

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Anàlisi de resultats d'una campanya experimental d'assaigs realitzada sobre provetes fabricades per impressió 3D-DLP

MEMÒRIA

Autor: Guillem Coronado Martínez
Director: Miquel Casafont Ribera
Convocatòria: Febrer 2019



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

EL DLP o Digital Light Processing és una de les noves tecnologies d'impressió 3D sobre la que encara no es té molta informació. El poc que és sap és que les peces obtingudes amb el DLP són anisotròpiques i les propietats mecàniques depenen del material utilitzat.

Degut a la poca informació sobre les propietats de les peces fetes amb DLP s'ha fet un estudi de provetes fabricades amb la resina acrílica fotosensible Resina HT de Spot-A Materials, en sis direccions diferents X, XY, XZ, Y, YZ i Z.

Aquestes provetes han estat assajades a compressió i s'han mesurat les deformacions mitjançant galgues extensiomètriques, DIC o Digital Image Correlation, i un extensòmetre mecànic, aquest últim només en les provetes XZ, YZ i Z.

S'han comparat les tres tècniques de mesura, per veure quines d'elles eren més fiables per trobar les propietats mecàniques. Aquesta comparativa s'ha fet amb el mòdul de Young, ja que aquest aportava prou informació, i s'ha observat que els mòduls trobats amb el DIC i l'extensòmetre eren bastant semblants, però el de les galgues era sempre superior. Que el mòdul de Young de galgues sigui sempre superior és degut a una singularitat pròpia de les galgues, que provocava un efecte de rigidesa a la zona on es troben enganxades. De totes maneres, la part inicial de les corbes tensió-deformació trobades amb el DIC eren molt curtes, per lo que aquest mètode no és vàlid per trobar mòduls de Young.

Després de trobar els diferents mòduls de Young, es van trobar els coeficients de Poisson de les provetes. Aquests es van calcular en dues direccions diferents en les galgues i amb només una en el DIC. Aquest coeficient van donar poc per sobre de 0,5.

Després de trobar el coeficients de Poisson i mòduls de Young es va veure que el material amb els que estaven fetes les provetes era anisòtrop, doncs les diferències que hi havia entre les direccions principals (X, Y, Z) eren majors del 5%.

Per últim, es va trobar un coeficient corrector per tal de d'eliminar el efecte de rigidesa de les galgues sobre el mòdul de Young. Aquest coeficient va fer reduir els mòdul de Young trobats per les galgues, però no va canviar gaire bé res les variacions entre les direccions principals.

