utilitzat per saber quant d'aquest volum ajuda a reforçar el forat.

Finalment la tercera ràtio serà la relació entre la força de reacció i les tensions S11, S22 i S12, per veure el cas que ofereix una major rigidesa amb les menors tensions possibles.

Per tal d'obtenir la suma total de la força de reacció sotmesa en els nodes on s'apliquen les restriccions de desplaçament (set de nodes "n_bound"), es demanarà a través de la interfície gràfica de l'Abaqus que el programa faci la suma totes les forces de reacció (RF11) dels nodes d'aquest set i doni el resultat.

En aquest capítol es mostraran algunes figures dels resultats obtinguts amb la simulació, per tal d'acompanyar les explicacions. Les representacions de deformació de les figures següents no són reals, són estrictament visuals.

Per veure totes les figures de totes les simulacions s'ha d'anar a l'annex D on hi ha la recopilació dels resultats de cada cas.

7.1. Cas isotròpic

A continuació es mostren unes figures (29, 30 i 31) amb els resultats de tensió obtinguts en la simulació d'elements finits del cas isotròpic amb totes les capes orientades a 0° .

S11:

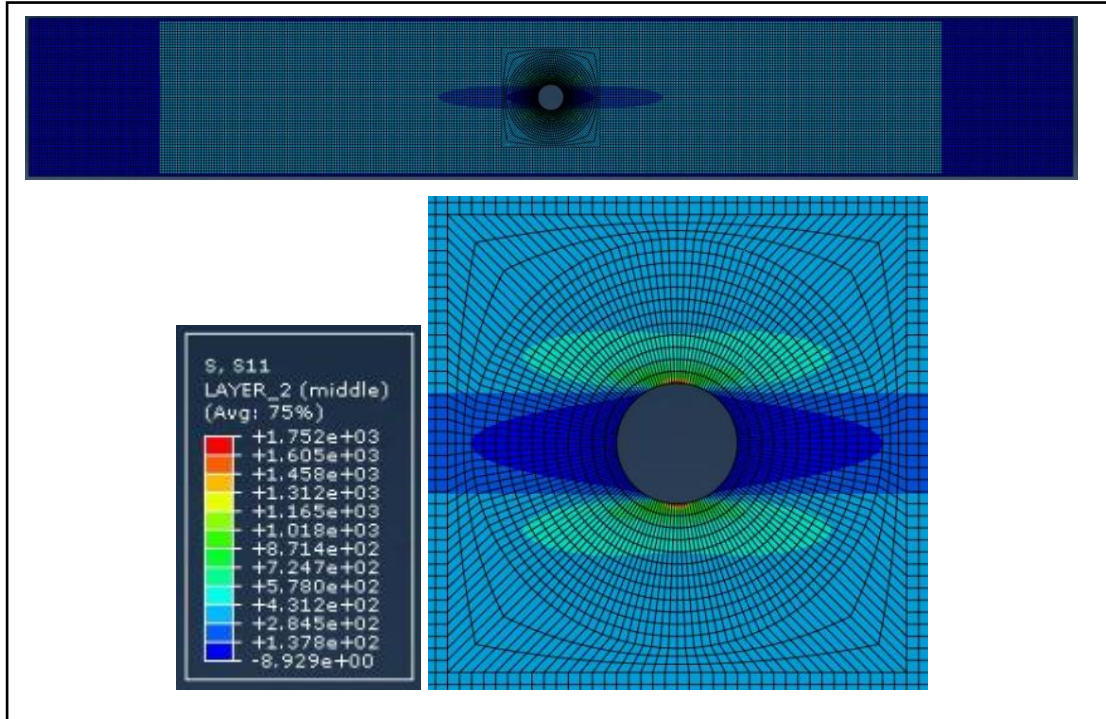


Figura 29. Resultats de la tensió S11 del cas isotròpic 0° .

S22:

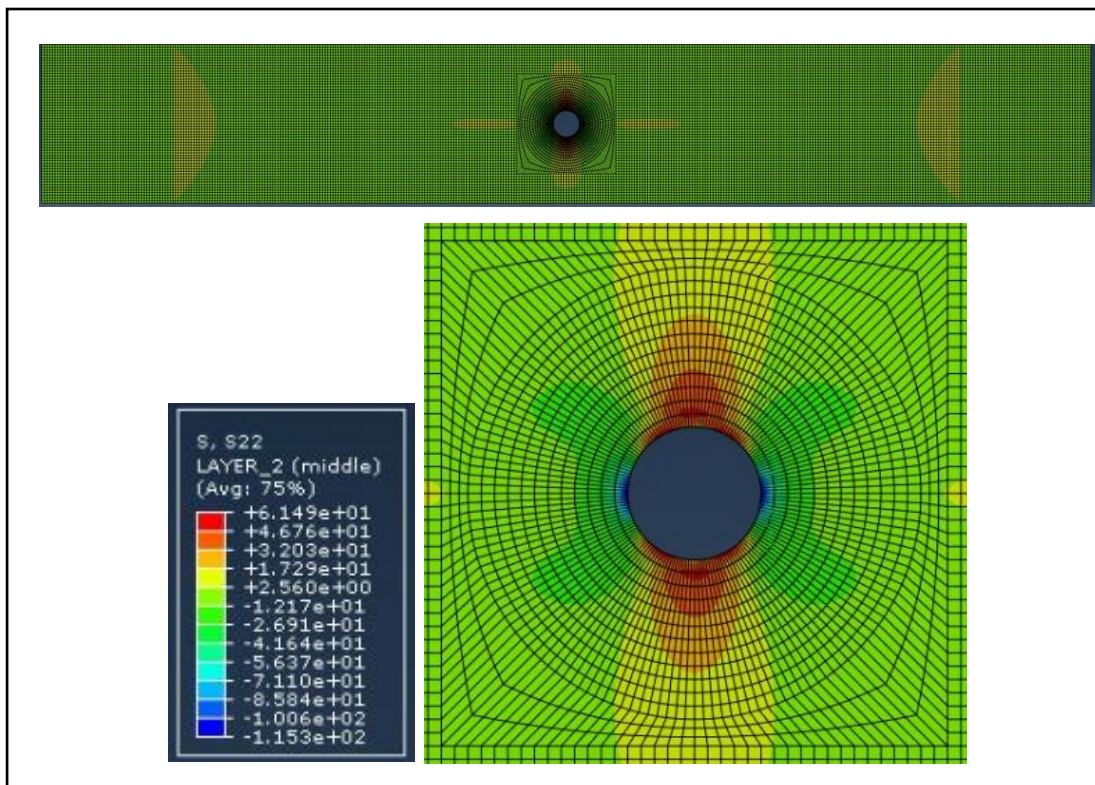


Figura 30. Resultats de la tensió S22 del cas isotròpic 0° .

S12:

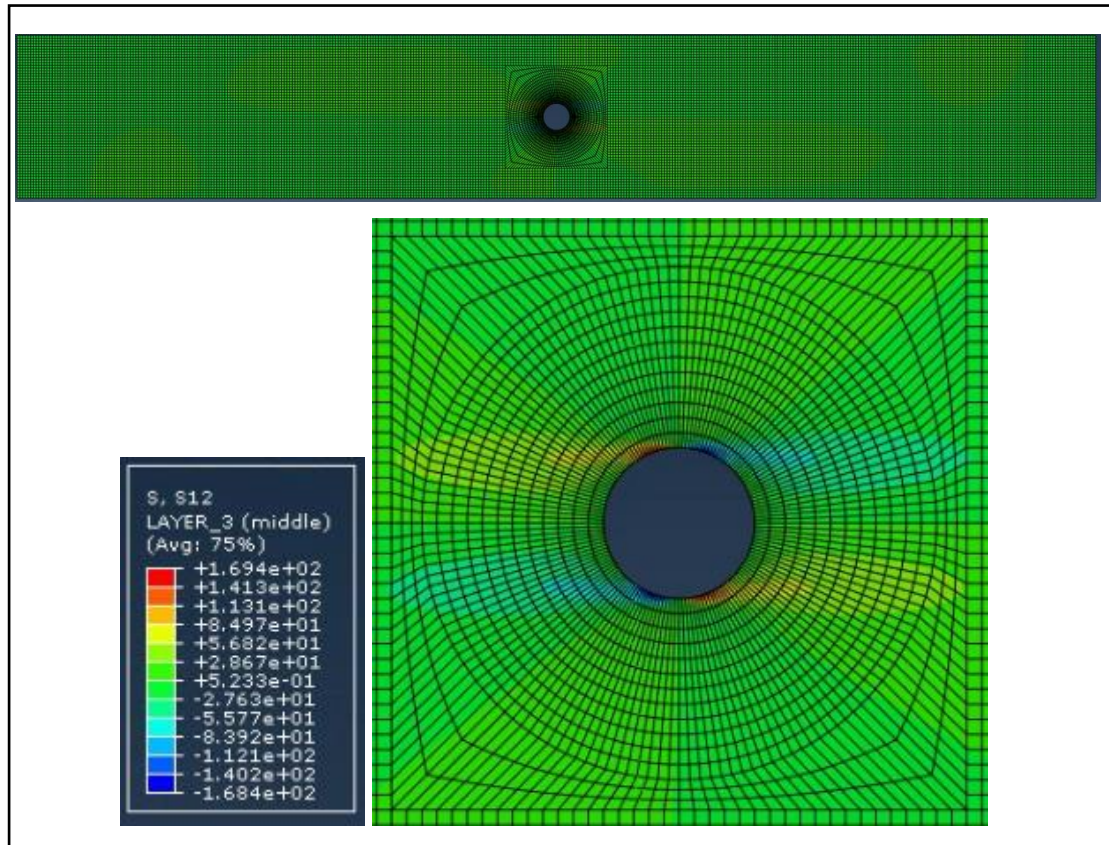


Figura 31. Resultats de la tensió S12 del cas isotròpic 0°.

Si observem les figures anteriors, en el cas de la tensió en direcció S11 s'observa una concentració de tensions molt elevada i focalitzada a la part superior i inferior del forat, la qual genera dos punts molt susceptibles a produir fractures del material i fallar.

Les tensions en la direcció S22 i el tallant disminueixen però tot i així formen punts on s'acumulen al voltant del llavi del forat.

Per altra banda es pot veure com la orientació a 0 graus de la fibra fa que en tota la resta de la proveta les tensions siguin molt més baixes que les que hi ha a la zona del forat.

A continuació s'adjunta una taula (5) amb el resum dels resultats obtinguts de les tres simulacions que engloba aquest cas. La peça està sotmesa a un desplaçament a tracció de 1mm. També hi figura el càlcul de les ràtios comentades anteriorment per tal de poder comparar els resultats.

CAS ISOTRÒPIC	Material i orientació de les capes					
	Niló	CFRP 0°	CFRP 90/45/-45/0			
Magnitud valorada	/	0	90	45	-45	0
S11 (MPa)	19,17	1752	99,44	697,4	693,6	1086
S22 (MPa)	3,35	61,49	111	77,1	78,57	21,88
S12 (MPa)	5,26	169,4	28,79	2,93	51,31	28,89
RF11 (N)	232,5	10075	4139			
VF (cm³)	0	5,17	5,13			
VN (cm³)	8,09	2,88	2,73			
S11/VF (MPa/cm³)	/	338,88	19,38	135,95	135,20	211,70
S22/VF (MPa/cm³)	/	11,89	21,64	15,03	15,32	4,27
S12/VF (MPa/cm³)	/	32,77	5,61	0,57	10,00	5,63
RF/VF (N/cm³)	/	1948,7427	806,8226121			
RF/S11 (N/MPa)	12,13	5,75	41,62	5,93	5,97	3,81
RF/S22 (N/MPa)	69,40	163,85	37,29	53,68	52,68	189,17
RF/S12 (N/MPa)	44,20	59,47	143,77	1412,63	80,67	143,27

Taula 5. Resum de resultats obtinguts de la simulació amb l'ABAQUS pel cas isotròpic

On:

RF = Reaction Force (Força de reacció); VN = Volum de niló; CFRP = Carbon Fiber Reinforced Polymer.

Es pot observar que en el cas de la proveta fabricada només de niló, no es pot calcular la ràtio tensió/VF ja que el volum de fibra de carboni és nul.

7.2. Cas concèntric

Tal com s'ha comentat, en aquest cas s'han dut a terme un total de 9 simulacions. Des de 6 a 2 concentricitats de fibra al voltant del forat, ja que el programa d'impressió no permet fer només una concentricitat sola, i des de 5 a 2 concentricitats al voltant del forat afegint el reforç del contorn.

A continuació es mostren les figures d'alguns els resultats obtinguts de les simulacions diferents que engloba el cas concèntric.

7.2.1. Anells concèntrics

Seguidament es mostren les figures (32, 33 i 34) dels resultats del cas de 6 concentricitats. Al final s'adjunta una taula amb el resum dels resultats dels 5 casos d'anells concèntrics.

S11 (6 concentricitats):

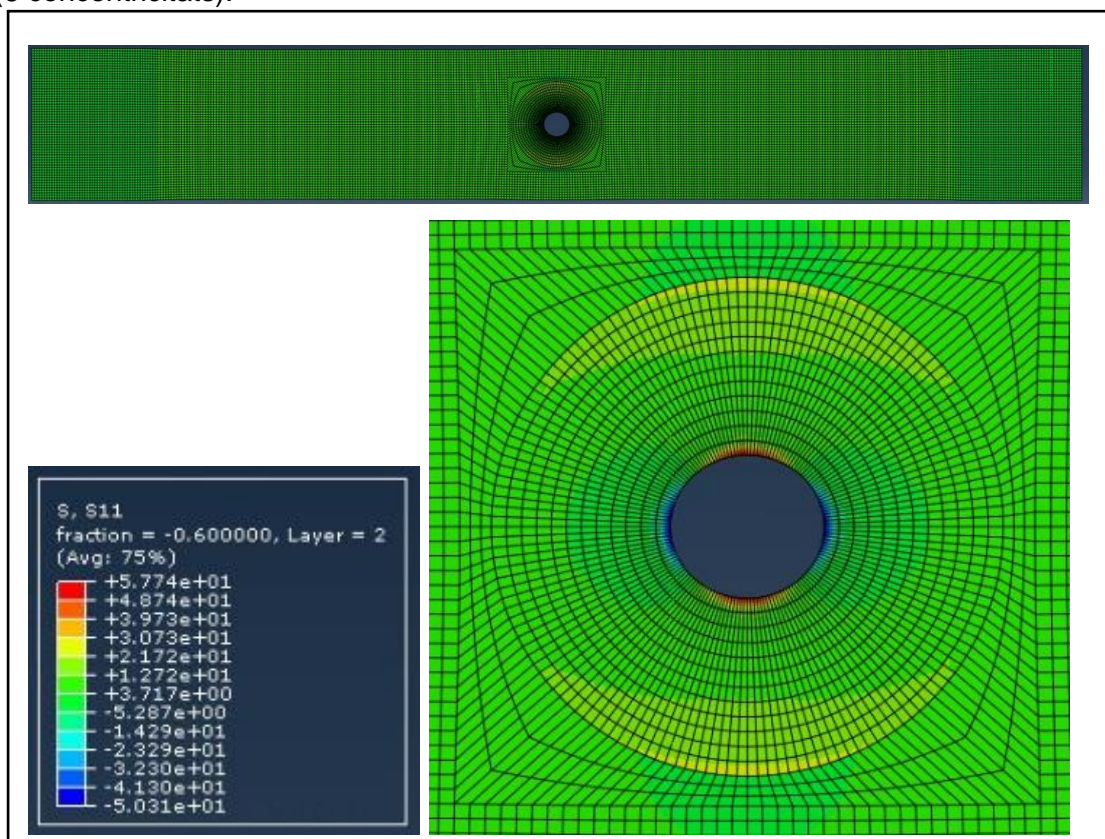


Figura 32. Resultats de la tensió S11 del cas amb 6 concentricitats

S22 (6 concentricitats):

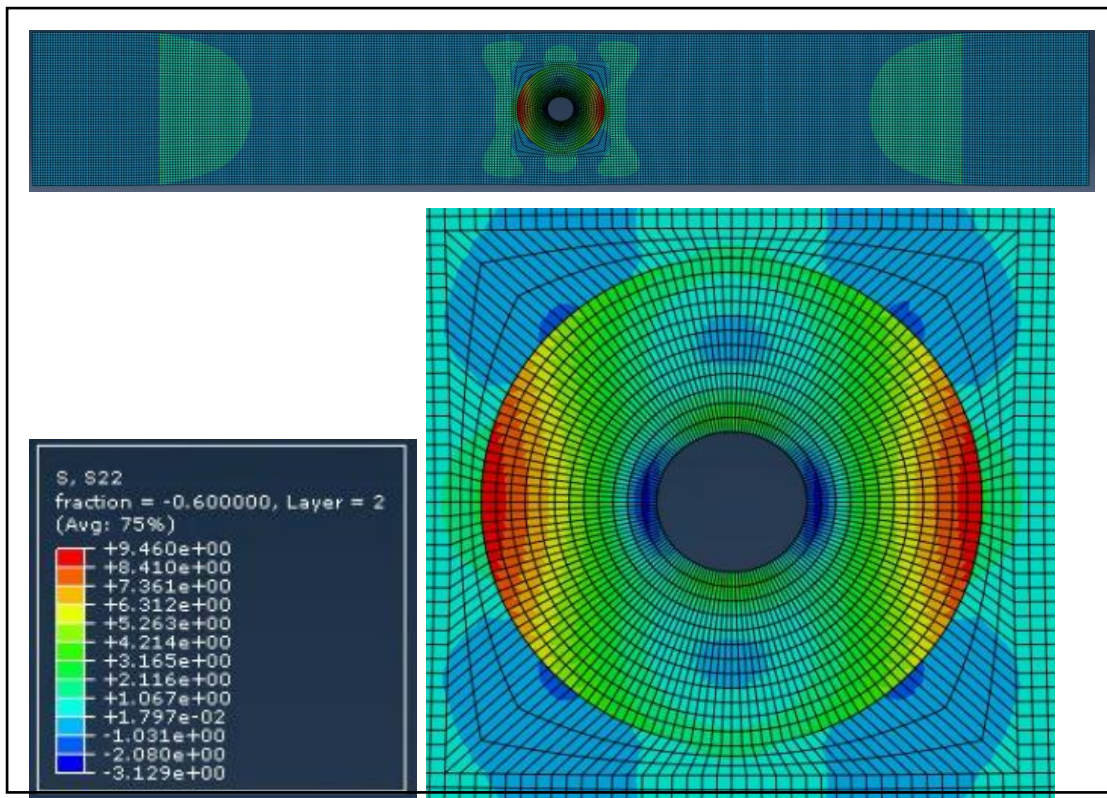


Figura 33. Resultats de la tensió S22 del cas amb 6 concentricitats

S12 (6 concentricitats):

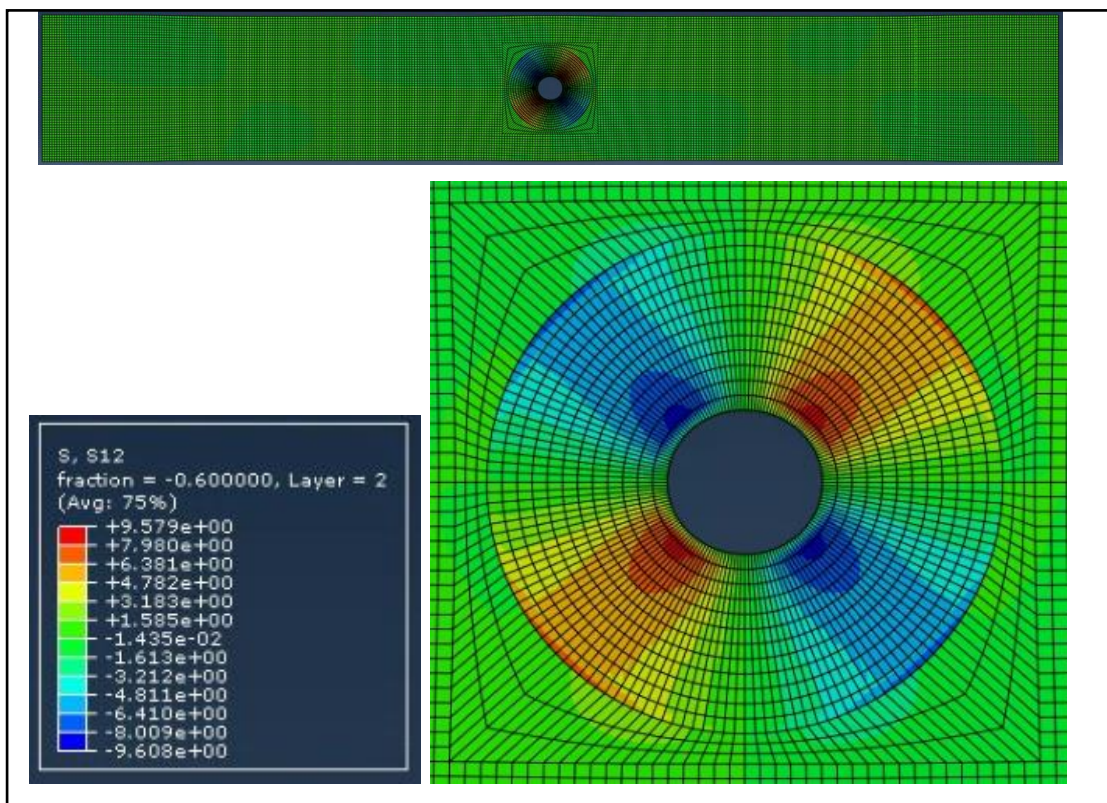


Figura 34. Resultats de la tensió S12 del cas amb 6 concentricitats

A continuació s'adjunta una taula (6) amb el resum dels resultats obtinguts de les simulacions concèntriques. La peça està sotmesa a un desplaçament a tracció de 1mm. També hi figura el càlcul de les ràtios per tal de poder comparar els resultats.

CAS CONCÈNTRIC	Quantitat de concentricitats de fibra				
Magnitud	6 conc.	5 conc.	4 conc.	3 conc.	2 conc.
S11 (MPa)	57,74	59,93	63,37	69,31	81,08
S22 (MPa)	9,46	9,38	9,22	8,91	8,16
S12 (MPa)	9,58	9,8	10,16	10,83	12,21
RF11 (N)	249	246	243	241	239
VF (cm³)	0,2	0,16	0,12	0,08	0,05
VN (cm³)	7,9	7,94	7,98	8,01	8,04
S11/VF (MPa/cm³)	288,70	374,56	528,08	866,38	1621,60
S22/VF (MPa/cm³)	47,30	58,63	76,83	111,38	163,20
S12/VF (MPa/cm³)	47,90	61,25	84,67	135,38	244,20
RF/VF (N/cm³)	1245	1537,5	2025	3012,5	4780
RF/S11 (N/MPa)	4,31	4,10	3,83	3,48	2,95
RF/S22 (N/MPa)	26,32	26,23	26,36	27,05	29,29
RF/S12 (N/MPa)	25,99	25,10	23,92	22,25	19,57

Taula 6. Resum de resultats obtinguts de la simulació amb l'ABAQUS pel cas concèntric

S'observa que el cas amb menys tensions és el que té més concentricitats, però la diferència és molt petita amb els altres casos. Això fa que la ràtio RF/VF surti més favorable al cas de 2 concentricitats, ja que la disminució del volum de fibra en aquest és més significativa que la diferència de tensions.

7.2.2. Anells concèntrics + reforç del contorn

Seguidament es mostren les figures (35, 36 i 37) dels resultats del cas de 5 concentricitats amb reforç del contorn. Al final s'adjunta una taula amb el resum dels resultats dels 4 casos d'anells concèntrics.

En el càlcul de la S11, es donen dues taules de tensions. Una és la taula de tensions globals de tota la proveta, i l'altra, la que té la tensió màxima assenyalada amb un requadre vermell, és la taula de tensions de la zona del forat només. Aquesta tensió assenyalada és la que s'utilitzarà per les comparacions, ja que és la que està sotmesa en la zona que ens interessa calcular. Les altres tensions de la proveta, encara que siguin superiors, no es consideraran.

S11: La tensió assenyalada és la màxima en la zona del forat.

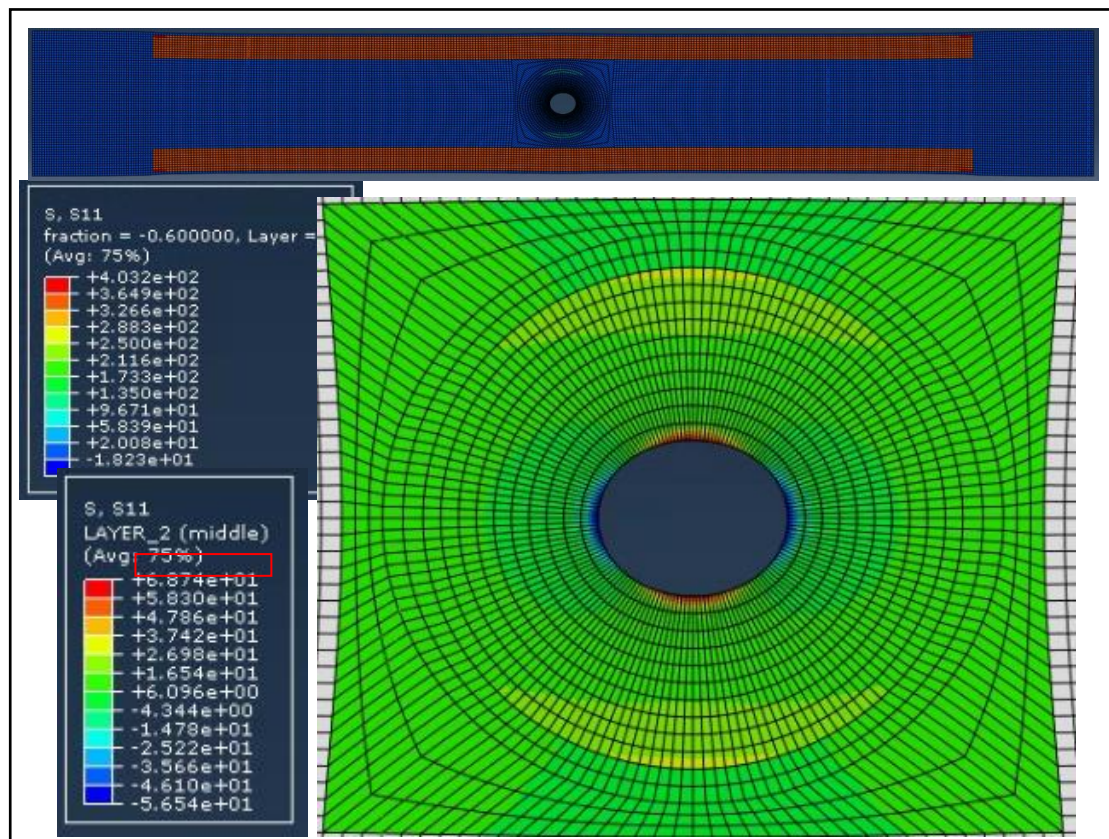


Figura 35. Resultats de la tensió S11 del cas amb 5 concentricitats + reforç

S22:

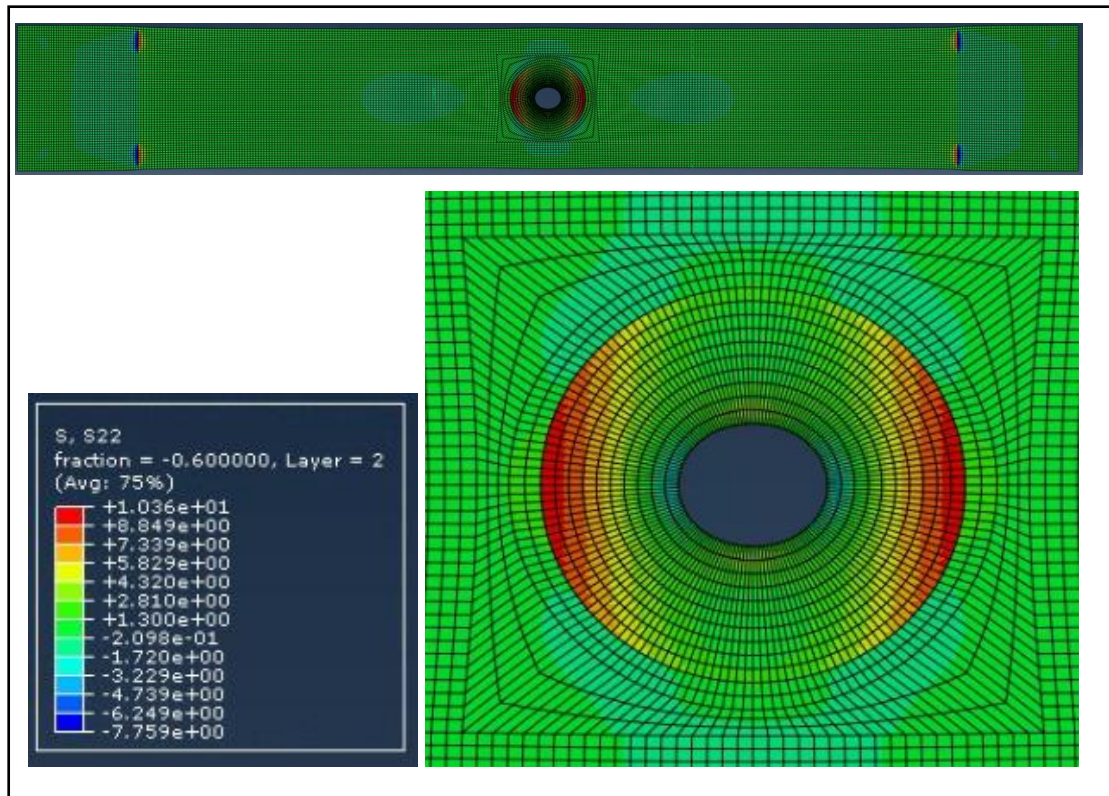


Figura 36. Resultats de la tensió S22 del cas amb 5 concentricitats + reforç

S12:

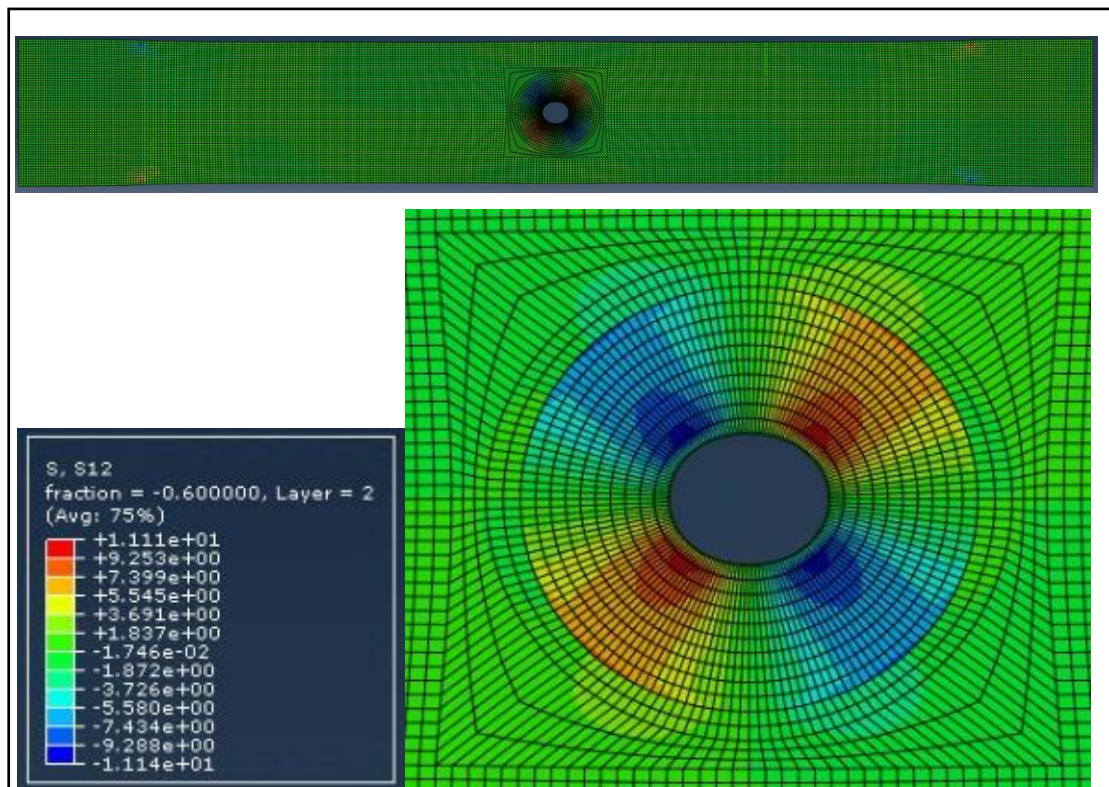


Figura 37. Resultats de la tensió S12 del cas amb 5 concentricitats + reforç

A continuació s'adjunta una taula (7) amb el resum dels resultats obtinguts de les simulacions concèntriques amb reforç.

CAS CONCÈNTRIC + REFORÇ	Quantitat de concentricitats de fibra i reforç del contorn			
	5 conc.	4 conc.	3 conc.	2 conc.
Magnitud				
S11 (MPa)	68,74	68,89	72,42	82,58
S22 (MPa)	10,36	9,84	9,27	8,59
S12 (MPa)	11,11	10,98	11,28	12,41
RF11 (N)	3746	3043	2340	1638
VF (cm³)	2,12	1,7	1,28	0,86
VN (cm³)	6,05	6,45	6,86	7,27
S11/VF (MPa/cm³)	32,42	40,52	56,58	96,02
S22/VF (MPa/cm³)	4,89	5,79	7,24	9,99
S12/VF (MPa/cm³)	5,24	6,46	8,81	14,43
RF/VF (N/cm³)	1766,98	1790,00	1828,13	1904,65
RF/S11 (N/MPa)	54,50	44,17	32,31	19,84
RF/S22 (N/MPa)	361,58	309,25	252,43	190,69
RF/S12 (N/MPa)	337,17	277,14	207,45	131,99

Taula 7. Resum de resultats obtinguts de la simulació amb l'ABAQUS pel cas concèntric amb reforç

En la taula es pot veure que els valors de tensions no varien gaire segons la quantitat de concentricitats al voltant del forat, però els valors de la força de reacció si que presenten una millora considerable a mesura que s'afegeixen concentricitats.

S'observen uns valors molt elevats en les ràtios de RF/tensió. Això indica que ofereix una elevada rigidesa a la vegada que està sotmès a tensions baixes.

7.3. Cas mixt

Seguidament es mostren les figures (38, 39 i 40) dels resultats del cas de 6 concentricitats mixt. Al final s'adjunta una taula amb el resum dels resultats de les 6 simulacions.

S11:

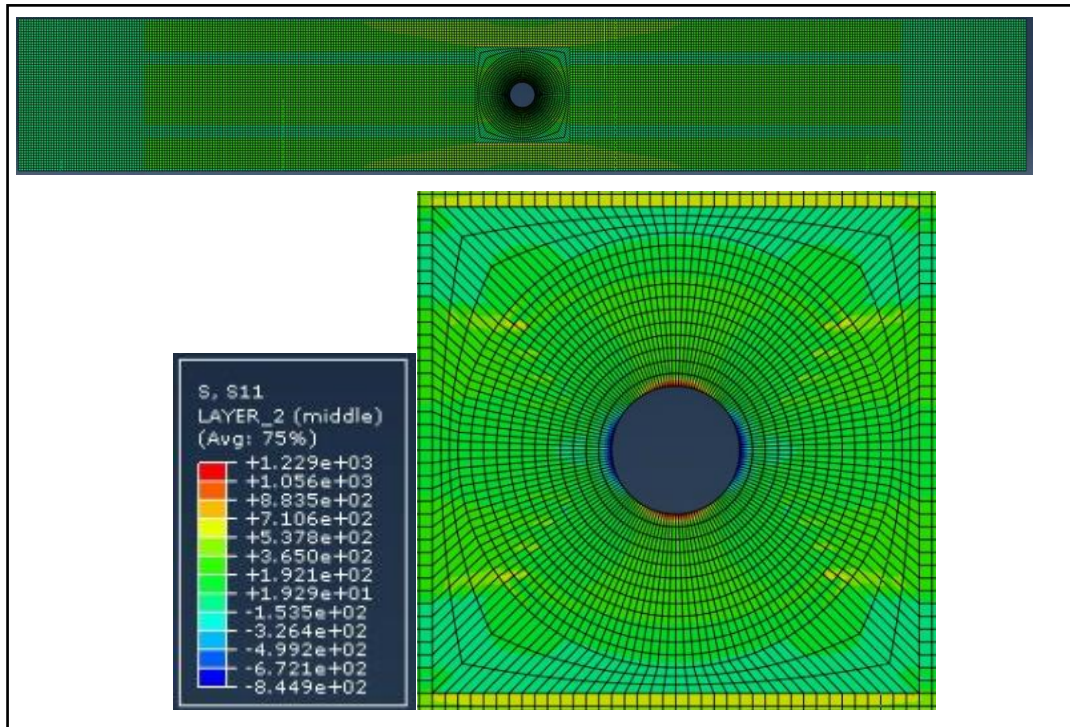


Figura 38. Resultats de la tensió S11 del cas mixt amb 6 concentricitats

S22:

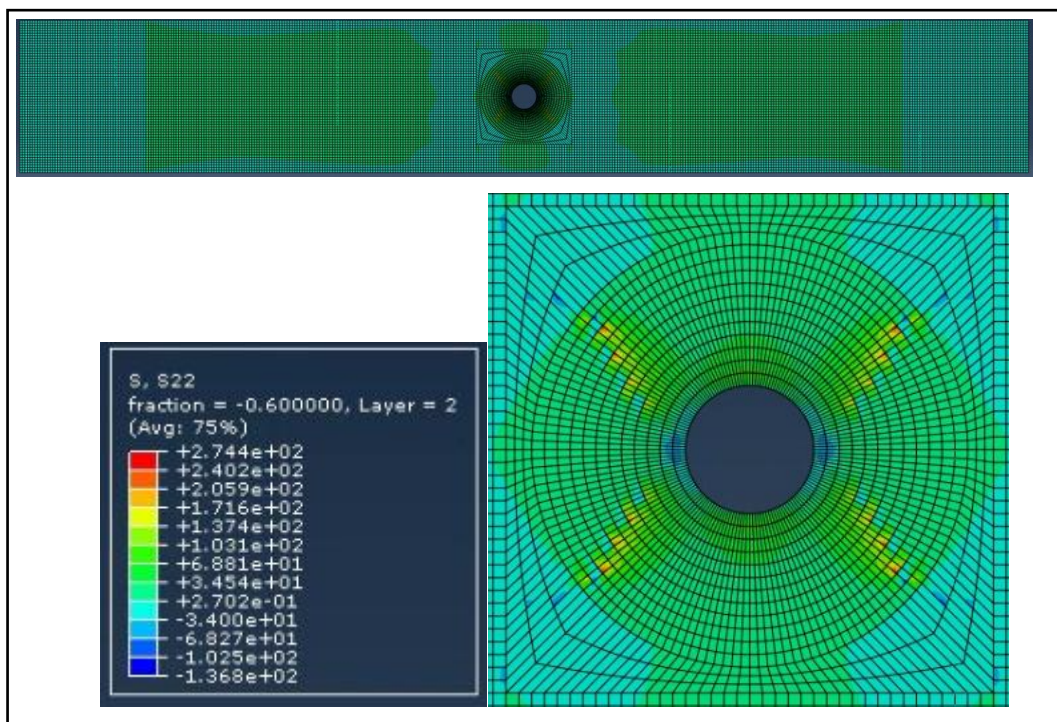


Figura 39. Resultats de la tensió S22 del cas mixt amb 6 concentricitats

S12:

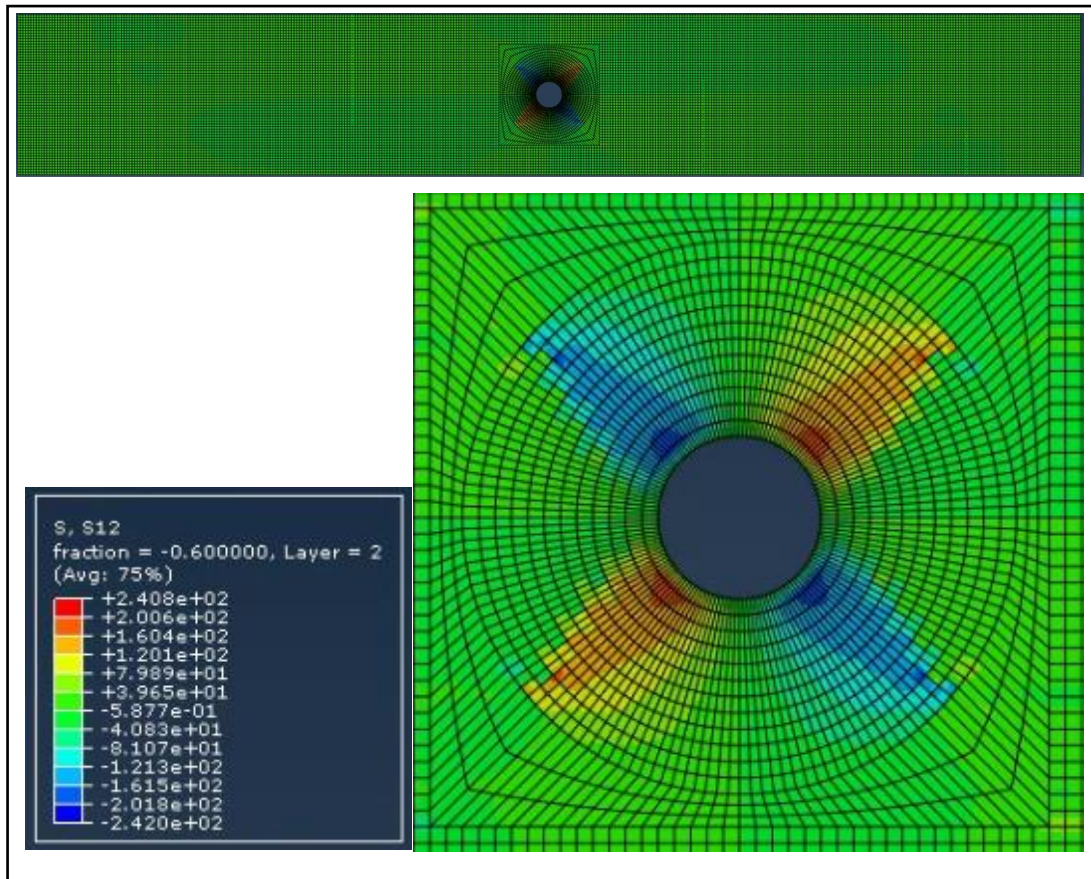


Figura 40. Resultats de la tensió S12 del cas mixt amb 6 concentricitats

Tant en la figura que mostra els resultats de la tensió S11 com en la de la S22, s'observen petites zones en les concentricitats on hi ha una elevada concentració de tensions. Aquests punts són on es produeix el canvi de direcció de la fibra, que passa d'estar orientada a 0° a estar concèntrica al forat. El fet de tenir un gir important en la trajectòria de la fibra en tant poc espai pot produir que la fibra en aquella zona al sotmetre's a un esforç, es trenqui. Tal i com passava en els "U turns" explicats en capítols anteriors.

A la següent pàgina s'adjunta una taula (8) amb el resum dels resultats obtinguts de les simulacions del cas mixt.

CAS MIXT	Quantitat de concentricitats de fibra					
	6 conc.	5 conc.	4 conc.	3 conc.	2 conc.	1 conc.
Magnitud						
S11 (MPa)	1229	1170	1140	1124	1127	777,5
S22 (MPa)	274,4	245	304,6	324	318,8	206,9
S12 (MPa)	240,8	211,1	267,7	259,3	239,3	146,4
RF11 (N)	7118,3	6129,4	4921,5	3729,55	2569,4	1415
VF (cm³)	4,36	3,66	2,96	2,24	1,5	0,76
VN (cm³)	3,96	4,64	5,32	6,02	6,74	7,46
S11/VF (MPa/cm3)	281,88	319,67	385,14	501,79	751,33	1023,03
S22/VF (MPa/cm3)	62,94	66,94	102,91	144,64	212,53	272,24
S12/VF (MPa/cm3)	55,23	57,68	90,44	115,76	159,53	192,63
RF/VF (N/cm3)	1632,64	1674,70	1662,67	1664,98	1712,93	1861,84
RF/S11 (N/MPa)	5,79	5,24	4,32	3,32	2,28	1,82
RF/S22 (N/MPa)	25,94	25,02	16,16	11,51	8,06	6,84
RF/S12 (N/MPa)	29,56	29,04	18,38	14,38	10,74	9,67

Taula 8. Resum de resultats obtinguts de la simulació amb l'ABAQUS pel cas mixt

Observant els valors de la taula es pot veure que aquest cas està sotmès a elevats valors de tensions. La força de reacció també és molt elevada, sobretot en els casos amb més concentricitats. Tot i així, l'elevada rigidesa és poc influent en la disminució de les tensions de la peça, per això no presenta una ràtio de RF/tensió gaire prometedora.

7.4. Anàlisi dels resultats

Una vegada obtinguts els resultats, es representen a continuació mitjançant una sèrie de gràfics per tal de poder-los analitzar i comparar més fàcilment.

En l'estudi dels resultats no es té en compte el comportament del material fins al trencament, només es considera un comportament elàstic. Per les simulacions fetes, en molts casos, el material trencaria abans d'arribar als valors indicats.

7.4.1. Tensions

A continuació es mostren les gràfiques de les tensions en els diferents casos. Per cada cas de tensions s'adjunten dues gràfiques. Una engloba les tensions del cas isotròpic (proveta de niló, proveta amb capes a 0° i proveta amb capes orientades), i l'altre engloba les tensions dels casos que tenen concentricitats de fibra al voltant del forat (cas concèntric, concèntric + reforç i mixt).

S11: Les figures 41 i 42 mostren les gràfiques de les tensions en la direcció S11.

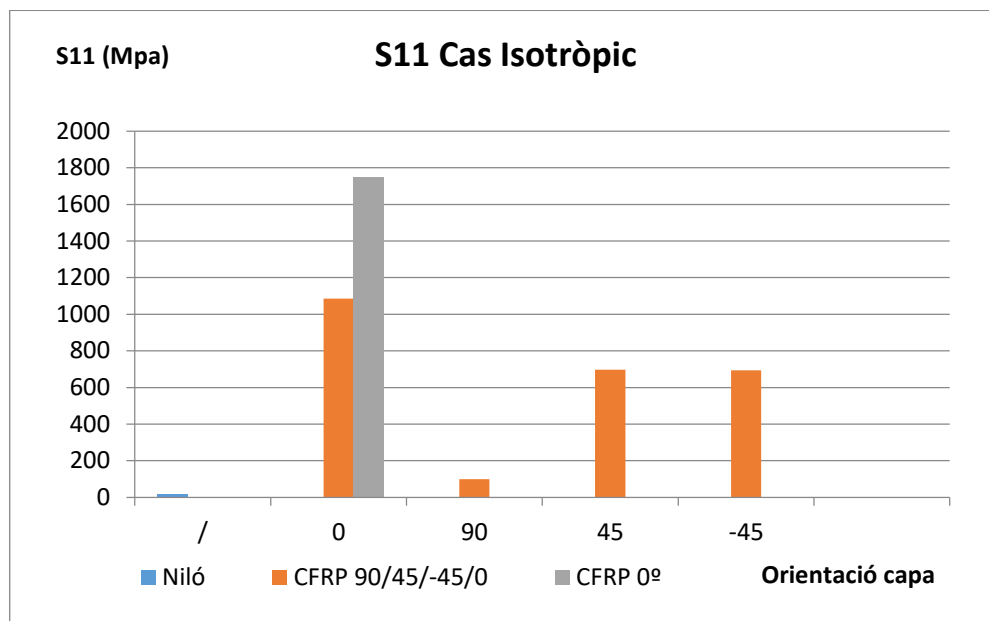


Figura 41. Tensions S11 cas isotròpic

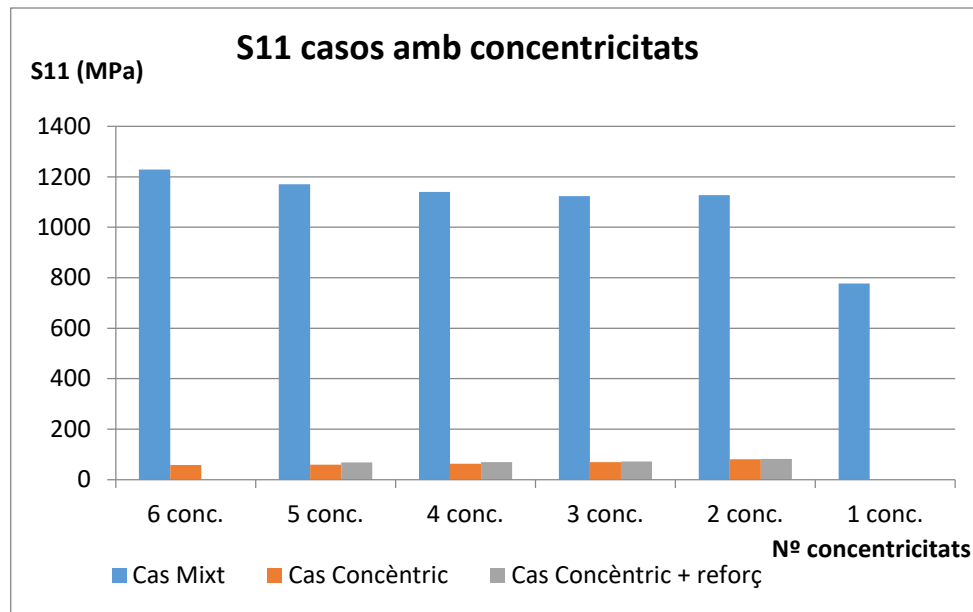


Figura 42. Tensions S11 casos amb concentricitats

De les gràfiques s'observa que el cas isotròpic amb les fibres a 0° és el que està sotmès a unes tensions més elevades, juntament amb les capes orientades a 0° del cas isotròpic amb orientacions. El niló presenta una tensió màxima molt baixa degut a la seva poca rigidesa comparat amb els casos amb reforç de fibra.

El fet de tenir la fibra orientada a 90° , fa que les tensions en aquesta capa siguin molt petites degut a la poca resistència d'aquestes respecte un esforç transversal a la seva orientació.

En la figura 42, es mostra com el cas mixt també ofereix valors considerables de tensions en totes les variacions de concentricitats, molt per sobre dels casos concèntrics, però sense arribar als valors del cas isotròpic amb les fibres a 0° .

La diferència entre el cas únicament concèntric i el cas concèntric reforçat és pràcticament nul·la en termes de tensió.

S22: Les figures 43 i 44 mostren les gràfiques de les tensions en la direcció S22.

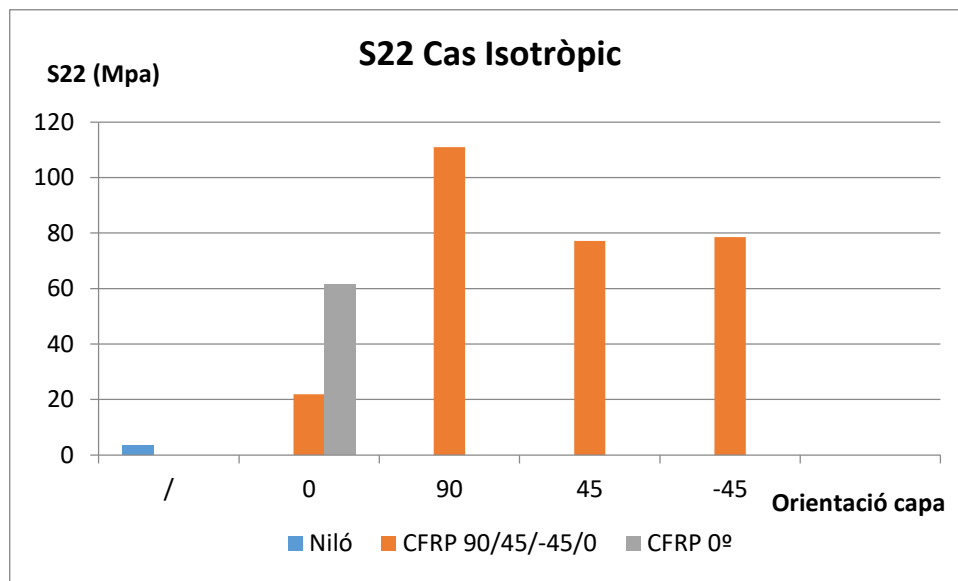


Figura 43. Tensions S22 cas isotròpic

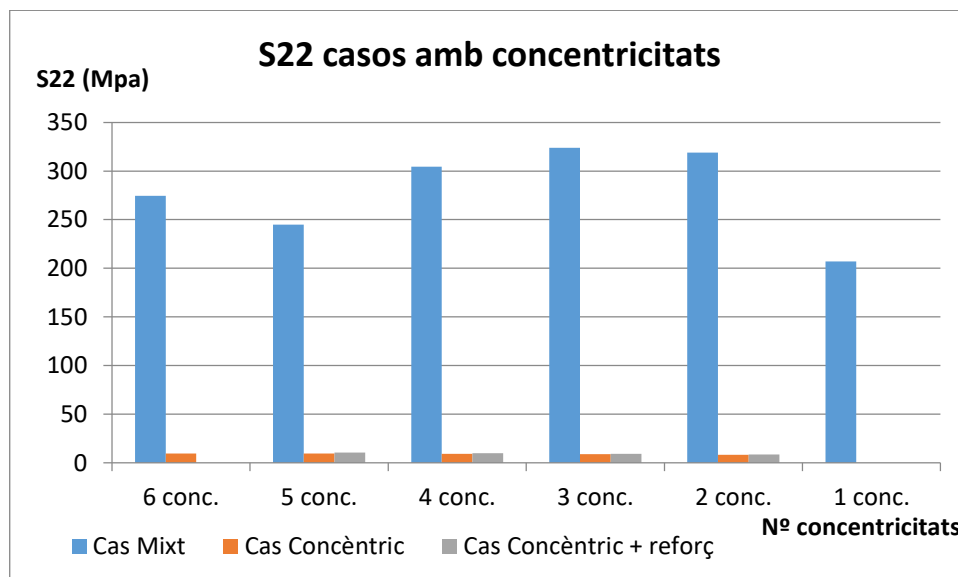


Figura 44. Tensions S22 casos amb concentricitats

Pel que fa els resultats de la tensió S22, el cas mixt segueix destacant per sobre tots els altres amb diferència al llarg de totes les proves amb diferents concentricitats. El cas isotròpic amb capes orientades està sotmès a majors tensions respecte el normal. Gràcies a les seves capes orientades a 45° i -45° però sobretot destaca la de 90° on les fibres orientades en la direcció de les tensions aguanten els esforços més grans.

El cas concèntric i el reforçat segueixen amb unes tensions molt baixes i amb poca diferència l'un de l'altre.

S12: Les figures 45 i 46 mostren les gràfiques de les tensions en la direcció S12.

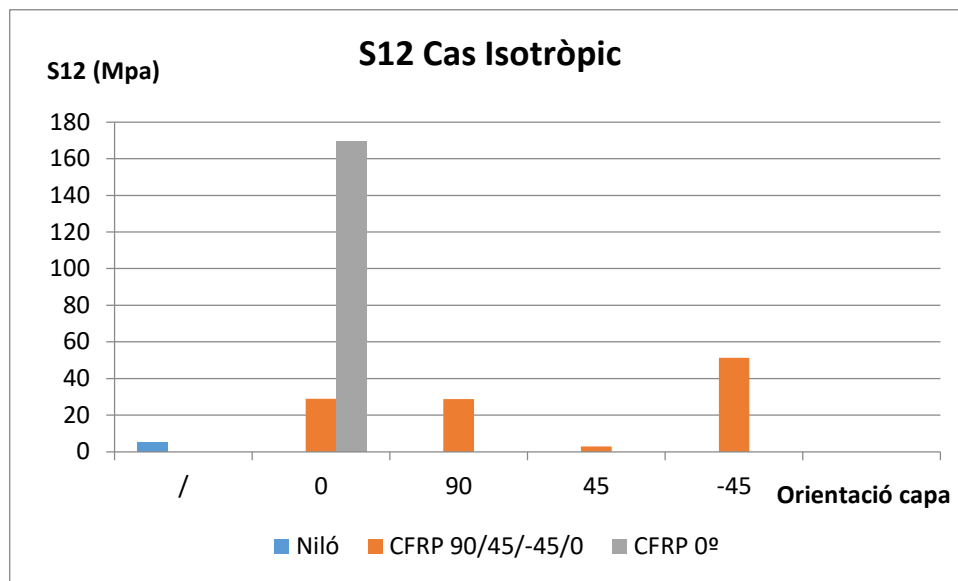


Figura 45. Tensions S12 cas isotròpic

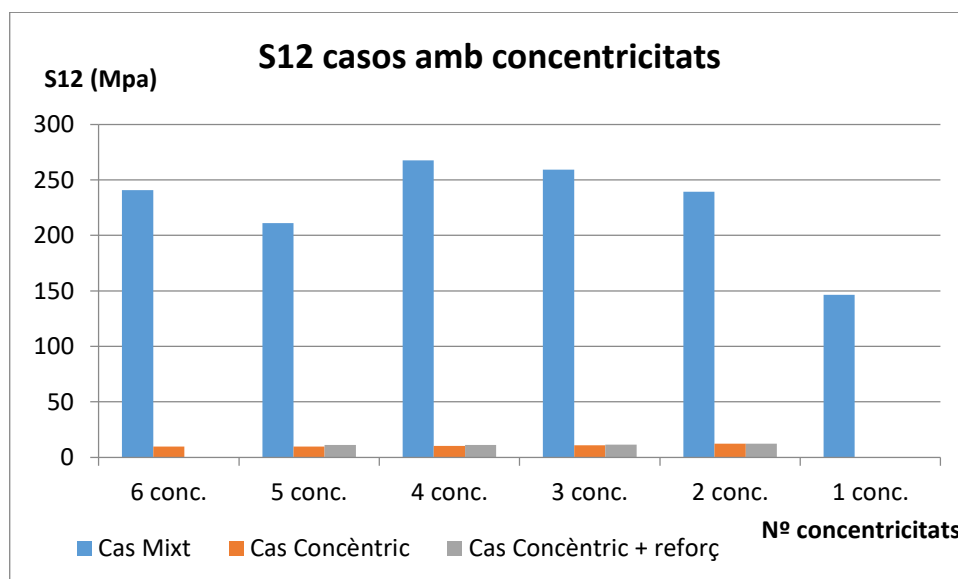


Figura 46. Tensions S12 casos amb concentricitats

El cas isotròpic sense orientació torna a destacar per les seves elevades tensions però sense arribar als valors del cas mixt el qual torna a presentar uns valors màxims molt superiors a la resta de casos.

L'altre cas amb les capes orientades s'observa com les capes amb orientacions a -45 graus tenen unes tensions molt superiors a les que tenen una orientació de 45 graus, degut a que la orientació de la tensió és favorable a la primera i perpendicular a la segona. Mentre que això causa que les capes a 0° i 90° presentin uns valors similars..

Pel que fa el cas concèntric i el reforçat segueixen amb unes tensions pràcticament similars.

7.4.2. Ràtio Tensió/VF

A continuació s'adjunten les gràfiques 47, 48 i 49 on es mostren les ràtios de tensió respecte el volum de fibra. També s'hi afegeix la figura 50 que mostra la gràfica que indica la força de reacció total calculada de cada cas per tal de poder-ho comparar amb els resultats obtinguts.

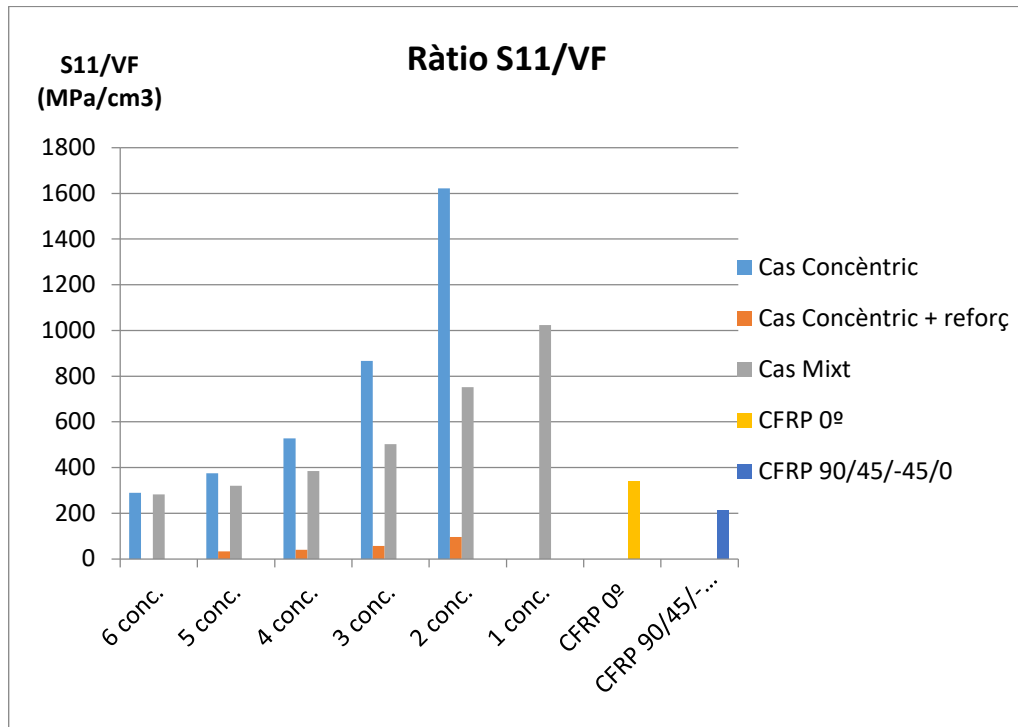


Figura 47. Gràfic ràtio S11/VF

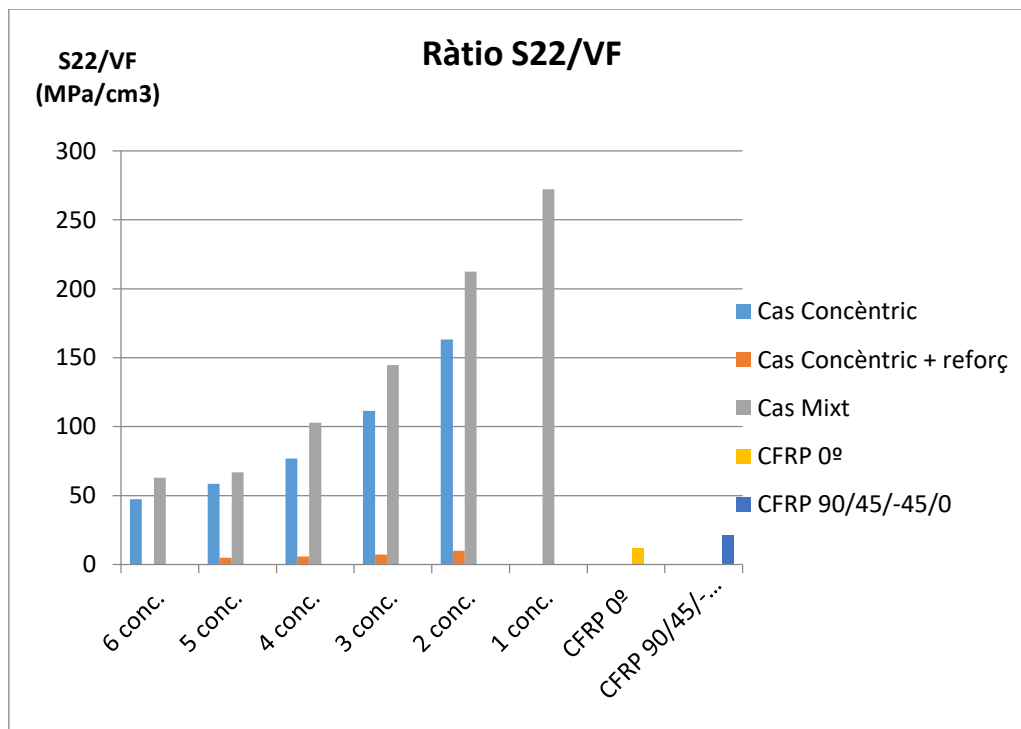


Figura 48. Gràfic ràtio S22/VF

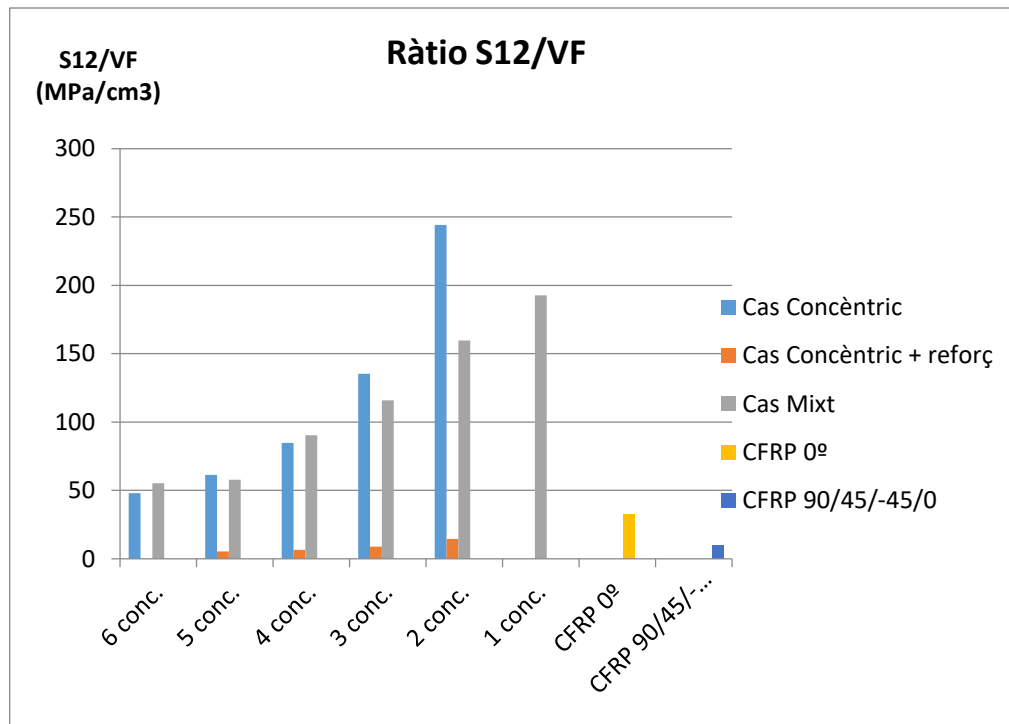


Figura 49. Gràfic ràtio S12/VF

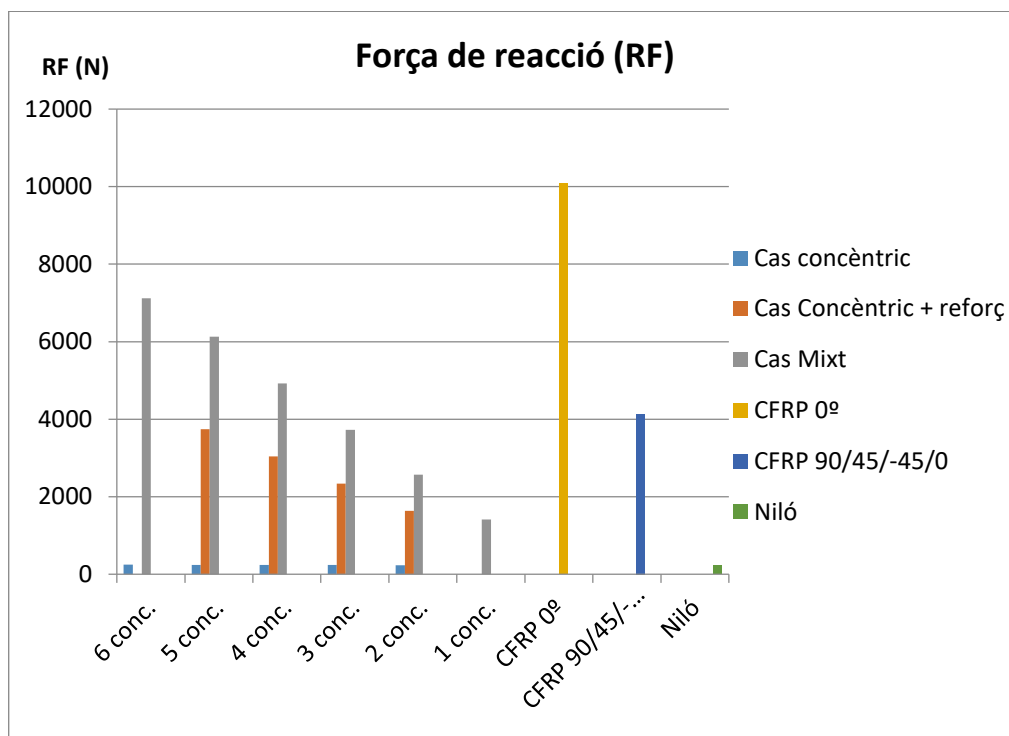


Figura 50. Gràfic força de reacció RF.

S'observa com el cas concèntric tot hi estar sotmès a molt poca tensió, té una ràtio molt elevada en les tres gràfiques, respecte els altres casos, degut al seu baix volum de fibra de carboni. Però si es mira la seva força de reacció és molt baixa, similar a la del cas de niló, el qual implica una rigidesa poc considerable, ja que la proveta és pràcticament tota de niló excepte les concentricitats.

Per altra banda el cas mixt també té unes ràtios molt elevades degut a les seves tensions, tot i que presenta una quantitat de fibra important. Si es mira la gràfica de la força de reacció, també destaca per sobre de tots els altres casos excepte l'isotròpic sense orientació. Això implica que la peça té una elevada rigidesa la qual causa aquestes forces de reacció elevades però està sotmesa unes tensions grans.

El cas concèntric amb reforç presenta unes ràtios molt baixes en tots els casos. Això és degut al seu augment del volum de fibra gràcies al reforç, el qual no comporta un augment de les tensions tot i que si que li ofereix una rigidesa molt superior envers al cas concèntric, com es pot veure reflectit en la força de reacció.

Els dos casos isotròpics tenen un volum de fibra similar, i presenten unes ràtios no molt diferents. Però el cas sense orientació presenta unes ràtios S_{11}/VF i S_{12}/VF més grans degut a estar sotmès a unes tensions més elevades. Aquestes tensions són derivades de la gran força de reacció que ofereix degut a tenir totes els filaments orientats en el sentit del desplaçament. Això provoca que aquest cas sigui el més rígid de tots i conseqüentment el que generarà unes forces de reacció més grans i per tant el que té un millor comportament, sense tenir en compte el volum de fibra que utilitza.

En totes les tres ràtios, es pot veure una tendència on a mesura que en una proveta se li disminueixen el nombre concentricitats, la seva ràtio S_{ii}/VF augmenta. Això és degut a que influeix molt més en la ràtio una disminució en el volum de fibra que l'augment de les tensions que això comporta.

7.4.3. Ràtio RF/VF

En la figura 51 a continuació es mostra la ràtio del total de la força de reacció trobada per cada cas respecte el volum de fibra que s'utilitza a cada un.

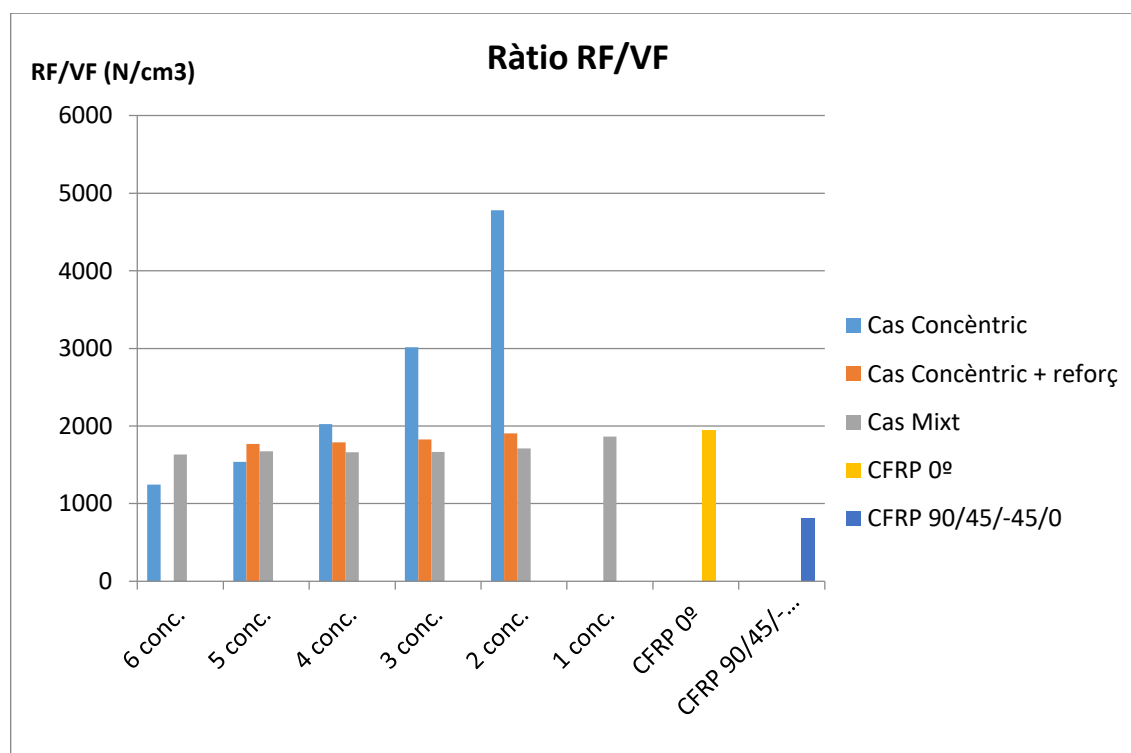


Figura 51. Ràtio Força de reacció respecte volum de fibra utilitzat (RG/VF)

El gràfic ens mostra que el cas que ofereix una ràtio més favorable és el cas concèntric, sobretot en els casos amb menys concentricitats, gràcies al seu baix volum de fibra. Tal com es pot veure com menys concentricitats es generen, millora la ràtio ja que la disminució de la fibra, tot hi ser molt poca, és molt més significativa que la poca diferència de la força de reacció que hi ha.

La resta de casos tenen unes ràtios molt similars, presentant un lleuger augment, poc significatiu, a mesura que es disminueixen les concentricitats. El cas isotròpic sense orientació supera lleugerament al cas concèntric amb reforç i al cas mixt però és poc significatiu.

Per últim, el cas isotròpic amb les diferents capes orientades, és el que ofereix una pitjor ràtio. Això és degut a que està format per una gran quantitat de reforç de fibra, el qual no millora la rigidesa de la peça suficientment per oferir una força de reacció prou elevada que pugui compensar l'elevat volum de fibra utilitzat.

7.4.4. Ràtio RF/Tensió

A continuació s'adjunten les gràfiques 52, 53 i 54 on es mostren les ràtios de força de reacció respecte la tensió en cada direcció.

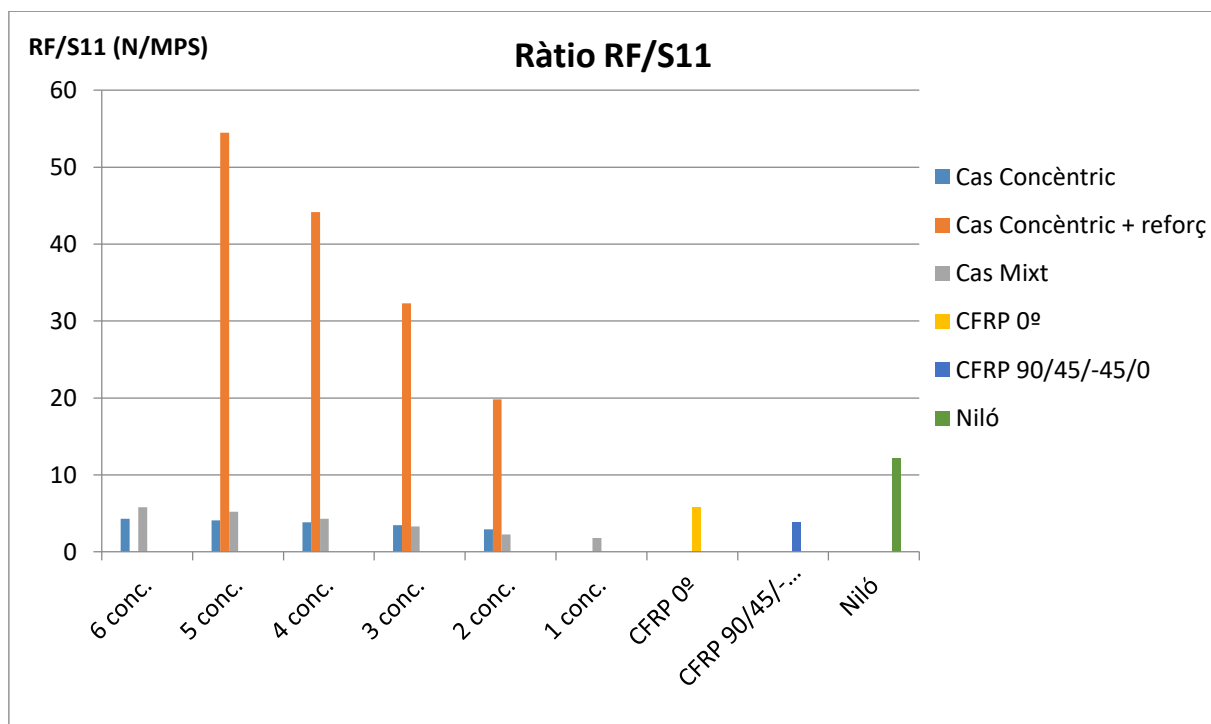


Figura 52. Gràfic ràtio RF/S11.

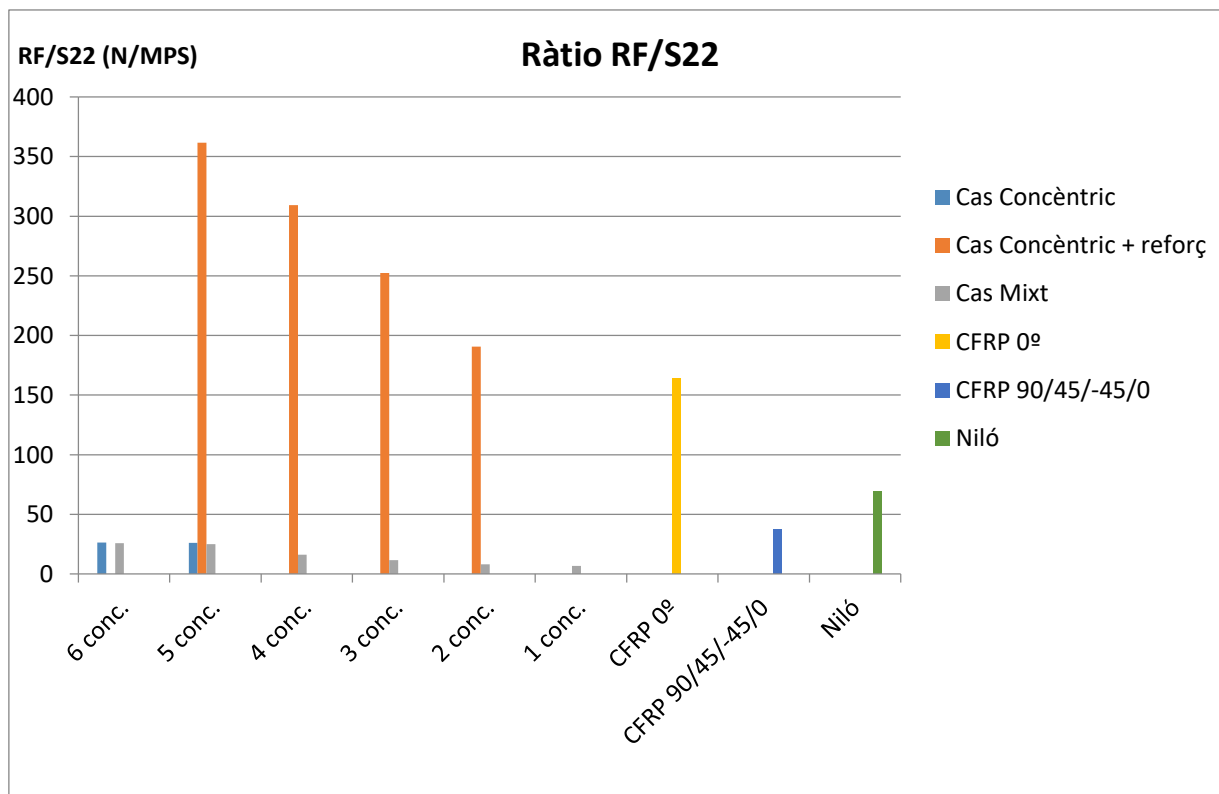


Figura 53. Gràfic ràtio RF/S22.

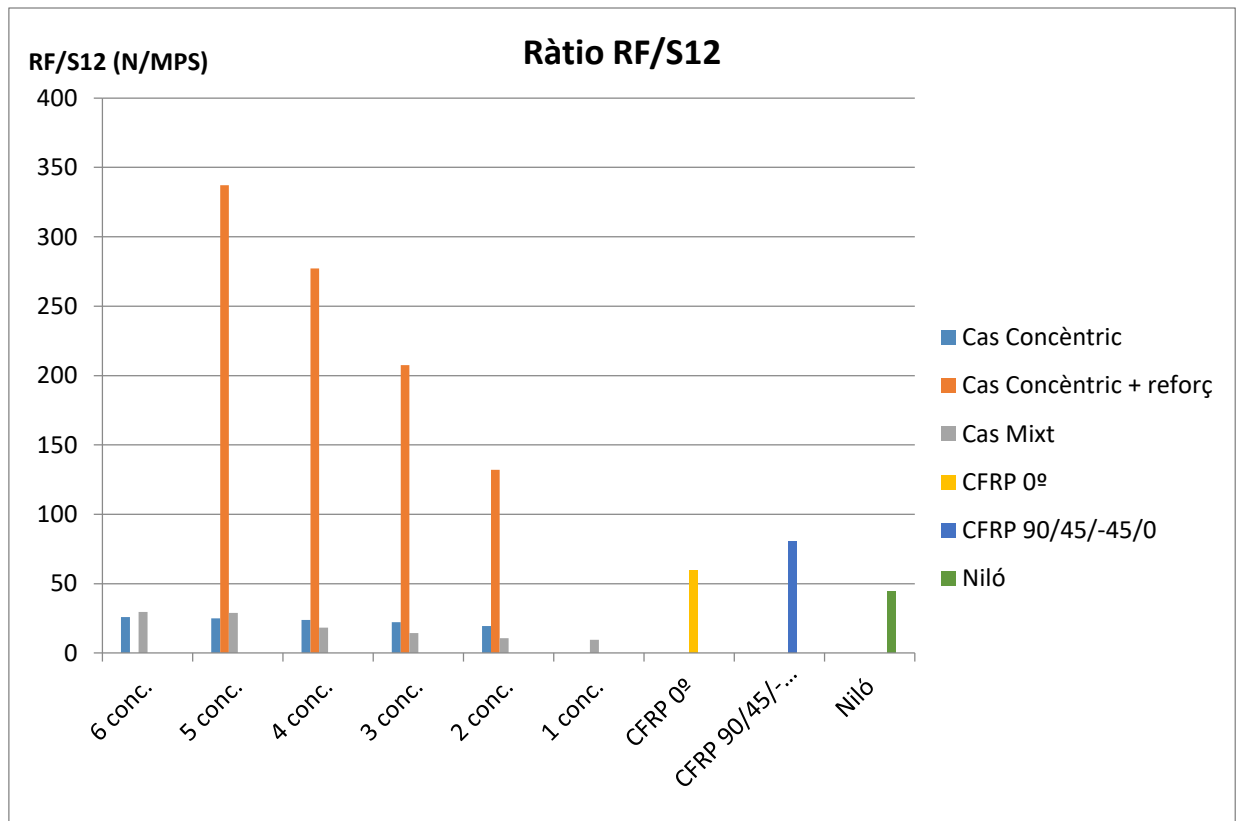


Figura 54. Gràfic ràtio RF/S12.

La ràtio que mostren aquests gràfics, ajuda a entendre la relació de les tensions en què està sotmès cada cas respecte la rigidesa de la proveta.

El cas que mostra una ràtio més favorable, amb una elevada rigidesa i unes tensions baixes és el cas concèntric amb reforç. Aquest destaca molt per sobre tots els altres casos en les tres figures. Això és gràcies a que està sotmès a unes tensions baixes, molt properes al cas concèntric, i a l'augment de rigidesa que li proporciona el reforç del contorn de la proveta.

Pel que fa al cas concèntric i el cas mixt tenen una ràtio molt baixa, el primer degut a que té una rigidesa molt petita encara que les tensions també ho siguin, i el segon degut a unes tensions molt elevades les quals no són compensades per l'alta rigidesa de la proveta.

El cas isotròpic a 0°, tot i ser el cas amb una rigidesa més elevada, les grans tensions que es donen, sobretot a la zona del forat, fan que la ràtio disminueixi molt. Mentre que el cas isotròpic amb les capes orientades no té una gran rigidesa el que fa que també quedi una ràtio baixa en els tres casos de tensions.

Per últim el cas de niló és el cas amb la força de reacció i les tensions més petites. Això fa que la seva ràtio sigui millor que la d'altres casos, però no destaca.

8. CONCLUSIONS

Tal com es pot observar en la majoria de resultats, el cas de niló és el menys prometedor en termes globals. Aquest té una rigidesa molt baixa el qual fa que no sigui apte per aplicacions estructurals que exigeixin esforços importants.

El cas concèntric tot i ser el cas més destacat tant en valor de tensions, en les ràtios de tensió respecte volum de fibra i en la de força de reacció respecte volum de fibra, presenta una rigidesa molt baixa. Aquest factor fa que no sigui un cas adequat per la majoria d'aplicacions estructurals que se'n puguin derivar, ja que el niló és el principal component de la proveta. Aquesta serà propensa a deformar-se elàsticament molt fàcilment. Per aplicacions on les càrregues siguin molt petites, és una bona opció ja que les tensions en el forat són molt baixes.

Pel que fa al cas "concèntric + reforç", el reforç generat al contorn de la proveta ha donat molt bons resultats. Aquest cas manté unes tensions màximes molt baixes, properes al cas únicament concèntric. Però a diferència d'aquest, té una rigidesa molt més elevada reflectida en les forces de reacció que es generen, gràcies als filaments del seu contorn. En termes globals la seva rigidesa es força menor al cas isotròpic a 0° o al mixt, però considerant només un comportament elàstic i valorant els resultats que dona respecte el seu volum de fibra, és el cas més eficient de tots.

El cas mixt és el cas que presenta les tensions més elevades de tots després del cas isotròpic a 0° . Si que ofereix una molt bona rigidesa, donant els millors valors després del cas isotròpic, i a més amb una quantitat de volum de fibra correcte pels resultats que dona. Però aquesta rigidesa no és suficient per compensar les tensions, en la zona del forat, tal com es veu en les ràtios de la força de reacció respecte les tensions. El fet de suprimir part dels anells concèntrics a canvi de filaments a 0° , provoca un augment molt considerable de tensions en el forat, i per tant segueix essent una zona problemàtica de la peça.

L'últim dels casos, l'isotròpic, en cap de les seves dues variants es mostra com un cas adequat per millorar les propietats del forat. El fet de tenir totes les capes a 0° li dona la millor rigidesa a tracció amb diferència, i fa que sigui el millor dels casos en termes absoluts, sense considerar el volum de fibra que s'utilitza. Per contra, el forat continua essent una zona conflictiva on les tensions assoleixen valors molt elevats, sobretot en la direcció 1.

En la variant del cas isotròpic amb les diferents capes orientades, s'observa una pitjor rigidesa respecte el cas amb totes les capes a 0° , però les tensions també són més baixes. Tal i com s'ha comprovat, aquest oferiria un millor reforç global de la proveta que l'isotròpic a 0° , si aquesta es veiés sotmesa a esforços en altres direccions, tal i com podria passar en una aplicació real. Però respecte aquest estudi on l'esforç és a tracció unidireccional no destaca en cap dels seus aspectes.

En resum, per millorar les tensions en el forat és idoni situar concentricitats completes al seu voltant, ja que representen poc volum de fibra i milloren molt el comportament. No són necessàries moltes ja que la disminució de les tensions és poc significativa a mesura que s'hi afegeixen concentricitats. A més interessa reforçar la proveta amb filaments al contorn d'aquesta per oferir-li rigidesa, sobretot orientats en al direcció de la sol·licitació, i així que esdevingui una peça amb més utilitat. Cada filament de reforç implica un augment d'uns 700N en al força de reacció que oferirà la proveta, valor prou considerable per afegir-hi suficients reforços.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] Abaqus Keywords Reference Guide. Simulia. Abaqus 2016. (<http://130.149.89.49:2080/v2016/books/key/default.htm?startat=ch06abk01.html>, 12/08/2020)
- [2] Antoni Solà, Joan Andreu Mayugo. Manual de Usuario. Proyecto ICARO. AMADE. Universitat de Girona. 2009.
- [3] ASTM International. Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies. (<https://www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm>, 31/07/2020)
- [4] Getting Started with Abaqus/CAE. Simulia. Abaqus 2016. (<http://130.149.89.49:2080/v2016/books/gsa/default.htm>, 12/08/2020)
- [5] Haoqi Zhang, Dongmin Yang, Yong Sheng. Performance-driven 3D Printing of continuous curved carbon fibre reinforced polymer composites: A preliminary numerical study. School of Civil Engineering. University of Leeds. Leeds. LS2 9JT. 2018
- [6] Lincy Pyl, Kalliopi-Artemi Kalteremidou, Danny Van Hemelrijck. Exploration of the design freedom of 3D printed continuous fibre-reinforced polymers in open-hole tensile strength tests. Department of Mechanics of Materials and Construction. Vrije Universiteit Brussel (VUB). Brussel-les. BE-1050. 2018.
- [7] Mark Forged. EIGER. Eiger.io. 2020
- [8] Norbert Blanco. Design and Analysis of Composites with Finite Elements. Constitutive equations for transversally isotropic materials. AMADE. Universitat de Girona.
- [9] Norbert Blanco. Design and Analysis of Composites with Finite Elements. Laminate theory. AMADE. Universitat de Girona.

10. GLOSSARI

- **CFRP:** Abreviatura provinent de l'anglès de "Carbon Fiber Reinforced Polymer".
En català: Polímer reforçat amb fibra de carboni.
- **CMD:** Command Prompt. Serveix per enviar ordres al sistema de Windows mitjançant codi.
En català: Intèrpret d'ordres de Windows.
- **FDM:** Abreviatura provinent de l'anglès de "Fused Deposition Modelling".
En català: Modelatge per deposició fosa.
- **.inp:** Extensió dels arxius que s'utilitzen per realitzar un estudi amb l'Abaqus/CAE.
Abreviatura provinent de l'anglès de "Input".
- **.py:** Extensió dels arxius o programes escrits en llenguatge Python.
Abreviatura provinent de l'anglès de "Python".
- **.stl:** Extensió dels arxius que s'utilitzen per realitzar impressions en 3D.
Abreviatura provinent de l'anglès de "Standard Triangle Language".
- **.txt:** Extensió dels arxius de text pla ASCII sense format.
Abreviatura provinent de l'anglès de "Text".
- **U turn:** Expressió d'origen anglès per designar un canvi de sentit o un gir de 180°.
En català: Gir en U. S'utilitzarà per designar un canvi de sentit de la trajectòria de la fibra de 180°.
- **VCCT:** Abreviatura provinent de l'anglès de "Virtual Crack Closure Technique".
És un tipus d'estudi amb elements finits on es simula la propagació d'una esquerda sotmesa a cicles repetitius d'obertura i tancament.

11. RELACIÓ DE DOCUMENTS

DOCUMENT 1. MEMÒRIA I ANNEXOS

1. MEMÒRIA

2. ANNEXOS

ANNEX A: INICIACIÓ I PROVES DE DISSENY DE LES PROVETES

ANNEX B: FITXERS DE DISSENY I CÀLCUL DE L'ESTUDI

ANNEX C: CARACTERÍSTIQUES D'IMPRESSIÓ

ANNEX D: RESULTATS DEL CÀLCUL AMB ELEMENTS FINITS

DOCUMENT 2. PRESSUPOST

RESUM

ANNEXOS

ANNEX A:

A. INICIACIÓ I PROVES DE DISSENY DE LES PROVETES

A.1 Familiarització amb l'abaqus cae

Per tal d'arribar a un mètode útil i fiable per a la generació de les provetes s'ha passat prèviament per diversos passos intermedis fins a arribar al mètode final. A continuació s'explicaran tots els passos realitzats i alguns dels exercicis fets fins a arribar al mètode adequat per dissenyar les provetes i el disseny d'aquestes.

A.1.1 Abaqus/CAE

Primerament s'ha començat amb exercicis i tutorials bàsics amb la interfície gràfica de l'Abaqus/CAE. Aquests exercicis han servit de base per entendre el funcionament del programa i començar a familiaritzar-se amb ell. Alguns dels exercicis realitzats són els següents:

Els tutorials d'Abaqus següents han estat extrets de les eines que posa a disposició SIMULIA per tal que els usuaris del programa es familiaritzin amb ell [\[4\]](#).

-Tutorial B: Creating and Analyzing a Simple Model in Abaqus/CAE.

Aquest tutorial és el més bàsic per començar a practicar amb el programa. Es realitza el càlcul d'una biga encastada sotmesa a flexió per una càrrega distribuïda al llarg de la seva superfície superior (Fig. 55).

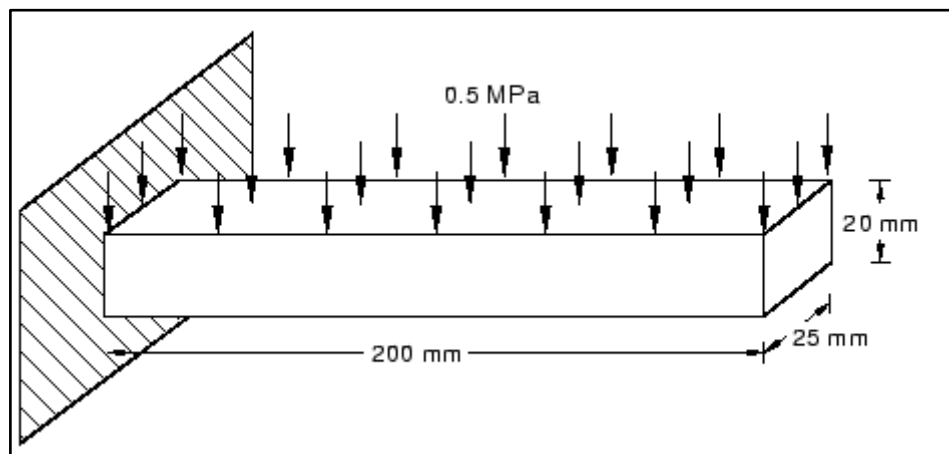


Figura 55. Tutorial B: Creating and Analyzing a simple model in Abaqus/CAE. Simulia. Abaqus/CAE. 12/08/2020

Els passos a seguir per dur a terme un anàlisi d'una geometria són els següents:

Primerament es crea la geometria de la peça i se li atribueixen unes propietats assignant-li el material corresponent que prèviament s'ha d'haver configurat. Seguidament es crea el conjunt del model en cas que estigui format per diferents elements i s'estableixen els passos del càlcul que s'hauran de realitzar i els resultats que es vol extreure (Von-Misses, deformació etc.) El següent pas consisteix en aplicar les condicions de contorn, és a dir

les restriccions (boundary conditions) i les càrregues (loads). Finalment s'estableixen els paràmetres del mallat i es genera aquest, per acabar creant la tasca a calcular i realitzant l'anàlisi.

Amb aquest tutorial s'obtenen les competències per realitzar anàlisis bàsics de geometries simples de peces.

-Tutorial C: Using Additional Techniques to Create and Analyze a Model in Abaqus/CAE.

Aquest tutorial permet aprofundir una mica més en la manera de dibuixar la geometria, ja que introdueix un cas més complex el qual està format per 3 conjunts diferents amb geometries més complexes, tal com mostra la figura 56, i per tant obliga a crear un muntatge. Bàsicament ajuda a consolidar el procés d'anàlisi explicat en el tutorial anterior i introdueix algunes eines noves.

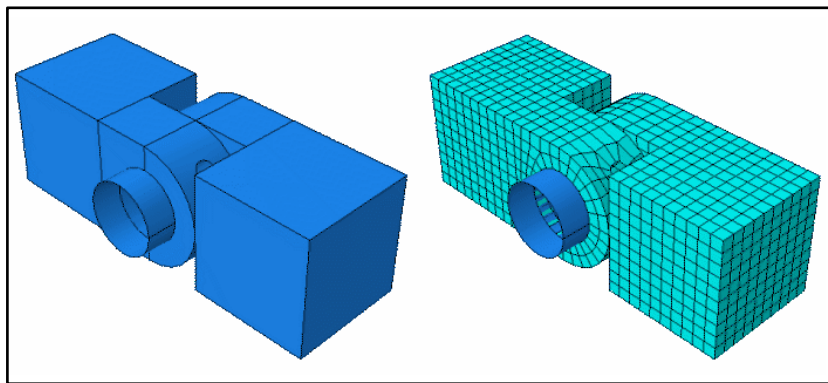


Figura 56. Tutorial C: Using additional techniques to create and analyze a model in Abaqus/CAE. Simulia. Abaqus/CAE. 12/08/2020

-Using Shell Elements:

Aquest tutorial permet introduir-se més en el camp que interessa en aquest estudi, ajuda a entendre què són i quan s'aplica l'estructura de "shell elements". Aquest paràmetre s'utilitza quan es vol modelitzar peces on una de les seves dimensions (el gruix) es significativament més petita que les altres dues. D'aquesta manera l'esforç en la direcció del gruix és negligible.

Aquest tutorial és important ja que aquesta configuració dels elements serà la que s'utilitzarà per representar el càlcul de les provetes de material compòsit, ja que ens permet crear orientacions locals i específiques a cada element.

Primerament s'explica com el programa estableix la direcció de les normals a la superfície de cada element, depenent de l'ordre en què s'han establert els nodes d'aquests elements. És a dir, tal com es pot veure en la figura 57 següent, el valor positiu de la normal s'establirà sobre la superfície on s'hagin donat els valors dels nodes en sentit

antihorari (SPOS). La cara de l'element amb la normal negativa (SNEG) serà la contrària. És important que les normals siguin les mateixes en elements adjacents.

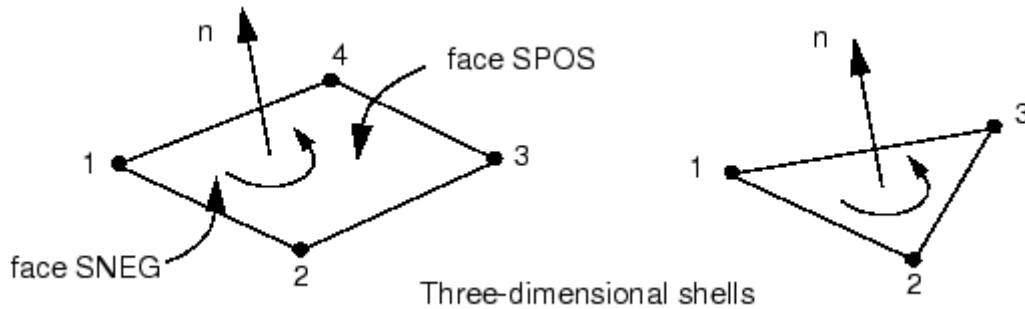


Figura 57. Determinar el sentit de la normal en elements S4R a l'esquerra i S3R a la dreta. Using shell elements. Simulia. Abaqus/CAE. 13/08/2020

Seguidament s'explica com el programa estableix els eixos locals a cada element depenent del sentit de la seva normal. Per això és important l'apartat anterior i establir correctament el sentit de la normal. Tal com es mostra en la figura 58, s'estableixen les direccions 1 i 2 sobre la superfície de l'element. La direcció 1 és la projecció de l'eix global 1 sobre la superfície, mentre que la direcció 2 és perpendicular a la primera en sentit antihorari a la superfície on la normal és positiva.