Sumari

| | |
|--|------------|
| RESUM | III |
| LLISTAT DE FIGURES | VII |
| LLISTA DE TAULES | X |
| GLOSSARI | XI |
| 1. INTRODUCCIÓ | 1 |
| 1.1. Objectius del projecte | 1 |
| 1.2. Abast del projecte | 2 |
| 2. FABRICACIÓ ADDITIVA I LA IMPRESSIÓ 3D | 3 |
| 2.1. Fabricació Additiva | 3 |
| 2.2. Impressió 3D | 3 |
| 2.2.1. FDM o impressió per extrusió | 4 |
| 2.2.2. SLA i DLP | 4 |
| 2.2.2.1. SLA | 5 |
| 2.2.2.2. DLP | 6 |
| 2.2.2.3. Diferències entre DLP i SLA | 8 |
| 2.2.3. Propietats mecàniques de les peces fabricades amb DLP | 11 |
| 3. EXPERIMENTS REALITZATS SOBRE LES PROVETES | 13 |
| 3.1. Assajos | 13 |
| 3.2. Provetes | 15 |
| 3.3. Experiments sobre les provetes | 16 |
| 4. TÈCNiques EXPERIMENTALS | 19 |
| 4.1. Extensiómetria elèctrica | 19 |
| 4.1.1. Preparació de les galgues | 19 |
| 4.1.2. Càlcul de les deformacions | 20 |
| 4.2. Digital Image Correlation (DIC) | 20 |
| 4.2.1. Preparació de les provetes | 20 |
| 4.2.2. Càlcul de les deformacions | 21 |
| 4.3. Extensòmetre mecànic | 22 |
| 5. EFICIÈNCIA I PRECISIÓ DE LES TÈCNiques DE MESURA | 23 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 5.1. | Estudi de precisió sobre el Mòdul de Young..... | 23 |
| 5.1.1. | Estudi en provetes Z..... | 23 |
| 5.1.2. | Estudi de les provetes XZ i YZ..... | 26 |
| 5.1.3. | Estudi de la resta de provetes..... | 28 |
| 5.2. | Singularitat de les galgues..... | 31 |
| 5.2.1. | Anàlisi amb DIC..... | 31 |
| 5.3. | Errors de mesura..... | 36 |
| 5.3.1. | Galgues i extensòmetre..... | 36 |
| 5.3.2. | DIC..... | 37 |
| 6. | PROPIETATS MECÀNIQUES DEL MATERIAL | 41 |
| 6.1. | Mòdul de Young..... | 41 |
| 6.1.1. | Resultats sense filtrar..... | 42 |
| 6.1.2. | Resultats filtrats..... | 44 |
| 6.1.3. | Anisotropia del material..... | 47 |
| 6.2. | Coefficient de Poisson..... | 48 |
| 6.2.1. | Resultats inicials..... | 50 |
| 6.2.2. | Resultats filtrats..... | 52 |
| 6.3. | Coefficient Corrector..... | 53 |
| | CONCLUSIONS | 57 |
| | Futures línies de recerca..... | 58 |
| | AGRAÏMENTS | 59 |
| | BIBLIOGRAFIA | 61 |
| | Referències bibliogràfiques..... | 61 |
| | Bibliografia complementària..... | 62 |
| | ANNEXOS | I |
| | Annex A. Gràfics tensió-deformació de les provetes X, Y i XY..... | I |
| | Annex B. Imatges de la singularitat de les galgues..... | V |

Llistat de Figures

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 Exemple d'impressora 3D de FDM. BCN 3D Sigma | 4 |
| Figura 2.2 Maqueta del procés d'impressió amb SLA | 5 |
| Figura 2.3 Exemple d'una peça curada i d'una de curada..... | 6 |
| Figura 2.4 Maqueta del procés d'impressió amb DLP | 7 |
| Figura 2.5 Exemple d'un post procesta d'eliminació de suports | 7 |
| Figura 2.6 Comparativa entre el resultat de fer una corba amb SLA i DLP..... | 9 |
| Figura 2.7 Diferència de resolució entre imprimir una mateixa peça en SLA i DLP..... | 9 |
| Figura 2.8 Efecte dels vòxels sobre la resolució de la impressió..... | 10 |
| Figura 2.9 Efecte vòxel vist lateralment..... | 10 |
| Figura 3.1 Geometria definida per la norma ASTM D638-14 per provetes a tracció | 13 |
| Figura 3.2 Proveta exemple creada a partir de la norma ASTM D790-15 per provetes a flexió | 14 |
| Figura 3.3 Provetes exemple de l'assaig a compressió segon la norma ASTM D695-15 | 15 |
| Figura 3.4 Distribució de les provetes segons la direcció de fabricació..... | 15 |
| Figura 3.5 Distribució de les galgues en les provetes | 16 |
| Figura 4.1 Exemple de la col·locació de les galgues a les provetes..... | 19 |
| Figura 4.2 Col·locació de les galgues a la proveta | 20 |
| Figura 4.3 Col·locació de la càmera per prendre les imatges pel DIC..... | 21 |
| Figura 5.1 Corba tensi-deformació completa de la proveta 1Z9 | 24 |
| Figura 5.2 Corba tensió-deformació proveta 1Z1 | 24 |
| Figura 5.3 Corba tensió-deformació proveta 1Z2 | 24 |
| Figura 5.4 Corba tensió-deformació proveta 1Z3 | 25 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.5 Corba tensió-deformació proveta 1Z4 | 25 |
| Figura 5.6 Corba tensió-deformació proveta 1Z5 | 25 |
| Figura 5.7 Corba tensió-deformació proveta 1Z6 | 25 |
| Figura 5.8 Corba tensió-deformació proveta 1Z7 | 25 |
| Figura 5.9 Corba tensió-deformació proveta 1Z8 | 25 |
| Figura 5.10 Corba tensió-deformació proveta 1Z9 | 25 |
| Figura 5.11 Corba tensió-deformació proveta 1XZ1 | 26 |
| Figura 5.12 Corba tensió-deformació proveta 1XZ2 | 26 |
| Figura 5.13 Corba tensió-deformació proveta 1XZ3 | 27 |
| Figura 5.14 Corba tensió-deformació proveta 1XZ4 | 27 |
| Figura 5.15 Corba tensió-deformació proveta 1YZ2 | 27 |
| Figura 5.16 Corba tensió-deformació proveta 1YZ1 | 27 |
| Figura 5.17 Corba tensió-deformació proveta 1YZ3 | 27 |
| Figura 5.18 Corba tensió-deformació proveta 1YZ4 | 27 |
| Figura 5.19 Corba tensió-deformació proveta 1YZ5 | 27 |
| Figura 5.20 Corba tensió-deformació proveta 1YZ6 | 27 |
| Figura 5.21 Estudi DIC de la proveta 1Z9 a 3 MPa | 32 |
| Figura 5.22 Estudi DIC de la proveta 1Z9 a 9 MPa | 33 |
| Figura 5.23 Estudi DIC de la proveta 1Z9 a 6 MPa | 33 |
| Figura 5.24 Estudi DIC de la proveta 1Y5 | 35 |
| Figura 5.25 Estudi DIC de la proveta 1X8 | 35 |
| Figura 5.26 Estudi DIC de la proveta 1XZ1 | 37 |
| Figura 5.27 Corba tensió-deformació proveta 1YZ3 | 38 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.28 Estudi DIC de la proveta 1XZ3 | 39 |
| Figura 5.29 Estudi DIC de la proveta 1Z5 | 39 |