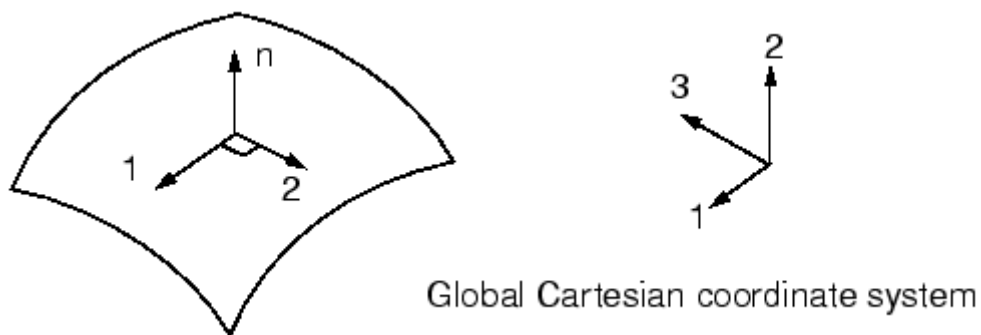


Figura 58. Mètode per determinar les coordenades locals de l'element. Using shell elements. Simulia. Abaqus/CAE. 13/08/2020

És important determinar si els efectes de la deformació a tallant són importants a la solució, per determinar si s'està tractant un cas de "thin shell" el qual negligeix aquesta deformació o "thick shell" el qual si que la té en consideració. La deformació a tallant implica que línies de material que inicialment eren normals a la superfície de la peça no necessàriament es mantenen normals durant la deformació de la peça, afegint flexibilitat a tallant. La figura 59 mostra un esquema del comportament dels dos casos comentats.

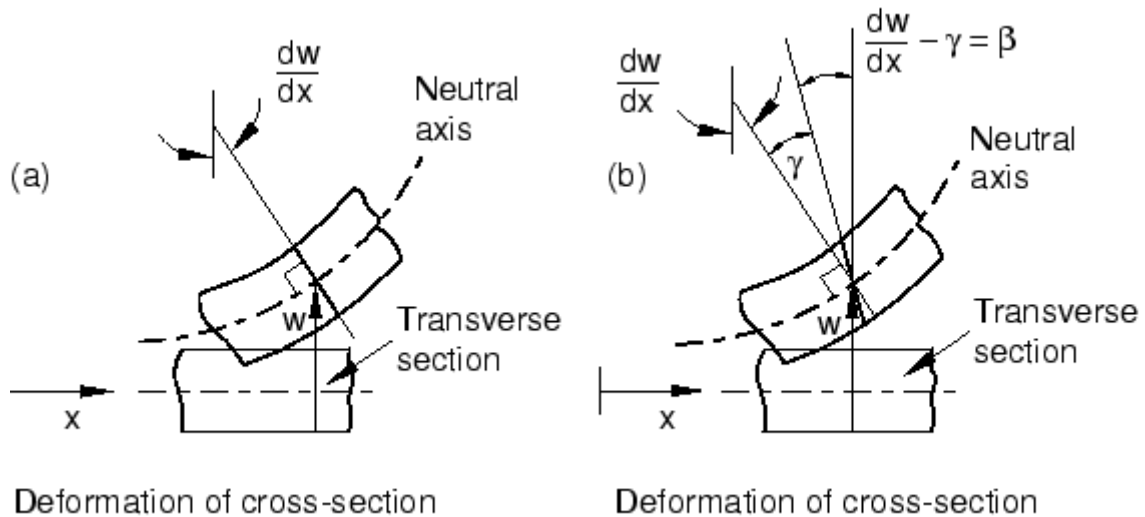


Figura 59. Comportament de la secció transversal de "thin shells" (a) i "thick shells" (b). Using shell elements. Simulació. Abaqus/CAE. 13/08/2020

En el cas de les peces formades per material compòsit en forma de "sandwich", tenen una baixa rigidesa a tallant i s'han de modelar considerant-les "thick shells". Per tant en tots els casos que s'estudiaran, es consideraran com a "thick shells".

Degut a això, els elements més adequats per modelar-los són: S4, S4R, S3/S3R i S8R. Aquestes sigles indiquen el següent; la "S" indica que és un "shell element", el número indica el nombre de nodes que el formen, i la "R" indica integració reduïda, la qual simplifica i accelera el càlcul en comparació a una integració completa..

Finalment s'ofereix un exercici per posar en pràctica alguns dels aspectes que s'han comentat anteriorment.

-[Antoni Solà i Joan Andreu Mayugo, Manual de Usuario, Projecte Icaro \[2\]](#).

Aquest manual és una eina d'ajuda bàsica per començar amb la simulació de materials compòsits que no forma part de l'ajuda d'Abaqus. Incorpora una petita part introductòria de teoria sobre les equacions constitutives de materials transversalment isotròpics, i seguidament planteja diversos exercicis per practicar els quals estan resoltos tant amb l'Abaqus com en l'Ansys Workbench®. Els exemples proposen diverses geometries amb diferents sol·licitacions, i característiques. Els exemples del primer capítol ajuden a entendre les diferències entre les propietats i el comportament dels diversos materials que es poden trobar en elements compòsits. Per exemple, en el problema 1.1 es tracta un material anisotròpic, en l'1.2 un material ortotròpic i en el 1.3 un material transversalment isotròpic.

Els exemples del capítol 2, permeten practicar les orientacions de les diverses capes de les provetes i entendre com aquestes funcionen. Des de provetes simples amb diverses capes i diferents orientacions fins a provetes més complexes amb forma de "T" invertida on la meitat de les capes es divideixen i formen una geometria i les altres la simètrica (fig. 60), incorporant zones amb una resina que aplica unes restriccions concretes, entre d'altres.

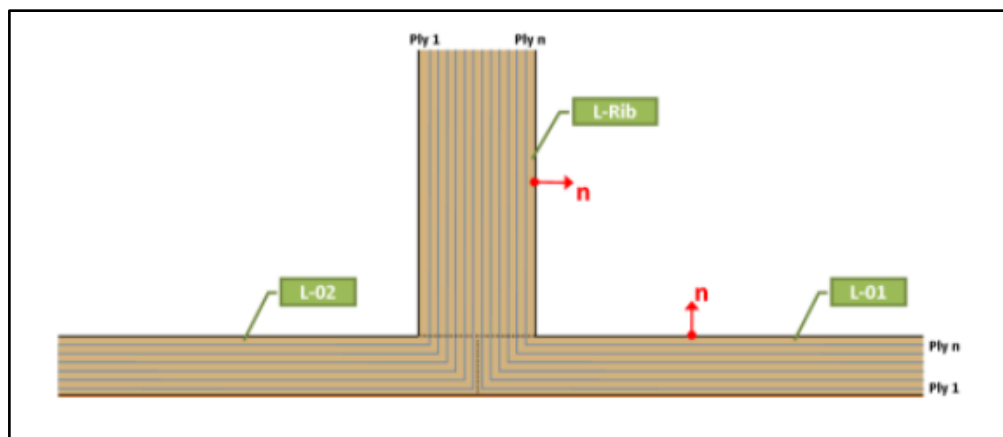


Figura 60. Exemple proveta amb forma de "T" invertida amb divisió de les capes. Antoni Solà et al. Manual de Usuari. ICARO. AMADE. Universitat de Girona. 12/08/2020

Aquest document ha permès entendre el funcionament de les diferents estructures de materials compostos que es poden tenir i com aplicar i interpretar les orientacions del material de reforç en les diverses capes de la proveta.

A.1.2 Input file

A mesura que s'ha anat avançant amb els exemples i proves amb l'Abaqus/CAE, s'ha arribat a la conclusió que per determinades característiques que es volen aplicar a les provetes, la interfície gràfica de l'Abaqus limita les possibilitats, per exemple les d'orientació dels diferents elements o les de variació del mallat.

Per aquest motiu seguidament s'ha passat a l'estudi i pràctica amb els fitxers input (Input file ".inp") de l'Abaqus. Aquests permeten introduir manualment les característiques de l'estudi, des de la geometria passant per les condicions de contorn i el material, els nodes i elements que conformen el mallat i fins als paràmetres que es volen avaluar en el càlcul.

Aquest fitxer és generat automàticament sempre que es realitza un estudi amb la interfície gràfica, i és el que estableix tots els paràmetres de l'estudi. En aquest cas es genera aquest fitxer manualment i seguidament s'executa amb l'Abaqus per generar l'estudi.

Primerament s'han agafat diversos fitxers ja generats que incorpora l'ajuda del programa, per tal de familiaritzar-se amb el llenguatge d'aquests i la manera d'escriure les comandes que el programa entén i utilitza durant l'estudi. Per tal d'anar seguint totes les ordres i resoldre els dubtes s'ha utilitzat de recolzament l'ajuda de l'Abaqus per les "Keywords" o paraules clau [\[1\]](#). Aquestes són les que introdueixen l'ordre al programa per tal de realitzar qualsevol modificació.

En l'annex A1 s'adjunta l'explicació d'un fitxer "input" utilitzat per aquest estudi.

A.2 Cas article Haoqi Zhang

Aquest cas ha estat el següent pas en el desenvolupament de les provetes i el càlcul. Tal i com indica el títol, es basa en l'estudi realitzat per Haoqi Zhang comentat en apartats anteriors (Haoqi Zhang et al., 2018.)[\[5\]](#).

La diferència més significativa amb el cas anterior és l'augment del forat, que passa a tenir 20mm de diàmetre mentre que les mides de la proveta i els elements es mantenen.

El fet de modificar la mida del forat implica tornar a crear un altre mallat al voltant d'aquest que s'adapti a les noves dimensions. Com a conseqüència del seu augment implica una major quantitat de nodes i elements al voltant, tal i com es pot observar a la figura 61 següent.

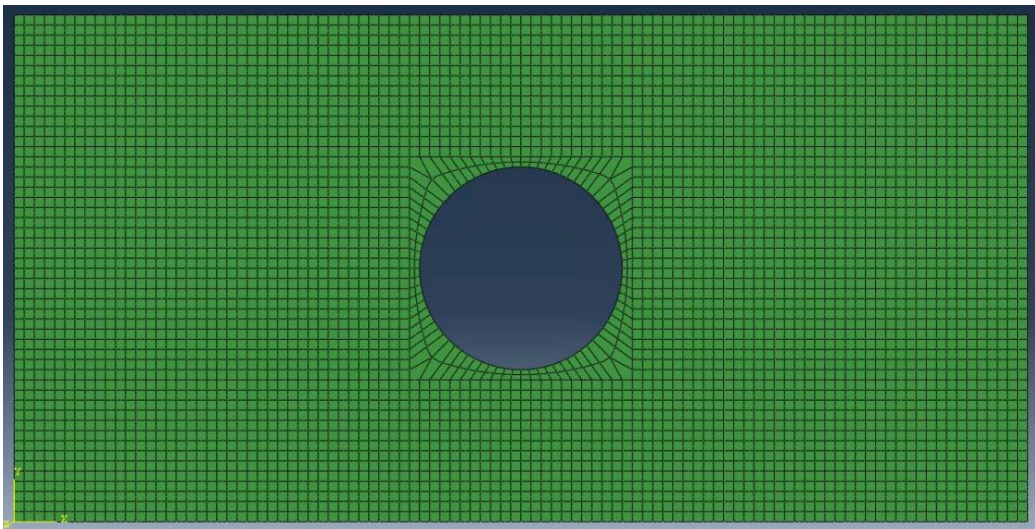


Figura 61. Modificació del forat i del seu marc d'unió amb la resta de la proveta

Pel tipus d'estudi que es vol realitzar, les mides de la proveta i el forat que s'utilitzen en aquest cas no són prou adequades. El forat és massa gran per obtenir resultats fiables ja que produeix que els elements del seu voltant siguin molt desproporcionats en comparació als de la resta de la peça. La proveta també és massa petita per contenir un forat tant gran, per això es deixa de prendre com a referència l'estudi que es basava en aquest article.

ANNEX B :

B. FITXERS DE DISSENY I CÀLCUL DE L'ESTUDI

B.1 Descripció fitxer input

A continuació s'adjunta un dels fitxers input generats per tal de fer-ne una descripció de les seves parts i els paràmetres que inclou. Cada cas disposa del se propi fitxer input, però només se'n adjunta un de mostra. Aquest fitxer concretament correspon al cas mixt amb 6 anells concèntrics al voltant del forat.

**Heading*

Exploration of the design freedom of 3D printed continuous fibre-reinforced polymers in open-hole tensile strength tests

**

Units: N, mm

**

1-axis=horizontal, 2-axis=vertical

**

***Preprint, echo=yes, model=yes, history=yes*

**

*** PARAMETER DEFINITION*

**

**parameter*

**

*** Independent parameters*

w = 200 # width of specimen

h = 30 # height of specimen

th = 0.125 # specimen of unit thickness

load = 1 # unit load applied to specimen

n0 = 10000000 # first node-element

xload = 100 # x-coordinate of hole center

**

*** Dependent parameters*

nload = n0+200 # load-node

*n_br = n0+4*w + 1 # bottom-right corner node*

n_bl = n0+1 # bottom-left corner node

*n_tl = n0+1+(2*h*10000) # top-left corner node*

*n_tr = n0+(4*w+1)+(2*h*10000) # top-right corner node*

Definició de l'estudi.

Paràmetres geomètrics de la peça i càrrega aplicada.

Definició de nodes útils per establir les condicions de contorn de la peça

`n_bl2 = n0+1+5000` # bottom-left corner second node

**

** Material parameters

`E11 = 53400` # Young's modulus fiber direction
`E22 = 6160` # Young's modulus matrix direction
`G12 = 1910` # in-plane shear modulus
`nu12 = 0.39` # in-plane Poisson's ratio
`E = 940` # Young's modulus nylon
`P = 0.3` # Poisson's ratio nylon

Propietats dels materials utilitzats: fibra de carboni i niló "End of life"

**

** MESH

**

** Nodes

`*node, input=open_hole_reinf_nodes.inp, nset=n_nohole`
`*node, input=hole_nodes.inp, nset=n_hole`

Es criden els fitxers de nodes de la proveta i del forat i se'ls hi assigna un nom a cada conjunt.

(fitxers generats en l'script de python)

**

**Elements

`*element, type=s8r, input=open_hole_reinf_el.inp, elset=el_nohole`
`*element, type=s8r, input=hole_elements.inp, elset=el_hole`

Es criden els fitxers d'elements de la proveta i del forat i se'ls hi assigna un nom a cada conjunt.

(fitxers generats en l'script de python)

**ORIENTATION SETS

`*include, input=Orientation_hole_sets.txt`
`*include, input=flat_cfr.txt`
`*include, input=fiber_sets.txt`

Es criden els fitxers que contenen "sets" o conjunts d'elements amb orientacions locals.

(fitxers generats en l'script de python)

**

** USEFUL SETS

`*include, input=boundary_set.txt`
`*nset, nset=n_all`
`n_nohole, n_hole`
`*elset, elset=el_all`
`el_nohole, el_hole`
`*elset, elset=border, generate`
`10000001, 10000400, 1`
`10000001, 10590001, 10000`
`10590001, 10590400, 1`
`10000400, 10590400, 10000`

Es crida un fitxer que conté "sets" d'elements que se'ls hi aplica alguna restricció

(fitxer generat en l'script de python)

Creació dels sets de nodes i elements del forat "hole" i de la resta de la proveta "nohole", del set d'elements de la vora de la proveta "border" i dels elements que contenen niló "nyl"

```
*elset, elset=nyl_el
border, el_nohole, f_nyl_el
**ORIENTATION
*include, input=Orientations.txt
*include, input=border_ori.txt
**
```

Es criden els fitxers que contenen orientacions locals que s'hauran d'assignar a elements o sets d'elements

(fitxer generat en l'script de python)

```
** MATERIAL
**
*shell section, elset=f_ori_0, composite, orientation=fib_0
<th>, 3, nylon6, 0
<th>, 3, CFRP, fib_0
<th>, 3, CFRP, fib_0
<th>, 3, CFRP, fib_0
<th>, 3, CFRP, fib_0
<th>, 3, CFRP, fib_0
<th>, 3, CFRP, fib_0
<th>, 3, CFRP, fib_0
<th>, 3, CFRP, fib_0
<th>, 3, nylon6, 0
**
```

Assignació de la secció (orientació, nombre de capes, gruix de cada capa, material) als elements que contenen fibra orientada a 0 graus dins el marc d'elements del forat.

```
*shell section, elset=f_ori_180, composite, orientation=fib_180
<th>, 3, nylon6, 0
<th>, 3, CFRP, fib_180
<th>, 3, CFRP, fib_180
<th>, 3, CFRP, fib_180
<th>, 3, CFRP, fib_180
<th>, 3, CFRP, fib_180
<th>, 3, CFRP, fib_180
<th>, 3, CFRP, fib_180
<th>, 3, CFRP, fib_180
<th>, 3, nylon6, 0
```

Assignació de la secció (orientació, nombre de capes, gruix de cada capa, material) als elements que contenen fibra orientada a 180 graus dins el marc d'elements del forat..

```
*shell section, elset=nyl_el, composite
```

```
<th>, 3, nylon6, 0
```

```
<th>, 3, nylon6, 0
```

```
<th>, 3, nylon6, 0
```

```
<th>, 3, nylon6, 0
```

```
<th>, 3, nylon6, 0
```

```
<th>, 3, nylon6, 0
```

```
<th>, 3, nylon6, 0
```

```
<th>, 3, nylon6, 0
```

```
<th>, 3, nylon6, 0
```

```
<th>, 3, nylon6, 0
```

```
**
```

```
**
```

```
*include, input=Sections.txt
```

```
*include, input=Border_sections.txt
```

```
**
```

```
**
```

```
*material, name=CFRP
```

```
*elastic, type=lamina
```

```
<E11>, <E22>, <nu12>, <G12>, <G12>, <G12>
```

```
**
```

```
*material, name=nylon6
```

```
*elastic, type=isotropic
```

```
<E>, <P>
```

```
**
```

Assignació de la secció (orientació, nombre de capes, gruix de cada capa, material) als elements que contenen niló..

Es criden els fitxers que assignen secció als elements concèntrics al forat (Sections.txt) i als elements que contenen fibra "isotròpica" (Border_sections) (fitxers generats en l'script de python)

Definició dels paràmetres del material CFRP i del niló "End of life" (nylon6)

```
** LOAD STEP
```

```
**
```

```
*step, inc=100
```

```
apply unit load
```

```
*static
```

```
**
```

```
** Boundary conditions
```

```
*boundary
```

```
n_bound, 1
```

```
n_bound, 3
```

```
n_bound, 5
```

```
**
```

```
** Applied displacement
```

```
*boundary, type=displacement
```

```
n_load, 1, 1, 1
```

```
**
```

```
** Output request
```

```
*el print, elset=el_all, position=nodes
```

```
3
```

```
s
```

```
*output, field
```

```
*node output
```

```
u, rf
```

```
*element output, elset=el_all
```

```
s, e
```

```
*energy print
```

```
**
```

```
*end step
```

```
**
```

```
** End of the model
```

Assignació de les restriccions de la proveta al set d'elements corresponent (n_bound)

Assignació del desplaçament unitari al set d'elements de la càrrega (n_load)

Especificació dels paràmetres que es volen obtenir en el càlcul de la proveta.

- u: desplaçament (mm)
- rf: reaction force (força de reacció) (N)
- s: stress (tensió) (MPa)
- e: strain (deformació)

B.2 Descripció fitxer python

A continuació s'adjunta i es comenta un dels scripts de python que s'han creat. Aquest script concretament pertany al cas mixt amb 6 concentricitats al voltant de forat. Cal destacar que cada cas té el seu script particular amb les seves petites variacions, però només s'adjunta aquest ja que és el que conté més matèria per poder desenvolupar.

Els elements envoltats per un requadre vermell són els noms dels documents els quals després són cridats pel fitxer input vist anteriorment.

Algunes parts repetitives de l'script s'han retallat per no estendre'l més del que ja és.

```
import string
```

```
import math
```

```
#
```

```
# This script runs a sequence of input files
```

```
# to generate and analyse an open hole tensile-strength test specimen
```

```
# The size of the element is set to 0.5 mm
```

```
#
```

```
# Parameters used in study:
```

```
#
```

```
# width of the specimen: w
```

```
# height of the specimen: h
```

```
# thickness of the specimen: th
```

```
# load applied to the plate: load
```

```
# x_coordinate of load application point: x_load
```

```
# y_coordinate of load application point: y_load
```

```
# Name of the files
```

```
filename ='open_hole_reinf'
```

```
## Start of parameter definition ##
```

Paràmetres utilitzats en l'estudi

Width values

w = [200]

Height values

h = [30]

Thickness values

th = [0.125]

Assignació de valors als diferents paràmetres de l'estudi

X-coordinates of the beam center

xload = [100]

Y-distance from hole centre to edge

e = [15]

Initial crack length

aa = 20

Material parameters

IM7 Carbon fibres

E11 = 53400 *# Young's modulus direction 1*

E22 = 6160 *# Young's modulus direction 2*

G12 = 1910 *# in-plane shear modulus*

nu12 = 0.39 *# in-plane Poisson's ratio*

Other specimen properties

d = 5 *# diameter of the holes*

load = 40 *# applied load*

dmm = 5 *# distance to define damage areas*

ne0 = 10000001 *# first node-element*

ninc = 10000 *# node-element vertical increment*

nfiber = 6 *#number of concentric fiber rings around the hole*

fth = 0.28 *#carbon fiber filament thickness*

sep = 0.72 *#separation between fibers*

End of parameter definition


```

## Start of variables definition ##

# Parameters to be considered

pars = ('w', 'th', 'xload', 'a',
'nload','E11','E22','G12','nu12')

## End of variables definition ##

```

Assignació de variables preparades per parametritzar si es volgués en l'estudi.
(En aquest cas no s'aplica)

```
## Start of model generation and execution ##
```

```
ww = w[0]
```

```
hh = h[0]
```

```
tthh = th[0]
```

```
xx = xload[0]
```

```
ee = e[0]
```

```
yy = hh/2
```

```
nload = int(ne0+xx)
```

```
f_with = int(nfiber*(fth+sep))
```

```
nx_min = int(401-(14+(4*(f_with-1))))
```

```
nx_max = int(401+(14+(4*(f_with-1))))
```

```
ny_min = int(10300401-50000-(20000*f_with)-(14+(4*(f_with-1))))
```

```
ny_max = int(10300401+40000+(20000*f_with)+(14+(4*(f_with-1))))
```

```
el_max = 10360207+f_with*10000+f_with*1
```

```
od = int((nfiber*2)+5)
```

#Diameter of the last concentric fiber

```
qq = int(od+2)
```

#Side of the square

```
an = math.radians(90.0/(qq*4))
```

#Angle of rotation for each node

```
lbcn = int(10300401-(10000*qq)-(qq*2))
```

#Left bottom corner node of the square

```
lmn = int(10300401-(qq*2))
```

#Left mid node of the square

```
bmnn = int(10300401-(10000*qq))
```

#Bottom mid node of the square

```
# Generation of inp files with nodes and elements
```

Definició de diverses variables que seran d'aplicació més endavant


```
i_py = float(15.000-(qq*0.500))
```

```
i_py = '%.3f' % i_py
```

```
while i < bmn:
```

```
#Aqui s'escriu la lina de nodes des del lbcn fins al bmn
```

```
    i_px = float(i_px) + 0.250
```

```
    i_px = '%.3f' % i_px
```

```
    line_w = str(nel)+' '+str(i_px)+' '+str(i_py)+' 0'+'\n'
```

```
    f0.write(line_w)
```

```
    nel = nel+1
```

```
    i = i+1
```

```
# 2. Nodes del ultim cercle interior del 3r quadrant
```

```
n_3qint = []
```

```
i_px = float(100-(od*0.5))
```

```
i_px = '%.3f' % i_px
```

```
i_py = 15.0
```

```
i_py = '%.3f' % i_py
```

```
i_px0 = float(i_px)
```

```
i_py0 = float(i_py)
```

```
an2 = an
```

```
r = od*0.5
```

```
for h in range (qq*4+1):
```

```
#Quadrant 3
```

```
    line_w = str(nel)+' '+str(i_px)+' '+str(i_py)+' 0'+'\n'
```

```
    f0.write(line_w)
```

```
    i_px = i_px0+r-math.cos(an2)*r
```

```
    i_py = i_py0-math.sin(an2)*r
```

```
    i_px = '%.3f' % i_px
```

```
    i_py = '%.3f' % i_py
```

```
    n_3qint.append(nel)
```

```
    an2 = an2+an
```

```
    nel = nel+1

    h = h+1

f0.close()

fname0 = 'hole_nodes.txt'           #Calcula les coord dels nodes intermitjos i es guarden (3r
Quadrant)

f0 = open(fname0,'r')

xqcoord = []

yqcoord = []

xcoord1 = []

ycoord1 = []

xcoord2 = []

ycoord2 = []

xxci = []

yyci = []

xxcie = []

yycie = []

xxcim = []

yycim = []

line = f0.readline()

numb_li = sum(1 for line in f0)

f0.seek(0)

for j in range (numb_li/2+1):

    line_r = f0.readline()

    xxq = eval(line_r[9:16])

    yyq = eval(line_r[16:22])

    xqcoord.append(xxq)

    yqcoord.append(yyq)
```

Càlcul de les coordenades dels nodes que es troben entre els nodes generats anteriorment (Només del 3r quadrant del forat)

```
j = j+1
```

```
for i in range (numb_li/2+1):
```

```
    line_r = f0.readline()
```

```
    xc = eval(line_r[9:16])
```

```
    yc = eval(line_r[16:22])
```

```
    xq = xqcoord [i]
```

```
    yq = yqcoord [i]
```

```
    xn1 = xc-(xc-xq)*0.333
```

```
    yn1 = yc-(yc-yq)*0.333
```

```
    xn2 = xq+(xc-xq)*0.333
```

```
    yn2 = yq+(yc-yq)*0.333
```

```
    xxii = xc-(xc-xq)*0.166
```

```
    yyii = yc-(yc-yq)*0.166
```

```
    xxie = xq+(xc-xq)*0.166
```

```
    yyie = yq+(yc-yq)*0.166
```

```
    xxim = xq+(xc-xq)*0.5
```

```
    yyim = yq+(yc-yq)*0.5
```

```
    xcoord1.append(xn1)
```

```
    ycoord1.append(yn1)
```

```
    xcoord2.append(xn2)
```

```
    ycoord2.append(yn2)
```

```
    xxci.append(xxii)
```

```
    yyxi.append(yyii)
```

```
    xxcie.append(xxie)
```

```
    yyxie.append(yyie)
```

```
    xxcim.append(xxim)
```

```
    yyxim.append(yyim)
```

```
    i = i+1
```

```
f0.close()

fname0 = 'hole_nodes.txt'

f0 = open(fname0,'a')

eln1 = []

eln2 = []

elni = []

elne = []

elnm = []

nel = 60000001+((qq*4)+1)*2

for i in range (qq*4+1):          # Crea nodes interiors dels elements interiors

    eln1.append(nel)

    xn1 = xcoord1[i]

    yn1 = ycoord1[i]

    xn1 = '%.3f' % xn1

    yn1 = '%.3f' % yn1

    line_w = str(nel)+' '+str(xn1)+' '+str(yn1)+' 0'+'\n'

    f0.write(line_w)

    nel = nel+1

    i = i+1

for j in range (qq*4+1):          # Crea nodes interiors dels elements exteriors

    eln2.append(nel)

    xn2 = xcoord2[j]

    yn2 = ycoord2[j]

    xn2 = '%.3f' % xn2

    yn2 = '%.3f' % yn2

    line_w = str(nel)+' '+str(xn2)+' '+str(yn2)+' 0'+'\n'

    f0.write(line_w)

    nel = nel+1
```

$j = j + 1$

for h in range (qq*2+1): # Crea nodes intermitjos dels elements interiors

elni.append(nel)

xni = xxci[h*2]

yni = yyci[h*2]

xni = '%.3f' % xni

yni = '%.3f' % yni

line_w = str(nel)+' '+str(xni)+' '+str(yni)+' 0'+'\n'

f0.write(line_w)

nel = nel+1

h = h+2

for k in range (qq*2+1): # Crea nodes intermitjos dels elements exteriors

elne.append(nel)

xne = xxcie[k*2]

yne = yycie[k*2]

xne = '%.3f' % xne

yne = '%.3f' % yne

line_w = str(nel)+' '+str(xne)+' '+str(yne)+' 0'+'\n'

f0.write(line_w)

nel = nel+1

k = k+2

for s in range (qq*2+1): # Crea nodes intermitjos dels elements del mig

elnm.append(nel)

xnm = xxcim[s*2]

ynm = yycim[s*2]

xnm = '%.3f' % xnm

ynm = '%.3f' % ynm

line_w = str(nel)+' '+str(xnm)+' '+str(ynm)+' 0'+'\n'

```

f0.write(line_w)

nel = nel+1

s = s+2

f0.close

fname0 = 'hole_nodes.txt'           #Guarda les coord x i y dels nodes del 3r Q

f0 = open(fname0,'r')

xco = []

yco = []

line = f0.readline()

n_li = sum(1 for line in f0)

f0.seek(0)

for i in range (n_li+1):

    line_r = f0.readline()

    xc = eval(line_r[9:16])

    yc = eval(line_r[16:22])

    xco.append(xc)

    yco.append(yc)

    i = i+1

f0.close()

fname0 = 'hole_nodes.txt'           #Node generation

f0 = open(fname0,'a')

nnod = 60001001

nn2 = []

for i in range (n_li):               #Crea nodes 2n Q (Marc exterior)

    xc2 = xco[i]

    yc23 = yco[i]

```

Es guarden dins uns vectors les coordenades x i y dels nodes del 3r quadrant generats anteriorment, per tal de crear els nodes dels altres 3 quadrants que falten (1, 2 i 4), aplicant càlculs de simetria respecte el centre del forat.


```
yc2 = 15+(15-yc23)

xc2 = '%.3f' % xc2

yc2 = '%.3f' % yc2

if float(yc2) == yc23:

    i = i+1

else:

    line_w = str(nnod)+' '+str(xc2)+' '+str(yc2)+' 0'+'\n'

    f0.write(line_w)

    nn2.append(nnod)

    nnod = nnod+1

    i = i+1

nnod = 60002001

nn4 = []

for j in range (n_li):          #Crea nodes 4t Q (Marc exterior)

    xc43 = xco[j]

    yc4 = yco[j]

    xc4 = 100+(100-xc43)

    xc4 = '%.3f' % xc4

    yc4 = '%.3f' % yc4

    if float(xc4) == xc43:

        j = j+1

    else:

        line_w = str(nnod)+' '+str(xc4)+' '+str(yc4)+' 0'+'\n'

        f0.write(line_w)

        nn4.append(nnod)

        nnod = nnod+1

        j = j+1

nnod = 60003001
```

```

nn1 = []

for k in range (n_li+1):          #Crea nodes 1r Q (Marc exterior)

    xc13 = xco[k]

    yc13 = yco[k]

    xc1 = 100+(100-xc13)

    yc1 = 15+(15-yc13)

    xc1 = '%.3f' % xc1

    yc1 = '%.3f' % yc1

    line_w = str(nnod)+' '+str(xc1)+' '+str(yc1)+' 0'+'\n'

    f0.write(line_w)

    nn1.append(nnod)

    nnod = nnod+1

    k = k+1

xxc = []                        # Nodes de les concentricitats

yyc = []

nnlat = []

nnint = []

nodes2 = []

nodes4 = []

nodes1 = []

for j in range (12):           #Nodes 3rQ

    i_px = float(100-(od*0.5)+0.5*(j+1))          #Nodes 3rQ lateral
    element

    i_px = '%.3f' % i_px

    i_py = 15.0

    i_py = '%.3f' % i_py

    i_px0 = float(i_px)

    i_py0 = float(i_py)

```

```

an2 = an

r = (od*0.5)-0.5*(j+1)

nn = 60000001+(j+1)*100000

for i in range (qq*4+1):

    line_w = str(nn)+' '+str(i_px)+' '+str(i_py)+' 0'+'\n'

    f0.write(line_w)

    xxc.append(i_px)

    yyc.append(i_py)

    nnlat.append(nn)

    i_px = i_px0+r-math.cos(an2)*r

    i_py = i_py0-math.sin(an2)*r

    i_px = '%.3f' % i_px

    i_py = '%.3f' % i_py

    an2 = an2+an

    nn = nn+1

    i = i+1

i_pxi = float(100-(od*0.5+0.25)+0.5*(j+1))           #Nodes 3rQ interior element

i_pxi = '%.3f' % i_pxi

i_pyi = 15.0

i_pyi = '%.3f' % i_pyi

i_px0i = float(i_pxi)

i_py0i = float(i_pyi)

an2 = 2*an

r = (od*0.5+0.25)-0.5*(j+1)

for i in range (qq*2+1):

    line_w = str(nn)+' '+str(i_pxi)+' '+str(i_pyi)+' 0'+'\n'

    f0.write(line_w)

    xxc.append(i_pxi)

```

```

yyc.append(i_pyi)

nnint.append(nn)

i_pxi = i_px0i+r-math.cos(an2)*r
i_pyi = i_py0i-math.sin(an2)*r

i_pxi = '%.3f' % i_pxi
i_pyi = '%.3f' % i_pyi

an2 = an2+2*an

nn = nn+1

i = i+1

n2n = 60000001+((j+1)*100000)+1000

for i in range (qq*6+2):          #Crea nodes 2n Q

    xc2 = float(xxc[i+j*(qq*6+2)])

    yc23 = float(yyc[i+j*(qq*6+2)])

    yc2 = 15+(15-yc23)

    xc2 = '%.3f' % xc2

    yc2 = '%.3f' % yc2

    if float(yc2) == yc23:

        i = i+1

    else:

        line_w = str(n2n)+' '+str(xc2)+' '+str(yc2)+' 0'+'\n'

        f0.write(line_w)

        nodes2.append(n2n)

        n2n = n2n+1

        i = i+1

n4n = 60000001+((j+1)*100000)+2000

for i in range (qq*6+2):          #Crea nodes 4t Q

    xc43 = float(xxc[i+j*(qq*6+2)])

    yc4 = float(yyc[i+j*(qq*6+2)])

```

```

xc4 = 100+(100-xc43)

xc4 = '%.3f' % xc4

yc4 = '%.3f' % yc4

if float(xc4) == xc43:

    i = i+1

else:

    line_w = str(n4n)+' '+str(xc4)+' '+str(yc4)+' 0'+'\n'

    f0.write(line_w)

    nodes4.append(n4n)

    n4n = n4n+1

    i = i+1

n1n = 60000001+((j+1)*100000)+3000

for i in range (qq*6+2):      #Crea nodes 1r Q

    xc13 = float(xxc[i+j*(qq*6+2)])

    yc13 = float(yyc[i+j*(qq*6+2)])

    xc1 = 100+(100-xc13)

    yc1 = 15+(15-yc13)

    xc1 = '%.3f' % xc1

    yc1 = '%.3f' % yc1

    line_w = str(n1n)+' '+str(xc1)+' '+str(yc1)+' 0'+'\n'

    f0.write(line_w)

    nodes1.append(n1n)

    n1n = n1n+1

    i = i+1

j = j + 1

f0.close()

#Crea fitxer input de nodes

```

```
fname0 = 'hole_nodes.txt'
```

```
fname1 = 'hole_nodes.inp'
```

```
f0 = open(fname0, 'r')
```

```
f1 = open(fname1, 'w')
```

```
line = f0.readline()
```

```
n_li = sum(1 for line in f0)
```

```
f0.seek(0)
```

```
for i in range (n_li+1):
```

```
    line_r = f0.readline()
```

```
    nnum = eval(line_r[0:8])
```

```
    ncx = eval(line_r[9:16])
```

```
    ncy = eval(line_r[16:22])
```

```
    ncx = '%.3f' % ncx
```

```
    ncy = '%.3f' % ncy
```

```
    line_w = str(nnum)+' '+str(ncx)+' '+str(ncy)+' 0'+'\n'
```

```
    f1.write(line_w)
```

```
    i = i+1
```

```
f0.close()
```

```
f1.close()
```

```
fname0 = 'hole_elements.inp'
```

```
# Hole elements generation
```

```
fname1 = 'hole_nodes.txt'
```

```
f0 = open(fname0, 'w')
```

```
f1 = open(fname1, 'r')
```

```
line_r = f1.readline()
```

```
nelem = 70000001
```

```
for i in range (qq*2):
```

```
#Exterior elements 3rdQ
```

```
    if i < qq:
```

En aquest petit fragment de codi es genera el fitxer de nodes que formaran els elements que envoltaran el forat

Creació dels elements del marc del voltant del forat a partir dels nodes creats anteriorment.

```

n4 = 10300401-qq*2-10000*i

n8 = n4 - 5000

n1 = n4 - 10000

if i >= qq:

    n4 = 10300401-qq*2-qq*10000+2*(i-qq)

    n8 = n4 + 1

    n1 = n4 + 2

n3 = eln2[i*2]

n6 = n3 + 1

n2 = n3 + 2

n7 = elne[i]

n5 = n7+1

if i == 0:

    n42e = n4

    n72e = n7

    n32e = n3

el_a = str(nelem)+'', '+str(n1)+'', '+str(n2)+'', '+str(n3)+'', '+str(n4)

el_b = ', '+str(n5)+'', '+str(n6)+'', '+str(n7)+'', '+str(n8)+'\n'

el_ab = el_a+el_b

f0.write(el_ab)

nelem = nelem+1

i = i+1

n44e = n2                                #Nodes frontera amb el 4tQ

n74e = n5

n34e = n1

n3qi = []

line_r = f1.readline()

for i in range (qq*2):                    #Interior elements 3rdQ

```

```

n3 = n_3qint[i*2]

n3qi.append(n3)

n6 = n3 + 1

n3qi.append(n6)

n2 = n3 + 2

n4 = eln1[i*2]

n8 = n4 + 1

n1 = n4 + 2

n7 = elni[j]

n5 = n7+1

if i == 0:

    n42i = n4

    n72i = n7

    n32i = n3

if i == qq*2-1:

    n3qi.append(n2)

    el_a = str(nelem)+'', '+str(n1)+'', '+str(n2)+'', '+str(n3)+'', '+str(n4)

    el_b = ', '+str(n5)+'', '+str(n6)+'', '+str(n7)+'', '+str(n8)+'\n'

    el_ab = el_a+el_b

    f0.write(el_ab)

    nelem = nelem+1

    i = i+1

n44i = n2                                #Nodes frontera amb el 4tQ

n74i = n5

n34i = n1

for i in range (qq*2):                    #Middle elements 3rdQ

    n4 = eln2[i*2]

    n8 = n4 + 1

```



```
n1 = n4 + 2
n3 = eln1[i*2]
n6 = n3 + 1
n2 = n3 + 2
n7 = elnm[i]
n5 = n7+1
if i == 0:
    n42m = n4
    n72m = n7
    n32m = n3
    el_a = str(nelem)+', '+str(n1)+', '+str(n2)+', '+str(n3)+', '+str(n4)
    el_b = ', '+str(n5)+', '+str(n6)+', '+str(n7)+', '+str(n8)+'\n'
    el_ab = el_a+el_b
    f0.write(el_ab)
    nelem = nelem+1
    i = i+1
n44m = n2 #Nodes frontera amb el 4tQ
n74m = n5
n34m = n1
```

Aquí s'ha retallat una part del codi per no estendre massa el document.

En aquesta part hi havia la creació de la resta d'elements dels altres quadrants del marc del voltant del forat. Però com que eren càlculs repetitius i iguals com els que s'han fet pel 3r quadrant, han estat suprimits.

#ELEMENTS DE LES CONCENTRICITATS

```
for i in range (qq*2):          #Elements 3rdQ primera conc
```

```
    n3 = nnlat[i*2]
```

```
    n6 = n3+1
```

```
    n2 = n3+2
```

```
    n4 = n3qi[i*2]
```

```
    n8 = n4+1
```

```
    n1 = n4+2
```

```
    n7 = nnint[i]
```

```
    n5 = n7+1
```

```
    if i == 0:
```

```
        n12 = n4
```

```
        n52 = n7
```

```
        n22 = n3
```

```
    if i == qq*2-1:
```

```
        n14 = n2
```

```
        n54 = n5
```

```
        n24 = n1
```

```
    el_a = str(nelem)+' '+str(n1)+' '+str(n2)+' '+str(n3)+' '+str(n4)
```

```
    el_b = ' '+str(n5)+' '+str(n6)+' '+str(n7)+' '+str(n8)+'\n'
```

```
    el_ab = el_a+el_b
```

```
    f0.write(el_ab)
```

```
    nelem = nelem+1
```

```
    i = i+1
```

```
for i in range (qq*2):          #Elements 2nQ primera conc
```

```
    n6 = nodes2[i*2]
```

```
    n2 = n6-1
```

```
    n3 = n6+1
```

Seguidament es creen els elements que conformaran les concentricitats al voltant del forat, els quals posteriorment seran orientats per simular el reforç de fibra de carboni concèntrica al forat

Primerament es creen només els elements de la primera concentricitat al voltant del forat quadrant per quadrant

```
n8 = nn2[i*2+(qq*4)]
n4 = n8+1
n1 = n8-1
n7 = nodes2[i+qq*4]
n5 = n7-1
if i == 0:
    n1 = n12
    n5 = n52
    n2 = n22
if i == qq*2-1:
    n31 = n4
    n71 = n7
    n41 = n3
el_a = str(nelem)+' '+str(n1)+' '+str(n2)+' '+str(n3)+' '+str(n4)
el_b = ' '+str(n5)+' '+str(n6)+' '+str(n7)+' '+str(n8)+'\n'
el_ab = el_a+el_b
f0.write(el_ab)
nelem = nelem+1
i = i+1
for i in range (qq*2):          #Elements 4tQ primera conc
    n4 = nodes4[i*2]
    n8 = n4+1
    n1 = n4+2
    n3 = nn4[i*2+(qq*4)]
    n6 = n3+1
    n2 = n3+2
    n7 = nodes4[i+qq*4]
    n5 = n7+1
```

```
if i == 0:
    n11 = n4
    n51 = n7
    n21 = n3

if i == qq*2-1:
    n1 = n14
    n5 = n54
    n2 = n24

el_a = str(nelem)+' '+str(n1)+' '+str(n2)+' '+str(n3)+' '+str(n4)
el_b = ' '+str(n5)+' '+str(n6)+' '+str(n7)+' '+str(n8)+'\n'
el_ab = el_a+el_b
f0.write(el_ab)
nelem = nelem+1
i = i+1

for i in range (qq*2):          #Elements 1rQ primera conc
    n1 = nodes1[i*2]
    n8 = n1+1
    n4 = n1+2
    n2 = nn1[i*2+(qq*4+1)]
    n6 = n2+1
    n3 = n2+2
    n5 = nodes1[i+(qq*4+1)]
    n7 = n5+1

    if i == 0:
        n1 = n11
        n5 = n51
        n2 = n21

    if i == qq*2-1:
```

```

n3 = n31

n7 = n71

n4 = n41

el_a = str(nelem)+' '+str(n1)+' '+str(n2)+' '+str(n3)+' '+str(n4)

el_b = ' '+str(n5)+' '+str(n6)+' '+str(n7)+' '+str(n8)+'\n'

el_ab = el_a+el_b

f0.write(el_ab)

nelem = nelem+1

i = i+1

for j in range (11):
    for i in range (qq*2): #Elements 3rdQ resta conc
        n3 = nnlat[i*2+(j+1)*(qq*4+1)]
        n6 = n3+1
        n2 = n3+2
        n4 = nnlat[i*2+(j)*(qq*4+1)]
        n8 = n4+1
        n1 = n4+2
        n7 = nnint[i+(j+1)*(qq*2+1)]
        n5 = n7+1
        if i == 0:
            n12 = n4
            n52 = n7
            n22 = n3
        if i == qq*2-1:
            n14 = n2
            n54 = n5
            n24 = n1
    el_a = str(nelem)+' '+str(n1)+' '+str(n2)+' '+str(n3)+' '+str(n4)

```

Un cop creats els elements de la primera concentricitat, es creen la resta d'elements de les altres concentricitats.

Tal i com es pot veure pel rang de la iteració encerclada amb un valor de 11, que indica la quantitat de concentricitats que es generaran sense comptar la primera.

Com que en aquest cas estem tractant 6 anells de fibra concèntrics al forat, i el gruix de la fibra equival més o menys a 1mm. Si tenim elements de 0.5mm, equival a que cada dos concentricitats d'elements seran una concentricitat de fibra.

Per això es generen 11 concentricitats que sumades a la que ja havíem creat fan un total de 12 (2 concentricitats d'elements per anell de fibra).

```

el_b = ', '+str(n5)+'', '+str(n6)+'', '+str(n7)+'', '+str(n8)+'\n'

el_ab = el_a+el_b

f0.write(el_ab)

nelem = nelem+1

i = i+1

for i in range (qq*2):          #Elements 2nQ resta conc

    n6 = nodes2[i*2+(j+1)*(qq*6)]

    n2 = n6-1

    n3 = n6+1

    n8 = nodes2[i*2+(j)*(qq*6)]

    n4 = n8+1

    n1 = n8-1

    n7 = n6+(qq*4)-i

    if j == 0:

        n7 = nodes2[i+(j+1)*(qq*10)]

    n5 = n7-1

    if i == 0:

        n1 = n12

        n5 = n52

        n2 = n22

    if i == qq*2-1:

        n31 = n4

        n71 = n7

        n41 = n3

    el_a = str(nelem)+'', '+str(n1)+'', '+str(n2)+'', '+str(n3)+'', '+str(n4)

    el_b = ', '+str(n5)+'', '+str(n6)+'', '+str(n7)+'', '+str(n8)+'\n'

    el_ab = el_a+el_b

    f0.write(el_ab)

```

```

    nelem = nelem+1

    i = i+1

for i in range (qq*2):          #Elements 4tQ resta conc

    n4 = nodes4[i*2+(j+1)*(qq*6)]

    n8 = n4+1

    n1 = n4+2

    n3 = nodes4[i*2+(j)*(qq*6)]

    n6 = n3+1

    n2 = n3+2

    n7 = n4+(qq*4)-i

    if j == 0:

        n7 = nodes4[i+(j+1)*(qq*10)]

    n5 = n7+1

    if i == 0:

        n11 = n4

        n51 = n7

        n21 = n3

    if i == qq*2-1:

        n1 = n14

        n5 = n54

        n2 = n24

    el_a = str(nelem)+' '+str(n1)+' '+str(n2)+' '+str(n3)+' '+str(n4)

    el_b = ' '+str(n5)+' '+str(n6)+' '+str(n7)+' '+str(n8)+'\n'

    el_ab = el_a+el_b

    f0.write(el_ab)

    nelem = nelem+1

    i = i+1

for i in range (qq*2):          #Elements 1rQ resta conc

```

```
n1 = nodes1[i*2+(j+1)*(qq*6+2)]
n8 = n1+1
n4 = n1+2
n2 = nodes1[i*2+(j)*(qq*6+2)]
n6 = n2+1
n3 = n2+2
n5 = n1 +(qq*4+1)-i
if j == 0:
    n5 = nodes1[i+(j+1)*(qq*10+3)]
n7 = n5+1
if i == 0:
    n1 = n11
    n5 = n51
    n2 = n21
if i == qq*2-1:
    n3 = n31
    n7 = n71
    n4 = n41
el_a = str(nelem)+' '+str(n1)+' '+str(n2)+' '+str(n3)+' '+str(n4)
el_b = ' '+str(n5)+' '+str(n6)+' '+str(n7)+' '+str(n8)+'\n'
el_ab = el_a+el_b
f0.write(el_ab)
nelem = nelem+1
i = i+1
j=j+1
f0.close()
f1.close()
```



```
n_n = ne0
```

```
y_n = 0.
```

```
fname0 = filename+'_nodes.inp'
```

```
f0 = open(fname0,'w')
```

```
for i in range(hh*4+1):
```

```
    x_n = 0.
```

```
    n_n = ne0+i*ninc/2
```

```
    for j in range(ww*4+1):
```

```
        node = str(n_n)+'', '+str(x_n)+0', '+str(y_n)+0, 0.'+'\\n'
```

```
        f0.write(node)
```

```
        n_n = n_n+1
```

```
        x_n = x_n+1./4
```

```
    y_n = y_n+1./4
```

```
f0.close()
```

```
fname1 = filename+'_el.inp'
```

```
f1 = open(fname1,'w')
```

```
for i in range(2*hh):
```

```
    for j in range(2*ww):
```

```
        n_el = ne0+i*ninc+j
```

```
        el_1 = ne0+i*ninc+j*2
```

```
        el_2 = el_1+2
```

```
        el_3 = el_2+ninc
```

```
        el_4 = el_1+ninc
```

```
        el_5 = el_1+1
```

```
        el_6 = el_2+ninc/2
```

```
        el_7 = el_5+ninc
```

```
        el_8 = el_1+ninc/2
```

En aquest apartat del codi es generen els nodes i el fitxer de nodes de la resta de la proveta.

(Els que no conformen el marc del forat ni les seves concentricitats)

Seguidament es generen els elements i el fitxer d'elements de la resta de la proveta, a partir dels nodes anteriors.