Llista de Taules

| | |
|---|----|
| Taula 5.1 Resultats del mòdul de Young | 29 |
| Taula 6.1 Resultats del mòdul de Young sense filtrar | 42 |
| Taula 6.2 Resum resultats del mòdul de Young sense filtrar | 44 |
| Taula 6.3 Resultats del mòdul de Young filtrats | 45 |
| Taula 6.4 Resum resultats del mòdul de Young filtrats..... | 47 |
| Taula 6.5 Variacions dels mòduls de Young de les direccions principals..... | 48 |
| Taula 6.6 Resultats dels coeficients de Poisson inicials | 50 |
| Taula 6.7 Resum resultats dels coeficients de Poisson inicials | 52 |
| Taula 6.8 Resum resultats dels coeficients de Poisson filtrats | 52 |
| Taula 6.9 Variacions dels coeficients de Poisson de les direccions principals | 53 |
| Taula 6.10 Resultats coeficients correctors de les direccions principals | 54 |
| Taula 6.11 Resultats del mòdul de Young corregits per a les galgues | 55 |
| Taula 6.12 Nova variació de l mòdul de Young de les direccions principals..... | 55 |

Glossari

AM Additive Manufacturing o Fabricació Additiva

CAD Computer Aided Design o Disseny Assistit per Computador

FDM Fused Deposition Modeling o Impressió 3D per extrusió

SLA Estereolitografia

DLP Direct Light Processing

DIC Digital Image Correlation

E Mòdul de Young [MPa]

ν Coeficient de Poisson

ϵ Deformació

σ Tensió [MPa]

1. Introducció

La impressió 3D és una de les tecnologies que actualment es troba en creixement constant, i per tant, es van desenvolupant noves tècniques d'impressió. Una d'aquestes noves tècniques és el DLP, Digital Light Processing, en la que la impressió es duu a terme mitjançant la fotopolimerització d'una resina líquida fotosensible gràcies a un projector de llum.

El DLP és encara molt nou i no hi ha molta informació dels resultats obtinguts amb aquesta tècnica, però sí que hi ha molta informació sobre el seu funcionament, degut a que és molt semblant al SLA, o estereolitografia, el seu considerat germà.