(Els que no conformen el marc del forat ni les seves concentricitats)

```

el_a = str(n_el)+' '+str(el_1)+' '+str(el_2)+' '+str(el_3)+' '+str(el_4)

el_b = ' '+str(el_5)+' '+str(el_6)+' '+str(el_7)+' '+str(el_8)+'\n'

el_ab = el_a+el_b

if j in ix and i in iy:

    el_ab = el_ab

else:

    f1.write(el_ab)

f1.close()

#Determination of the elements to be oriented and their center of mass

fname1 = 'hole_elements.inp'

fname2 = 'hole_nodes.txt'

fname3 = filename+'_cdm.txt'

f1 = open(fname1,'r')

f2 = open(fname2,'r')

f3 = open(fname3,'w')

nn5 = []

nn7 = []

eln = []

count = 0

if f_with>=1:

    line = f1.readline()

    n_li = sum(1 for line in f1)

    f1.seek(0)

    for i in range(n_li+1):

        #Primer guardem els nodes 5 i 7 dels elements a orientar

        line_r = f1.readline()

        el_hn = eval(line_r[0:8])

        n5 = eval(line_r[50:58])

```

Aquest fragment de codi estableix quins dels elements concèntrics al voltant del forat s'hauran d'orientar localment per simular la disposició de la fibra de carboni. Seguidament n'extreu el seu centre de masses que serà el punt on s'aplicarà la orientació.

```
n7 = eval(line_r[70:78])

nn5.append(n5)

nn7.append(n7)

eln.append(el_hn)

count = count + 1

i = i + 1

line2 = f2.readline()

n_li2 = sum(1 for line2 in f2)

f2.seek(0)

for i in range (count):          #Guardem les coordenades dels nodes 5 i 7

    nod5 = nn5[i]

    nod7 = nn7[i]

    el_n = eln[i]

    sigx = 0

    sigy = 0

    j = 0

    for j in range (n_li2):

        line_rr = f2.readline()

        nnum = eval(line_rr[0:8])

        if nnum == nod5 and sigx == 0:

            x_n5 = eval(line_rr[9:16])

            y_n5 = eval(line_rr[16:22])

            sigx = 1

        if nnum == nod7 and sigy == 0:

            x_n7 = eval(line_rr[9:16])

            y_n7 = eval(line_rr[16:22])

            sigy = 1

    if sigx == 1 and sigy == 1:    #Calculem el cdm de l'element
```

Càlcul de les coordenades X i Y del centre de masses de cada element a orientar

```

if x_n5 <= x_n7:
    x_cdm = x_n5+((x_n7-x_n5)*0.5)
else:
    x_cdm = x_n7+((x_n5-x_n7)*0.5)
if y_n5 <= y_n7:
    y_cdm = y_n5+((y_n7-y_n5)*0.5)
else:
    y_cdm = y_n7+((y_n5-y_n7)*0.5)
x_cdm = '%.3f' % x_cdm
y_cdm = '%.3f' % y_cdm
line_w = str(el_n)+' '+str(x_cdm)+' '+str(y_cdm)+'\n'
f3.write(line_w)
f2.seek(0)
break
else:
    j = j + 1
    i = i + 1
f3.close()
f2.close()
f1.close()

#Determination of the angle that each element needs to be oriented respect hole center
fname1 = filename+'_cdm.txt'
fname2 = filename+'_angle.txt'
f1 = open(fname1,'r')
f2 = open(fname2,'w')
line_r = f1.readline()
numb_li = sum(1 for line in f1)

```

Un cop establerts els elements a orientar, a partir del centre de masses de cada un trobat anteriorment, es calcula l'angle que s'haurà d'orientar cada element.

Aquest angle es calcula trobant el vector perpendicular a la recta que uneix el centre del forat amb el centre de masses de cada element

```

f1.seek(0)

noriset = []

st = 70000457      #Primer element de les concentricitats

elinc = 303        #Numero d'elements dintre de cada concentricitat de fibra

for i in range(numb_li+1):

    line_r = f1.readline()

    el_n = eval(line_r[0:8])

    pos_x = eval(line_r[9:16])

    pos_y = eval(line_r[16:23])

    if el_n >= st and el_n <= st+elinc:      #Orientacio elements primera concentricitat fibra

        if pos_y < 10 or pos_y > 20:

            cx = 100 - pos_x

            cy = 15 - pos_y

            if cx != 0 and cy != 0:

                angle = math.atan(-cx/cy)

                a_d = math.degrees(angle)

            elif cx == 0:

                a_d = 0

            elif cy == 0:

                a_d = 90

            line_w = str(el_n)+' '+str(a_d)+'\n'

            f2.write(line_w)

    if el_n >= st+elinc+1 and el_n <= st+1+(elinc*2):#Orientacio elements segona
concentricitat fibra

        if pos_y < 11 or pos_y > 19:

            cx = 100 - pos_x

            cy = 15 - pos_y

            if cx != 0 and cy != 0:

```

```

        angle = math.atan(-cx/cy)

        a_d = math.degrees(angle)

    elif cx == 0:

        a_d = 0

    elif cy == 0:

        a_d = 90

    line_w = str(el_n)+' '+str(a_d)+'\n'

    f2.write(line_w)

    if el_n >= st+2+(elinc*2) and el_n <= st+2+(elinc*3): #Orientacio    elements    segona
concentricitat fibra

        if pos_y < 12 or pos_y > 18:

            cx = 100 - pos_x

            cy = 15 - pos_y

            if cx != 0 and cy != 0:

                angle = math.atan(-cx/cy)

                a_d = math.degrees(angle)

            elif cx == 0:

                a_d = 0

            elif cy == 0:

                a_d = 90

            line_w = str(el_n)+' '+str(a_d)+'\n'

            f2.write(line_w)

    if el_n >= st+3+(elinc*3) and el_n <= st+3+(elinc*4): #Orientacio    elements    quarta
concentricitat fibra

        if pos_y < 13 or pos_y > 17:

            cx = 100 - pos_x

            cy = 15 - pos_y

            if cx != 0 and cy != 0:

```

```

        angle = math.atan(-cx/cy)

        a_d = math.degrees(angle)

    elif cx == 0:

        a_d = 0

    elif cy == 0:

        a_d = 90

    line_w = str(el_n)+' '+str(a_d)+'\n'

    f2.write(line_w)

    if el_n >= st+4+(elinc*4) and el_n <= st+4+(elinc*5): #Orientacio elements cinquena
concentricitat fibra

        if pos_y < 14 or pos_y > 16:

            cx = 100 - pos_x

            cy = 15 - pos_y

            if cx != 0 and cy != 0:

                angle = math.atan(-cx/cy)

                a_d = math.degrees(angle)

            elif cx == 0:

                a_d = 0

            elif cy == 0:

                a_d = 90

            line_w = str(el_n)+' '+str(a_d)+'\n'

            f2.write(line_w)

    if el_n >= st+5+(elinc*5) and el_n <= st+5+(elinc*6): #Orientacio elements
sisena concentricitat fibra (mes propera al forat)

        cx = 100 - pos_x

        cy = 15 - pos_y

        if cx != 0 and cy != 0:

            angle = math.atan(-cx/cy)

```

```
        a_d = math.degrees(angle)

    elif cx == 0:

        a_d = 0

    elif cy == 0:

        a_d = 90

    line_w = str(el_n)+' '+str(a_d)+'\n'

    f2.write(line_w)

else:

    noriset.append(el_n)

f2.close()

f1.close()
```

#Write orientations file and element orientation sets file

```
fname1 = filename+'_angle.txt'
```

```
fname2 = 'Orientations.txt'
```

```
fname3 = 'Orientation_hole_sets.txt'
```

```
f1 = open(fname1,'r')
```

```
f2 = open(fname2,'w')
```

```
f3 = open(fname3,'w')
```

```
line_r = f1.readline()
```

```
num_lin = sum(1 for line in f1)
```

```
f1.seek(0)
```

```
angles = []
```

```
for i in range(num_lin+1):
```

```
    line_r = f1.readline()
```

```
    rot = eval(line_r[9:15])
```

```
    if rot in angles:
```

```
        i = i + 1
```

Seguidament s'escriu el fitxer que conté totes les orientacions calculades anteriorment, i el fitxer que conté tots els elements que s'han d'orientar. Aquests elements estan agrupats per sets d'elements que comparteixen un mateix angle d'orientació.


```
else:

    angles.append(rot)

    i = i + 1

j = 0

set = []

for i in angles:

    line_w1 = '*orientation, name=ori'+str(j)+'', definition=coordinates, system=rectangular+'\n'

    line_w2 = '1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0'+'\n'+3, '+str(i)+'\n'

    line_w = line_w1+line_w2

    f2.write(line_w)

    line_w11 = '*elset, elset=rot_'+str(j)+'\n'

    f3.write(line_w11)

    f1.seek(0)

    for z in range (num_lin+1):

        line_rr = f1.readline()

        el = eval(line_rr[0:8])

        rotation = eval(line_rr[9:15])

        if rotation == i:

            set.append(el)

k = 0

for m in set:

    if k == 0:

        line_w22 = str(m)

        elif k == 16 or k == 31 or k == 47 or k == 63 or k == 79 or k == 95:

            line_jump = '\n'

            f3.write(line_jump)

            line_w22 = str(m)

    else:
```

```

        line_w22 = ', '+str(m)

        f3.write(line_w22)

        k = k+1

        jump = '\n'

        f3.write(jump)

        set *= 0

        j = j+1

f3.close()

f2.close()

f1.close()

fname0 = filename+'_cdm.txt' #Creacio del set d'elements del marc i concentricitats que
contenen fibra horitzontal

fname1 = 'flat_cfr.txt'

f0 = open(fname0, 'r')

f1 = open(fname1, 'w')

line_write = "*elset, elset=f_ori_0'+ '\n'

f1.write(line_write)

line_r = f0.readline()

n_line = sum(1 for line in f0)

f0.seek(0)

ffe = 70000001

k = 0

n = 16

frame_b = []

nyl_el = []

for i in range (n_line):          #Elements del marc que van a 0 graus

        line_r = f0.readline()

```

En aquest fragment de codi es crea el fitxer que conté els sets d'elements del marc i les concentricitats, els quals no han d'anar orientats respecte el forat, i contenen fibra a 0 o 180 graus o bé que contenen niló.

```

el_n = eval(line_r[0:8])

pos_y = eval(line_r[16:23])

ok = 0

if el_n >= ffe and el_n <= ffe+qq*24:

    if pos_y > 15-nfiber+0.25 and pos_y < 15+nfiber-0.25:

        line_w1 = str(el_n)

        ok = 1

    if pos_y < 15-(qq*0.5)+0.75 or pos_y > 15+(qq*0.5)-0.75:

        frame_b.append(el_n)

    if ok == 1:

        if k == 0:

            f1.write(line_w1)

        elif k == n:

            line_w2 = '\n'

            line_w = line_w2+line_w1

            f1.write(line_w)

            n = n +16

        else:

            line_w3 = ','

            line_w = line_w3+line_w1

            f1.write(line_w)

        k += 1

    else:

        nyl_el.append(el_n)

for i in noriset:          #Elements de les concentricitats que van a 0 graus

    if i > ffe+qq*24:

        if k == 0:

            line_w11 = str(i)

```

```

elif k == n:
    line_j = '\n'
    f1.write(line_j)
    line_w11 = str(i)
    n = n + 16
else:
    line_w11 = ', '+str(i)
    f1.write(line_w11)
    k += 1

line_w = '\n'+'*elset, elset=f_ori_180'+ '\n'      #Elements del marc que van a 180 graus
f1.write(line_w)

k = 0
n = 16

for i in frame_b:
    if k == 0:
        line_w11 = str(i)
    elif k == n:
        line_j = '\n'
        f1.write(line_j)
        line_w11 = str(i)
        n = n + 16
    else:
        line_w11 = ', '+str(i)
        f1.write(line_w11)
        k += 1

line_w = '\n'+'*elset, elset=f_nyl_el'+ '\n' #Elements del marc de nylon
f1.write(line_w)

k = 0

```

```
n = 16
```

```
for i in nyl_el:
```

```
    if k == 0:
```

```
        line_w11 = str(i)
```

```
    elif k == n:
```

```
        line_j = '\n'
```

```
        f1.write(line_j)
```

```
        line_w11 = str(i)
```

```
        n = n + 16
```

```
    else:
```

```
        line_w11 = ', '+str(i)
```

```
    f1.write(line_w11)
```

```
    k += 1
```

```
f1.close()
```

```
f0.close()
```

```
fname0 = 'fiber_sets.txt' #Creacio dels sets d'elements que contenen fibra de les vores
```

```
f0 = open(fname0, 'w')
```

```
line_w = '*elset, elset=fiber_el_0, generate'+'\n'
```

```
f0.write(line_w)
```

```
lbe = 10000001
```

```
rbe = 10000400
```

```
lte = 10590001
```

```
rte = 10590400
```

```
lme1 = 10290001
```

```
lme2 = 10300001
```

```
rme1 = 10290400
```

Seguidament es crea el fitxer que engloba els sets d'elements que contenen fibra però que formen part del cos de la proveta. No inclou els elements del marc ni de les concentricitats del forat.

Serien els elements que van orientats de forma lineal al voltant de la peça.

$rme2 = 10300400$

for i in range (6): #Elements que van orientats a 0 graus

$$lm11 = lme1 - (i^2)*10000 + (3+i^2)$$

$$lm12 = lme1 - (i^2+1)*10000 + (3+i^2)$$

$$lmm11 = lme1 + 180 - (i^2)*10000$$

$$lmm12 = lme1 + 180 - (i^2+1)*10000$$

$$lm21 = lme2 + (i^2)*10000 + (3+i^2)$$

$$lm22 = lme2 + (i^2+1)*10000 + (3+i^2)$$

$$lmm21 = lme2 + 180 + (i^2)*10000$$

$$lmm22 = lme2 + 180 + (i^2+1)*10000$$

$$rm11 = rme1 - (i^2)*10000 - (3+i^2)$$

$$rm12 = rme1 - (i^2+1)*10000 - (3+i^2)$$

$$rmm11 = rme1 - 180 - (i^2)*10000$$

$$rmm12 = rme1 - 180 - (i^2+1)*10000$$

$$rm21 = rme2 + (i^2)*10000 - (3+i^2)$$

$$rm22 = rme2 + (i^2+1)*10000 - (3+i^2)$$

$$rmm21 = rme2 - 180 + (i^2)*10000$$

$$rmm22 = rme2 - 180 + (i^2+1)*10000$$

line_w = str(lm11)+'', '+str(lmm11)+'', '1'+'\n'+ str(lm12)+'', '+str(lmm12)+'', '1'+'\n'+ str(lm21)+'',
'+str(lmm21)+'', '1'+'\n'+ str(lm22)+'', '+str(lmm22)+'', '1'+'\n'+ str(rmm11)+'', '+str(rm11)+'', '1'+'\n'+
str(rmm12)+'', '+str(rm12)+'', '1'+'\n'+ str(rmm21)+'', '+str(rm21)+'', '1'+'\n'+ str(rmm22)+'', '+str(rm22)+'',
1'+'\n'

f0.write(line_w)

```
line_w = '*elset, elset=fiber_el_180, generate'+'\n'
```

```
f0.write(line_w)
```

```
for i in range (6):           #Elements que van orientats a 180 graus
```

$$lb1 = lbe + (i^2+1)*10000 + (3+i^2)$$

$$lb2 = lbe + (i^2+2)*10000 + (3+i^2)$$

$$rb1 = rbe + (i^2+1)*10000 - (3+i^2)$$

$$rb2 = rbe + (i^2+2)*10000 - (3+i^2)$$

$$lt1 = lte - (i^2+1)*10000 + (3+i^2)$$

$$lt2 = lte - (i^2+2)*10000 + (3+i^2)$$

$$rt1 = rte - (i^2+1)*10000 - (3+i^2)$$

$$rt2 = rte - (i^2+2)*10000 - (3+i^2)$$

```
line_w = str(lb1)+'', '+str(rb1)+'', 1+'\n'+ str(lb2)+'', '+str(rb2)+'', 1+'\n'+ str(lt1)+'', '+str(rt1)+'',
1+'\n'+ str(lt2)+'', '+str(rt2)+'', 1+'\n'
```

```
f0.write(line_w)
```

```
line_w = '*elset, elset=fiber_el_90, generate'+'\n'
```

```
f0.write(line_w)
```

```
for i in range (6):           #Elements que van orientats a 90 graus
```

$$lb11 = lbe + (i^2+3)*10000 + (1+i^2)$$

$$lb22 = lbe + (i^2+3)*10000 + (2+i^2)$$

$$lm11 = lme1 - (i^2+2)*10000 + (1+i^2)$$

$$lm12 = lme1 - (i^2+2)*10000 + (2+i^2)$$

$$rt11 = rte - (i^2+3)*10000 - (1+i^2)$$

$$rt22 = rte - (i^2+3)*10000 - (2+i^2)$$

$$rm21 = rme2 + (i^2+2)*10000 - (1+i^2)$$

$$rm22 = rme2 + (i^2+2)*10000 - (2+i^2)$$

```
line_w = str(lb11)+' '+str(lm11)+'', 10000+'\n'+ str(lb22)+' '+str(lm12)+'', 10000+'\n'+
str(rm21)+' '+str(rt11)+'', 10000+'\n'+ str(rm22)+' '+str(rt22)+'', 10000+'\n'
```

```
f0.write(line_w)
```

```
line_w = '*elset, elset=fiber_el_270, generate'+'\n'
```

```
f0.write(line_w)
```

```
for i in range (6):           #Elements que van orientats a 270 graus
```

$$rb11 = rbe + (i^2+3)*10000 - (1+i^2)$$

$$rb22 = rbe + (i^2+3)*10000 - (2+i^2)$$

$$rm11 = rme1 - (i^2+2)*10000 - (1+i^2)$$

$$rm12 = rme1 - (i^2+2)*10000 - (2+i^2)$$

$$lt11 = lte - (i^2+3)*10000 + (1+i^2)$$

$$lt22 = lte - (i^2+3)*10000 + (2+i^2)$$

$$lm21 = lme2 + (i^2+2)*10000 + (1+i^2)$$

$$lm22 = lme2 + (i^2+2)*10000 + (2+i^2)$$

```
line_w = str(rb11)+' '+str(rm11)+'', 10000+'\n'+ str(rb22)+' '+str(rm12)+'', 10000+'\n'+
str(lm21)+' '+str(lt11)+'', 10000+'\n'+ str(lm22)+' '+str(lt22)+'', 10000+'\n'
```

```
f0.write(line_w)
```

```
line_w = '*elset, elset=fiber_el_45'+'\n'
```

```
f0.write(line_w)
```


for i in range (6):

#Elements que van orientats a 45 graus

$$lmid11 = lme1 - (i^2)*10000 + (1+i^2)$$

$$lmid12 = lme1 - (i^2)*10000 + (2+i^2)$$

$$lmid21 = lme1 - (1+i^2)*10000 + (1+i^2)$$

$$lmid22 = lme1 - (1+i^2)*10000 + (2+i^2)$$

$$rmid33 = rme2 + (i^2)*10000 - (1+i^2)$$

$$rmid34 = rme2 + (i^2)*10000 - (2+i^2)$$

$$rmid43 = rme2 + (1+i^2)*10000 - (1+i^2)$$

$$rmid44 = rme2 + (1+i^2)*10000 - (2+i^2)$$

line_w = str(lmid11)+', '+str(lmid12)+', '+str(lmid21)+', '+str(lmid22)+', '+str(rmid33)+',
'+str(rmid34)+', '+str(rmid43)+', '+str(rmid44)+'\n'

f0.write(line_w)

line_w = '*elset, elset=fiber_el_135'+'\n'

f0.write(line_w)

for i in range (6):

#Elements que van orientats a 135 graus

$$lbot11 = lbe + (1+i^2)*10000 + (1+i^2)$$

$$lbot12 = lbe + (1+i^2)*10000 + (2+i^2)$$

$$lbot21 = lbe + (2+i^2)*10000 + (1+i^2)$$

$$lbot22 = lbe + (2+i^2)*10000 + (2+i^2)$$

$$rtop11 = rte - (1+i^2)*10000 - (1+i^2)$$

$$rtop12 = rte - (1+i^2)*10000 - (2+i^2)$$

$$rtop21 = rte - (2+i^2)*10000 - (1+i^2)$$

$$rtop22 = rte - (2+i^2)*10000 - (2+i^2)$$

line_w = str(lbot11)+', '+str(lbot12)+', '+str(lbot21)+', '+str(lbot22)+', '+str(rtop11)+',
'+str(rtop12)+', '+str(rtop21)+', '+str(rtop22)+'\n'

f0.write(line_w)

line_w = '*elset, elset=fiber_el_225'+'\n'

```
f0.write(line_w)
```

```
for i in range (6):          #Elements que van orientats a 225 graus
```

```
    ltop11 = lte - (1+i*2)*10000 + (1+i*2)
```

```
    ltop12 = lte - (1+i*2)*10000 + (2+i*2)
```

```
    ltop21 = lte - (2+i*2)*10000 + (1+i*2)
```

```
    ltop22 = lte - (2+i*2)*10000 + (2+i*2)
```

```
    rbot11 = rbe + (1+i*2)*10000 - (1+i*2)
```

```
    rbot12 = rbe + (1+i*2)*10000 - (2+i*2)
```

```
    rbot21 = rbe + (2+i*2)*10000 - (1+i*2)
```

```
    rbot22 = rbe + (2+i*2)*10000 - (2+i*2)
```

```
    line_w = str(ltop11)+'', 'str(ltop12)+'', 'str(ltop21)+'', 'str(ltop22)+'', 'str(rbot11)+'',
'str(rbot12)+'', 'str(rbot21)+'', 'str(rbot22)+'\n'
```

```
    f0.write(line_w)
```

```
line_w = '*elset, elset=fiber_el_315'+'\n'
```

```
f0.write(line_w)
```

```
for i in range (6):          #Elements que van orientats a 315 graus
```

```
    lmid33 = lme2 + (i*2)*10000 + (1+i*2)
```

```
    lmid34 = lme2 + (i*2)*10000 + (2+i*2)
```

```
    lmid43 = lme2 + (1+i*2)*10000 + (1+i*2)
```

```
    lmid44 = lme2 + (1+i*2)*10000 + (2+i*2)
```

```
    rmid11 = rme1 - (i*2)*10000 - (1+i*2)
```

```
    rmid12 = rme1 - (i*2)*10000 - (2+i*2)
```

```
    rmid21 = rme1 - (1+i*2)*10000 - (1+i*2)
```

```
    rmid22 = rme1 - (1+i*2)*10000 - (2+i*2)
```

```
    line_w = str(lmid33)+'', 'str(lmid34)+'', 'str(lmid43)+'', 'str(lmid44)+'', 'str(rmid11)+'',
'str(rmid12)+'', 'str(rmid21)+'', 'str(rmid22)+'\n'
```

```
    f0.write(line_w)
```

```
f0.close()
```

```
#Orientation files for border elements
```

```
fname0 = 'border_ori.txt'
```

```
f0 = open(fname0, 'w')
```

```
line_w = '*orientation, name=fib_0, definition=coordinates, system=rectangular'+'\n'+'1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0'+'\n'+'3, 0'+'\n'
```

```
f0.write(line_w)
```

```
line_w = '*orientation, name=fib_90, definition=coordinates, system=rectangular'+'\n'+'1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0'+'\n'+'3, 90'+'\n'
```

```
f0.write(line_w)
```

```
line_w = '*orientation, name=fib_180, definition=coordinates, system=rectangular'+'\n'+'1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0'+'\n'+'3, 180'+'\n'
```

```
f0.write(line_w)
```

```
line_w = '*orientation, name=fib_270, definition=coordinates, system=rectangular'+'\n'+'1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0'+'\n'+'3, 270'+'\n'
```

```
f0.write(line_w)
```

```
line_w = '*orientation, name=fib_45, definition=coordinates, system=rectangular'+'\n'+'1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0'+'\n'+'3, 45'+'\n'
```

```
f0.write(line_w)
```

```
line_w = '*orientation, name=fib_135, definition=coordinates, system=rectangular'+'\n'+'1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0'+'\n'+'3, 135'+'\n'
```

```
f0.write(line_w)
```

```
line_w = '*orientation, name=fib_225, definition=coordinates, system=rectangular'+'\n'+'1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0'+'\n'+'3, 225'+'\n'
```

```
f0.write(line_w)
```

```
line_w = '*orientation, name=fib_315, definition=coordinates, system=rectangular'+'\n'+'1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0'+'\n'+'3, 315'+'\n'
```

```
f0.write(line_w)
```

```
f0.close()
```

A continuació es crea el fitxer que conté les orientacions corresponents als sets d'elements anteriors, orientats "linealment".

Els cercles vermells indiquen els graus d'orientació de la fibra d'aquests elements

```
#Node set for boundary conditions
```

```
fname0 = 'boundary_set.txt'
```

```
f0 = open(fname0, 'w')
```

```
line_w = '*nset, nset=n_bound, generate'+'\n'
```

```
f0.write(line_w)
```

```
i_ln = 10000001
```

```
f_ln = i_ln + (2*hh*10000)
```

```
for i in range (101):
```

```
    i_lno = i_ln + i
```

```
    f_lno = f_ln + i
```

```
    line_w = str(i_lno)+' '+str(f_lno)+' 5000'+'\n'
```

```
    f0.write(line_w)
```

```
line_w = '*nset, nset=n_load, generate'+'\n'
```

```
f0.write(line_w)
```

```
i_rn = i_ln + (ww*4)
```

```
f_rn = i_rn + (2*hh*10000)
```

```
for i in range (101):
```

```
    i_rno = i_rn - i
```

```
    f_rno = f_rn - i
```

```
    line_w = str(i_rno)+' '+str(f_rno)+' 5000'+'\n'
```

```
    f0.write(line_w)
```

```
f0.close()
```

```
#Section file border elements
```

```
fname0 = 'Border_sections.txt'
```

```
f0 = open(fname0, 'w')
```

```
line_w = '*shell section, elset=fiber_el_0, composite, orientation=fib_0'+'\n'+<th>, 3, nylon6, 0'+  
'\n'+<th>, 3, CFRP, fib_0'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_0'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_0'+ '\n'+<th>, 3,
```

En aquest fragment de codi es crea el set de nodes els quals se'ls hi aplicarà les restriccions corresponents per simular la pinça que subjecta la proveta en una prova d'assaig a tracció.

Seguidament s'escriu el fitxer que conté l'assignació de les seccions als sets d'elements de la proveta que contenen fibra orientada "linealment"
No són els elements del marc del forat ni de les concentricitats.

```
CFRP, fib_0'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_0'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_0'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_0'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_0'+ '\n'+<th>, 3, nylon6, 0'+ '\n'
```

```
f0.write(line_w)
```

```
line_w = '*shell section, elset=fiber_el_180, composite, orientation=fib_180'+ '\n'+<th>, 3, nylon6, 0'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_180'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_180'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_180'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_180'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_180'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_180'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_180'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_180'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_180'+ '\n'+<th>, 3, nylon6, 0'+ '\n'
```

```
f0.write(line_w)
```

```
line_w = '*shell section, elset=fiber_el_90, composite, orientation=fib_90'+ '\n'+<th>, 3, nylon6, 0'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_90'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_90'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_90'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_90'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_90'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_90'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_90'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_90'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_90'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_90'+ '\n'+<th>, 3, nylon6, 0'+ '\n'
```

```
f0.write(line_w)
```

```
line_w = '*shell section, elset=fiber_el_270, composite, orientation=fib_270'+ '\n'+<th>, 3, nylon6, 0'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_270'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_270'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_270'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_270'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_270'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_270'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_270'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_270'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_270'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_270'+ '\n'+<th>, 3, nylon6, 0'+ '\n'
```

```
f0.write(line_w)
```

```
line_w = '*shell section, elset=fiber_el_45, composite, orientation=fib_45'+ '\n'+<th>, 3, nylon6, 0'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_45'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_45'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_45'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_45'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_45'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_45'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_45'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_45'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_45'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_45'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_45'+ '\n'+<th>, 3, nylon6, 0'+ '\n'
```

```
f0.write(line_w)
```

```
line_w = '*shell section, elset=fiber_el_135, composite, orientation=fib_135'+ '\n'+<th>, 3, nylon6, 0'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_135'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_135'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_135'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_135'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_135'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_135'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_135'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_135'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_135'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_135'+ '\n'+<th>, 3, nylon6, 0'+ '\n'
```

```
f0.write(line_w)
```

```
line_w = '*shell section, elset=fiber_el_225, composite, orientation=fib_225'+ '\n'+<th>, 3, nylon6, 0'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_225'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_225'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_225'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_225'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_225'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_225'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_225'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_225'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_225'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_225'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_225'+ '\n'+<th>, 3, nylon6, 0'+ '\n'
```

```
f0.write(line_w)
```

```
line_w = '*shell section, elset=fiber_el_315, composite, orientation=fib_315'+'\n'+<th>, 3, nylon6,
0'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_315'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_315'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_315'+
'\n'+<th>, 3, CFRP, fib_315'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_315'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_315'+
'\n'+<th>, 3, CFRP, fib_315'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_315'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_315'+
'\n'+<th>, 3, CFRP, fib_315'+ '\n'+<th>, 3, CFRP, fib_315'+ '\n'+<th>, 3, nylon6, 0'+ '\n'
```

```
f0.write(line_w)
```

```
f0.close()
```

```
#Write section file
```

```
fname1 = 'Orientations.txt'
```

```
fname2 = 'Sections.txt'
```

Aquesta última assignació de seccions correspon als elements orientats del marc del forat i de les concentricitats.

```
f1 = open(fname1,'r')
```

```
f2 = open(fname2,'w')
```

```
num_lines = sum(1 for line in f1)
```

```
i = 0
```

```
for i in range(num_lines/3):
```

```
    line_w1 = '*shell section, elset=rot_'+str(i)+'', composite, orientation=ori'+str(i)+'\n'
```

```
    line_w2 = str(tthh)+'', 3, nylon6, 0'+'\n'+str(tthh)+'', 3, CFRP, ori'+str(i)+'\n'+str(tthh)+'', 3,
CFRP, ori'+str(i)+'\n'+str(tthh)+'', 3, CFRP, ori'+str(i)+'\n'+str(tthh)+'', 3, CFRP,
ori'+str(i)+'\n'+str(tthh)+'', 3, CFRP, ori'+str(i)+'\n'+str(tthh)+'', 3, CFRP, ori'+str(i)+'\n'+str(tthh)+'', 3,
CFRP, ori'+str(i)+'\n'+str(tthh)+'', 3, CFRP, ori'+str(i)+'\n'+str(tthh)+'', 3, nylon6, 0'+'\n'
```

```
    line_w = line_w1 + line_w2
```

```
    f2.write(line_w)
```

```
    i = i + 1
```

```
f2.close()
```

```
f1.close()
```

```
# Create study

ct = ParStudy(par=pars, name=filename)

# Define name of input file

inputFiles=(filename)

# Define parameters

ct.define(DISCRETE, par=pars)

# Sample by value

ct.sample(VALUES, par='w', values=ww)

ct.sample(VALUES, par='th', values=tth)

ct.sample(VALUES, par='xload', values=xx)

ct.sample(VALUES, par='a', values=aa)

ct.sample(VALUES, par='nload', values=nload)

ct.sample(VALUES, par='E11', values=E11)

ct.sample(VALUES, par='E22', values=E22)

ct.sample(VALUES, par='G12', values=G12)

ct.sample(VALUES, par='nu12', values=nu12)

# Combine samples

ct.combine(MESH, name='crack')

# Generate analysis job data

ct.generate(template=filename)

# Execute jobs

ct.execute(ALL)

## End of model generation and execution ##

## End of file ##
```

Finalment es crea l'estudi dels paràmetres i l'anàlisi de les dades, i s'ordena executar tot l'script.

ANNEX C :

C. CARACTERÍSTIQUES D'IMPRESSIÓ

C.1 Paràmetres d'impressió

C.1.1 Pantalla principal

Seguidament s'explicaran totes les funcions que ofereix el programa d'impressió 3D Eiger del fabricant d'impressores Markforged®.

Per accedir a aquest programa es farà a través d'un navegador web ja que és un programa online. S'escriurà al buscador "eiger.io". Seguidament per poder accedir-hi s'haurà de tenir un compte i estar registrat.

Un cop s'ha accedit dins el compte, en aquest cas com és un compte compartit amb diferents usuaris hi trobem diverses carpetes amb els projectes de cada usuari. En accedir al nostre usuari se'ns mostra la següent pantalla (fig. 62):

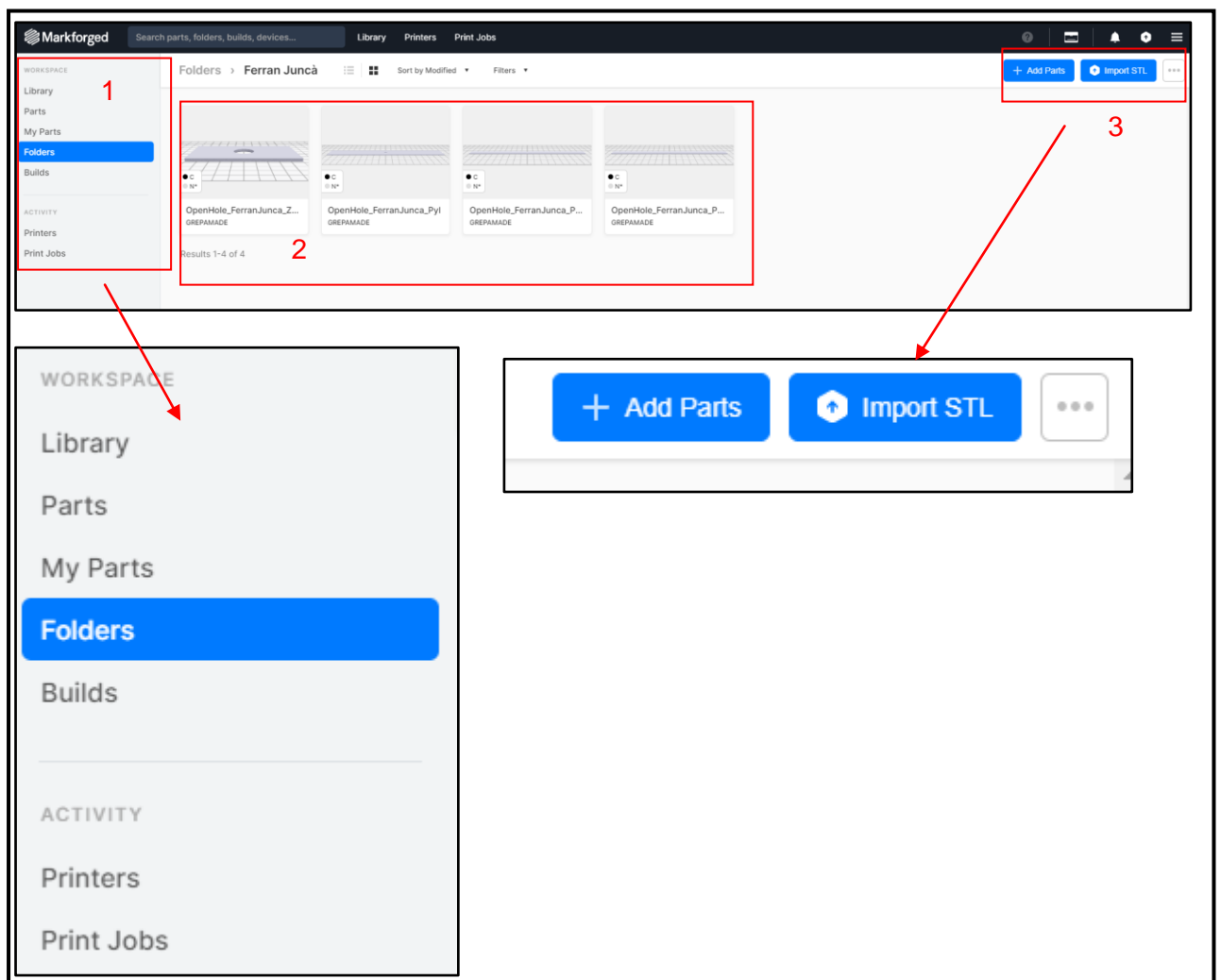


Figura 62. Pantalla d'inici en la carpeta del nostre usuari del programa Eiger. Eiger.io. Markforged. 05/08/2020

- 1: En aquest requadre a l'esquerra de la pantalla es pot navegar a través de les diferents carpetes, usuaris i peces que tenim dins el compte. També es poden

veure les impressores que hi ha configurades dins el programa i l'activitat recent d'aquesta.

- 2: Aquí es poden veure totes les peces que es tenen dins de la carpeta de l'usuari seleccionat.
- 3: Situats a la part superior esquerra de la pantalla es troben les funcions "Add Parts" que permet afegir peces d'una altra carpeta a la carpeta actual i la funció "Import STL" que permet importar peces noves en format ".stl".

El format ".stl" és el format en què es sol treballar en programes d'impressió 3D. Aquest divideix la peça en triangles i així en permet la seva impressió.

-Add Parts: A la següent figura 63 es pot veure com en seleccionar la opció apareixen altres peces per tal de poder-les afegir a la carpeta actual.

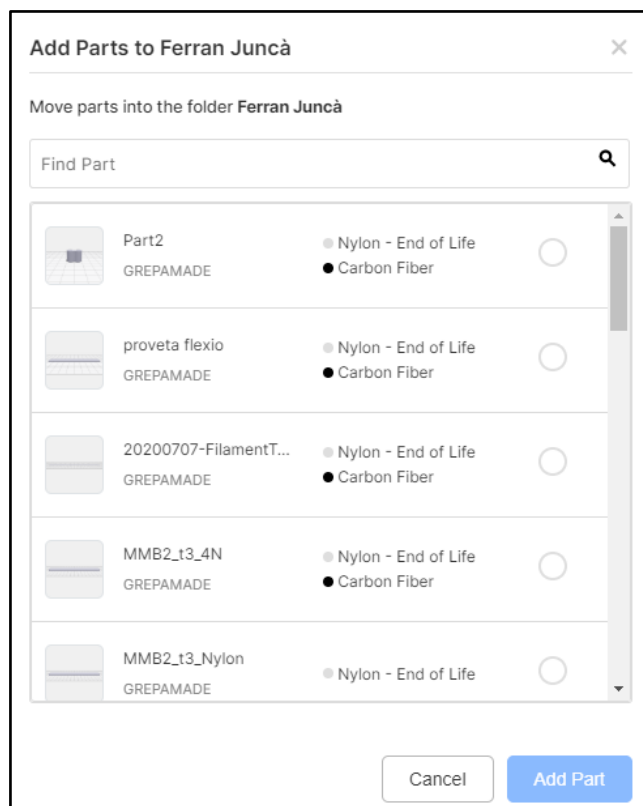


Figura 63. Subpantalla "Add Parts" que permet afegir peces d'altres carpetes a la carpeta actual. Eiger.io. Markforged. 05/08/2020

-Import STL: A la figura 64 es pot veure com el programa permet importar fitxers ".stl" i els afegeix a la carpeta que se li indiqui. En el treball s'han importat fitxers .STL generats a partir de peces creades amb SolidWorks®.

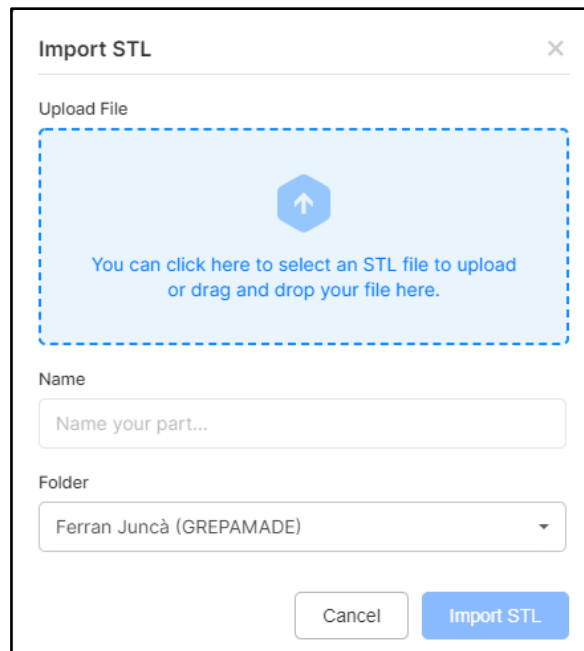


Figura 64. Subpantalla "Import STL" que permet importar peces noves. Eiger.io. Markforged. 05/08/2020

Seguidament si es selecciona una de les peces es procedeix a la configuració individual de la peça seleccionada.

C.1.2 Configuració d'impressió

Una vegada s'entra dins de la peça seleccionada apareix la següent pantalla (fig.65):

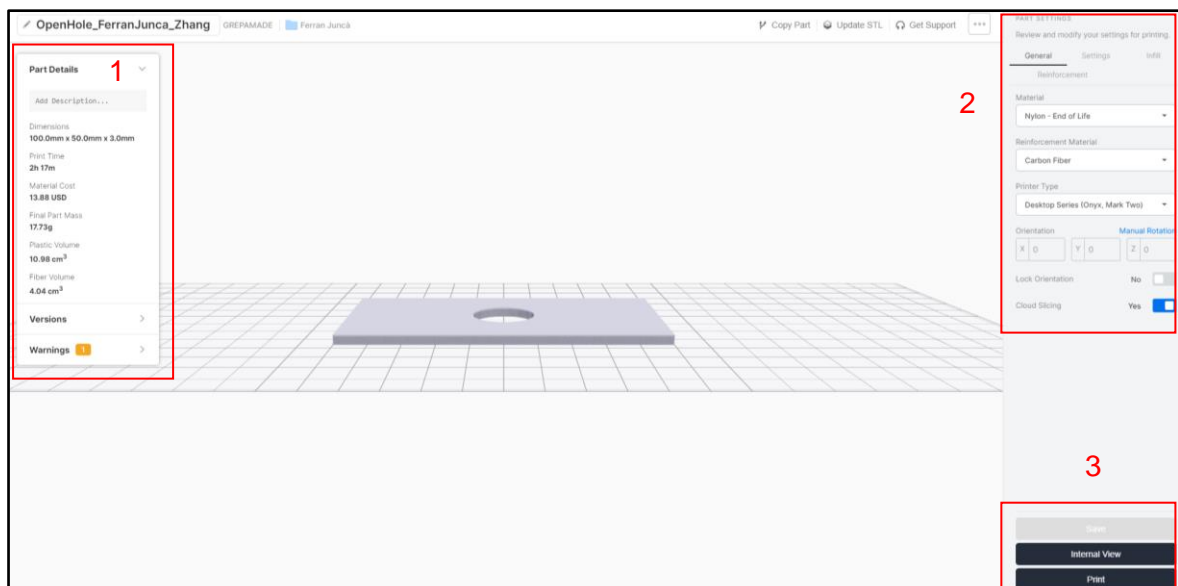


Figura 65. Pantalla de configuració de la peça. Eiger.io. Markforged. 05/08/2020

- 1: Tal i com es mostra en la figura 66 següent, a la part esquerra de la pantalla hi ha situada una breu descripció que especifica alguns detalls de la peça.

Alguns d'aquests detalls són: les dimensions totals de la peça, el temps estimat d'impressió, el cost del material en dòlars, el pes de la peça un cop acabada i el volum que es necessitarà de cada un dels materials que s'hagin especificat. També hi s'hi troba una pestanya amb totes les versions de la mateixa peça que s'hagin creat per tal de tenir diferents configuracions, i una altra pestanya amb avisos.



Figura 66. Requadre amb especificacions de la peça. Eiger.io. Markforged. 05/08/2020

- 2: En aquesta part dreta de la pantalla es troben les opcions de configuració d'impressió de la peça. Hi ha situades tres pestanyes (fig. 67) les quals ens permeten modificar diferents paràmetres.

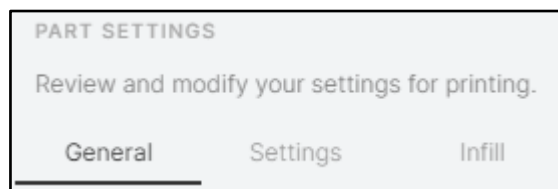
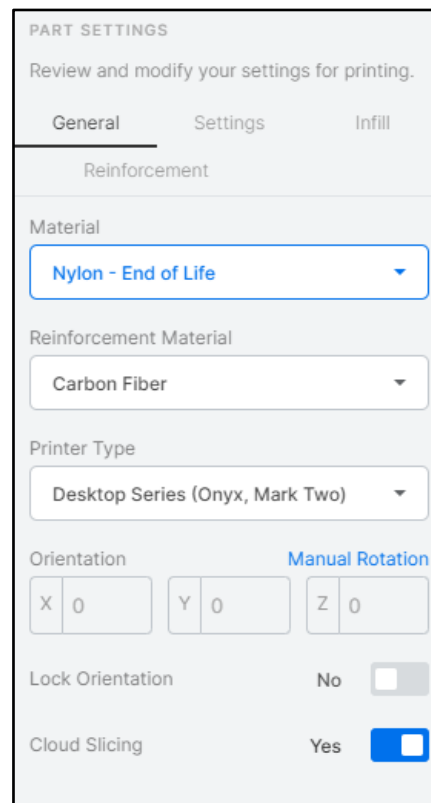


Figura 67. Diferents pestanyes per configurar la peça. Eiger.io. Markforged. 05/08/2020

-General: Aquesta pestanya desplega el següent requadre (fig. 68). En aquest apartat es podrà escollir el material de base de la peça entre una diversa llista de materials disponibles i el material de reforç que es desitja. També es seleccionarà el model d'impressora que es vulgui utilitzar.

A la part inferior de la pantalla es poden establir valors en els eixos X, Y i Z per tal d'orientar la peça de la manera més òptima per imprimir-la o fer-ho manualment amb el ratolí.

Finalment també es poden activar les opcions de bloquejar la orientació (Lock Orientation) per evitar que el programa ens la modifiqui i la opció de "Cloud slicing" per tal que el programa divideixi la part en els seus propis servers en comptes de fer-ho en el navegador que s'estigui utilitzant.



PART SETTINGS
Review and modify your settings for printing.

General Settings Infill

Reinforcement

Material
Nylon - End of Life

Reinforcement Material
Carbon Fiber

Printer Type
Desktop Series (Onyx, Mark Two)

Orientation Manual Rotation
X 0 Y 0 Z 0

Lock Orientation No

Cloud Slicing Yes

Figura 68. Opcions de la pestanya "general" de configuració de la peça. Eiger.io. Markforged. 05/08/2020

-Settings: Dins aquesta pestanya es troben les opcions de configuració que es mostren a la figura 69.

Tal com es pot veure, s'estableix el gruix de les capes de la peça, el qual ve determinat pel gruix del filament inicial. També es pot escollir el sistema d'unitats que es vulgui utilitzar, mètric o imperial, durant el procés i l'escala de la peça.

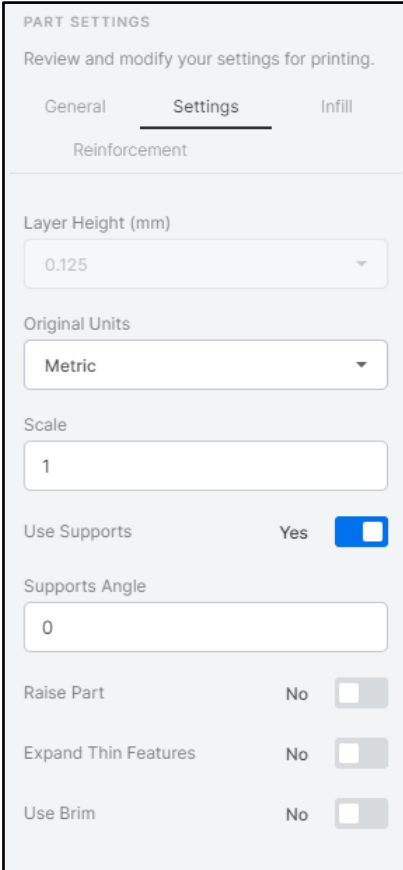
Una altra funció que permet escollir és la de si es volen crear suports durant la impressió de la peça i l'angle d'inclinació d'aquests. Els suports són unes columnes de polímer que permeten subjectar certes parts de la peça que estiguin en voladís o que siguin susceptibles a deformar-se o moure's mentre es refreda el material.

Finalment en aquesta pestanya trobem tres últimes opcions. Si s'activa la opció de "Raise Part", permet crear un llit de suports de 20 capes d'alçada per subjectar la

peça. Això és útil si les parts que toquen el llit de la impressora són dèbils i poden ser susceptibles a deformar-se.

Seguidament la opció de “Expand Features” s'utilitzarà si la peça que es vol crear té parets molt primes que interessa conservar. La impressora les reforçarà però es pot perdre precisió dimensional.

Per últim la opció de “Use brim” crea una àncora que aguantarà la peça si aquesta té tendència a deformar-se o disposa de molt pocs punts de contacte amb el llit de la impressora.



PART SETTINGS
Review and modify your settings for printing.

General Settings Infill

Reinforcement

Layer Height (mm)
0.125

Original Units
Metric

Scale
1

Use Supports Yes

Supports Angle
0

Raise Part No

Expand Thin Features No

Use Brim No

Figura 69. Opcions de la pestanya “settings” de configuració de la peça. Eiger.io. Markforged. 05/08/2020

-Infill: Finalment dins aquesta última pestanya de configuració d'impressió de la peça que es pot veure en la figura 70, es troben les opcions següents.

Primerament es selecciona el patró que es vol utilitzar per emplenar l'interior de la peça. Es pot escollir entre una disposició triangular, hexagonal, rectangular o completament sòlida.

Seguidament segons el tipus de patró que s'hagi escollit es situaran uns valors predeterminats de densitat d'aquest farciment el qual es podrà variar segons interès. Com més densitat, més reforçada la peça i més material tindrà.

La següent opció permet escollir la quantitat de capes sòlides de plàstic que es desitgen tenir a sobre i a sota la peça. El valor per defecte són 4.

La última característica que es pot variar són el nombre de passades de polímer que es volen a les vores de la peça. Cal tenir en compte que com més passades s'hi posin a les vores, es va reduint l'espai interior de la peça, per tant el nombre de fibres de reforç interior disminuirà.

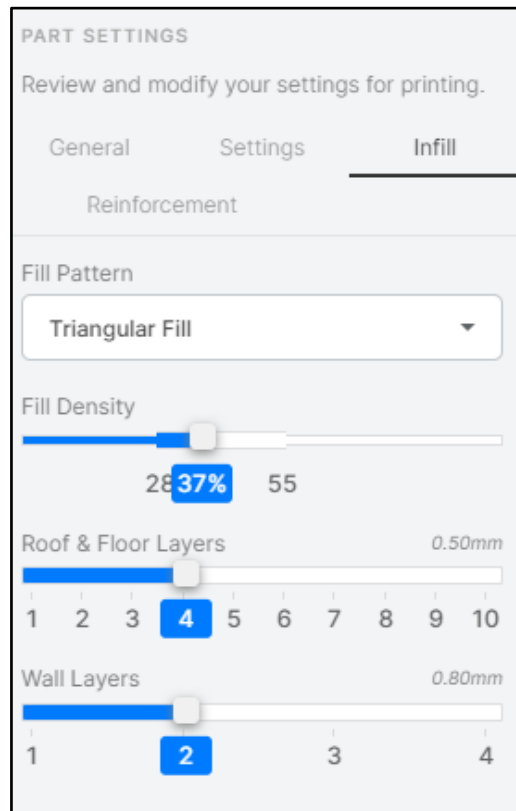


Figura 70. Opcions de la pestanya "infill" de configuració de la peça. Eiger.io. Markforged. 05/08/2020

- 3: En aquest petit requadre (fig. 71) s'hi troben 3 opcions. La de guardar la peça (Save), l'opció per accedir a configuracions internes de la peça (Internal view) i la opció d'imprimir la peça (Print).

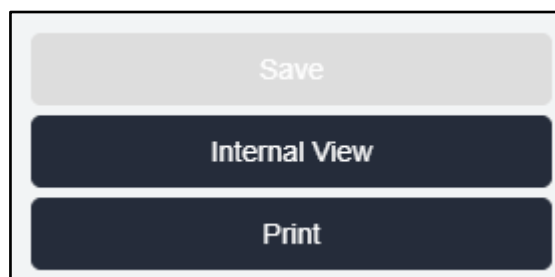


Figura 71. Requadre amb opcions de guardar, modificar i imprimir la peça. Eiger.io. Markforged. 05/08/2020

C.1.3 Configuració interna de la peça

Quan es té la peça amb la configuració d'impressió que es desitja, el següent pas és establir els paràmetres interns de la peça. És a dir definir el material de les diferents capes, la orientació de la fibra de reforç i el patró d'aquesta

Per tal d'entrar a la configuració interna de la peça, es seleccionarà la opció "Internal View" que es mostra en la figura X anterior.

Una vegada dins del menú de modificació intern de la peça apareix la següent pantalla (fig. 72).

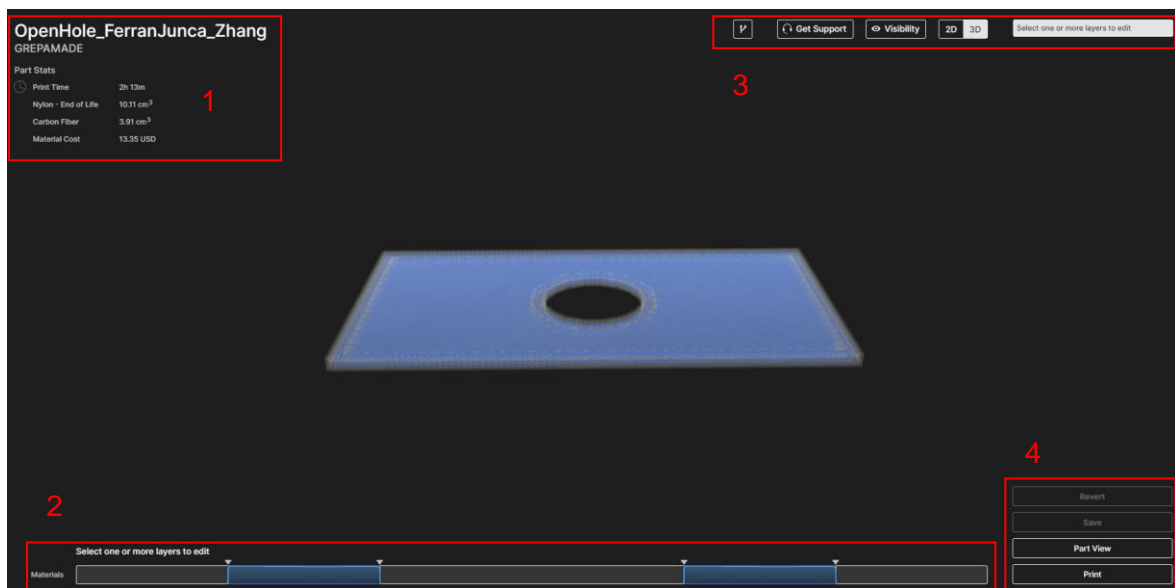


Figura 72. Pantalla de configuració interna de la peça. Eiger.io. Markforged. 05/08/2020

Es pot veure com en el centre de la pantalla hi ha situada la peça que es vol tractar. Fent clic i arrossegant podem girar-la per veure les diferents cares de la peça.

- 1: A la part superior esquerra de la pantalla es troben algunes dades de la peça, tal i com es pot veure en la figura 73. Aquestes dades són el nom de la peça i la carpeta on es troba, el temps estimat d'impressió, els volums necessaris del polímer i del reforç seleccionats i per últim el cost d'aquest material.



Figura 73. Característiques de la peça dins la pantalla de configuració interna d'aquesta. Eiger.io. Markforged. 05/08/2020

- 2 : A la part inferior de la pantalla de configuració s'hi troba la barra de selecció de capa. Aquesta barra ens permet seleccionar la capa de la peça que es vol editar. Els trams de color gris de la barra indiquen capes formades només per polímer, mentre que les de color blau indiquen capes on també hi ha material de reforç. En seleccionar una de les capes apareix a la part superior esquerra de la barra un indicador en forma de fracció que indica el número de capa que li correspon i a la part superior dreta de la barra apareix un valor que indica el gruix acumulat de la peça fins a la capa seleccionada (fig.74).

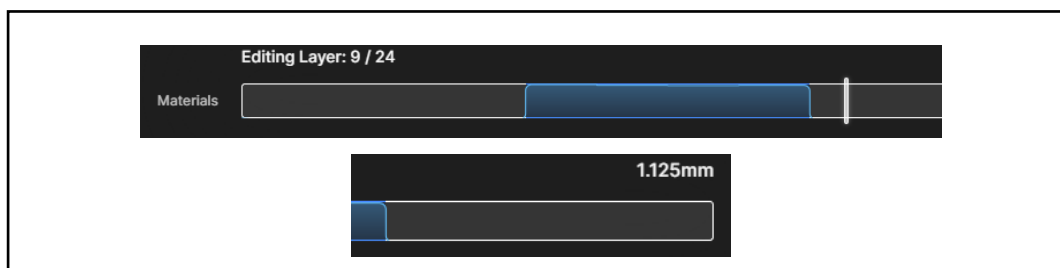


Figura 74. Selecció de les capes que es volen editar de la peça. Eiger.io. Markforged. 05/08/2020

- 3: A la part superior dreta de la pantalla de configuració s'hi troben una sèrie d'opcions que es mostren a la figura 75.



Figura 75. Opcions d'ajuda i de visualització de la peça. Eiger.io. Markforged. 05/08/2020

- A: Permet copiar la peça.
- B: Permet enviar un informe al suport quan es trobi algun problema o es tingui algun dubte amb el programa.

-C: Aquesta opció permet veure o ocultar diferents parts de la peça com el material de reforç, les capes superiors i inferiors, el material de les vores entre d'altres.

-D: Permet escollir veure la peça en una perspectiva de 3 dimensions o de 2 dimensions.

-E: Aquí poden aparèixer dos submenús diferents segons la capa de la peça que hi hagi seleccionada.

Si es selecciona una capa on no hi ha material de reforç, apareixerà el submenú mostrat a la figura 76. En aquest submenú es pot activar la opció "Use fiber" i aquest submenú passarà a ser el submenú de la figura 77 per tal d'afegir-hi material de reforç. També es pot activar la opció "Pause after layer", aquest opció crearà una pausa durant la impressió en aquesta capa el qual permetrà que es pugui inspeccionar la peça. Per tornar a reprendre la impressió s'haurà de fer manualment a la impressora.

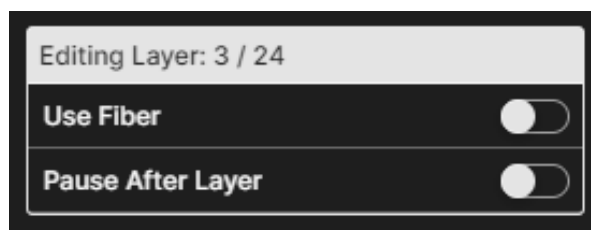


Figura 76. Opcions d'edició de capes sense material de reforç. Eiger.io. Markforged. 05/08/2020

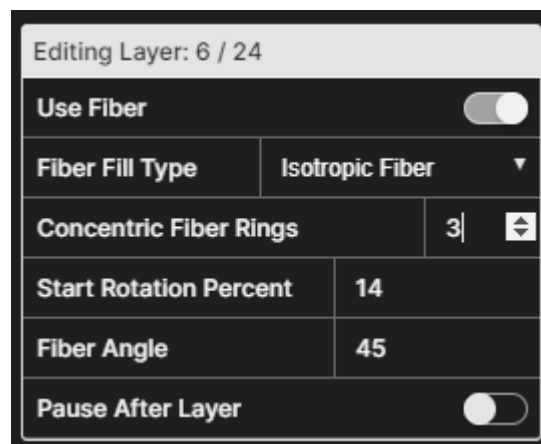


Figura 77. Opció "Isotropic fiber" d'edició de capes amb material de reforç. Eiger.io. Markforged. 05/08/2020

Si s'ha seleccionat una capa amb material de reforç apareix el menú de la figura 77 anterior. Seguidament aquest menú canviarà depenent del tipus de farciment de la fibra que es seleccioni.

Si es selecciona la opció anomenada "Isotropic fiber" el menú és el que es mostra en la figura 77 anterior. Aquest permet escollir si es volen anells concèntrics al voltant dels contorns exteriors i interiors de la peça i la quantitat d'aquests.

També es pot escollir l'angle d'inclinació del material de reforç.

La opció "Start rotation percent" desplaçar el punt on comença a crear les concentricitats la impressora entre capes adjacents, per tal que quedin ben adherides entre elles, ja que si el punt fos el mateix podria crear problemes d'adhesió. Per últim permet escollir si es vol fer una parada en acabar de crear la capa en qüestió.

La figura 78 a continuació mostra la capa configurada en la figura 77 anterior.

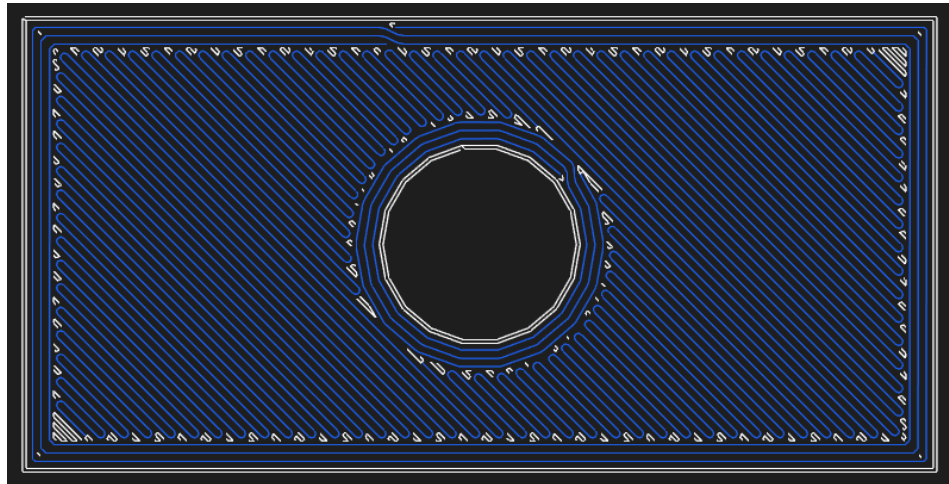


Figura 78. Exemple de configuració interna d'una capa amb la opció "Isotropic fiber". Eiger.io. Markforged. 05/08/2020

Per altra banda si s'escull l'altre opció de "Fiber fill type" anomenada "Concentric fiber", apareix el següent submenú (fig. 79):

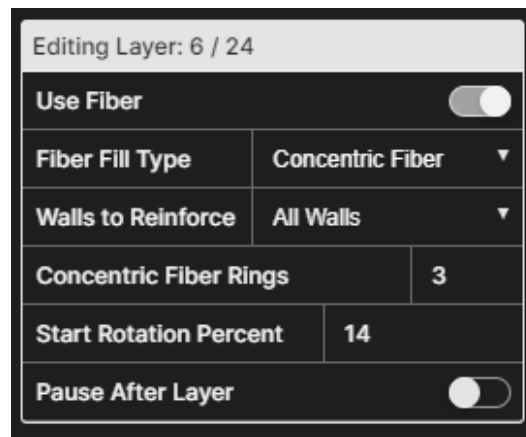


Figura 79. Opció "Concentric fiber" d'edició de capes amb material de reforç. Eiger.io. Markforged. 05/08/2020

La primera opció que permet escollir aquest submenú és la selecció de les vores que es vol tenir amb material de reforç. Si es selecciona la opció "Outer shell only" només es reforçaran els contorns exteriors de la peça, la opció "Inner holes only" només reforçarà els contorns interiors i la opció "All walls" els farà tots (fig.80).

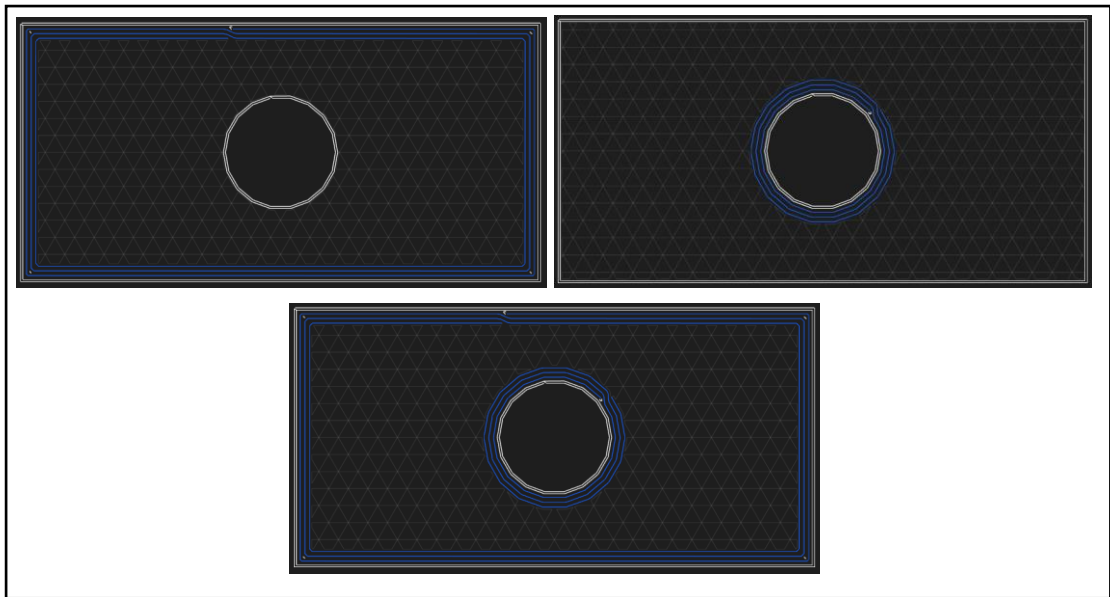


Figura 80. Opcions “Outer shell only”, “Inner holes only” i “All walls” de reforç dels contorns de la peça.
Eiger.io. Markforged. 05/08/2020

Seguidament tornen a aparèixer les opcions de selecció del nombre de concentricitats de fibra de reforç “Concentric fiber rings”, la opció de variació de l’inici de les concentricitats “Start rotation percent” i la opció de pausa després de la capa “Pause after layer” explicades anteriorment.

- 4: A la part inferior dreta de la pantalla s’hi troben les últimes quatre opcions que ofereix aquesta pantalla de configuració interna de la peça (fig. 81). La primera opció “Revert” permet desfer l’última modificació que s’hagi aplicat a la peça. La segona opció “Save” permet guardar les modificacions fetes. La tercera opció “Part View” permet tornar a la pantalla anterior de configuració d’impressió de la peça (Apartat B.1.2). I per últim la opció de “Print” permet imprimir la peça.



Figura 81. Opcions de desfer l’últim canvi (Revert), guardar (Save), tornar al menú de configuració de la peça (Part view) i imprimir (Print). Eiger.io. Markforged. 05/08/2020

C.2 FITXA TÈCNICA MARKFORGED MARK TWO



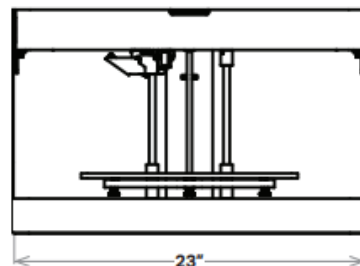
PRODUCT SPECIFICATIONS

Mark Two

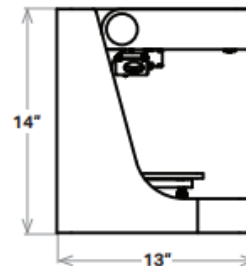
Replace machined aluminum tooling—jigs, jaws, and fixtures—with stronger parts for a fraction of the price. The Mark Two combines our unique continuous carbon fiber reinforcement with workhorse reliability for versatile parts with 26x the strength of ABS, ready same-day for use straight off the printer.

Printer Properties	Process	Fused filament fabrication, Continuous Filament Fabrication
	Build Volume	320 x 132 x 154 mm (12.6 x 5.2 x 6 in)
	Weight	16 kg (35 lbs)
	Machine Footprint	584 x 330 x 355 mm (23 x 13 x 14 in)
	Print Bed	Kinematic coupling — flat to within 160 µm
	Extrusion System	Second-generation extruder, out-of-plastic detection
	Power	100–240 VAC, 150 W (2 A peak)
Materials	Plastics Available	Onyx, Nylon White
	Fibers Available	Carbon fiber, fiberglass, Kevlar®, HST fiberglass
	Tensile Strength	800 MPa (25.8x ABS, 22.2x Onyx) *
	Flex Modulus	51 GPa (24.8x ABS, 14.2x Onyx) *
Part Properties	Layer Height	100 µm default, 200 µm maximum
	Infill	Closed cell infill: multiple geometries available
Software	Supplied Software	Eiger Cloud (Other options available at cost)
	Security	Two-factor authentication, org admin access, single sign-on

FRONT VIEW



SIDE VIEW



ANNEX D:

D. RESULTATS DEL CÀLCUL AMB ELEMENTS FINITS

A continuació s'adjunten les imatges dels resultats de totes les tensions calculades en les simulacions realitzades de cada cas. Les deformacions del forat són únicament visuals, no representen el comportament real.

En tots els casos les tensions que es mostren són les de una de les capes intermèdies, les quals són les que contenen reforç de fibra. Excepte el cas isotròpic 90/45/+45/0 el qual es mostren els resultats dels quatre casos d'orientació de les capes.

D.1 Cas isotròpic

- Isotròpic niló

S11:

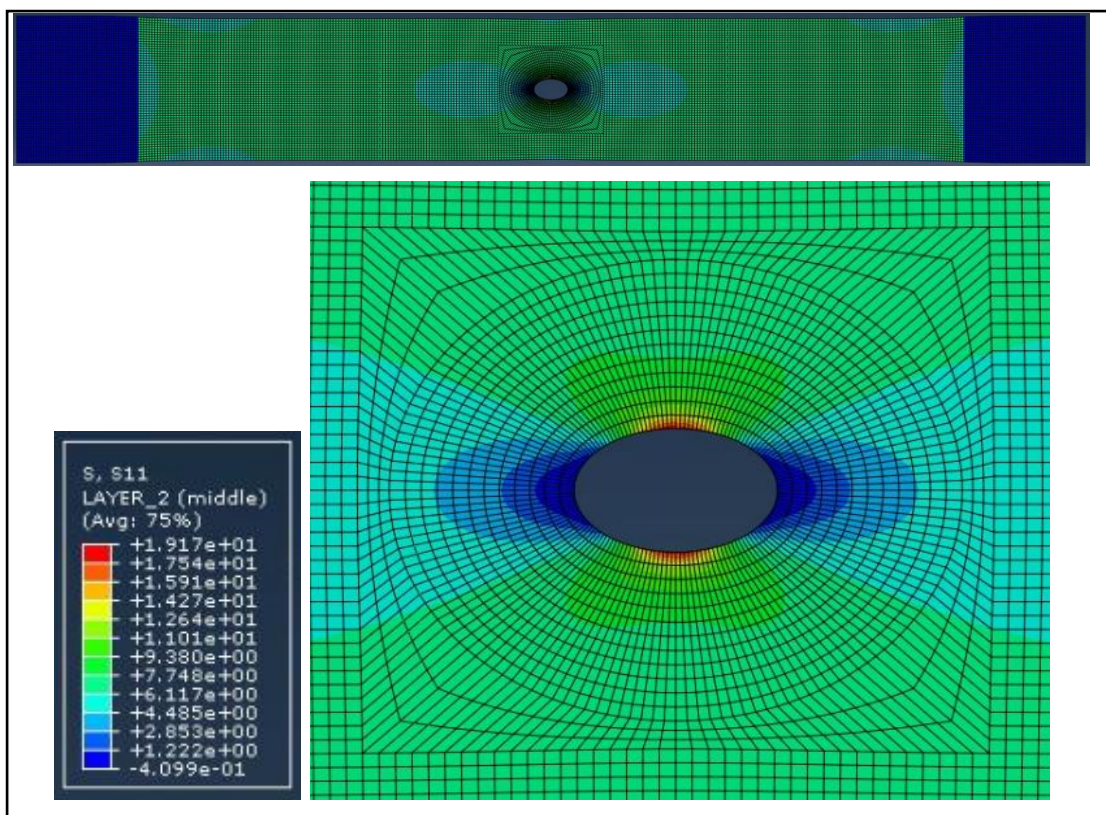


Figura 82. Resultats de la tensió S11 del cas isotròpic de niló.

S22:

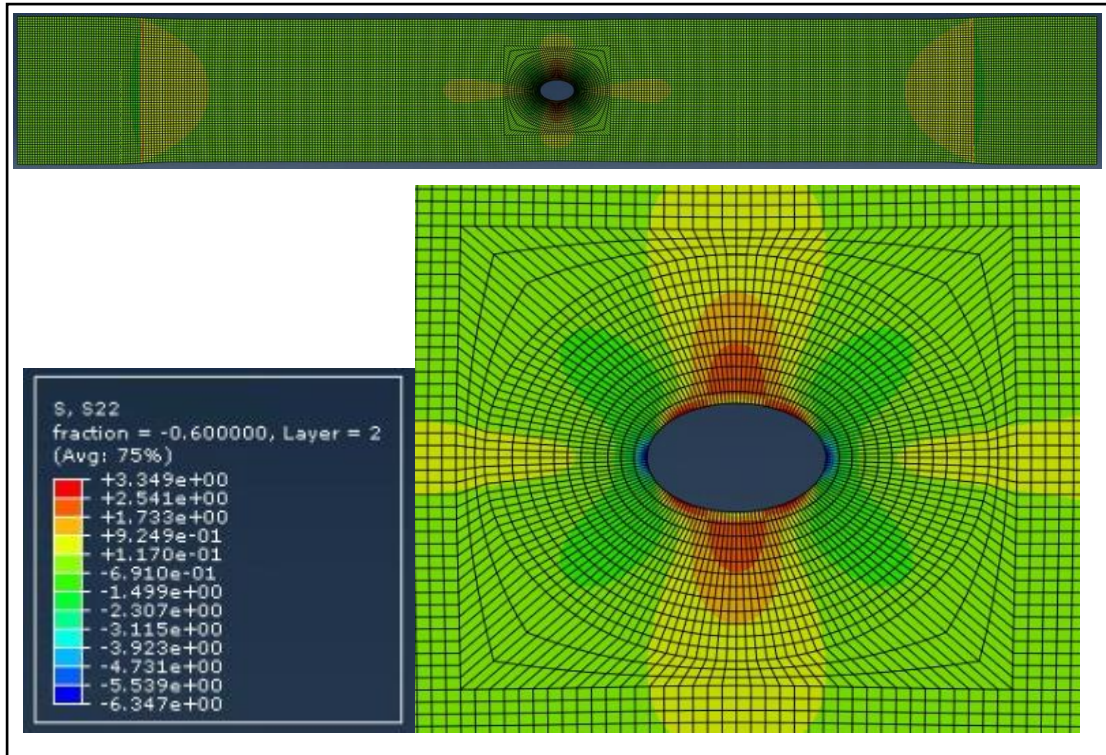


Figura 83. Resultats de la tensió S22 del cas isotròpic de niló.

S12:

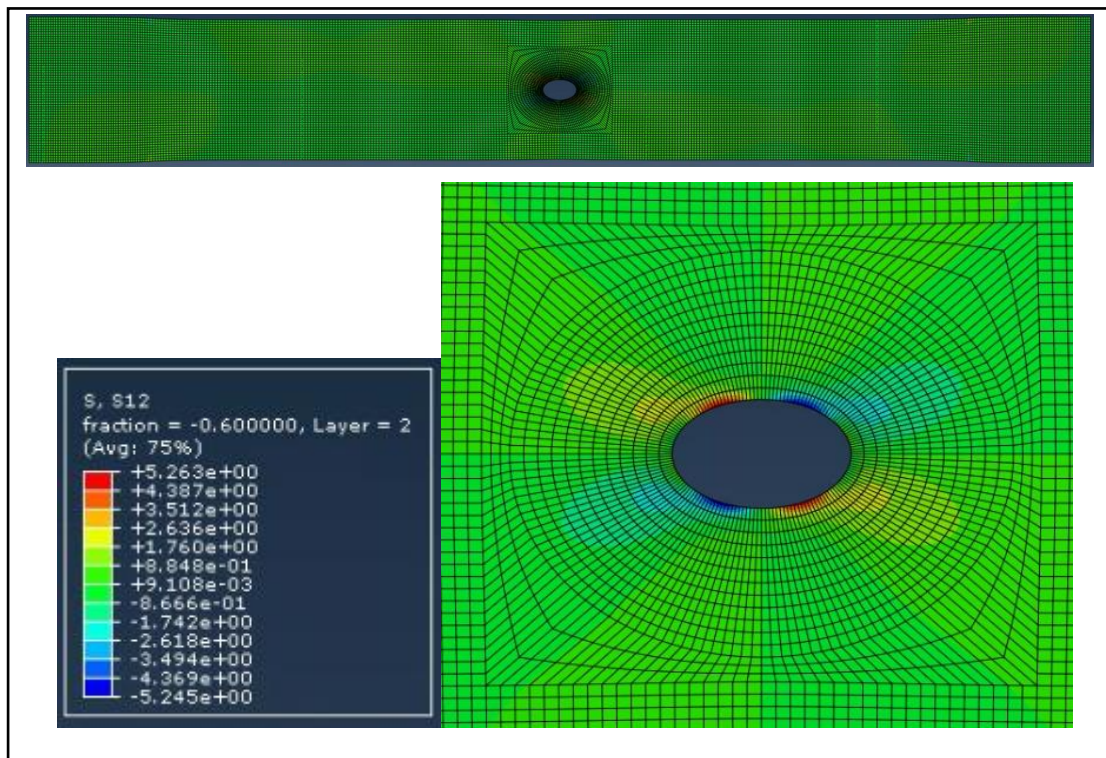


Figura 84. Resultats de la tensió S12 del cas isotròpic de niló.

- Isostròpic fibra 0°

S11:

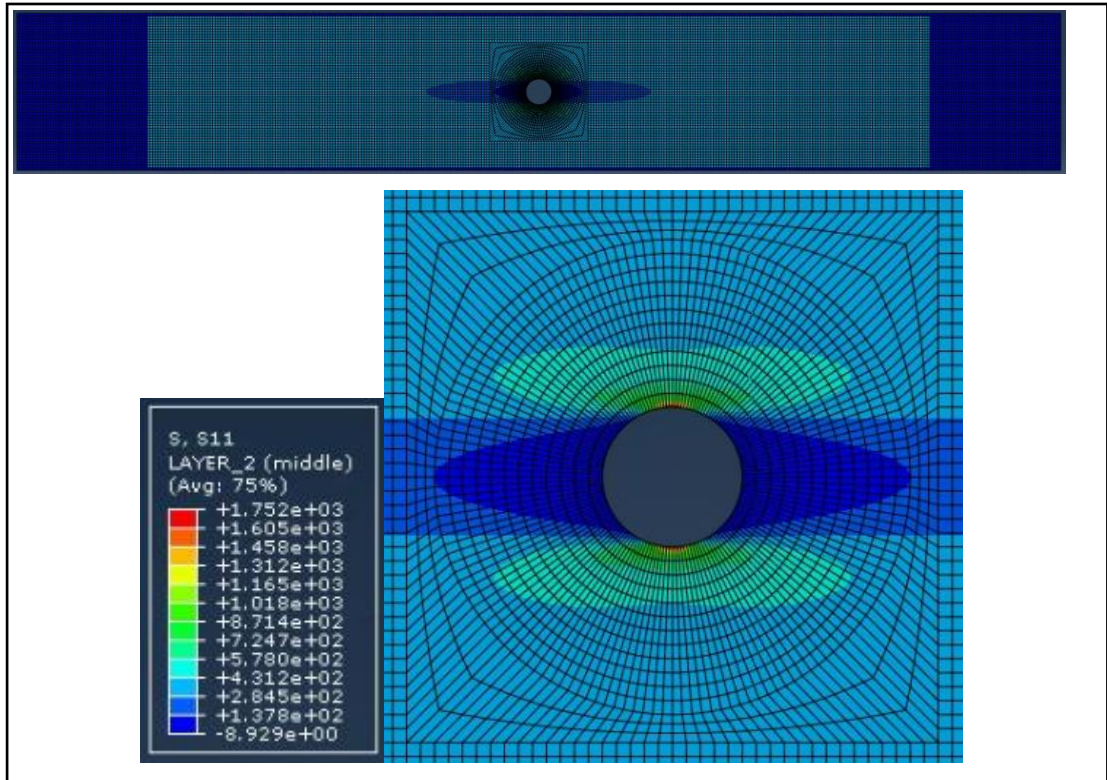


Figura 85. Resultats de la tensió S11 del cas isotròpic 0°.

S22:

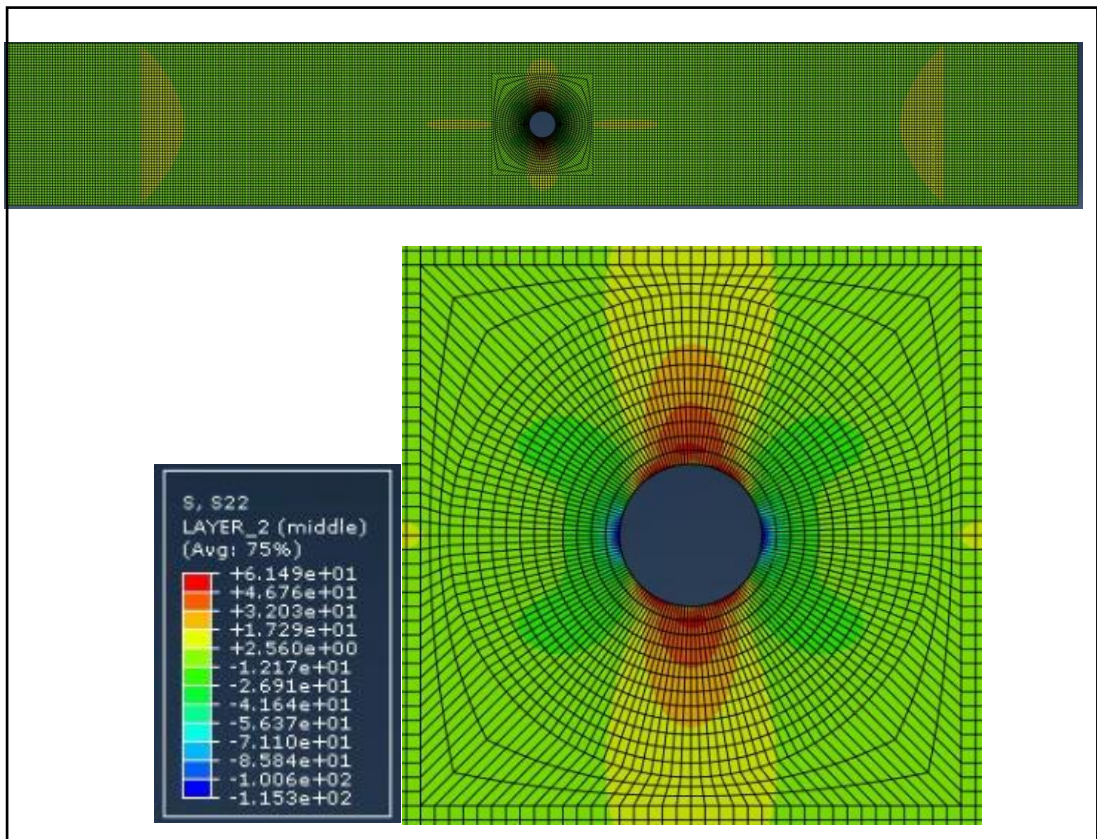


Figura 86. Resultats de la tensió S22 del cas isotròpic 0°.

S12:

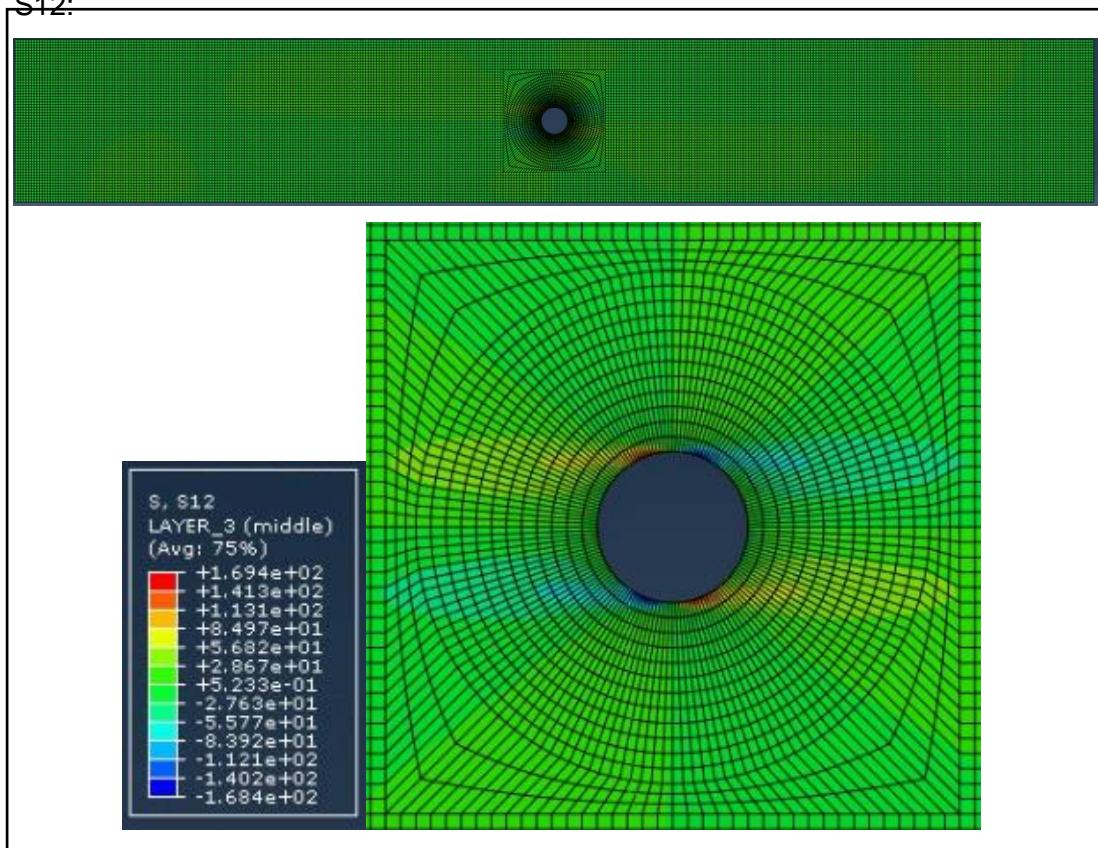


Figura 87. Resultats de la tensió S12 del cas isotròpic 0°.

- Isotròpic fibra 90/45/-45/0

S11 (capa 90°):

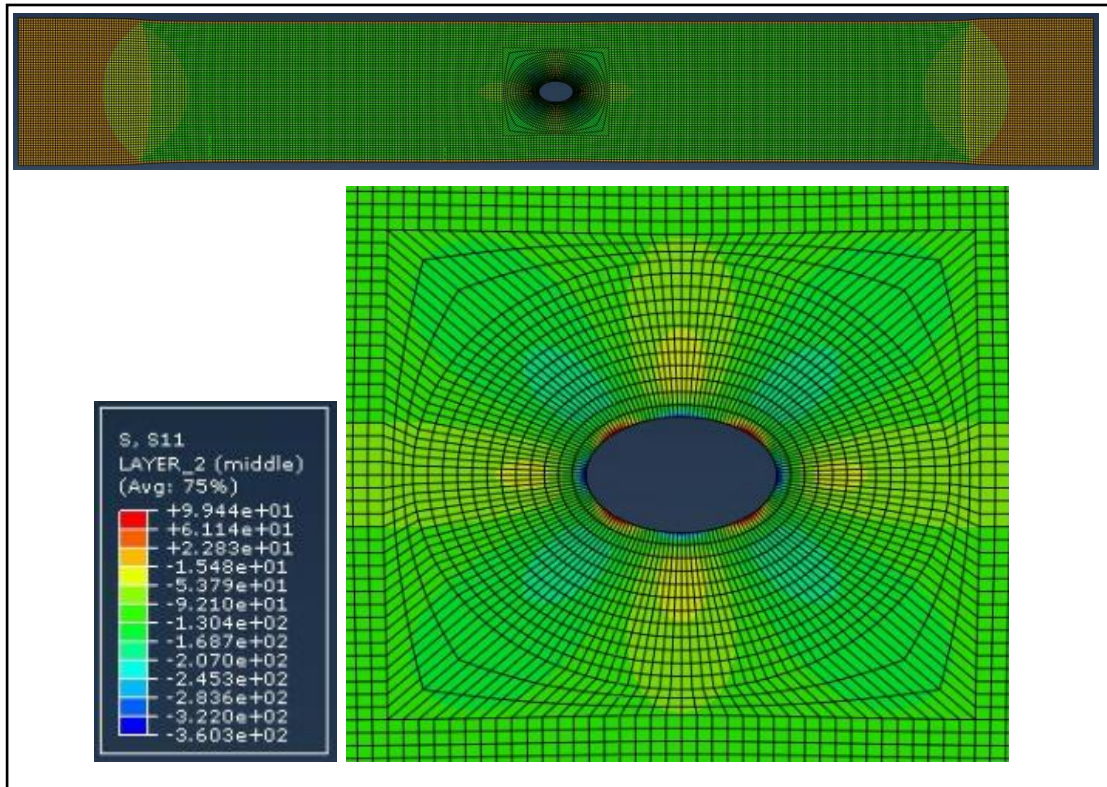


Figura 88. Resultats de la tensió S11 del cas isotròpic 90/45/-45/0 a la capa amb orientació 90

S22 (capa 90°):

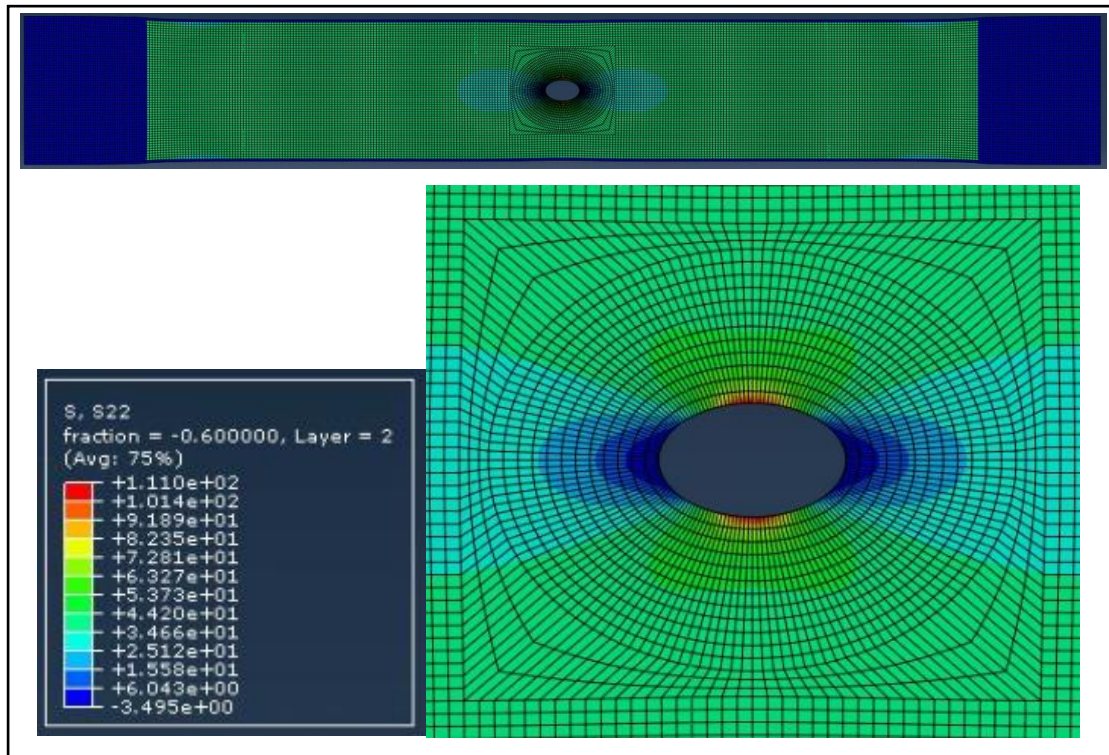


Figura 89. Resultats de la tensió S22 del cas isotròpic 90/45/-45/0 a la capa amb orientació 90

S12 (capa 90°):

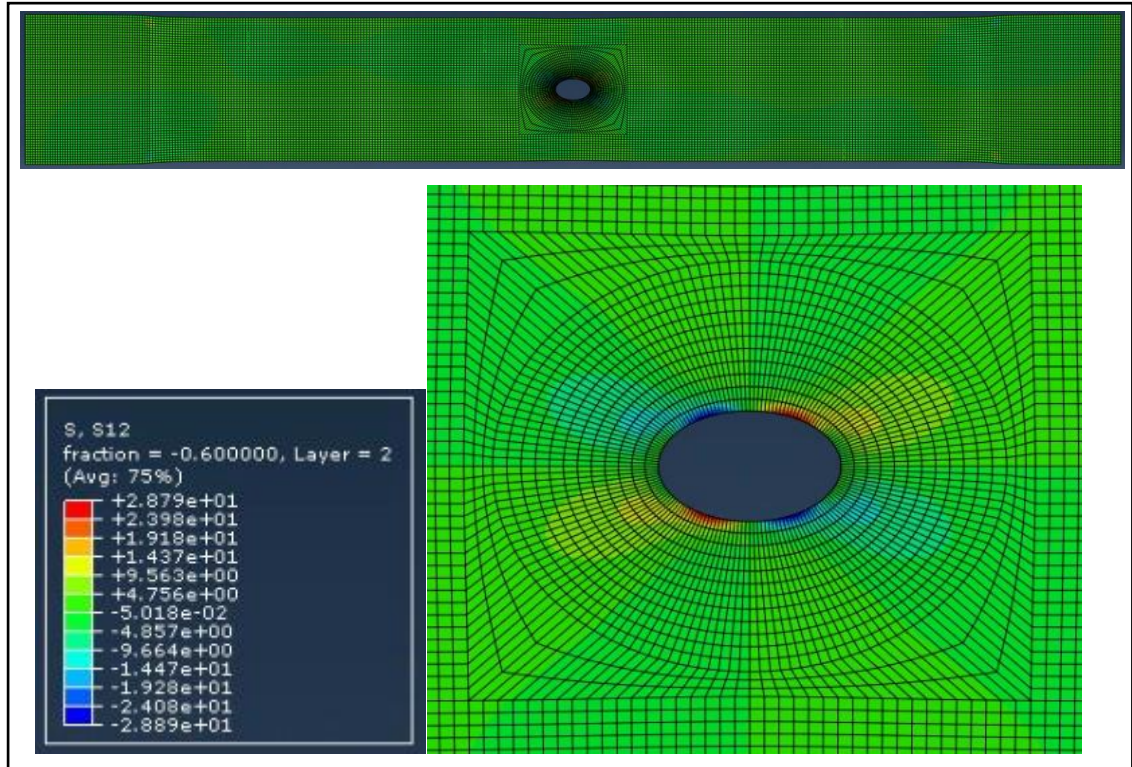


Figura 90. Resultats de la tensió S12 del cas isotròpic 90/45/-45/0 a la capa amb orientació 90

S11 (capa 45°):

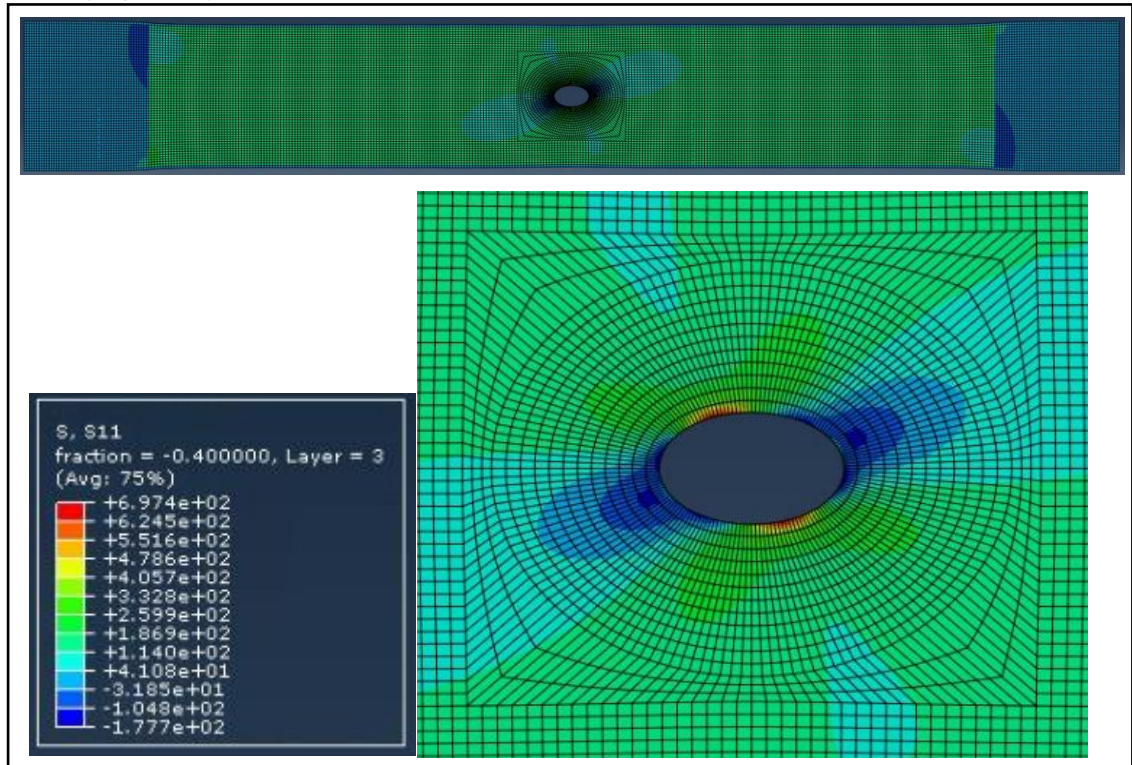


Figura 91. Resultats de la tensió S11 del cas isotròpic 90/45/-45/0 a la capa amb orientació 45

S22 (capa 45°):

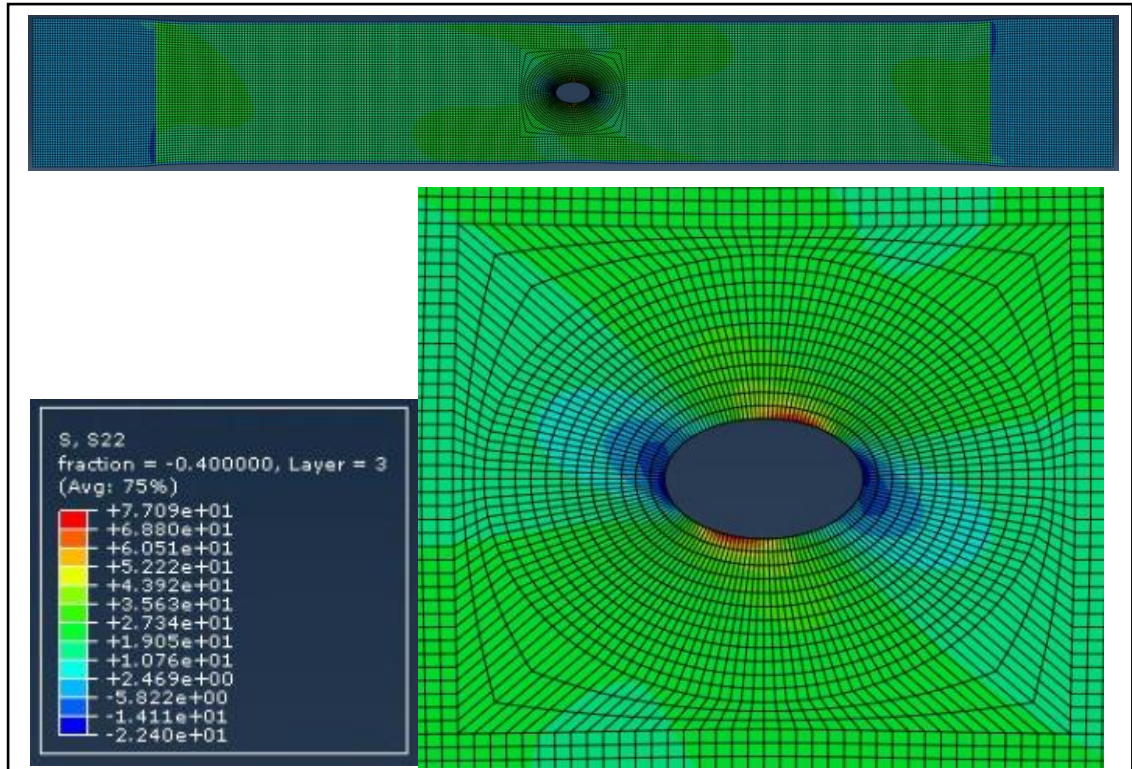


Figura 92. Resultats de la tensió S22 del cas isotròpic 90/45/-45/0 a la capa amb orientació 45

S12 (capa 45°):