A l'existir poca informació sobre les peces finals obtingudes es va decidir dur a terme un projecte on es faria l'estudi d'unes provetes impreses amb DLP per tal d'obtenir els resultats de les propietats mecàniques del material, i així poder caracteritzar una mica més les peces impreses amb DLP.

1.1. Objectius del projecte

En aquest projecte s'ha volgut calcular les propietats mecàniques d'unes provetes fabricades en DLP amb la resina acrílica fotosensible Resina HT de Spot-A Materials, així com també veure quins dels diferents sistemes de mesura usats en els assajos (galgues, extensòmetre mecànic i DIC o Digital Image Correlation) és més eficaç per trobar-les.

Per poder assolir aquest dos objectius principals s'han establert altres objectius menors, com:

- Trobar l'estat actual de la impressió 3D amb DLP, i saber a quines conclusions s'arriben sobre les diverses propietats mecàniques dels possibles materials de fabricació.
- Veure com funcionen les tècniques experimentals amb les que s'han fet les mesures sobre les provetes.
- Trobar els mòduls de Young de les provetes, per poder veure quins dels sistemes de mesura és més fiable
- Amb el mòdul de Young trobar si el material usat és isotrop o anisotrop.
- Trobar el coeficient de Poisson de les provetes.

1.2. Abast del projecte

Aquest projecte s'ha centrat en el càlcul de les propietats mecàniques de les provetes, i en analitzar quins dels sistemes de mesura proporciona millors resultats.

Les dades prèvies experimentals a trobar les diferents propietats ja havien estat determinades per la companya Laura Rey, així que no era necessari trobar de nou aquestes dades. Gràcies a la Laura, només calia trobar les propietats mecàniques doncs ella ja havia proporcionat tota la informació necessària, ja que proporcionava les diferents deformacions de les provetes en totes les tècniques, així com també a les tensions a les que estaven sotmeses.

Tot i que i només calia analitzar les dades obtingudes, també es veurà com es van fer els assajos, i com es van obtenir aquestes dades.

2. Fabricació Additiva i la impressió 3D

2.1. Fabricació Additiva

La fabricació additiva o Additive Manufacturing (AM) és la tecnologia utilitzada per construir objectes afegint capa sobre capa de material, ja siguin plàstics, ceràmics, formigó, productes alimentaris, i algun dia teixit humà.

Es comú en les tecnologies AM l'ús de programari de modelat 3D per computador (Computer Aided Design or CAD), on es crea un dibuix del prototip a fabricar. Un cop es finalitza l'esbós, l'equipament AM interpreta la informació del arxiu de CAD i agrega capes successives de líquid, pols, o altres materials fins arribar a crear un objecte 3D.

La fabricació additiva és un procés relativament ràpid, i actualment a uns costos no molt elevats, que la fan una opció habitual en el moment de construir diferents prototips, i peces que serviran per comprovar que no existeix cap problema amb el disseny 3D, o comprovar la durabilitat del material sota uns esforços concrets. Si el primer prototip és defectuós, es pot fabricar un segon sense gaire dificultat, i amb un temps reduït, avantatge a tenir en compte a l'hora de utilitzar un sistema de fabricació o un altre.

Mentre que per fabricar una sola peça la AM és una solució factible, en el moment de produir en massa, tot i que els seus temps de fabricació no són molt alts i els seus costos moderats, no és la millor opció. Per la fabricació en massa els sistemes de fabricació convencionals (com el fresat o tornejat) són més utilitzats, ja que segueixen sent més econòmics i ràpids. Tot i així, la primera peça es pot fabricar amb AM, com ja s'ha dit abans.

2.2. Impressió 3D

La fabricació additiva inclou moltes tecnologies diferents com la Impressió 3D, Rapid Prototyping, Direct Digital Manufacturing (DDM). Entre aquestes destaca la Impressió 3D, la que segurament és la més coneguda entre les diferents tecnologies AM.