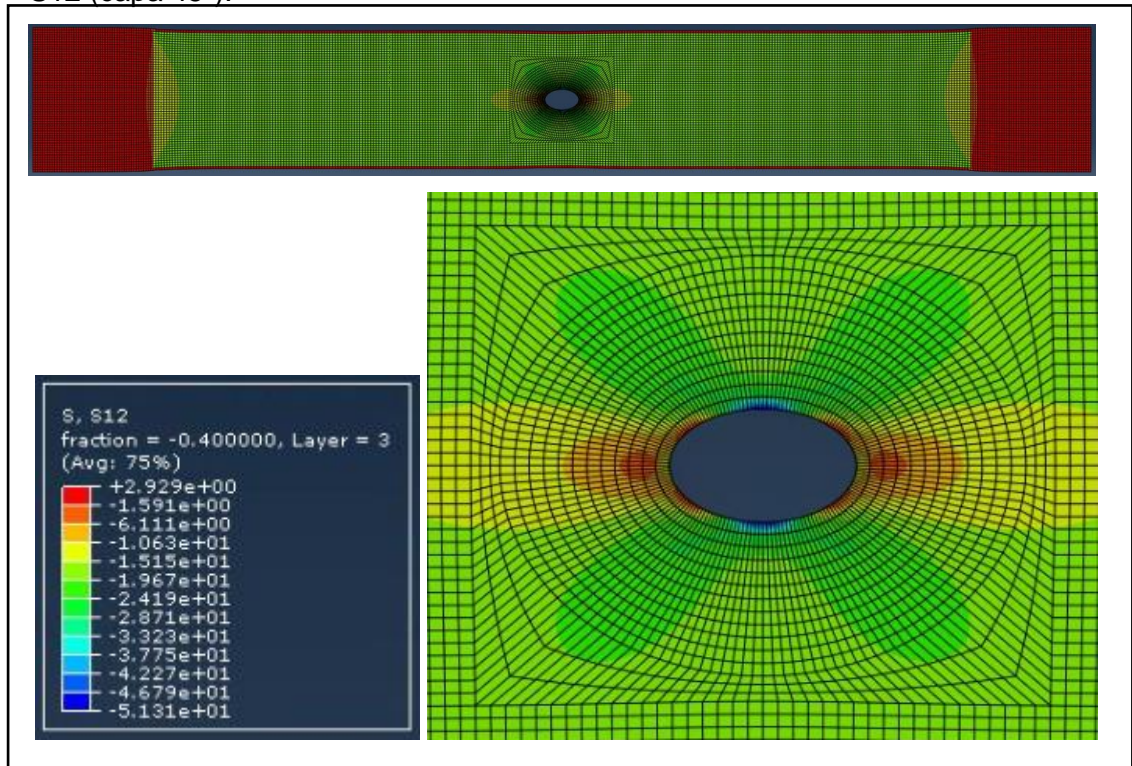


Figura 93. Resultats de la tensió S12 del cas isotròpic 90/45/-45/0 a la capa amb orientació 45

S11 (capa -45°):

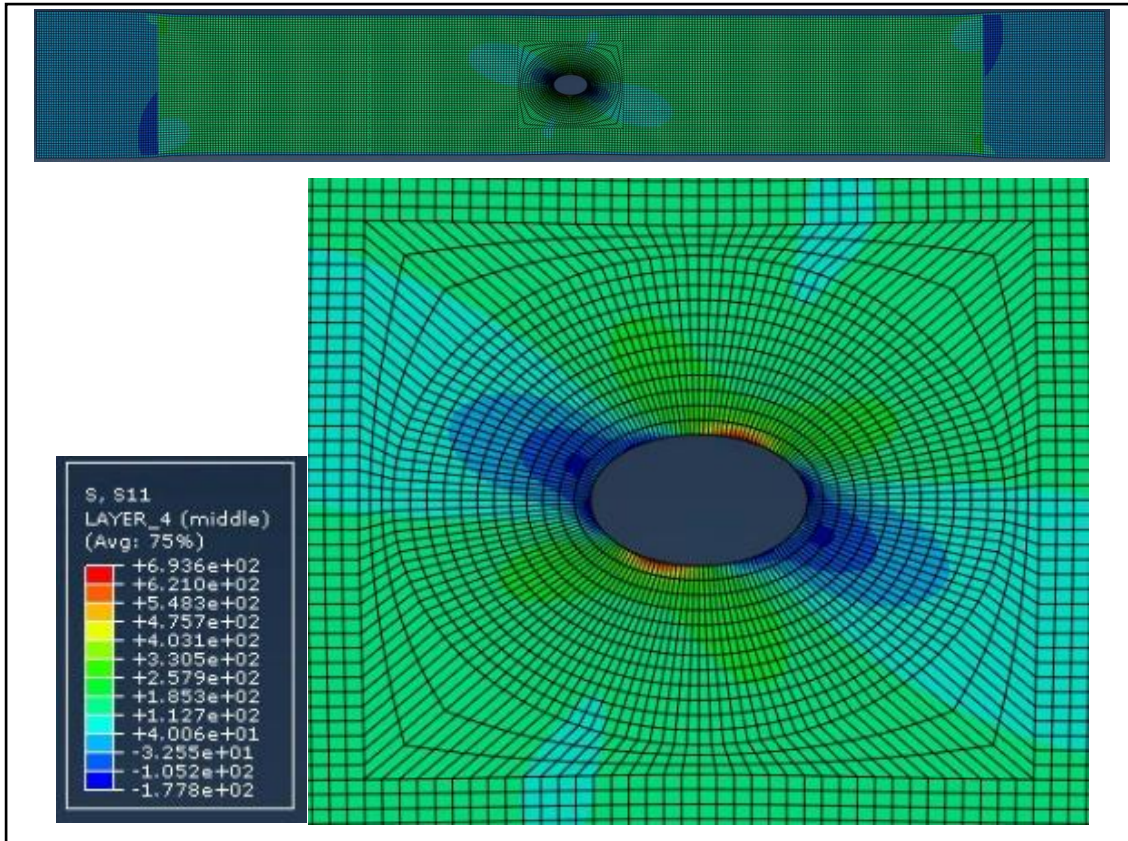


Figura 94. Resultats de la tensió S11 del cas isotròpic 90/45/-45/0 a la capa amb orientació -45

S22 (capa -45°):

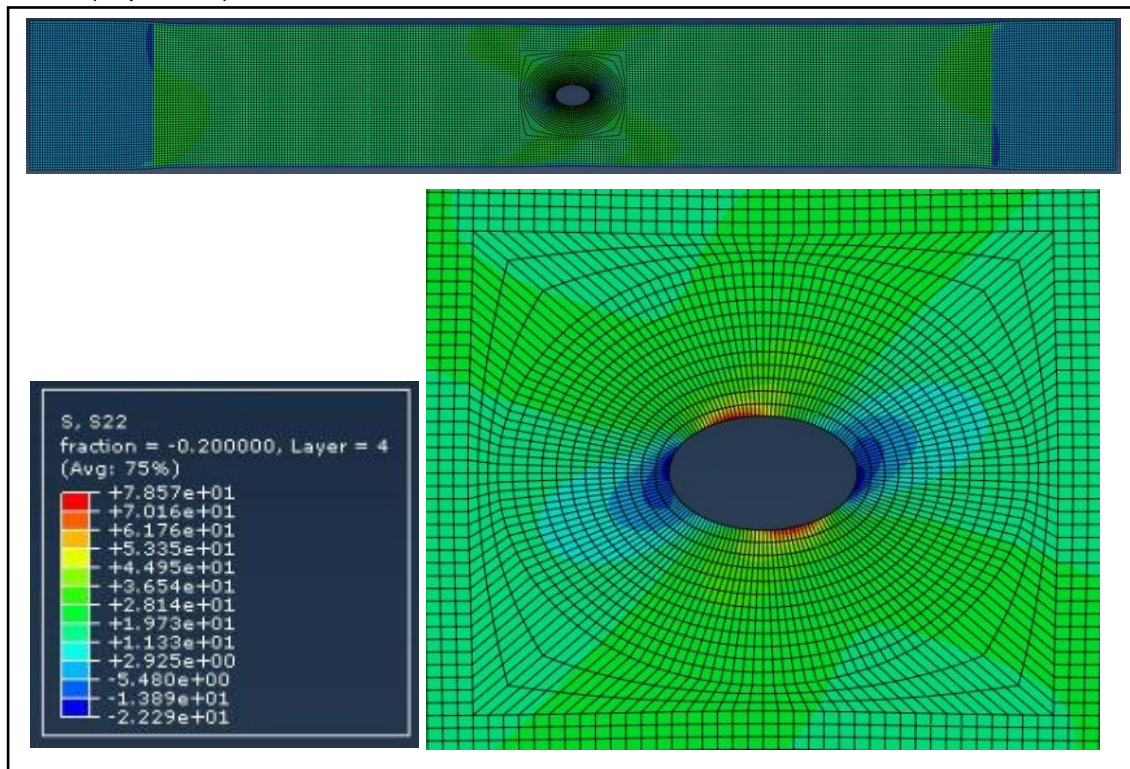


Figura 95. Resultats de la tensió S22 del cas isotròpic 90/45/-45/0 a la capa amb orientació -45

S12 (capa -45°):

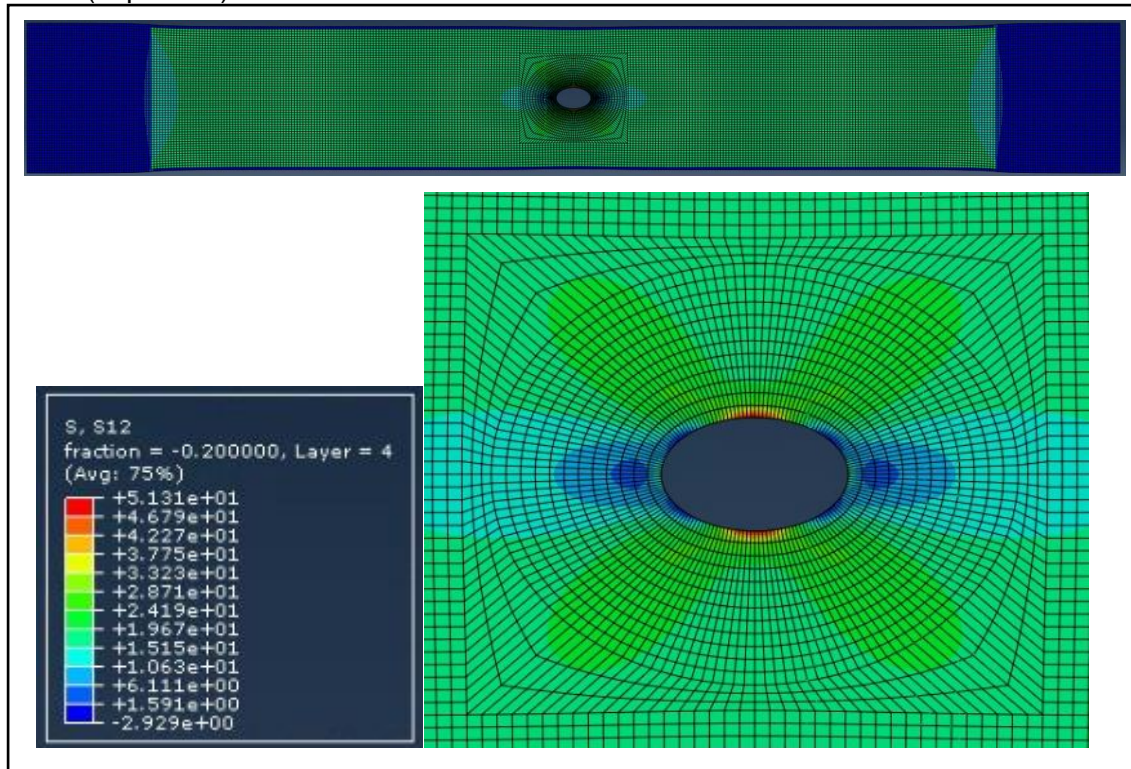


Figura 96. Resultats de la tensió S12 del cas isotròpic 90/45/-45/0 a la capa amb orientació -45

S11 (capa 0):

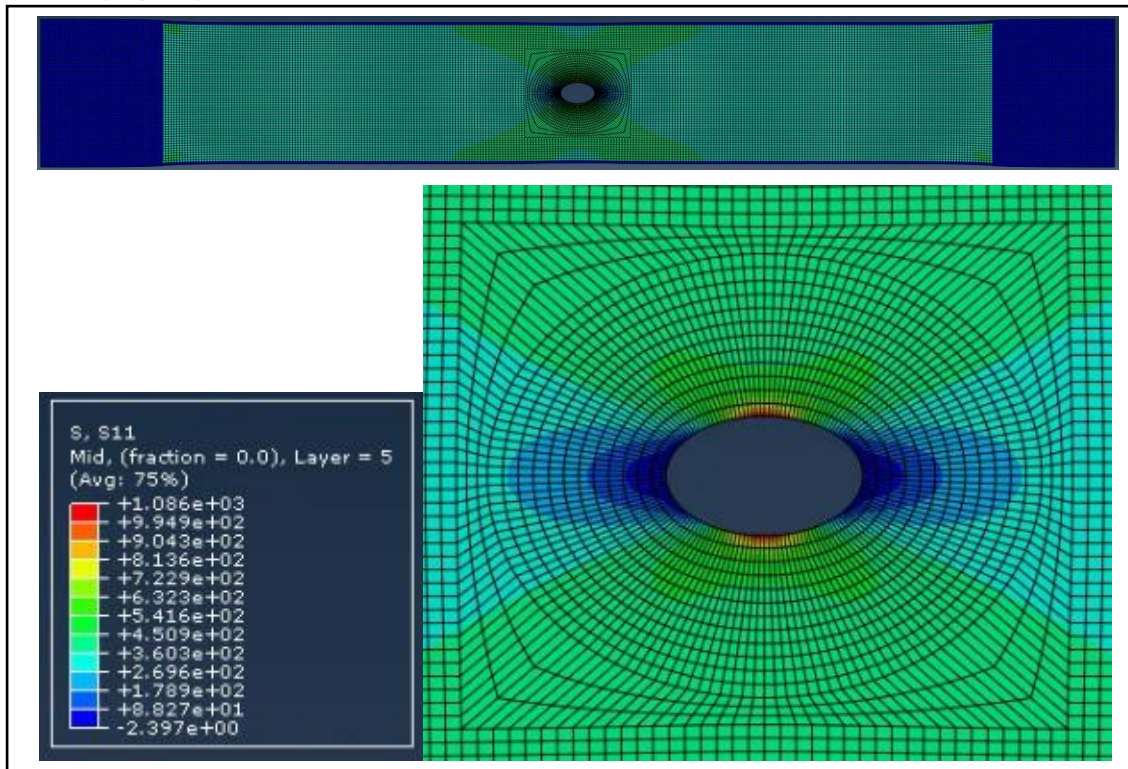


Figura 97. Resultats de la tensió S11 del cas isotròpic 90/45/-45/0 a la capa amb orientació 0

S22 (capa 0°):

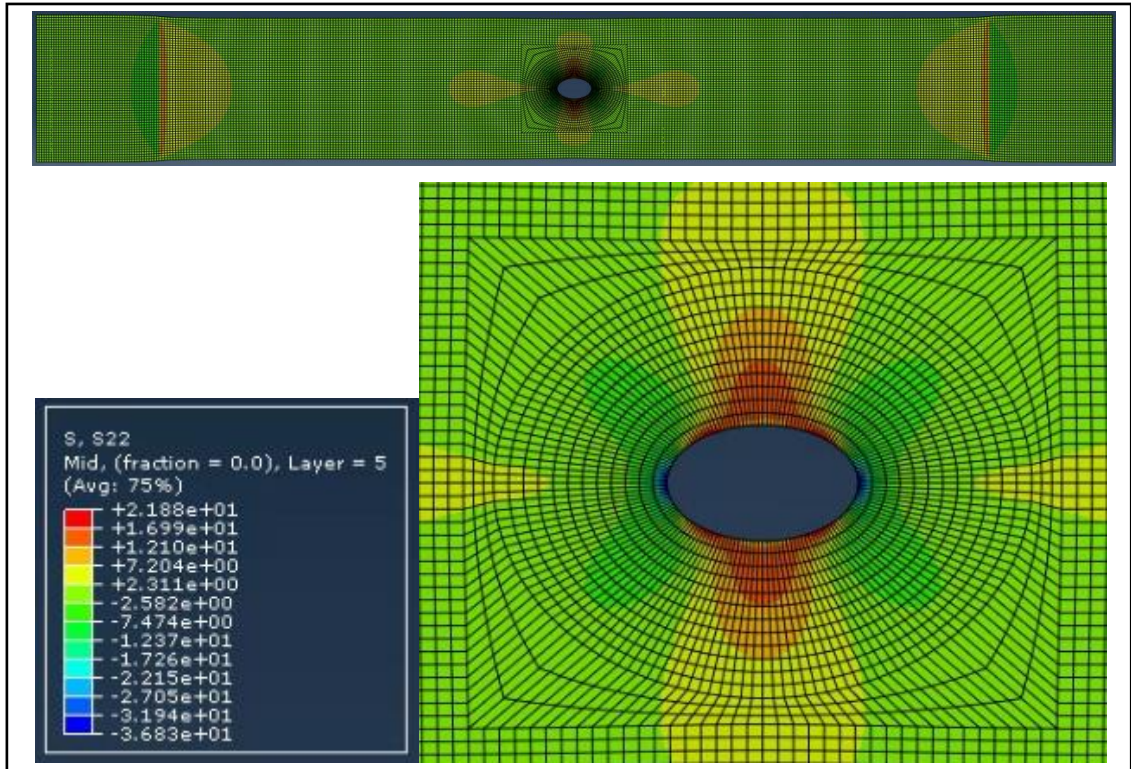


Figura 98. Resultats de la tensió S22 del cas isotròpic 90/45/-45/0 a la capa amb orientació 0

S12 (capa 0°):

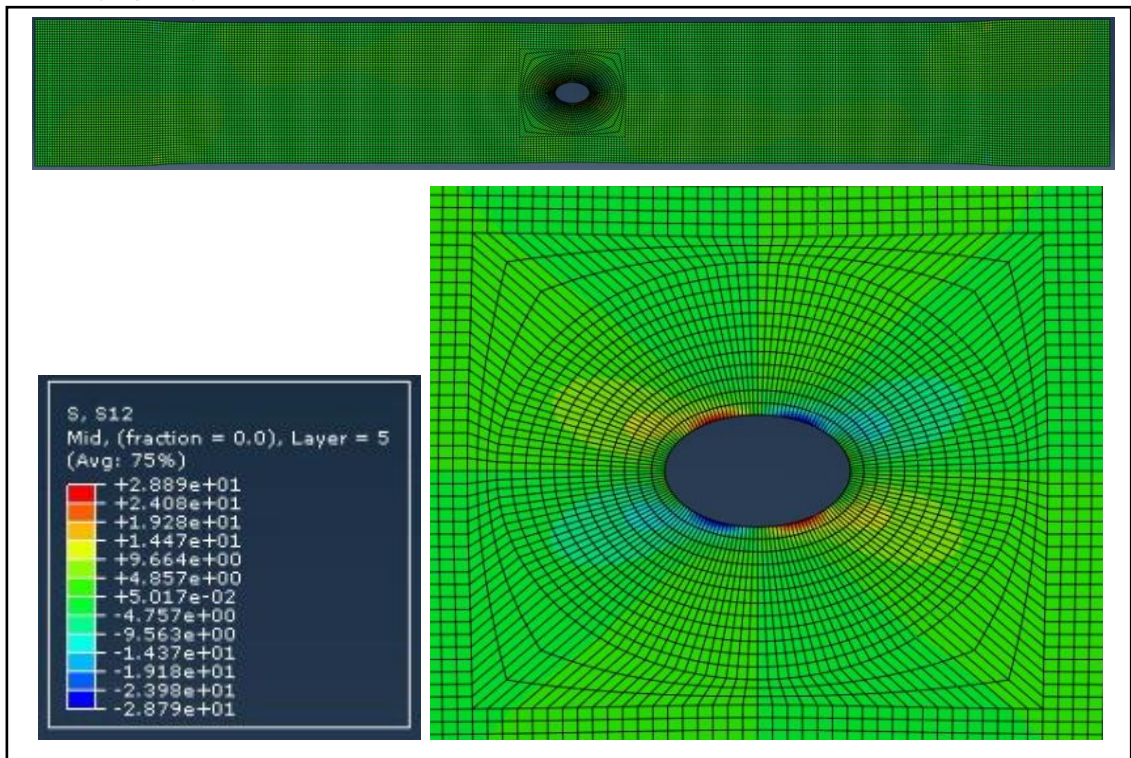


Figura 99. Resultats de la tensió S12 del cas isotròpic 90/45/-45/0 a la capa amb orientació 0

D.2 Cas concèntric

- Concèntric 2

S11:

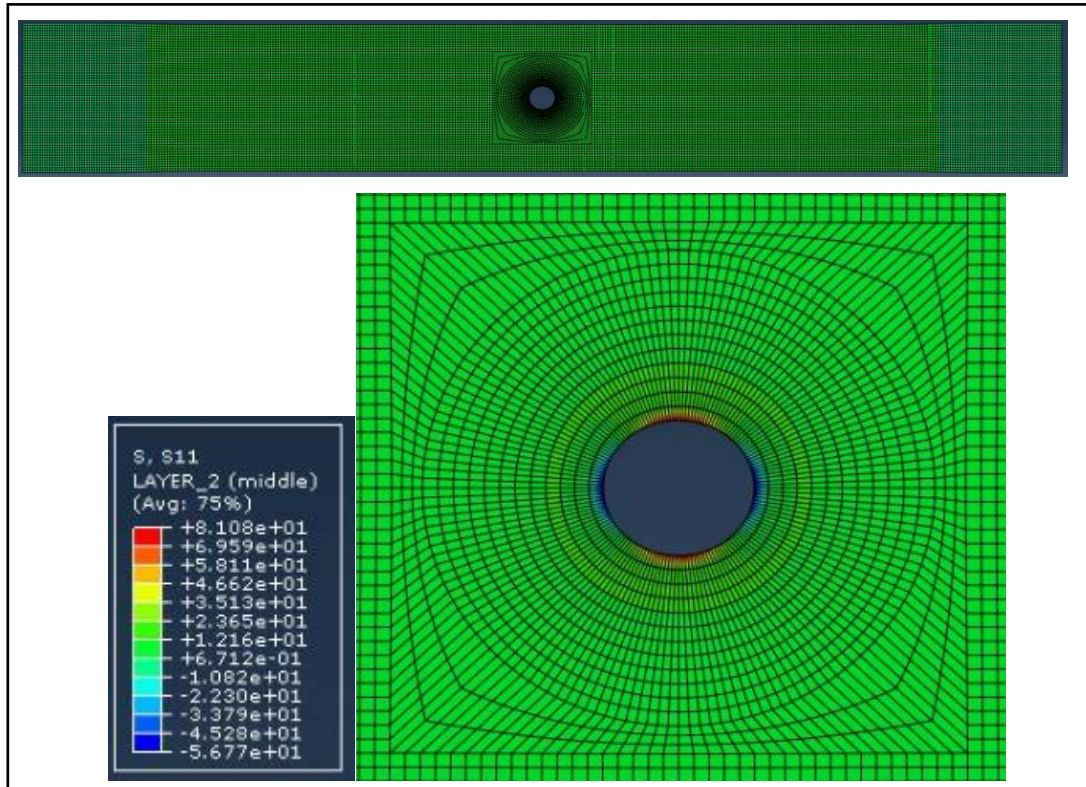


Figura 100. Resultats de la tensió S11 del cas amb 2 concenricitats

S22:

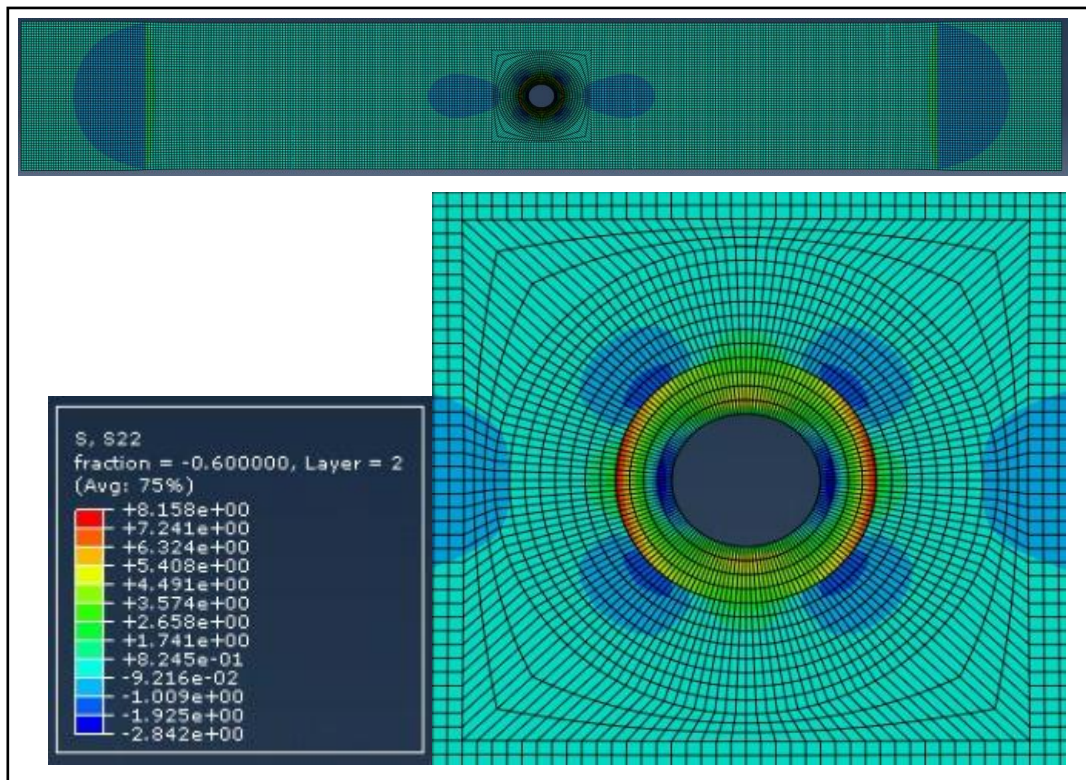


Figura 101. Resultats de la tensió S22 del cas amb 2 concenricitats

S12:

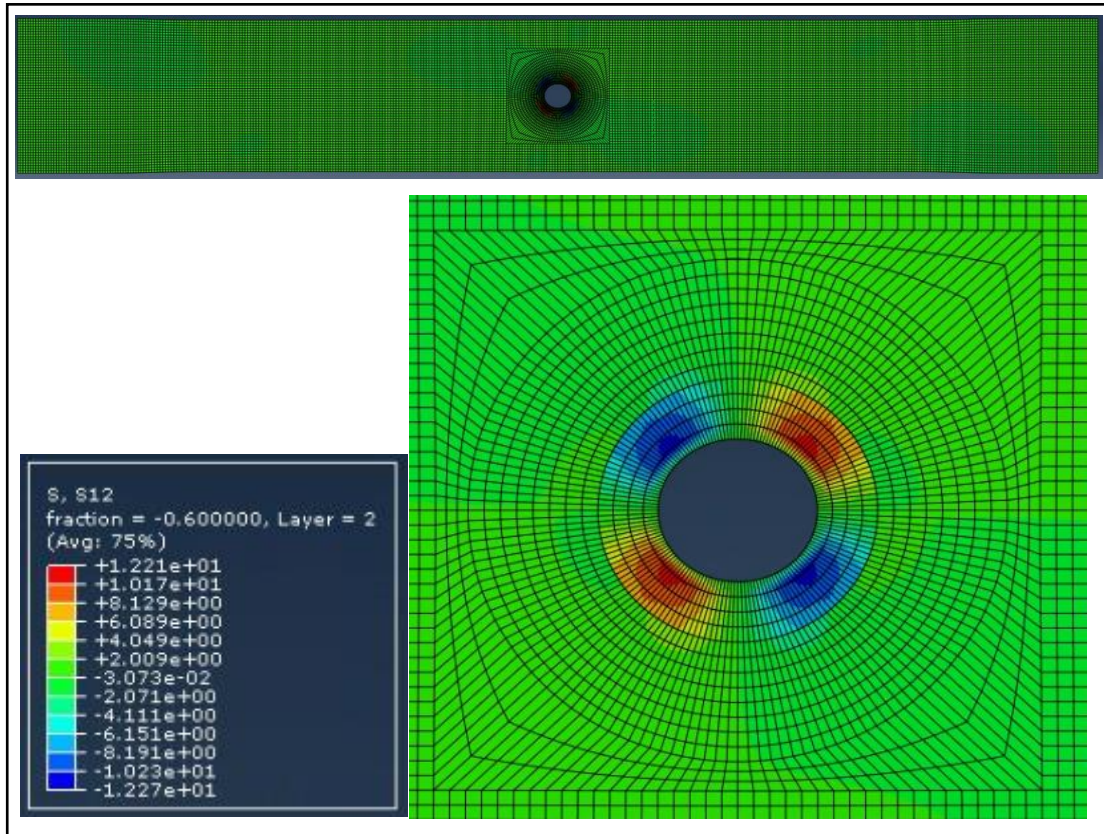


Figura 102. Resultats de la tensió S12 del cas amb 2 concentricitats

- Concèntric 3

S11:

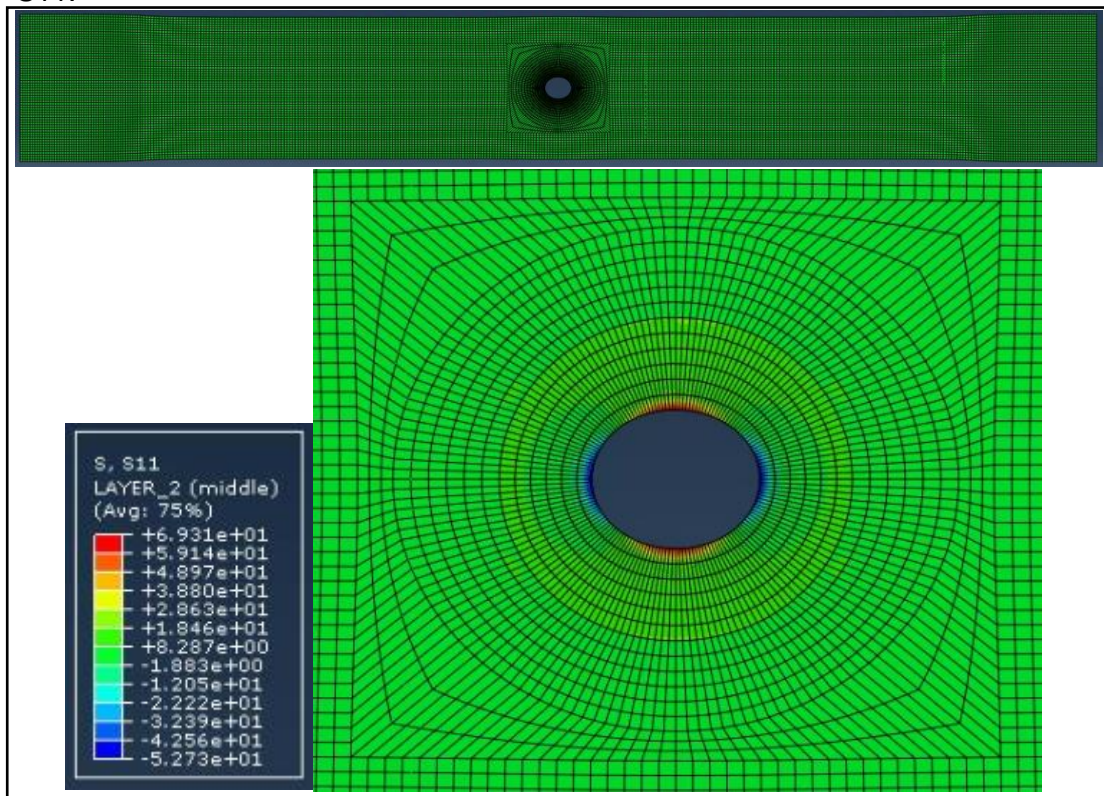


Figura 103. Resultats de la tensió S11 del cas amb 3 concentricitats

S22:

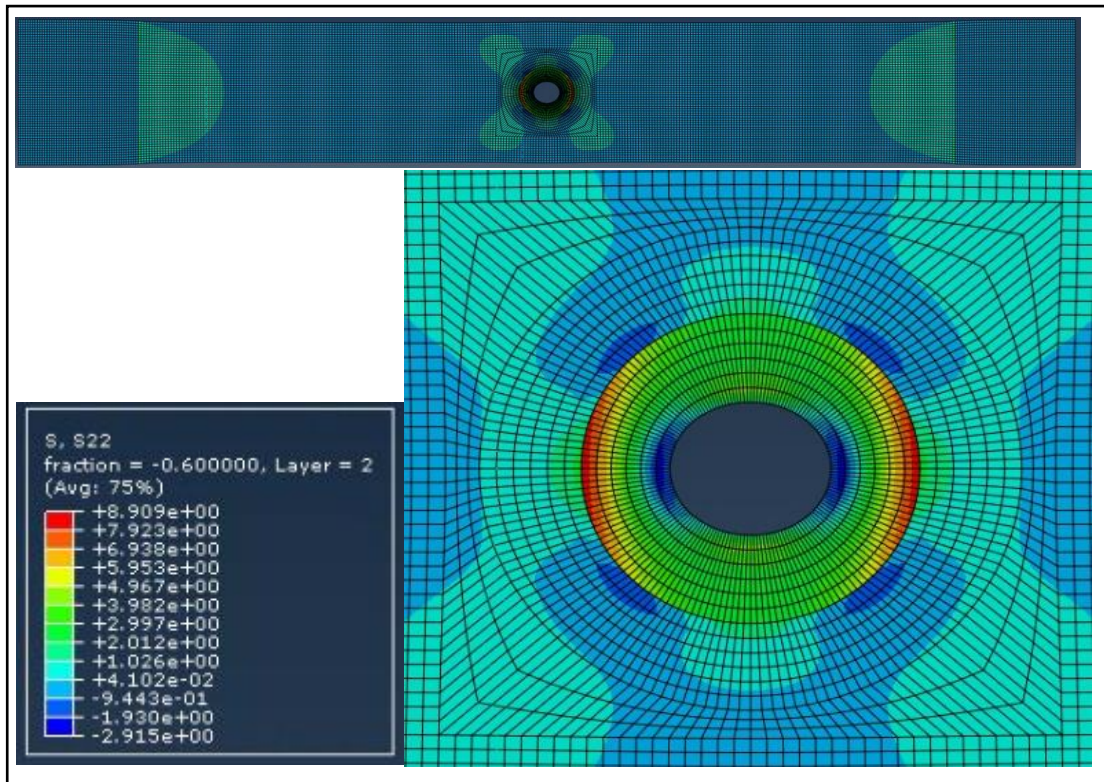


Figura 104. Resultats de la tensió S22 del cas amb 3 concentricitats

S12:

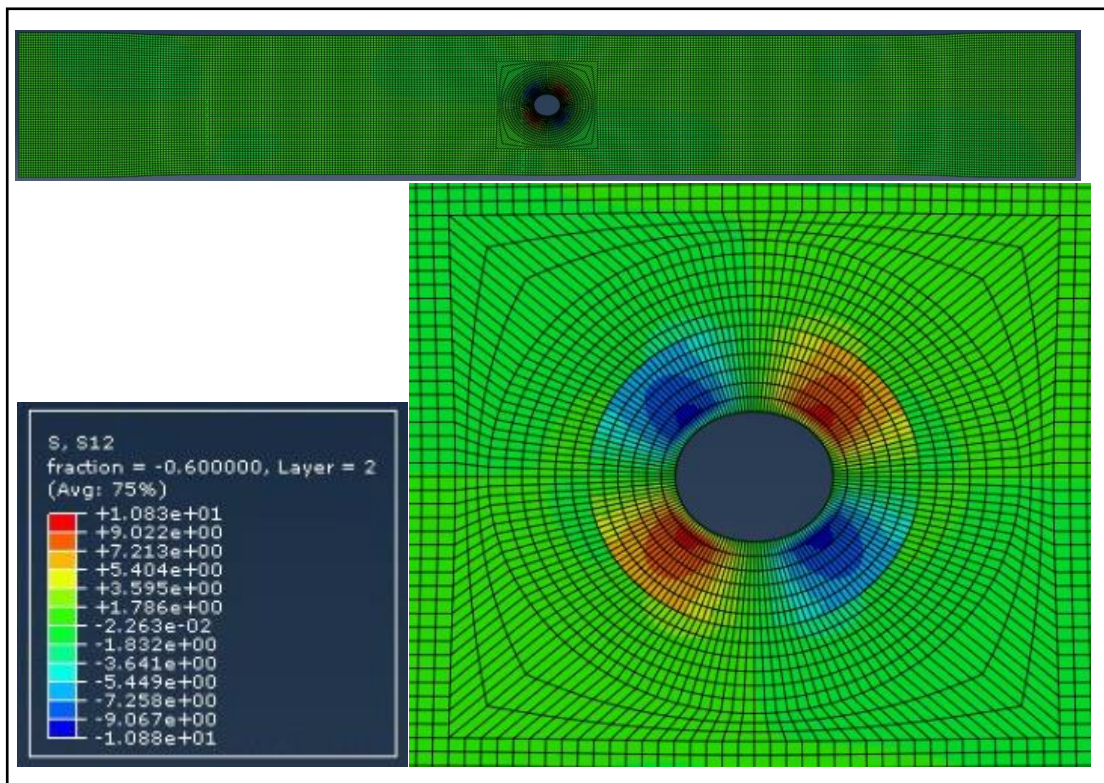


Figura 105. Resultats de la tensió S12 del cas amb 3 concentricitats

- Concèntric 4

S11:

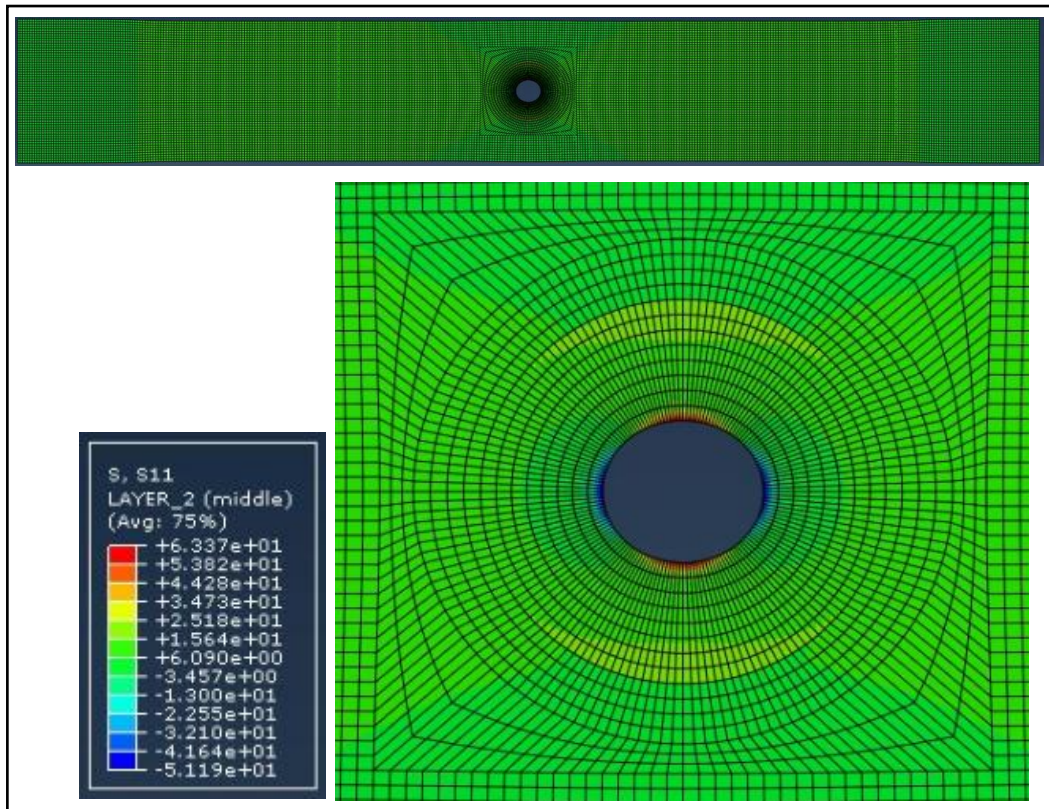


Figura 106. Resultats de la tensió S11 del cas amb 4 concentricitats

S22:

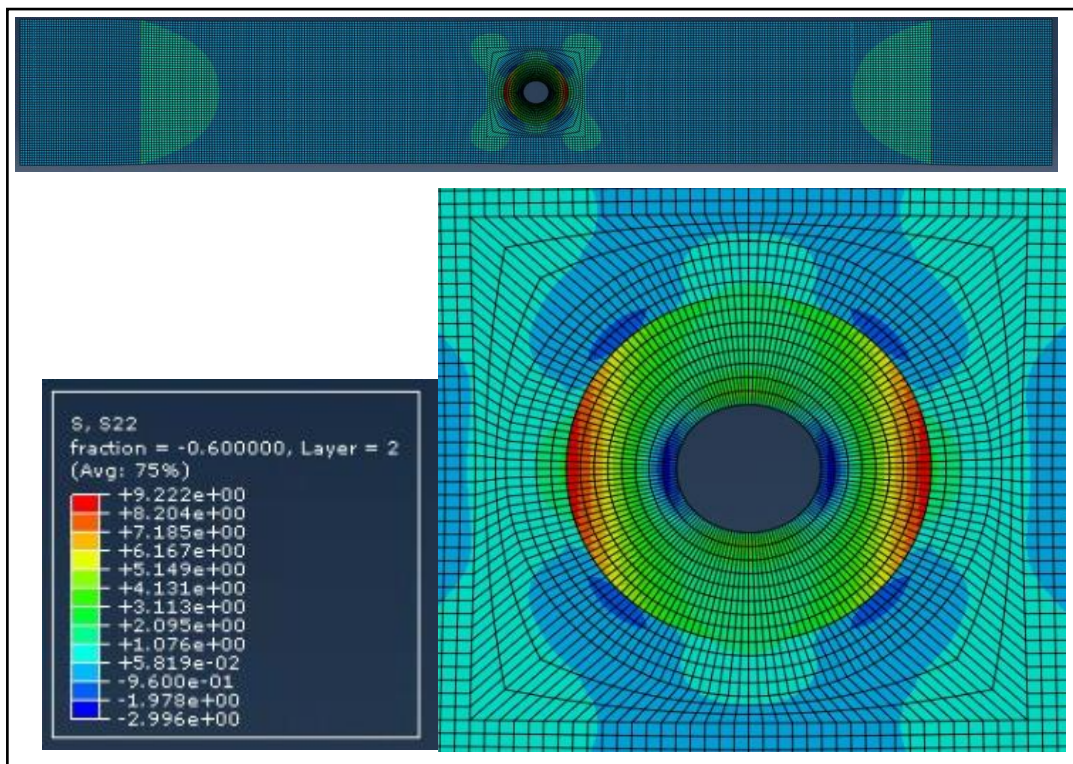


Figura 107. Resultats de la tensió S22 del cas amb 4 concentricitats

S12:

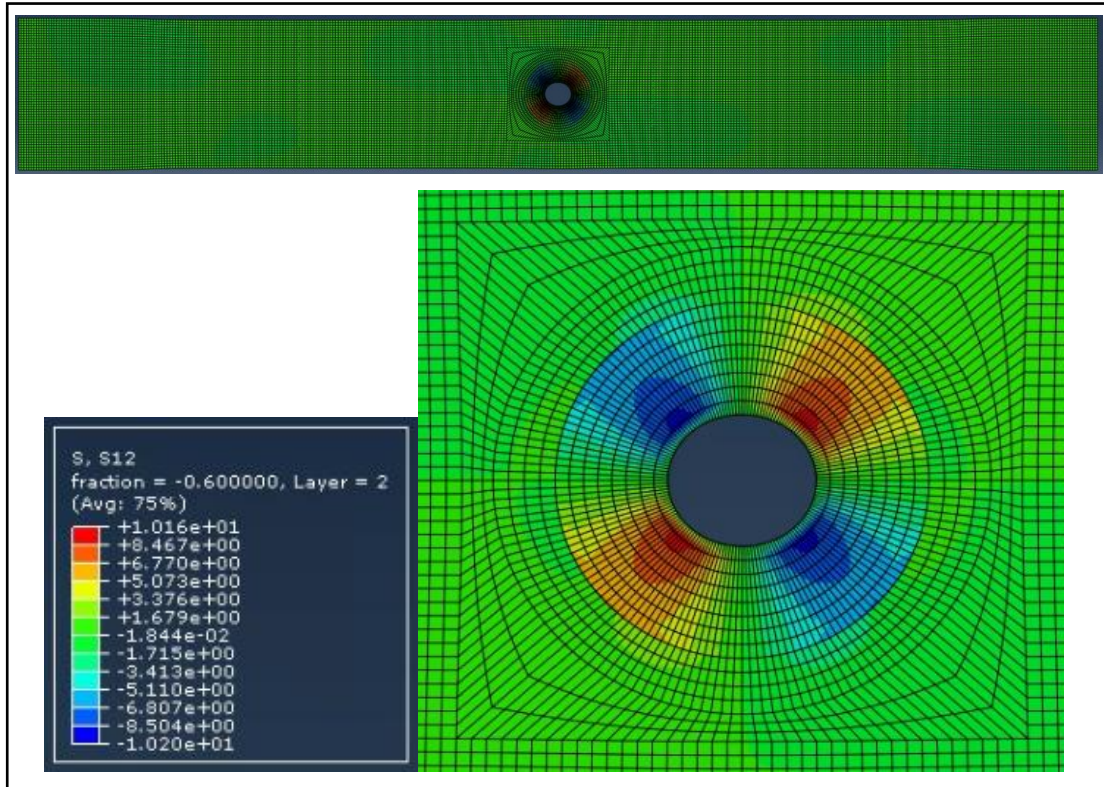


Figura 108. Resultats de la tensió S12 del cas amb 4 concentricitats

- Concèntric 5

S11:

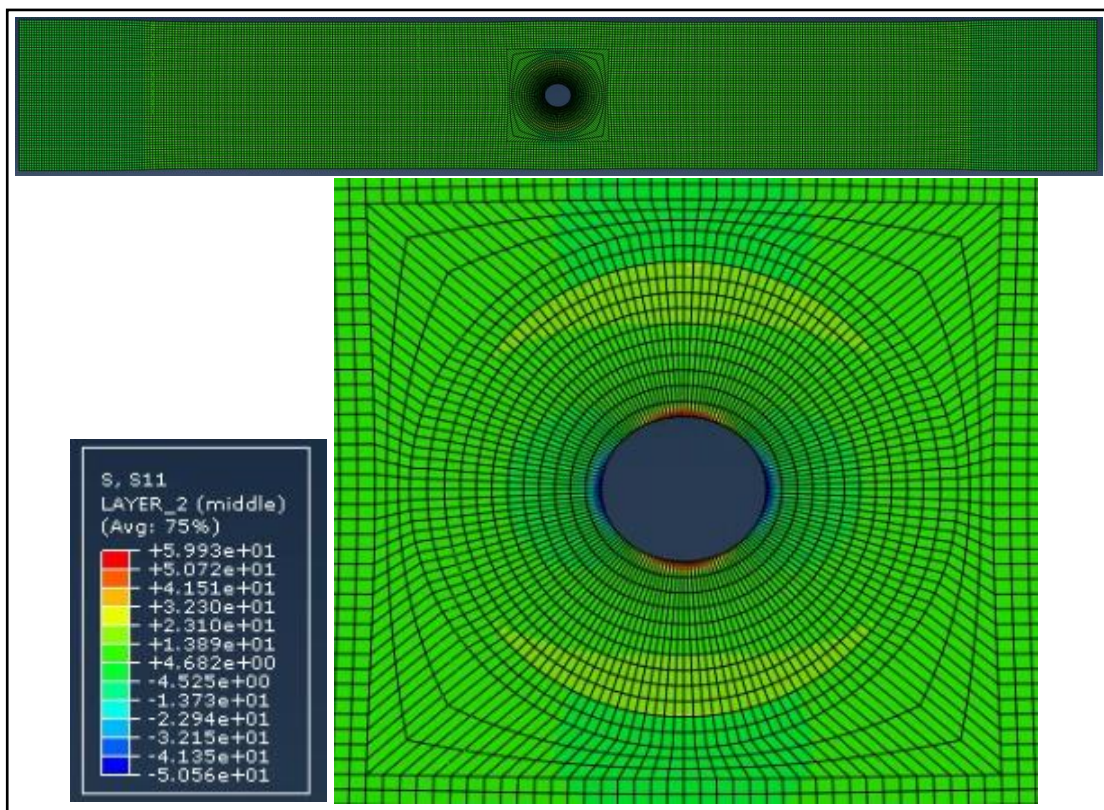


Figura 109. Resultats de la tensió S11 del cas amb 5 concentricitats

S22:

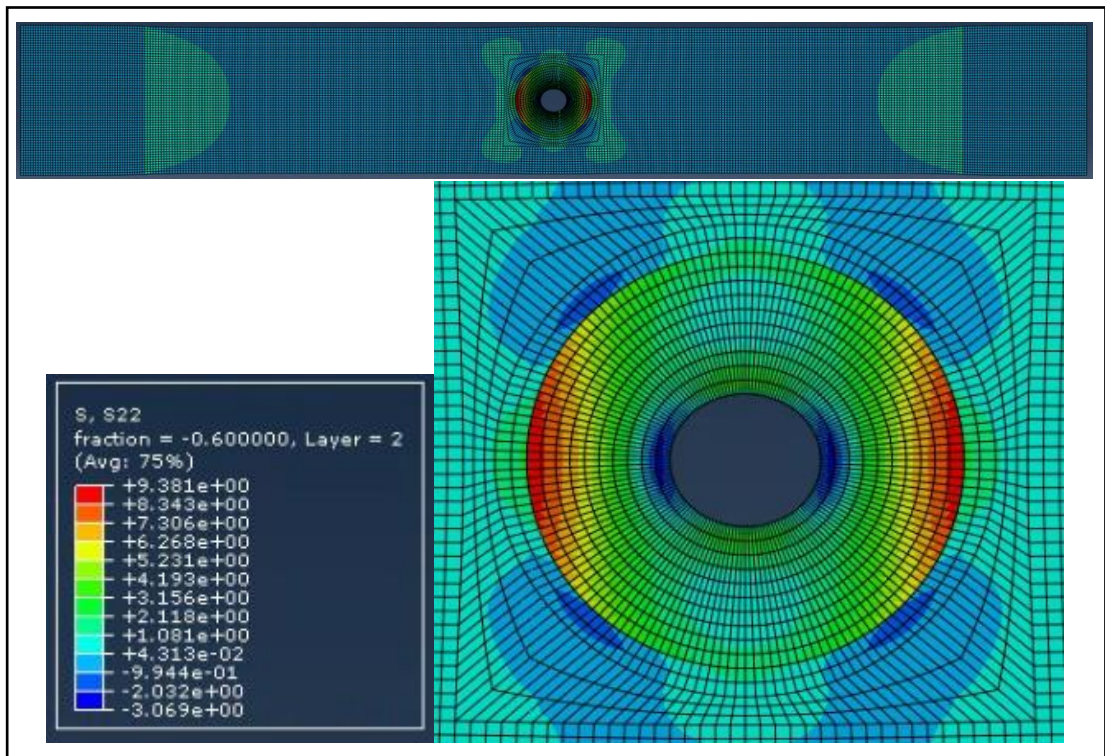


Figura 110. Resultats de la tensió S22 del cas amb 5 concentricitats

S12:

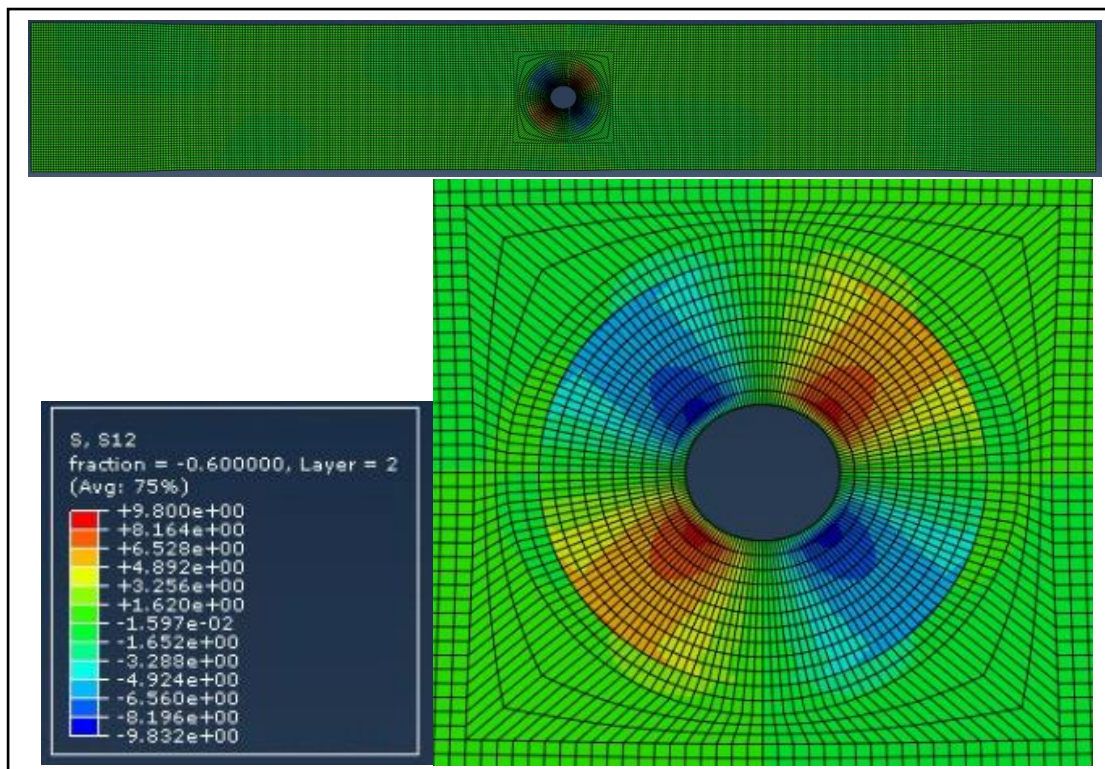


Figura 111. Resultats de la tensió S12 del cas amb 5 concentricitats

- Concèntric 6

S11:

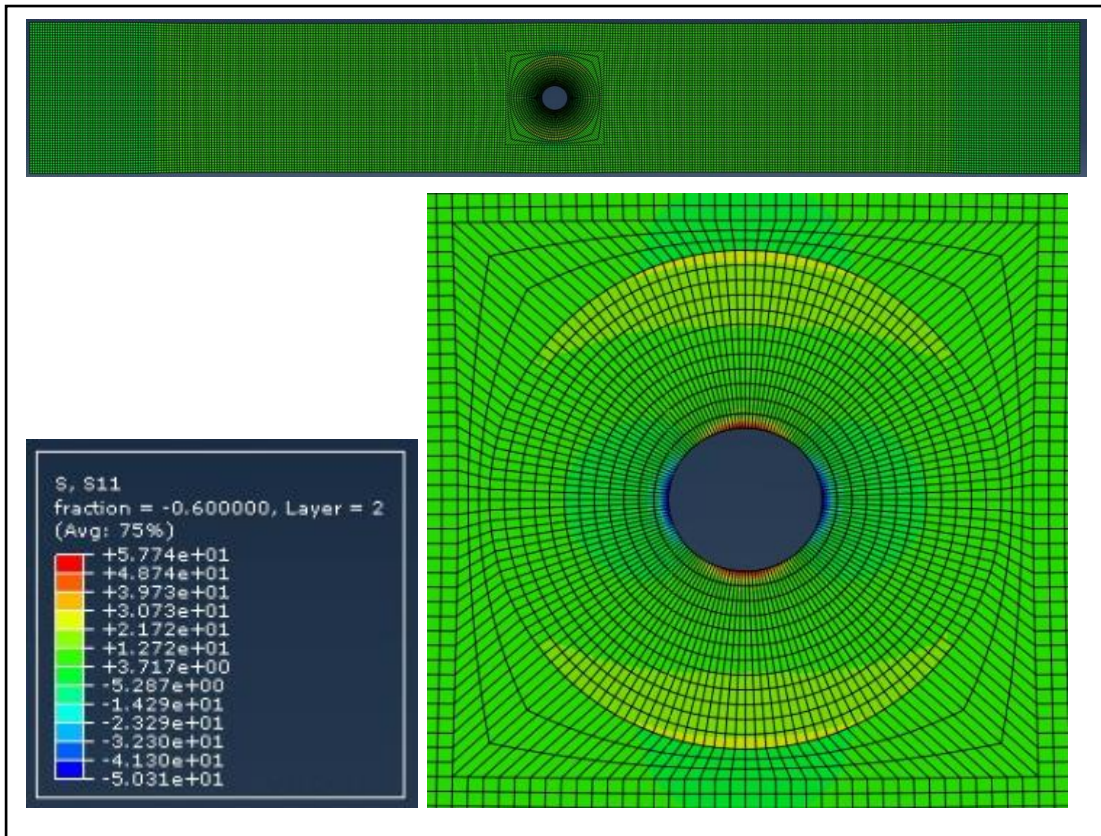


Figura 112. Resultats de la tensió S11 del cas amb 6 concentricitats

S22:

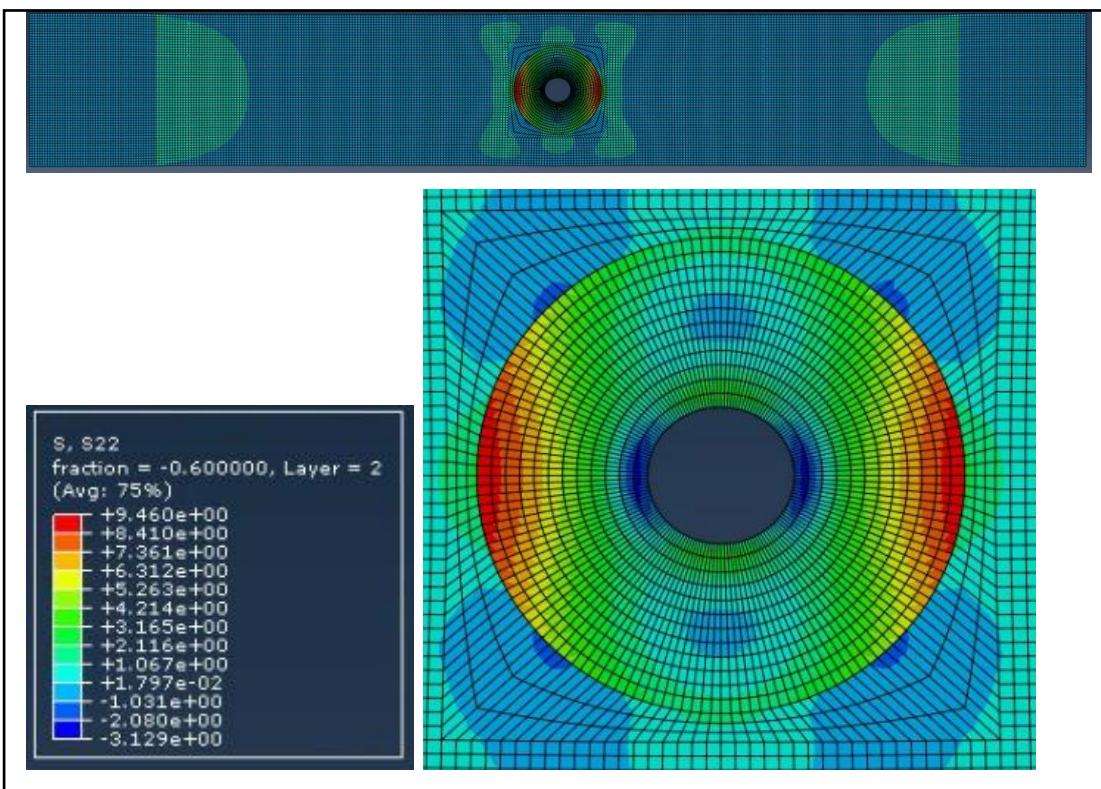


Figura 113. Resultats de la tensió S22 del cas amb 6 concentricitats

S12:

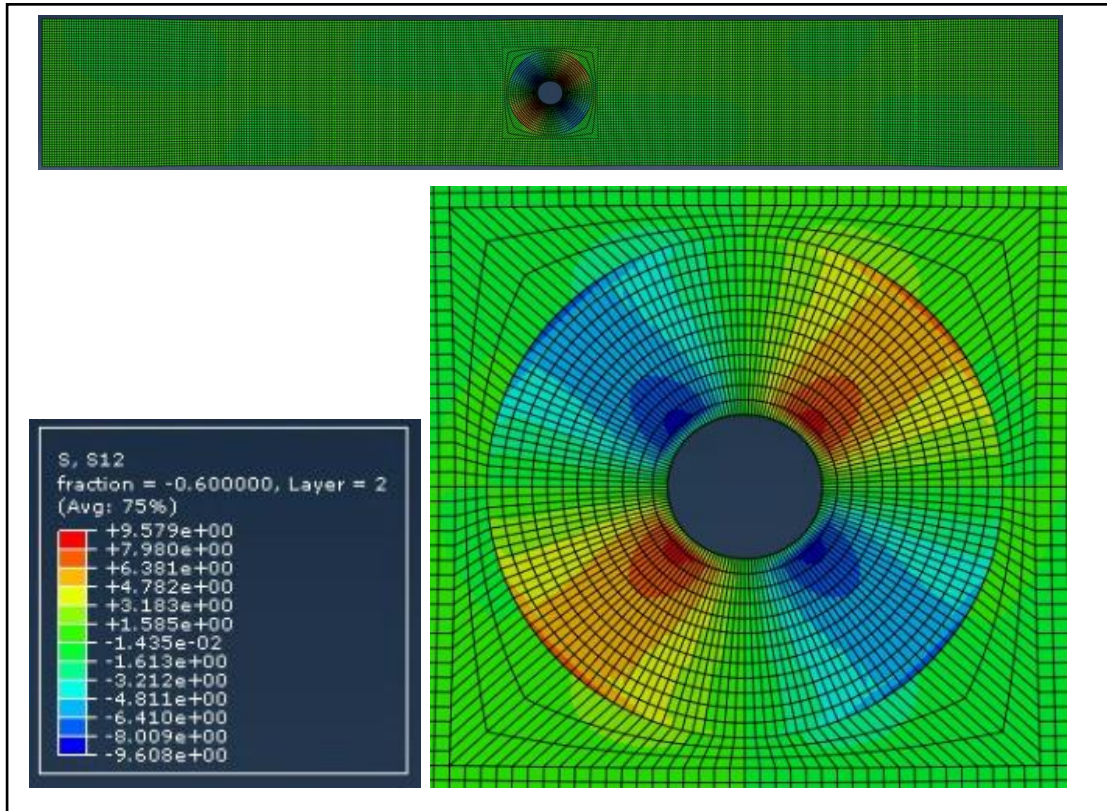


Figura 114. Resultats de la tensió S12 del cas amb 6 concentricitats

- Concèntric 2 + reforç

S11: La tensió assenyalada és la màxima en la zona del forat.

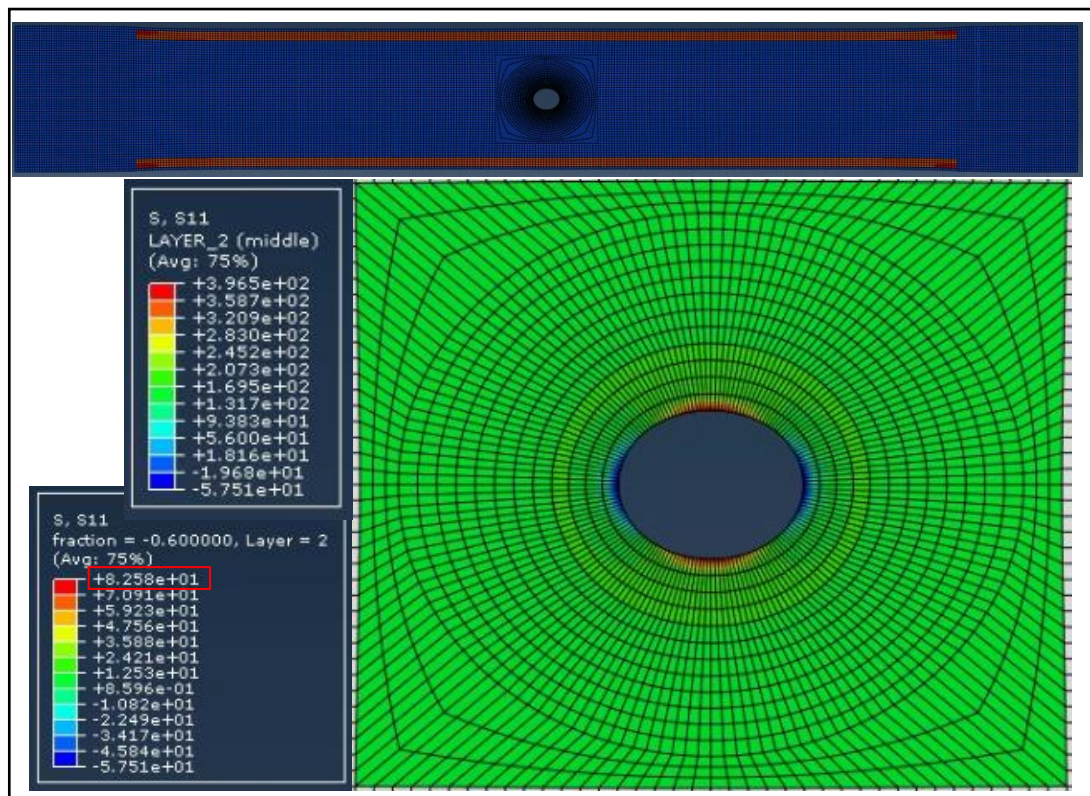


Figura 115. Resultats de la tensió S11 del cas amb 2 concentricitats + reforç

S22:

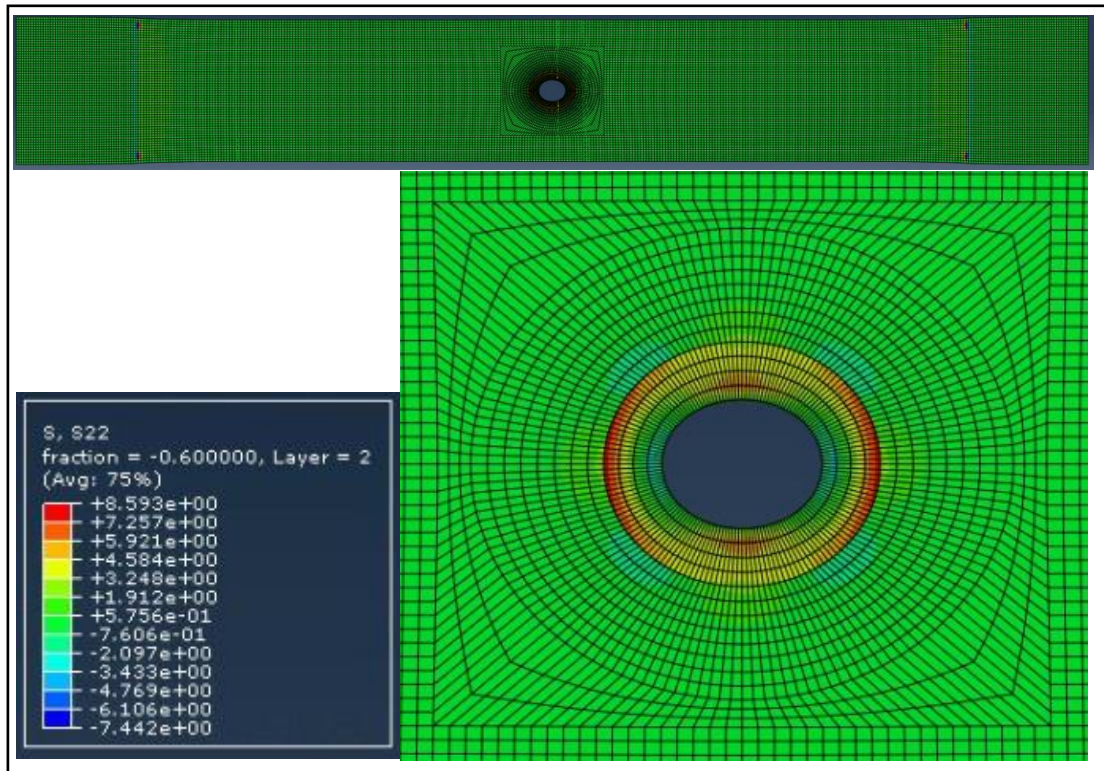


Figura 116. Resultats de la tensió S22 del cas amb 2 concentricitats + reforç

S12:

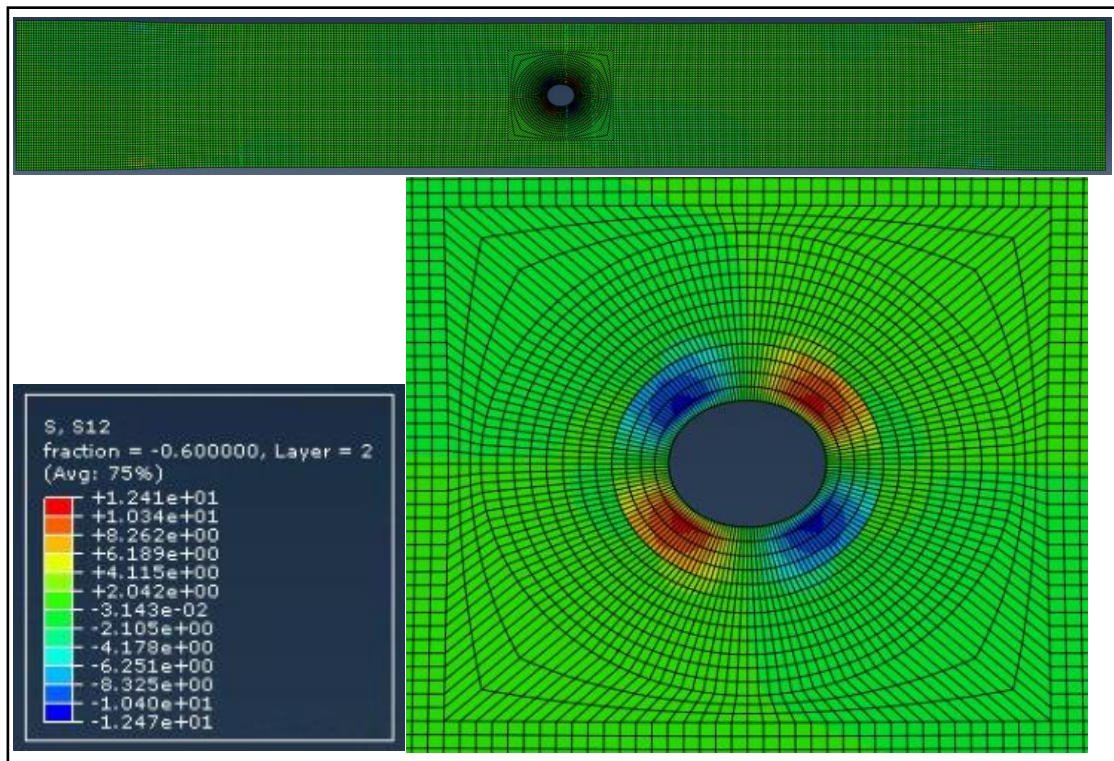


Figura 117. Resultats de la tensió S12 del cas amb 2 concentricitats + reforç

- Concèntric 3 + reforç

S11: La tensió assenyalada és la màxima en la zona del forat.

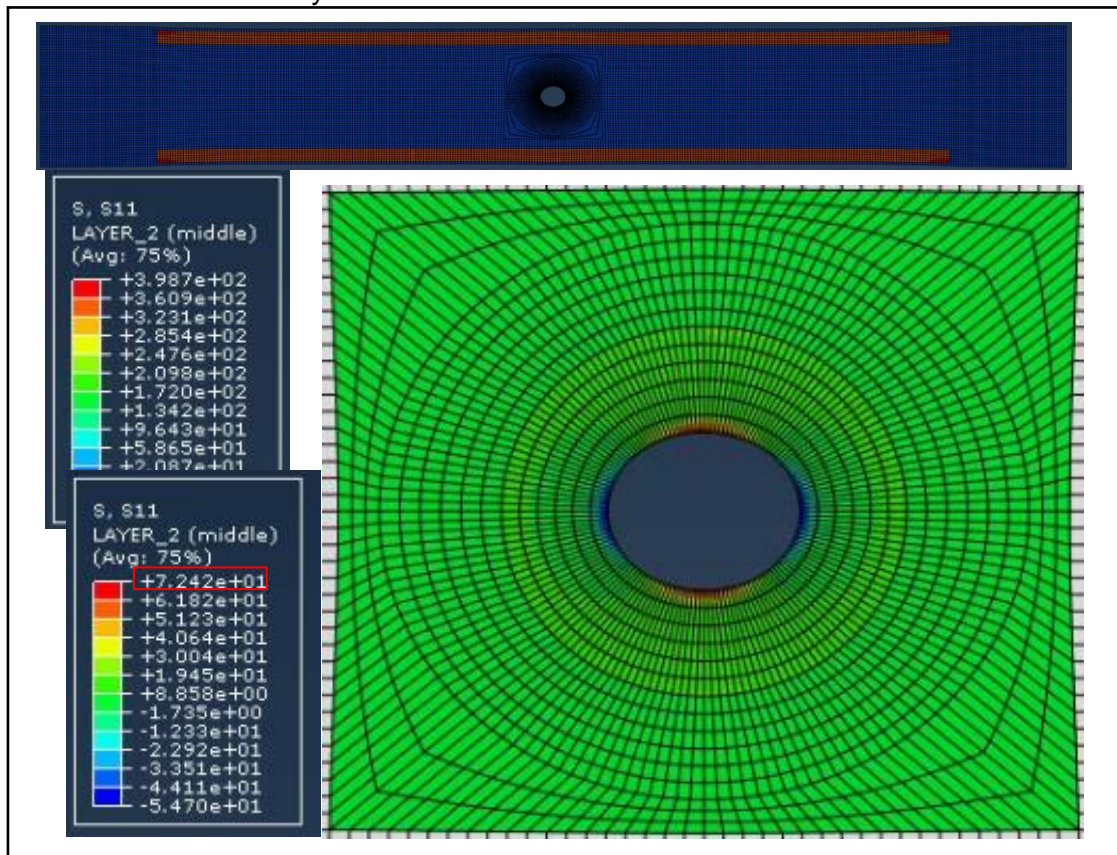


Figura 118. Resultats de la tensió S11 del cas amb 3 concèntricitats + reforç

S22:

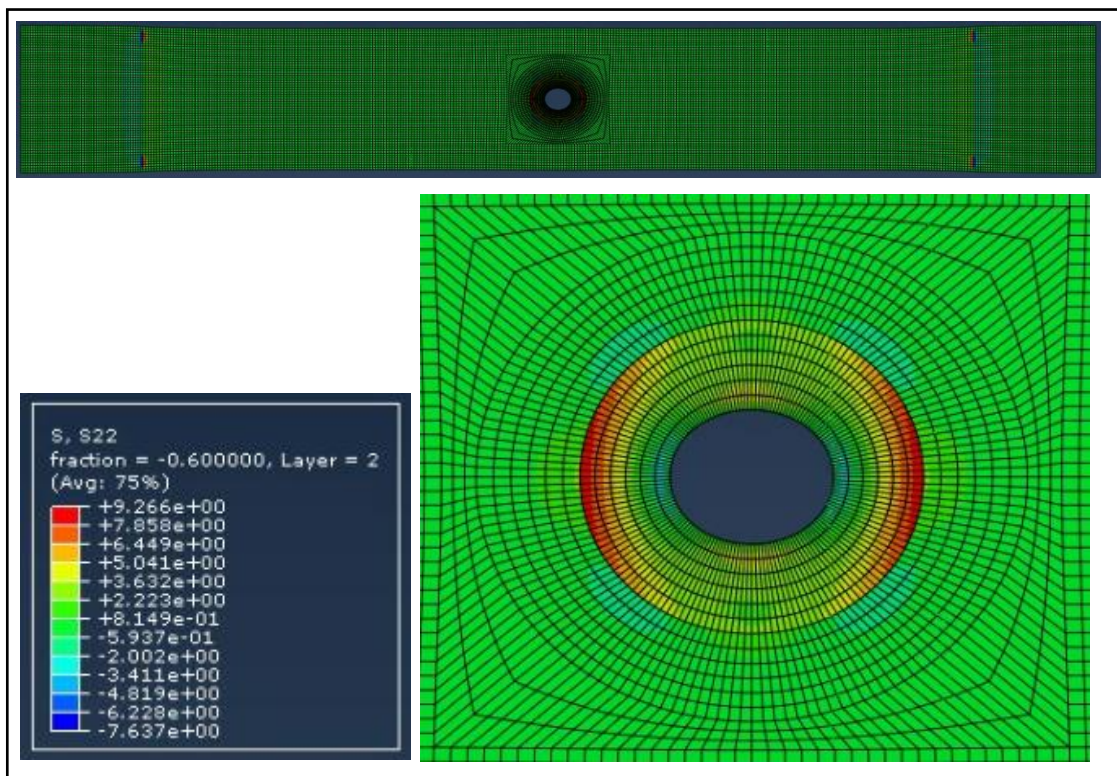


Figura 119. Resultats de la tensió S22 del cas amb 3 concèntricitats + reforç

S12:

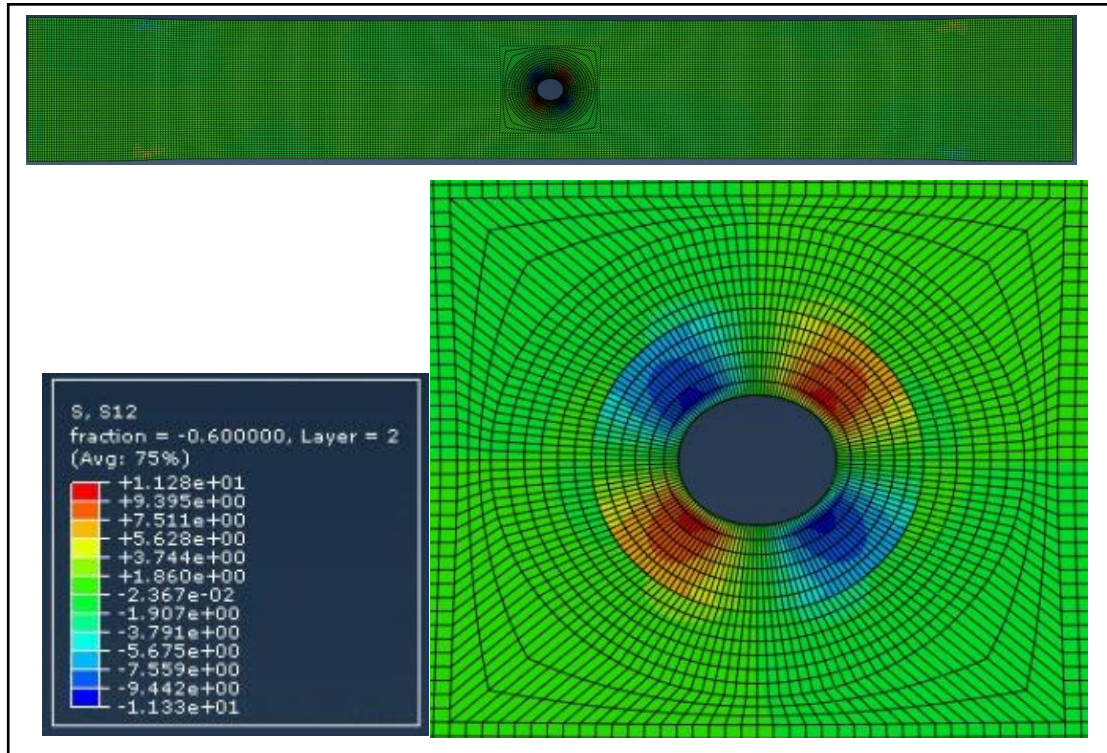


Figura 120. Resultats de la tensió S12 del cas amb 3 concentricitats + reforç

- Concèntric 4 + reforç

S11: La tensió assenyalada és la màxima en la zona del forat.

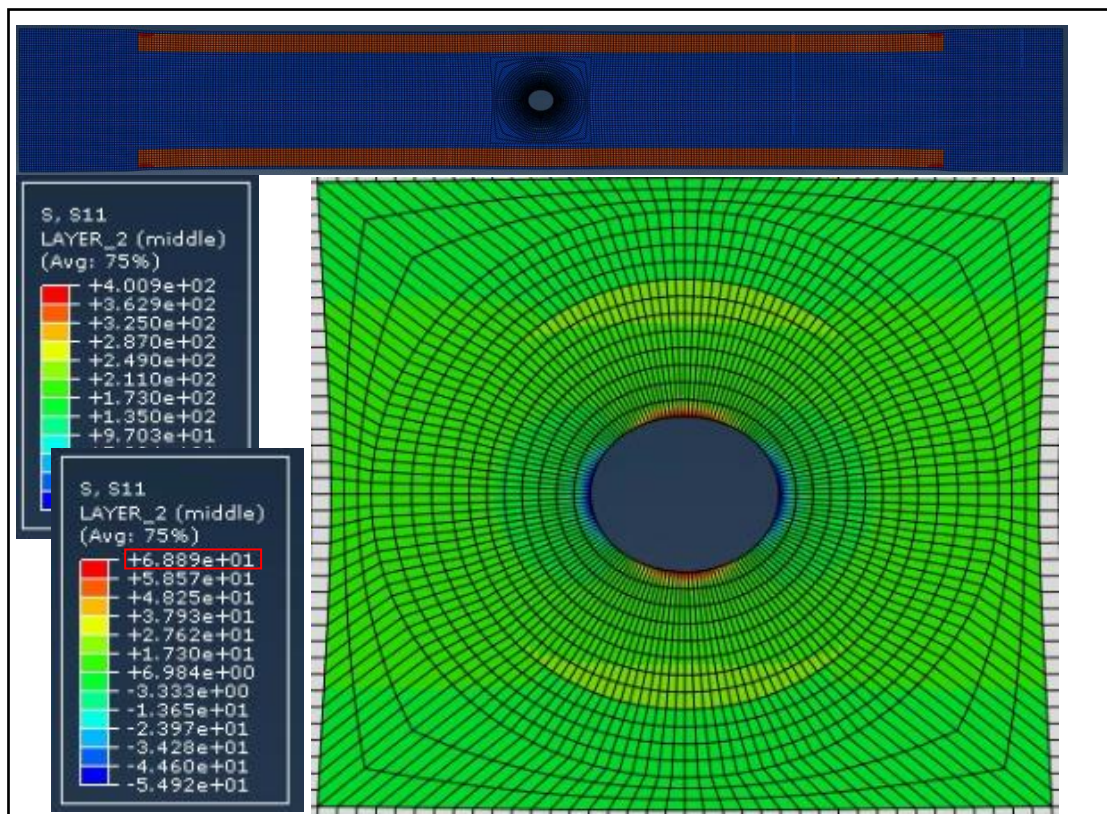


Figura 121. Resultats de la tensió S11 del cas amb 4 concentricitats + reforç

S22:

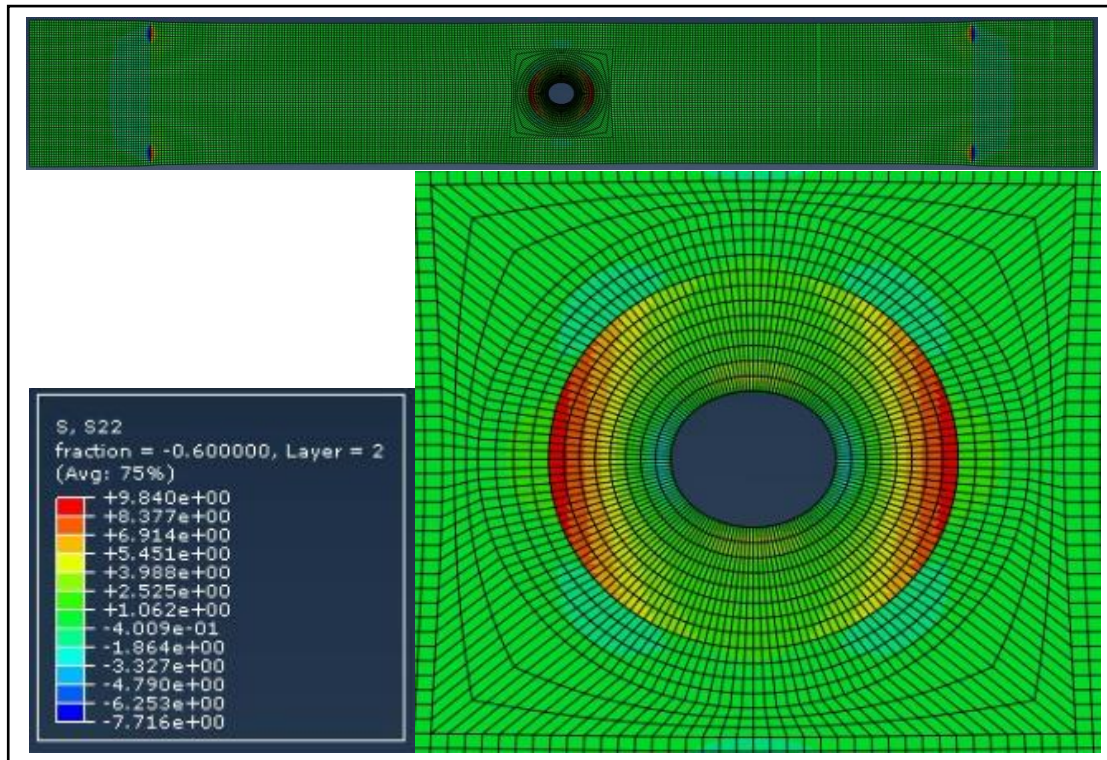


Figura 122. Resultats de la tensió S22 del cas amb 4 concentricitats + reforç

S12:

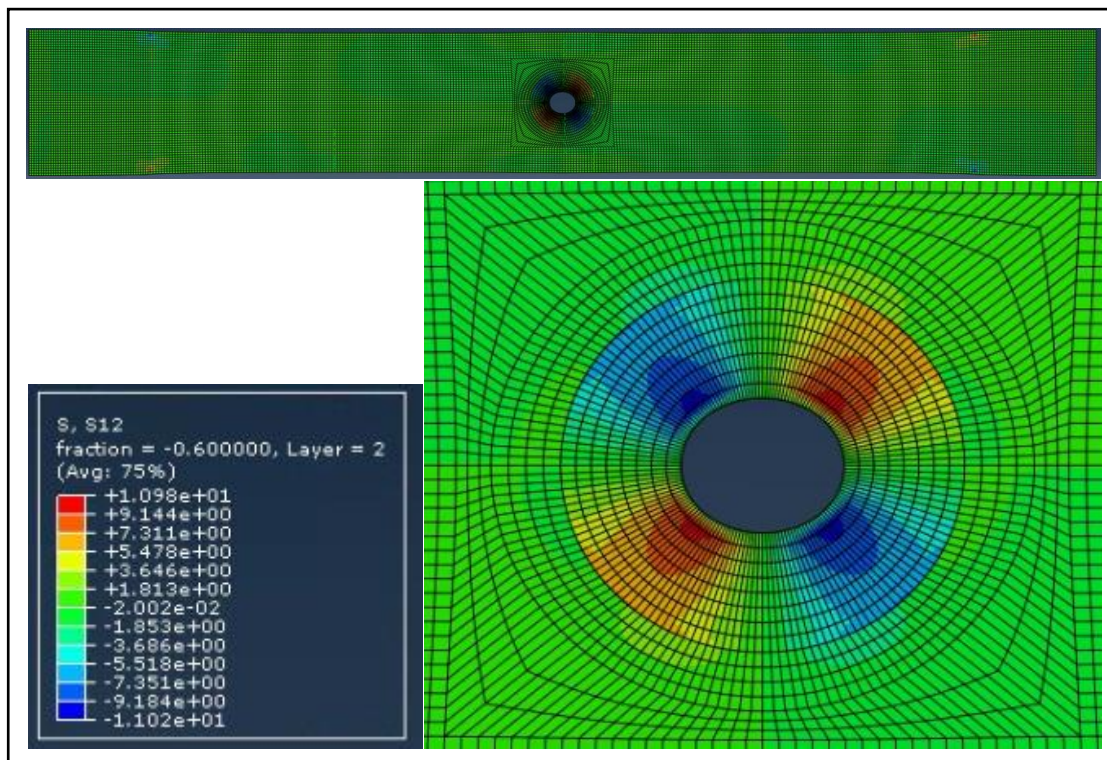


Figura 123. Resultats de la tensió S12 del cas amb 4 concentricitats + reforç

- Concèntric 5 + reforç

S11: La tensió assenyalada és la màxima en la zona del forat.

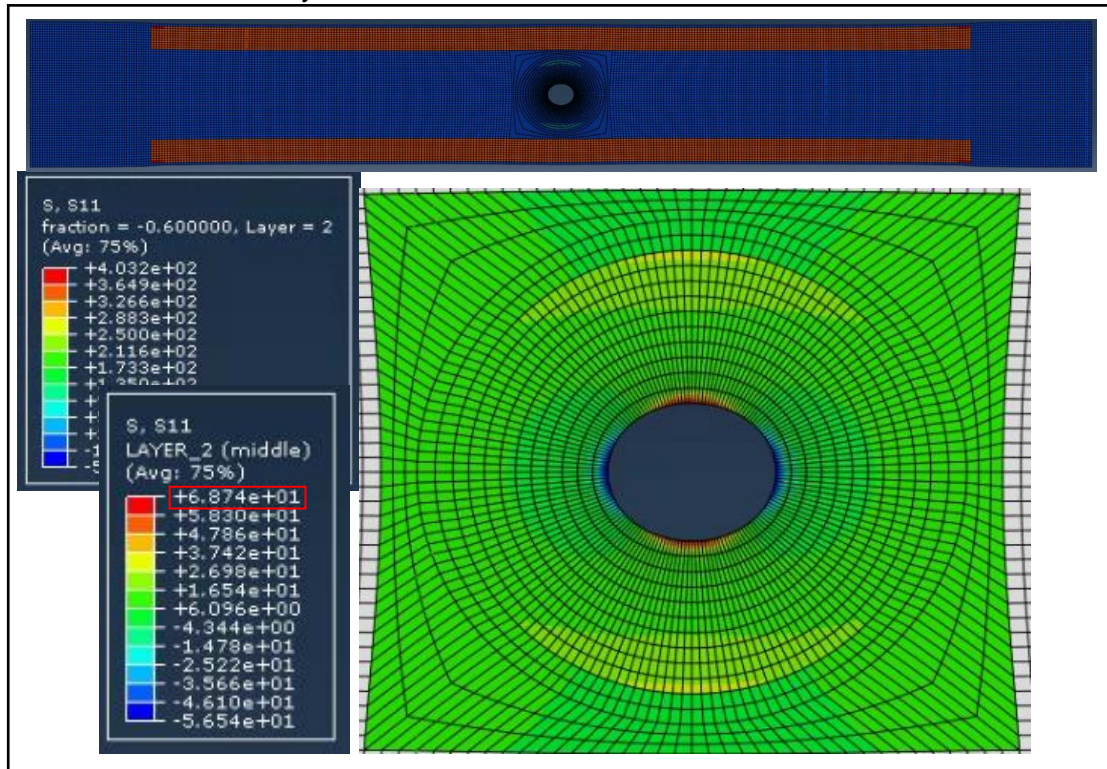


Figura 124. Resultats de la tensió S11 del cas amb 5 concèntricats + reforç

S22:

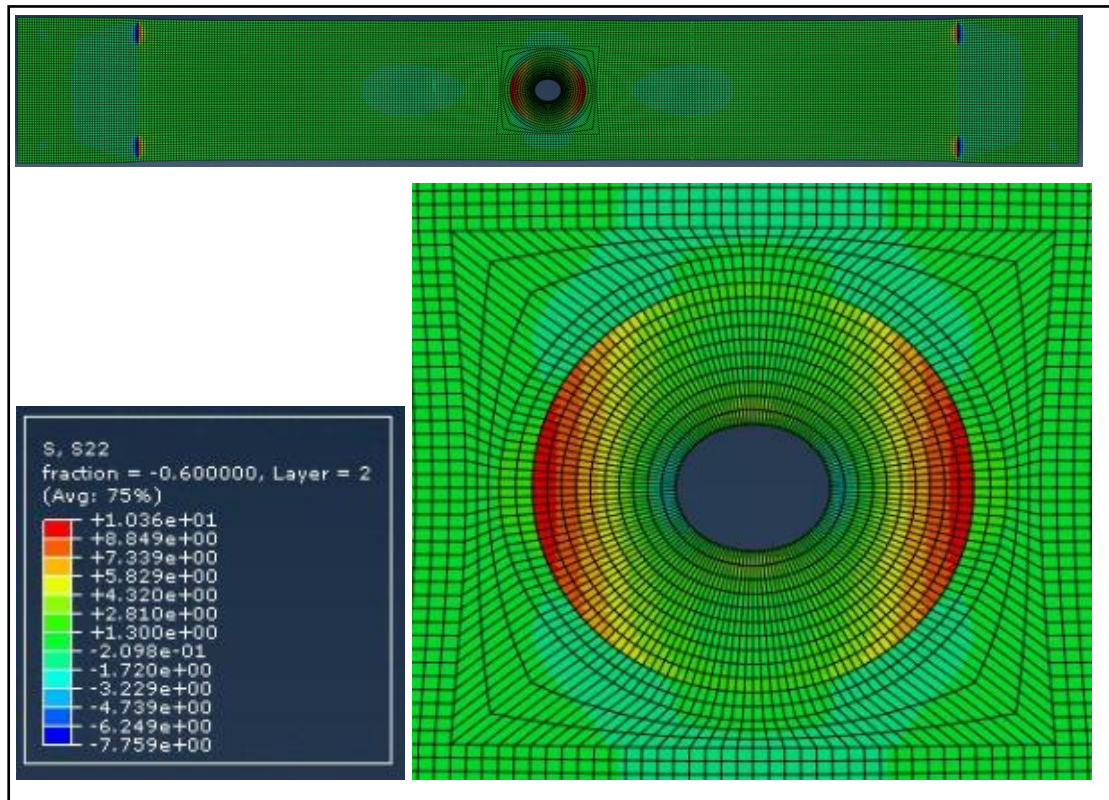


Figura 125. Resultats de la tensió S22 del cas amb 5 concèntricats + reforç

S12:

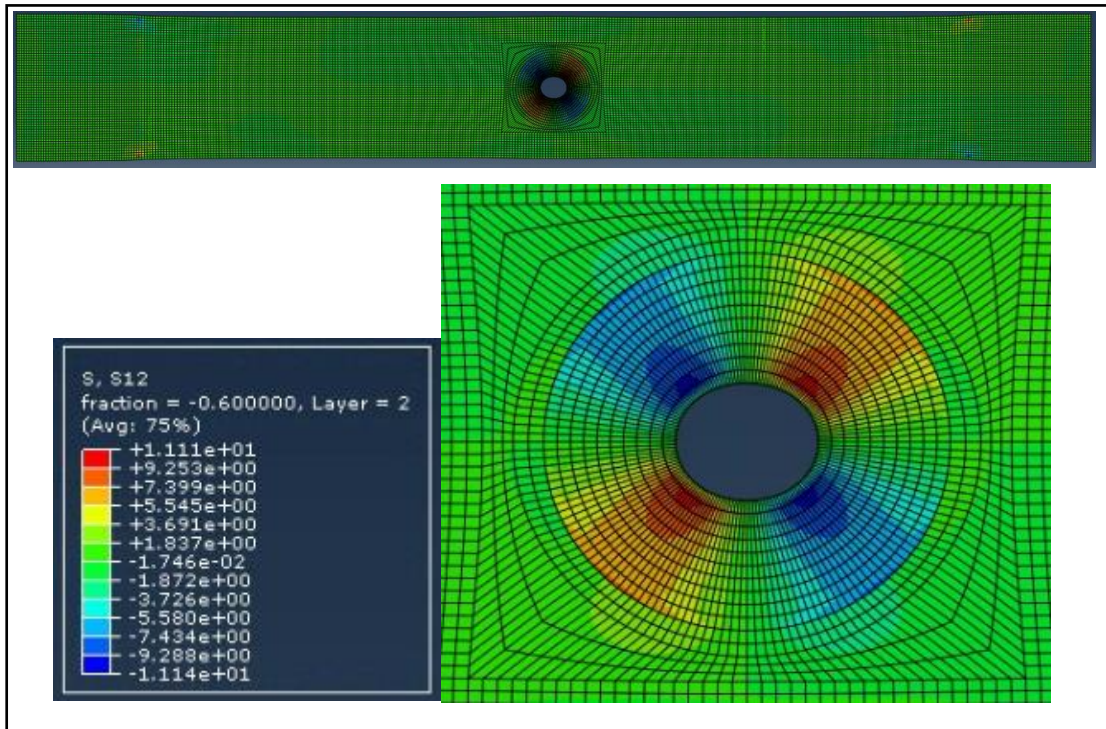


Figura 126. Resultats de la tensió S12 del cas amb 5 concentricitats + reforç

D.3 Cas mixt.