La impressió 3D destaca entre les altres tecnologies AM per ser, generalment, la tecnologia més ràpida, econòmica i fàcil d'utilitzar. Al ser la més versàtil de totes, aporta als departaments de Desenvolupament la capacitat de poder imprimir peces i realitzar muntatges amb diferents materials i així poder trobar la solució òptima de forma i propietats desitjades de la peça final. Dins la impressió 3D hi ha diverses metodologies per dur a terme superposició de les diferents

capas. D'entre totes les que n'hi ha, veurem la impressió per extrusió o FDM (Fused Deposition Modeling), la estereolitografia (SLA), i el Direct Light Processing (DLP).

2.2.1. FDM o impressió per extrusió

La impressió 3D per extrusió o FDM és, probablement, el tipus de fabricació additiva més conegut, així que veurem una mica com funciona. El procés comença amb la interpretació de la peça, anteriorment dissenyada amb CAD, per un programa propi de la impressora per poder veure com es mourà el capçal extrusor. Aquest capçal pot disposar d'un o més extrusor, tot i que el més comú és un. Els capçals amb 2 o més extrusors poden imprimir en diversos colors, o diferents materials a la vegada. Un motor es el que s'encarrega de moure el capçal extrusor, aquest es mourà en el pla XY abans de moure's en l'eix Z, és a dir, fins que no finalitza una capa no es mou per començar la següent. En el mètode per extrusió, el extrusor es alimentat per el material en diverses formes, con en filament, granulat o en pols, el qual calenta, generalment entre 170 i 240 °C, depenent del material utilitzat (els materials més comuns són els polímers per tant amb aquestes temperatures ja es suficient per arribar al punt de fusió del material). El material surt fos en forma de filament de l'extrusor i es va dipositant en la forma desitjada sobre la capa anterior. El material es va fixant i endurent a la temperatura ambient a mesura que entra en contacte amb la capa anterior, cosa que fa que s'hagi d'esperar entre impressió de capa i capa [1].



Figura 2.1 Exemple d'impressora 3D de FDM. BCN 3D Sigma

Els materials més utilitzats en la impressió per extrusió són els termoplàstics, però també podem trobar impressions fetes amb ceres e inclòs aliments. Entre els termoplàstics destaquen els ABS (Acrilonitril butadiè estirè) i el PLA (Àcid polilàctic). Aquesta metodologia, per contra, presenta anisotropia en la direcció Z, aquella direcció en la que es van imprimint les diverses capas, i que les diferents capas acostumen a ser visibles.

2.2.2. SLA i DLP

La SLA i el DLP són dos metodologies de impressió 3D que, tot i semblar-se molt, presenten algunes diferències. Primerament es veurà com funcionen les dues, i posteriorment les diferències i semblances que presenten.

2.2.2.1. SLA

La SLA, anomenat com estereolitografia, és un procés additiu que pertany a la família de la fotopolimerització. En SLA, es crea un objecte mitjançant la curació capa a capa d'una resina de polímer mitjançant un raig làser ultraviolat (UV). Els materials utilitzats en SLA són polímers termoestables fotosensibles que acostumen a estar en forma líquida abans de la curació [2].

La resina líquida és solidificada mitjançant un procés anomenat fotopolimerització. Durant la solidificació, les cadenes del monòmer de carboni, de les que està composta la resina, són activades per la llum UV del làser, provocant que la resina es solidifiqui degut als forts e irrompibles enllaços que creen les cadenes entre si. La fotopolimerització es un procés irreversible i no hi ha manera de tornar a convertir les peces creades per SLA en resina un altre cop. Si s'intenten escalfar les peces, aquestes es cremarien enlloc de fondre's, ja que els materials usats durant el procés són polímers termoestables, a diferència dels termoplàstics que utilitza la FDM .

El procés de fabricació d'una peça per SLA es pot explicar en els següents 4 passos:

- La plataforma de construcció es col·loca per primer cop al dipòsit de resina líquida, a una distància de la superfície igual a l'alçada d'una capa.
- Seguidament, un làser UV crea la següent capa, mitjançant la curació de la resina amb la fotopolimerització. El raig làser segueix un camí anteriorment predeterminat usant un conjunt de miralls anomenats *galvos*. S'escaneja la superfície transversal del model al complet, de manera que tota la capa creada sigui completament sòlida.
- Quan s'acaba una capa, la plataforma es desplaça, amb la ajuda d'un pistó, a una distància de seguretat, i una pala escombradora torna a recobrir la superfície de resina. El procés es repeteix fins que es completa la peça.
- Després d'imprimir, la peça es troba en un estat verd i no curat, i requereix un posterior processament posterior sota llum UV, si es requereixen propietats mecàniques i tèrmiques molt elevades.

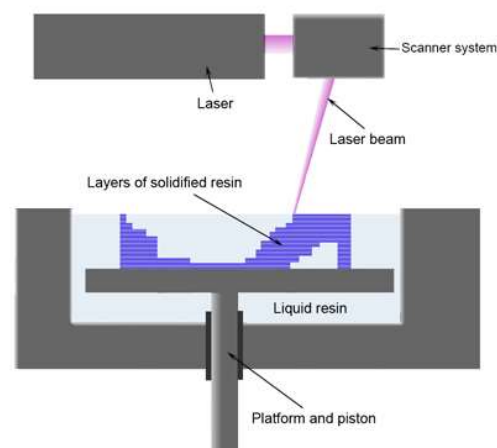


Figura 2.2 Maqueta del procés d'impressió amb SLA



Figura 2.3 Exemple d'una peça curada i d'una de curada.

Es comú que les peces que es volen fabricar siguin complexes, i parts grans sense cap tipus de sustentació, per això moltes vegades al disseny inicial se li afegeixen diferents suports. Aquest suports ajuden a que la peça amb grans voladissos, o una orientació no horitzontal, no es trenqui mentre s'està fabricant. Els suports són petits, i per tant amb unes alicates es poden tallar sense problema. Gràcies a l'ajuda dels suports podem fabricar peces de major complexitat amb menor dificultat.

Un cop vist el funcionament del SLA es poden trobar algunes avantatges i desavantatges al seu ús. La SLA presenta las següents avantatges:

- La SLA pot produir peces amb una molt bona precisió dimensional i amb detalls complexos.
- Les peces fetes amb SLA tenen un acabat superficial molt suau, que els fa ideals per a prototips visuals.
- Existeixen diferents materials especials, com resines transparents i flexibles .

Per una altra banda, les principals desavantatges que presenta les peces impreses amb SLA són:

- Les peces resultants acostumen a ser fràgils i no són adequades per a prototips funcionals. Si es volen usar per a prototips funcionals necessiten d'un posterior processat a la fabricació.
- Les propietats mecàniques i l'aparença visual de les peces es degrada en el temps quan les peces són exposades contínuament a la llum solar.
- Els suports i el post processament són sempre necessaris per eliminar les marques visuals que queden a la peça.

2.2.2.2. DLP

Per una altra banda, el DLP, Direct Light Processing, igual que el SLA, és un procés additiu que pertany a la família de la fotopolimerització. Com en la resta de processos additius , amb tècnica del DLP les peces es construeixen capa a capa, però utilitzant un projecteur de llum en comptes d'un làser, com en el SLA. Els materials usats en el DLP són resines, polímers termoestables, que es troben en estat líquid abans del procés o curació [6].

El procés de fabricació d'una peça amb DLP és quasi idèntic al utilitzat en els sistemes SLA anteriorment explicats. El procediment consta generalment de 4 passos, que en aquest cas s'explicaran breument, ja que han estat comentats abans.

- La plataforma de construcció es col·loca al dipòsit de resina líquida, a una distància de la superfície igual a l'alçada de les capes.
- El segon pas és el que diferencia el DLP del SLA. Amb el DLP, el dipòsit de resina és exposat a la llum del projector DLP. El projector DLP mostra la imatge del model 3D en el polímer líquid. El polímer líquid exposat a la llum s'endureix, formant així una capa. Després, la plataforma amb el dipòsit es mou cap avall i el polímer líquid queda exposat una vegada més a la llum.
- Quan acaba una capa, la plataforma es va movent amunt i avall repetint el pas 2 fins que la peça està finalitzada.
- Per finalitzar, just després de sortir de la impressora la peça es troba en un estat verd i no curat, i requereix un posterior processament posterior. També es pot realitzar un post tractament sota llum UV, si es requereixen propietats mecàniques i tèrmiques molt elevades.