- 1 concentricitat mixt

S11:

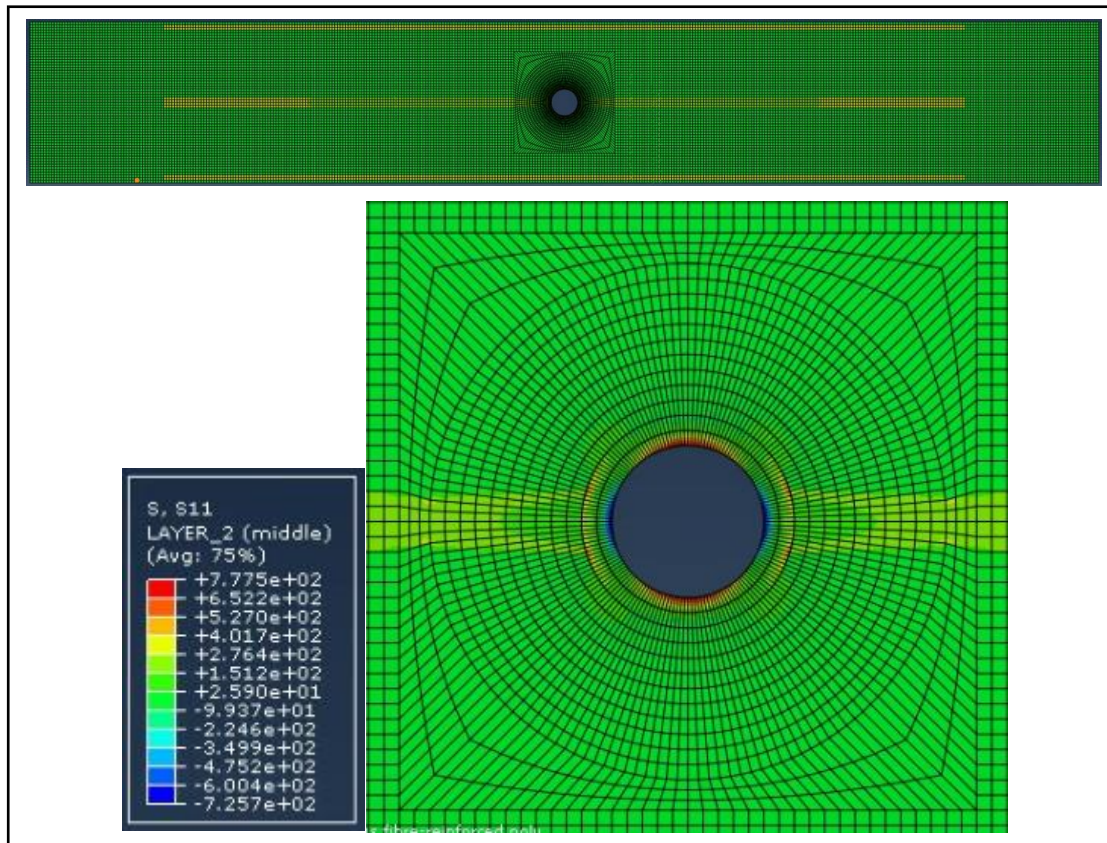


Figura 127. Resultats de la tensió S11 del cas mixt amb 1 concentricitat

S22:

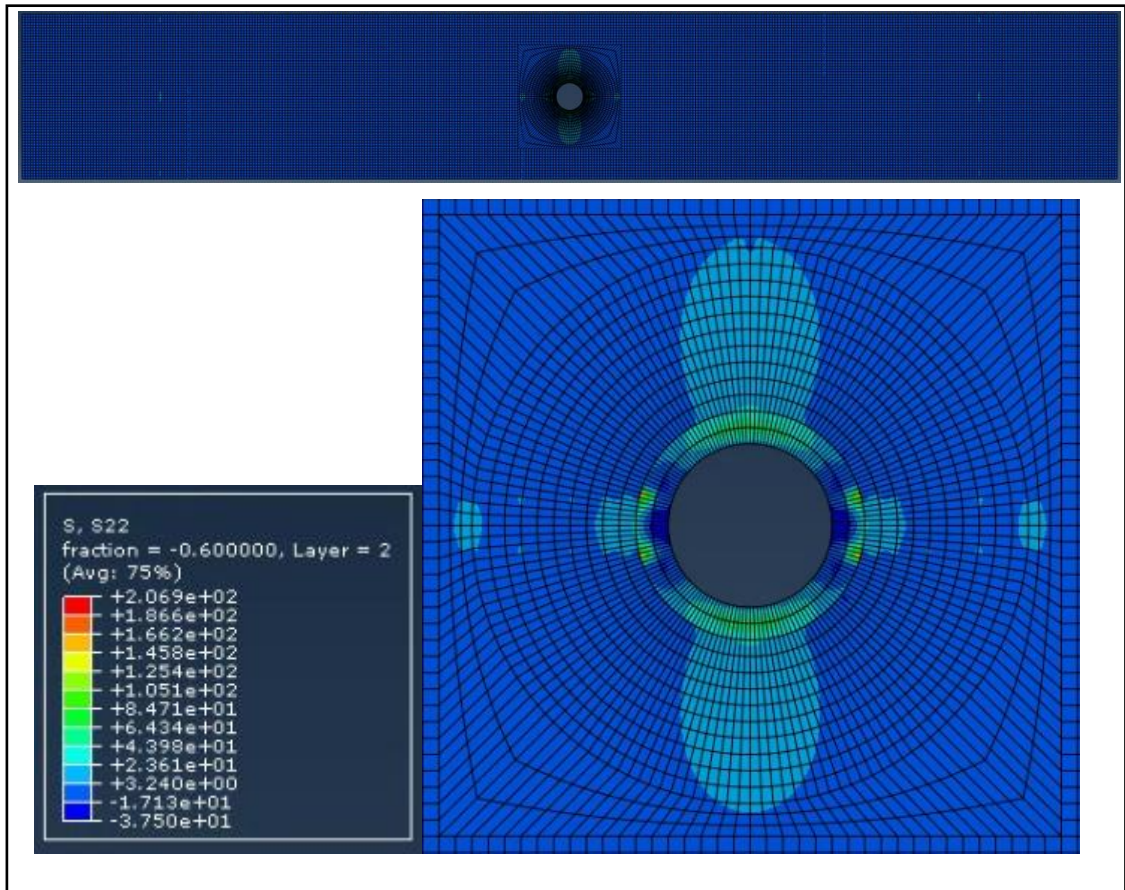


Figura 128. Resultats de la tensió S22 del cas mixt amb 1 concentricitat

S12:

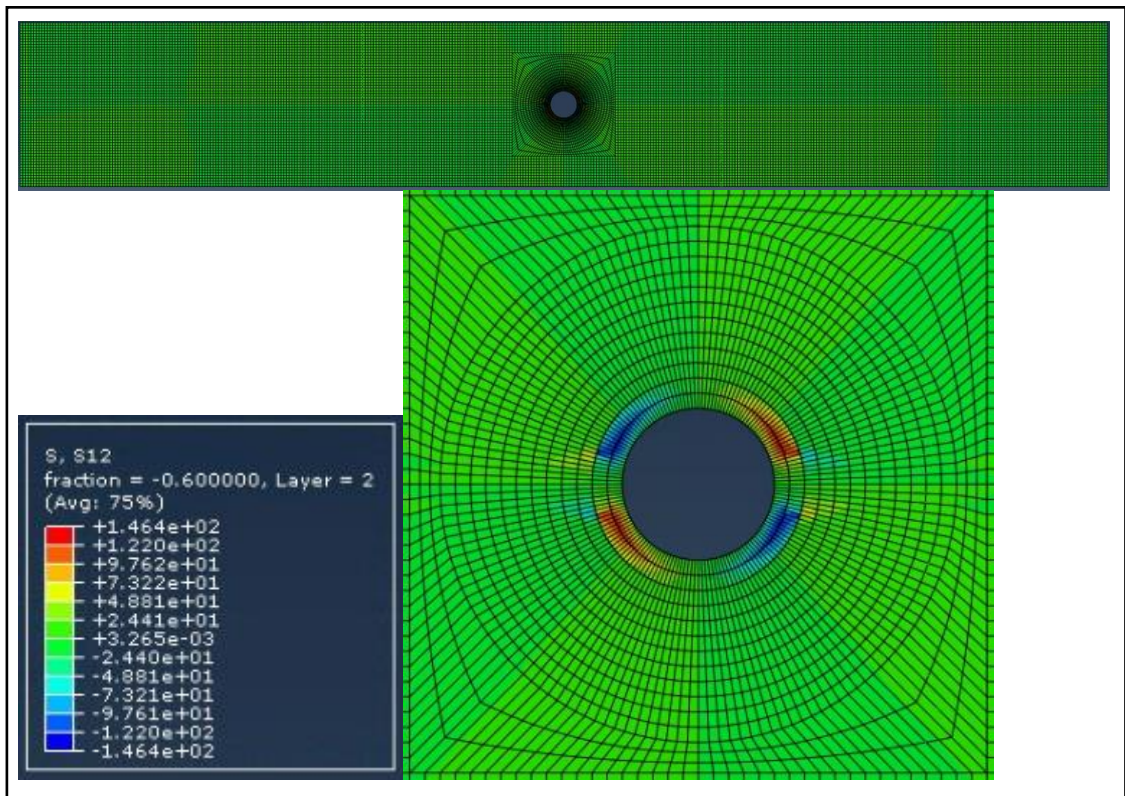


Figura 129. Resultats de la tensió S12 del cas mixt amb 1 concentricitat

- 2 concentricitats mixt

S11:

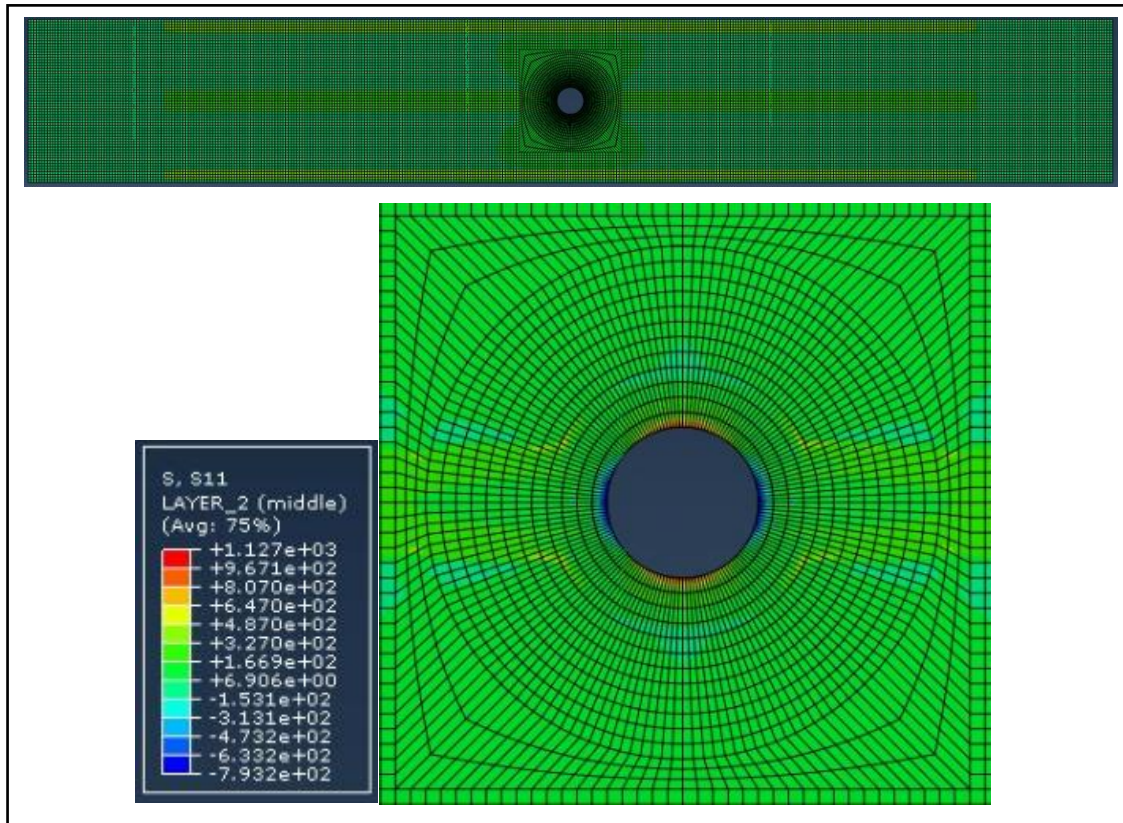


Figura 130. Resultats de la tensió S11 del cas mixt amb 2 concentricitats

S22:

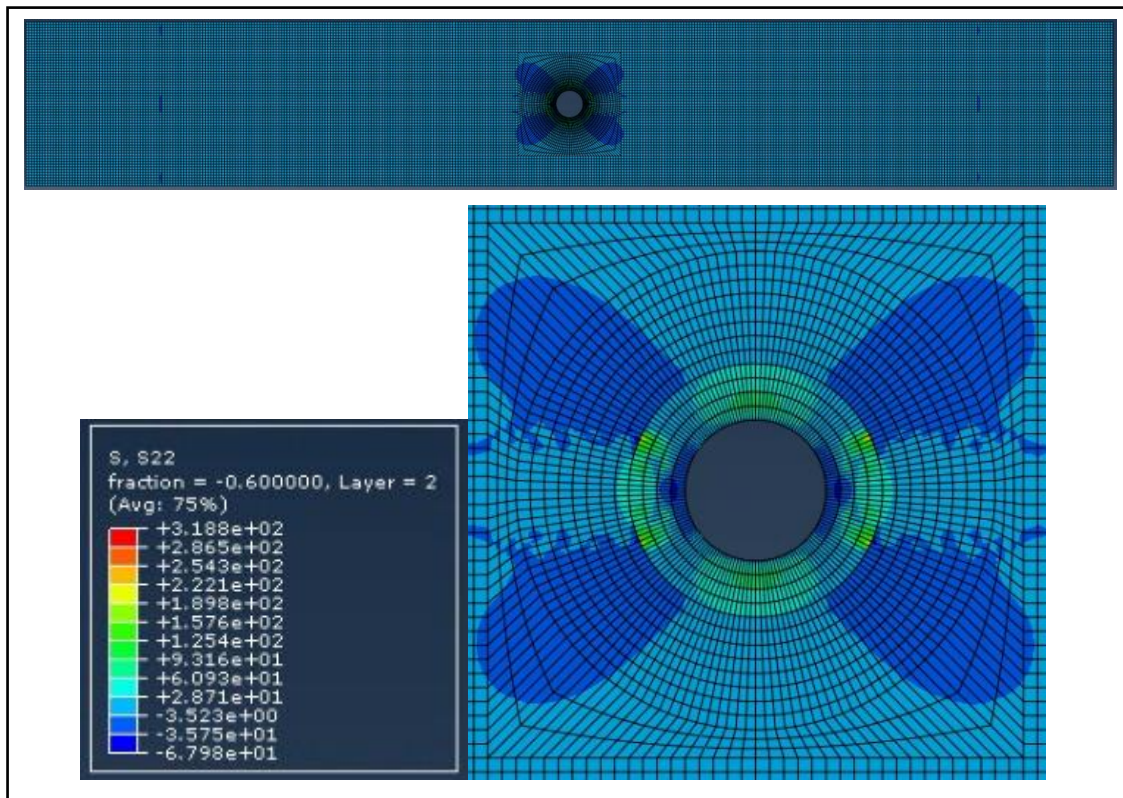


Figura 131. Resultats de la tensió S22 del cas mixt amb 2 concentricitats

S12:

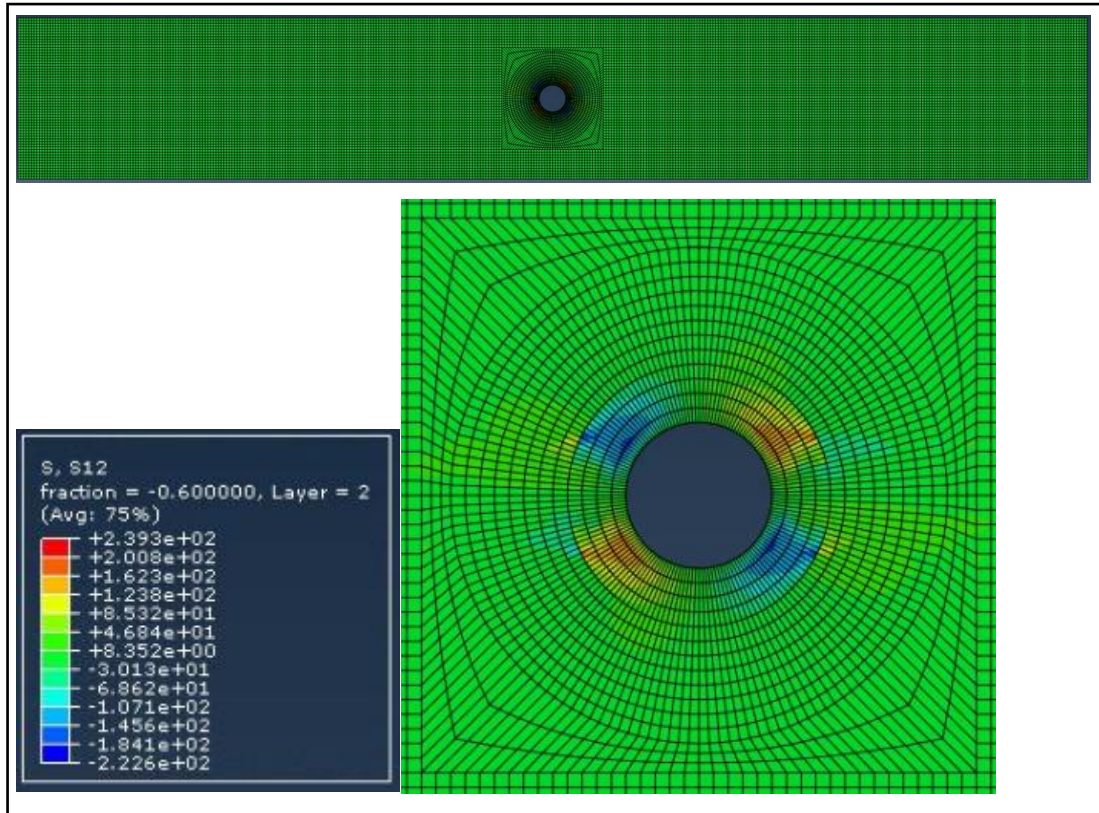


Figura 132. Resultats de la tensió S12 del cas mixt amb 2 concentricitats

- 3 concentricitats mixt

S11:

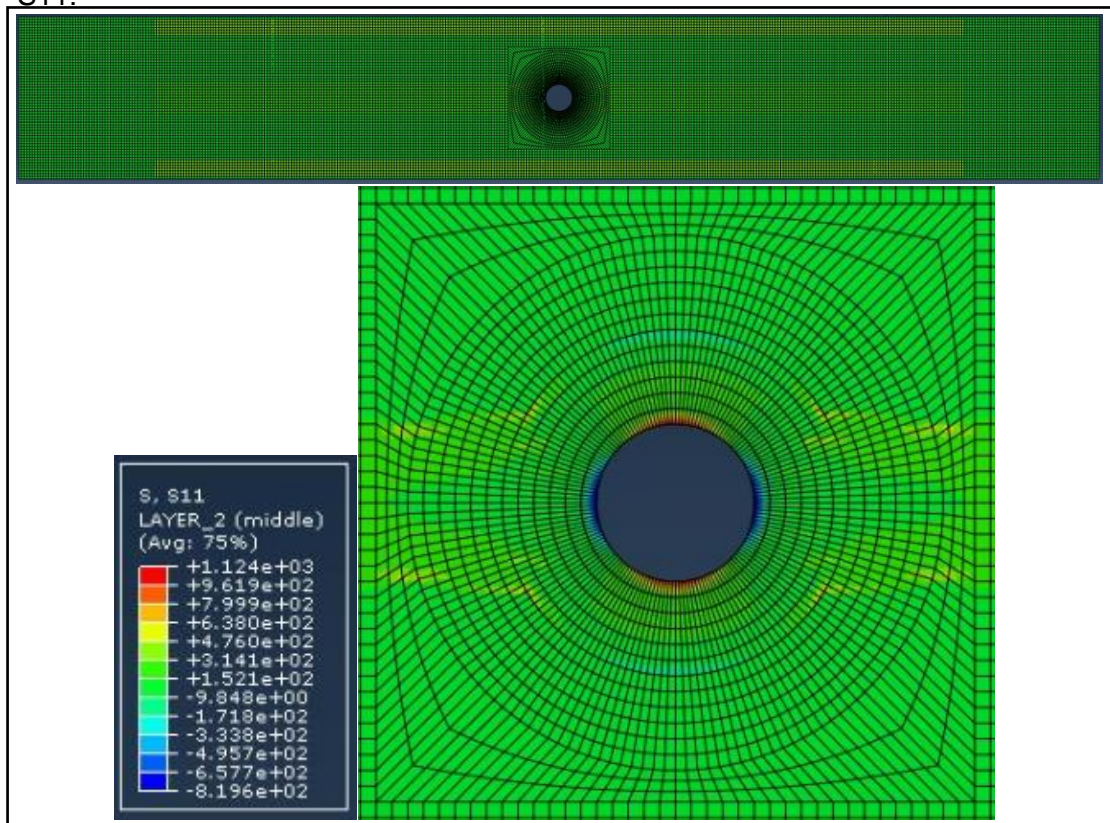


Figura 133. Resultats de la tensió S11 del cas mixt amb 3 concentricitats

S22:

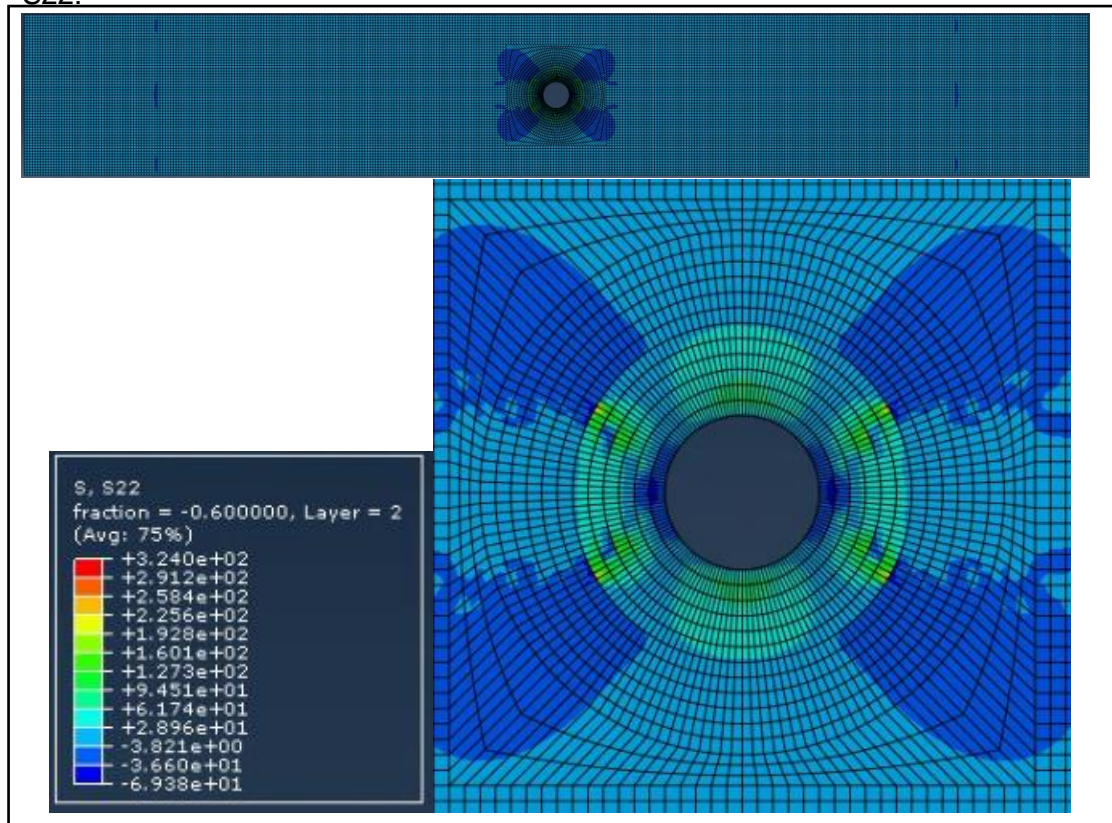


Figura 134. Resultats de la tensió S22 del cas mixt amb 3 concentricitats

S12:

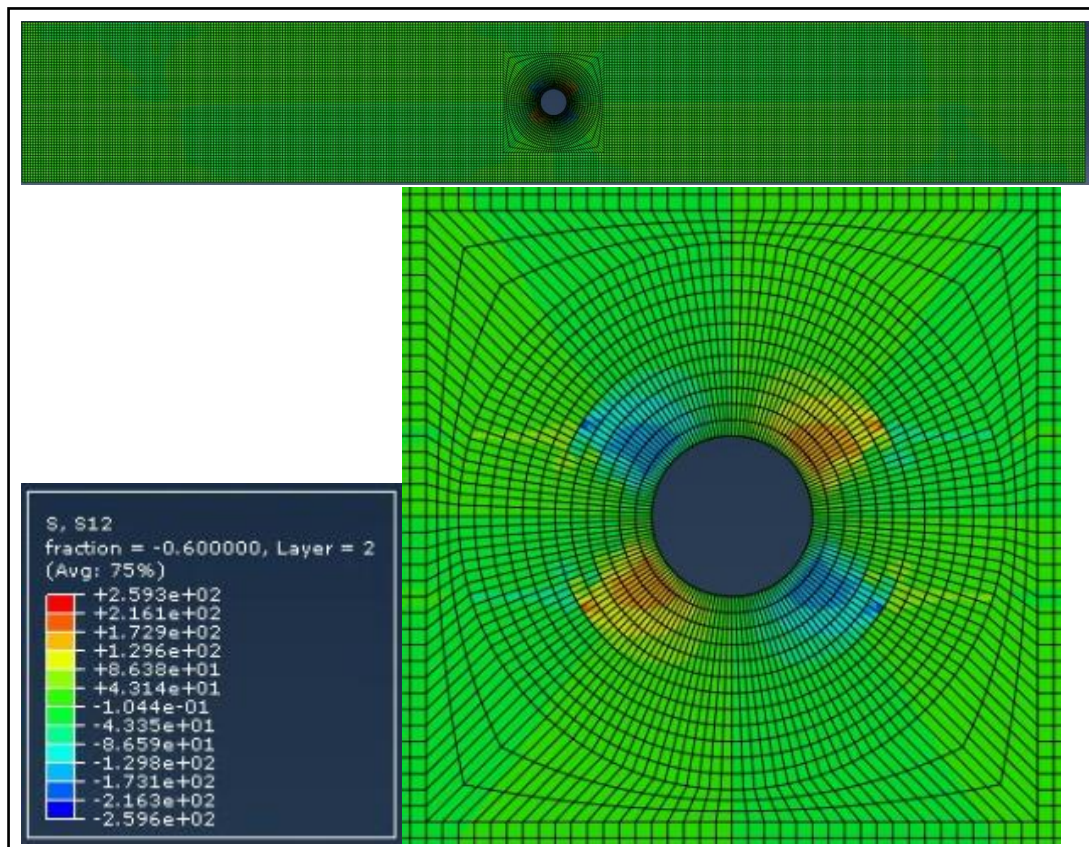


Figura 135. Resultats de la tensió S12 del cas mixt amb 3 concentricitats

- 4 concentricitats mixt

S11:

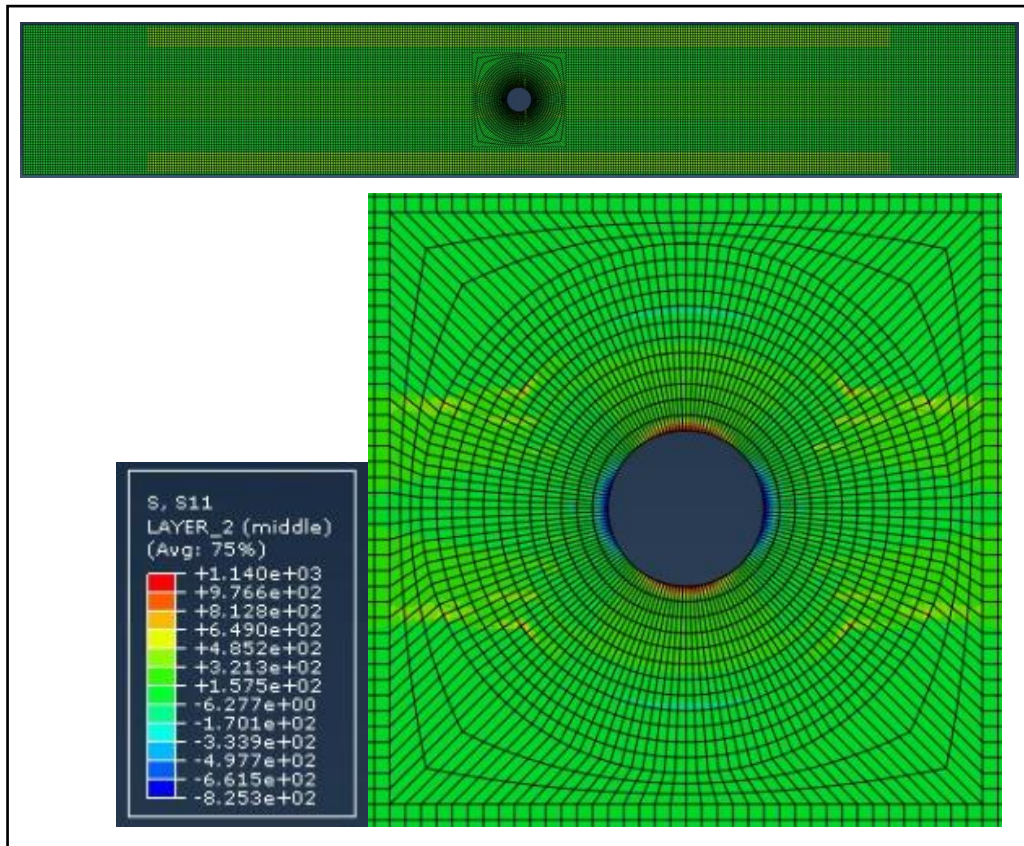


Figura 136. Resultats de la tensió S11 del cas mixt amb 4 concentricitats

S22:

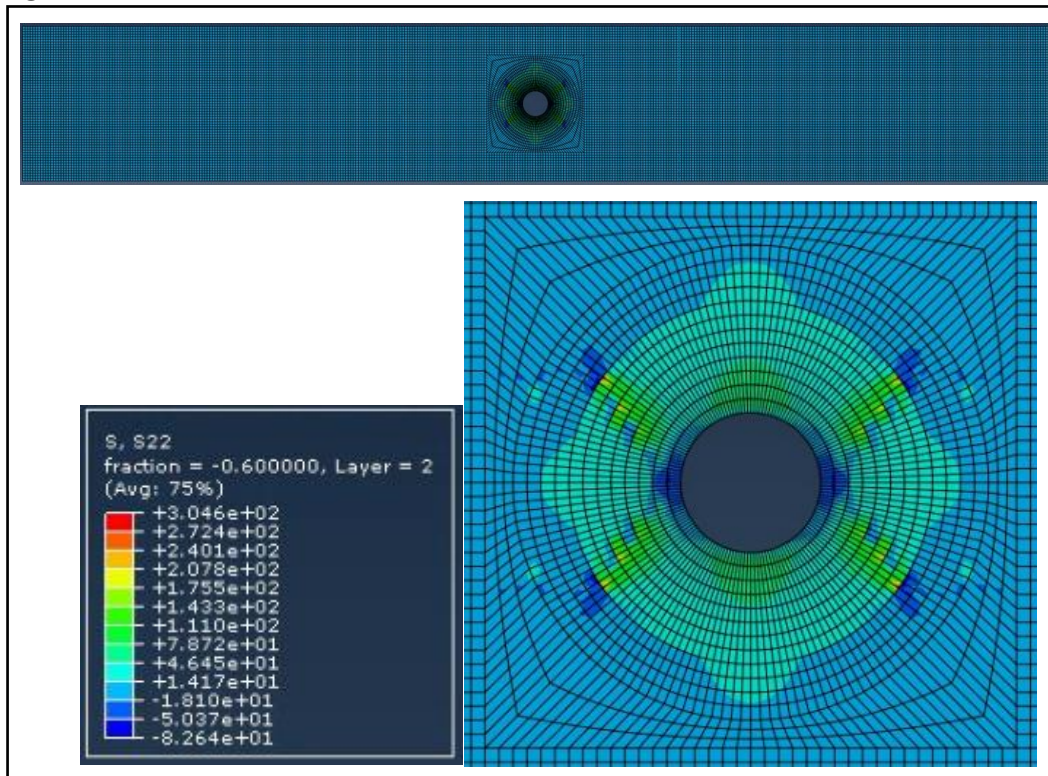


Figura 137. Resultats de la tensió S22 del cas mixt amb 4 concentricitats

S12:

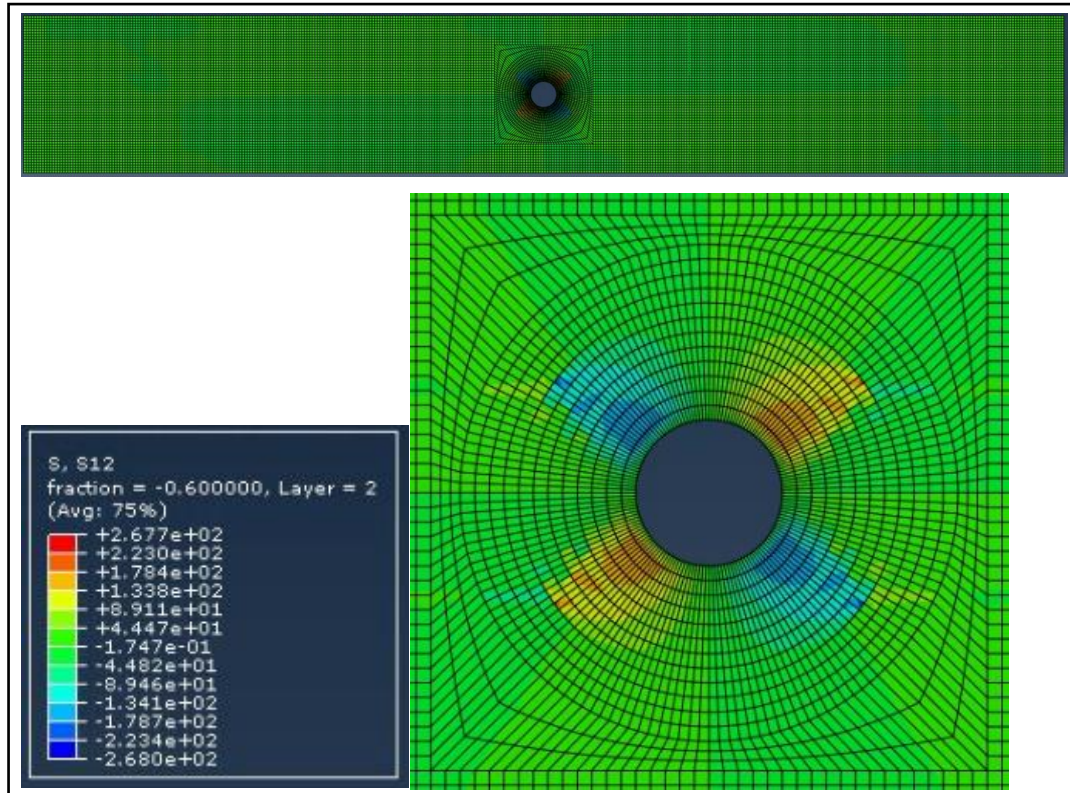


Figura 138. Resultats de la tensió S12 del cas mixt amb 4 concentricitats

- 5 concentricitats mixt

S11:

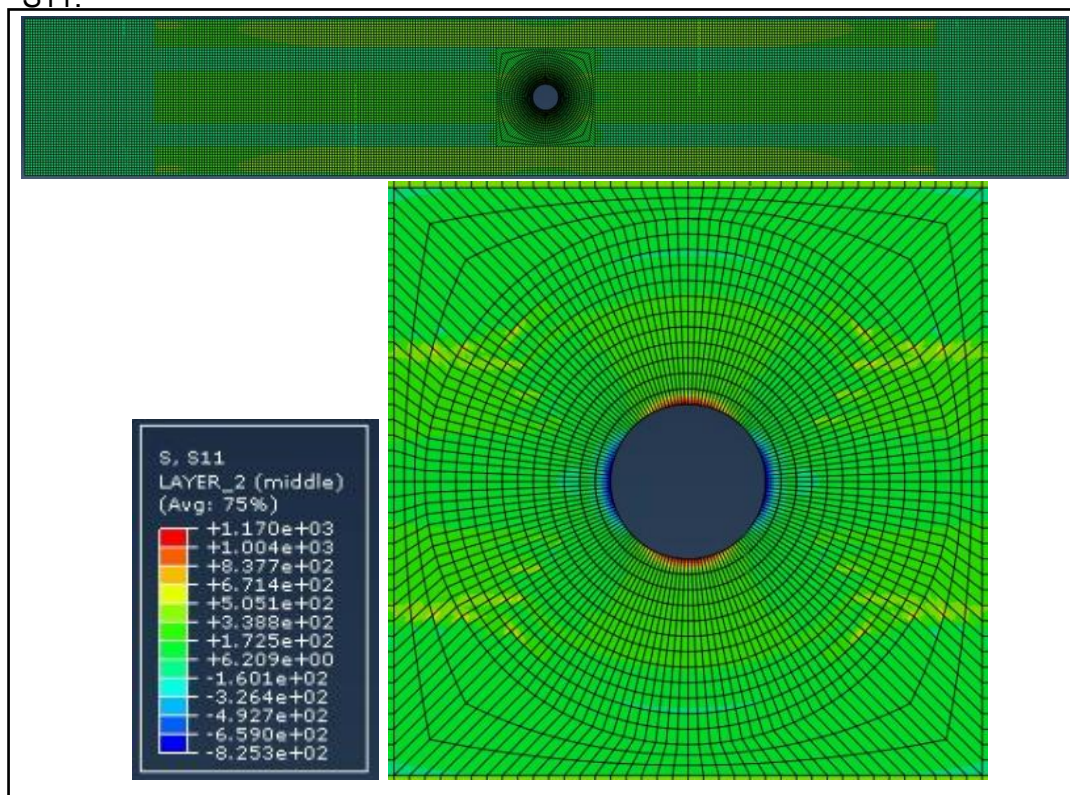


Figura 139. Resultats de la tensió S11 del cas mixt amb 5 concentricitats

S22:

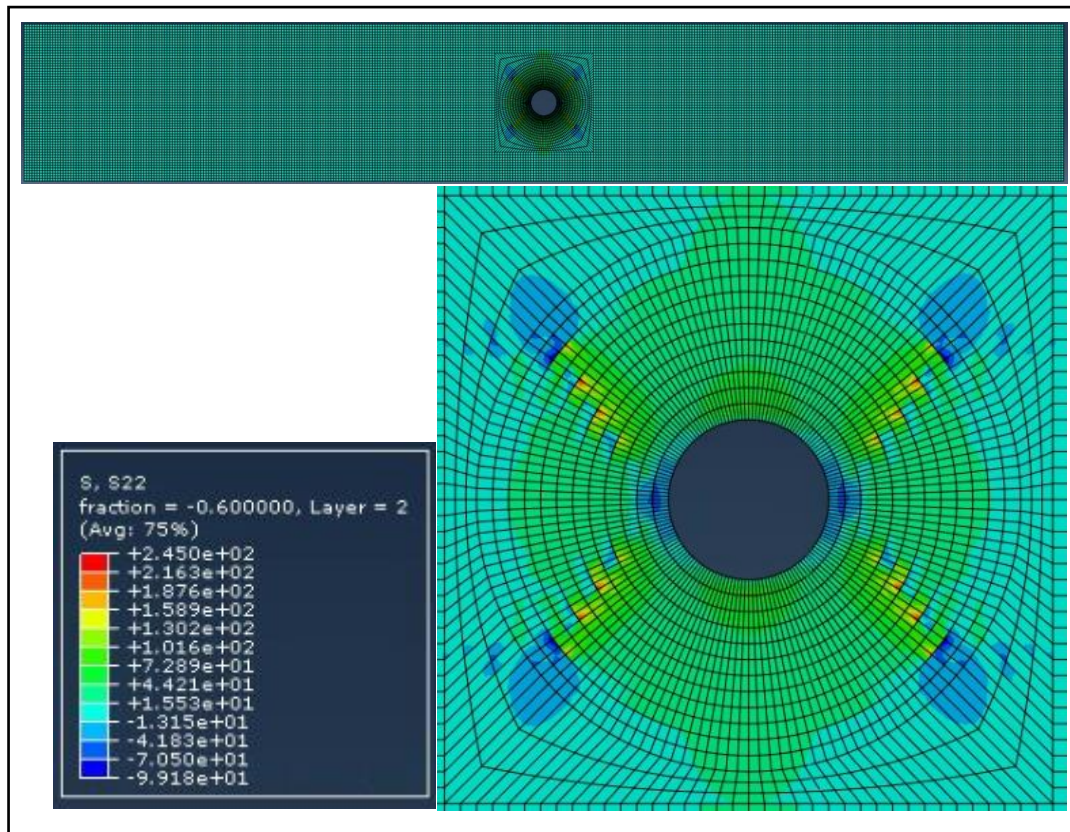


Figura 140. Resultats de la tensió S22 del cas mixt amb 5 concentricitats

S12:

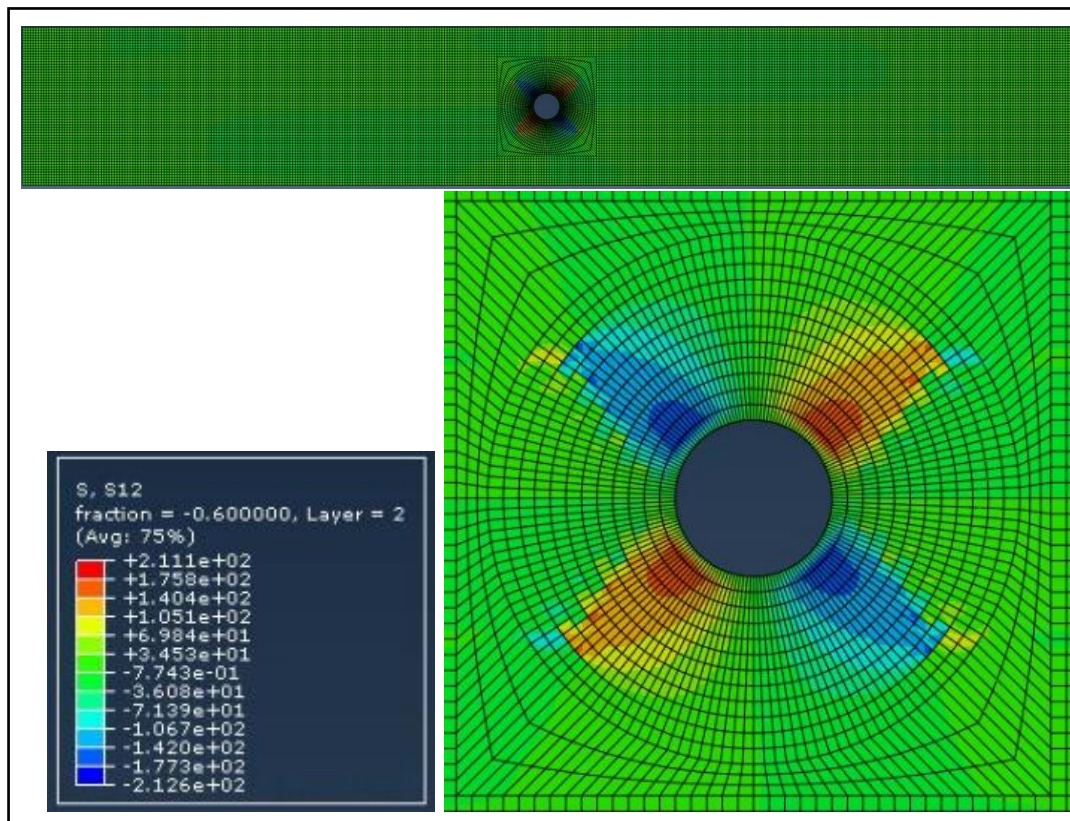


Figura 141. Resultats de la tensió S12 del cas mixt amb 5 concentricitats

- 6 concentricitats mixt

S11:

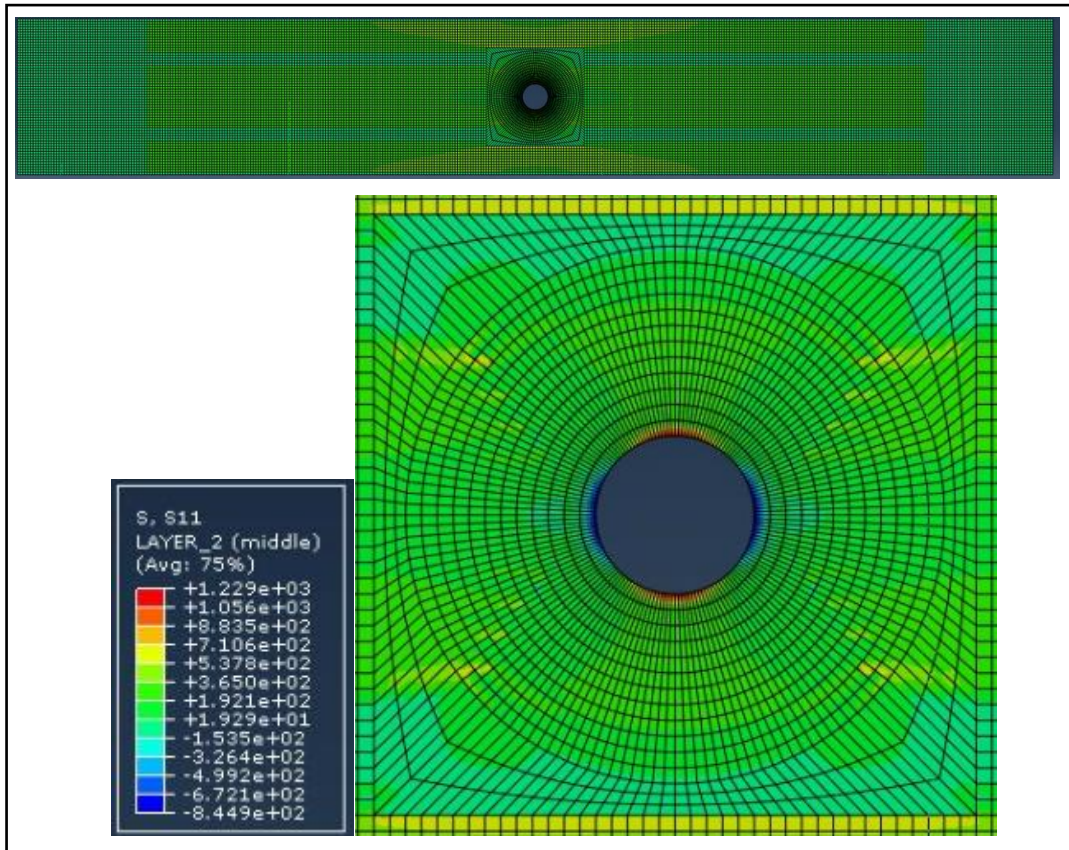


Figura 142. Resultats de la tensió S11 del cas mixt amb 6 concentricitats

S22:

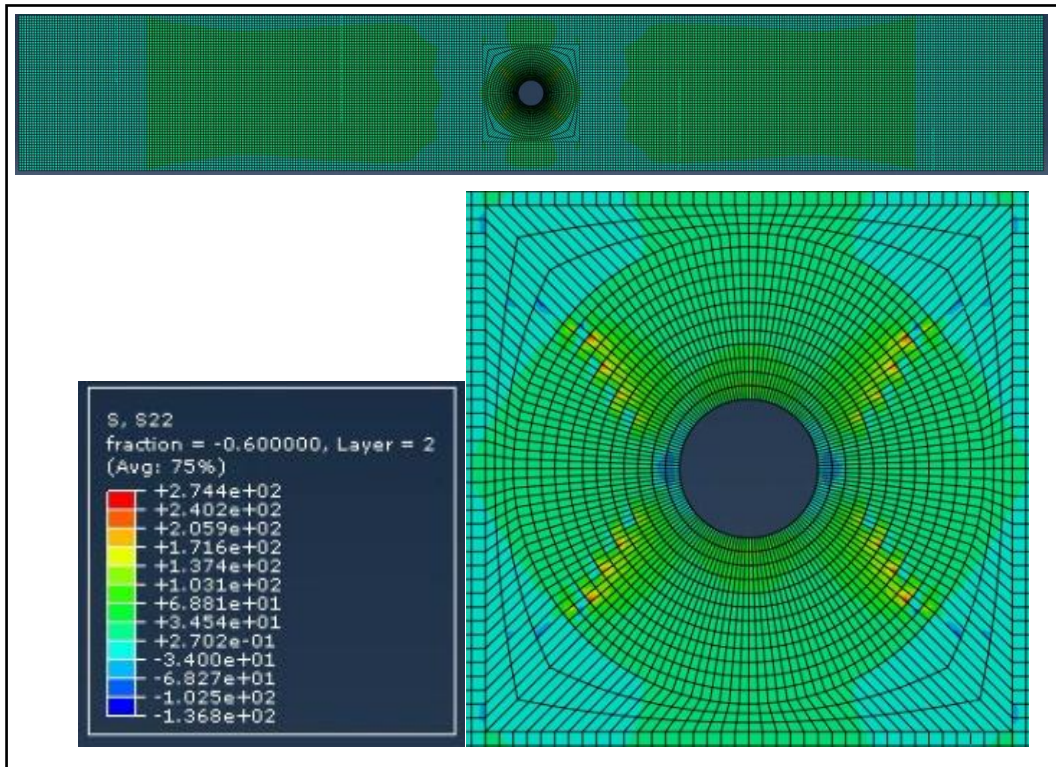


Figura 143. Resultats de la tensió S22 del cas mixt amb 6 concentricitats

S12:

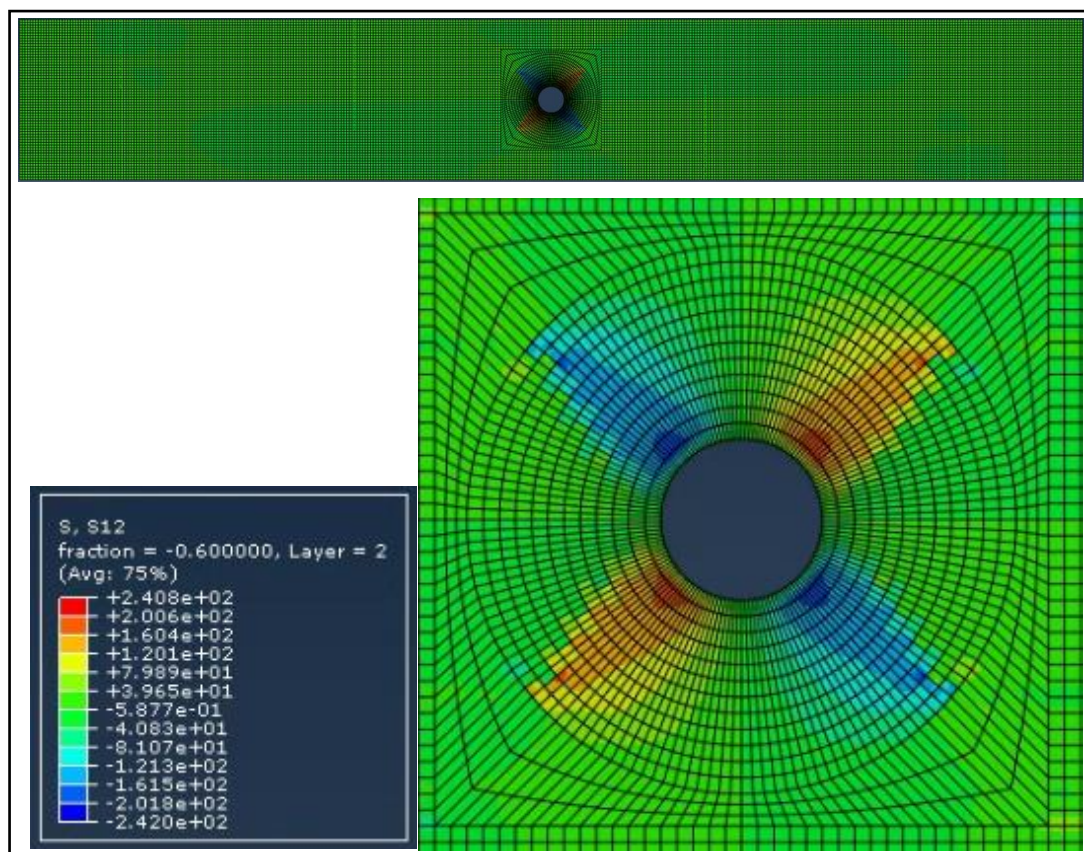


Figura 144. Resultats de la tensió S12 del cas mixt amb 6 concentricitats