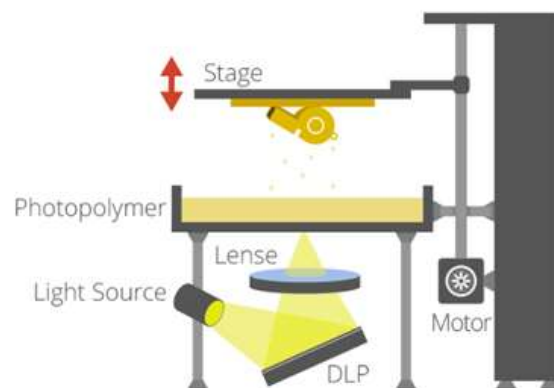


Figura 2.4 Maqueta del procés d'impressió amb DLP

En el procés de construcció d'una peça, com que el projector és una pantalla digital, la imatge de cada capa es compon de píxels quadrats, fent així que la qualitat de la impressió depengui de la mida dels píxels utilitzats per el projector. El objecte resultant està compostat per capes formades per petits maons rectangulars anomenats vòxels.

El post processament és un pas necessari per poder obtenir la peça finalitzada i amb les propietats desitjades. Com amb la SLA, les peces fabricades amb DLP poden ser molt complexes i tenir grans voladissos, cosa que obliga a construir la peça amb diferents suports per a poder aguantar la peça, o per facilitar la seva construcció.



Figura 2.5 Exemple d'un post processa d'eliminació de suports

Aquests voladissos s'han de eliminar manualment per poder donar la peça per acabada. El que s'hagin de retirar manualment es degut a la falta de resines per a la fabricació amb DLP, i que no existeixi cap que es pugui dissoldre amb aigua o similars, com passa amb alguns plàstics de la FDM. També és comú haver de fer un procés de curació de la peça, ja que moltes vegades la resina no està prou endureida o no gaudeix de les propietats mecàniques desitjades. Aquest tècnica

implica sotmetre el objecte a una llum intensa en una màquina de tipus forn, o en un forn per

poder alterar lleugerament les propietats mecàniques [4] [5].

El DLP és encara una tecnologia molt jove, però tot i així ja es poden trobar algunes avantatges i inconvenients als seu procediment i als seus objectes impresos. Com avantatges destaquen [7]:

- Alta velocitat de impressió.
- Excel·lent precisió del acabat i del col·locat de les capes.
- Diferents àrees d'aplicació.
- El baix cost de les impressores.

En quant als principals inconvenients es poden destacar:

- La inseguretat dels materials utilitzats. Els principal materials són resines de fotopolímers molt sensibles a la radiació ultraviolada. Aquest nombre restringit de materials s'explica pel fet que no tots els materials es poden curar sota radiació.
- El cost elevat de tot el funcionament.

El DLP, igual que moltes de les altres tecnologies de AM, és àmpliament utilitzat en disseny de prototips, usualment aplicats per enginyers i dissenyadors. En indústries específiques, les impressores DLP 3D s'utilitzen en l'assistència sanitària, l'estomatologia, la producció de joies i *souvenirs*, i en disseny.

2.2.2.3. Diferències entre DLP i SLA

El DLP i la SLA, com ja s'ha anat veient, són dues tecnologies molt semblants, però que alhora són bastant diferents, donat que els resultats que podem obtenir d'una o l'altra poden ser suficientment heterogenis. Ja s'han vist algunes diferències entres aquest sistemes d'impressió 3D, però ara aprofundirem una mica més en les semblances i diferències que hi ha entre el SLA i el DLP.

La major semblança que tenen també és el motiu de la major diferència, ja que totes dues tecnologies formen part de la AM de la família fotopolimerització, no obstant, les dues apliquen de manera diferents la fotopolimerització.

La SLA utilitza dos motors (un en el eix X i l'altre en el eix Y), per moure i dirigir el raig làser a través de l'àrea d'impressió solidificant així la resina a mesura que es mou. Aquest procés desglossa el disseny de capa a capa en una sèrie de punts i línies que s'introdueixen als motors com a conjunt de coordenades [3].

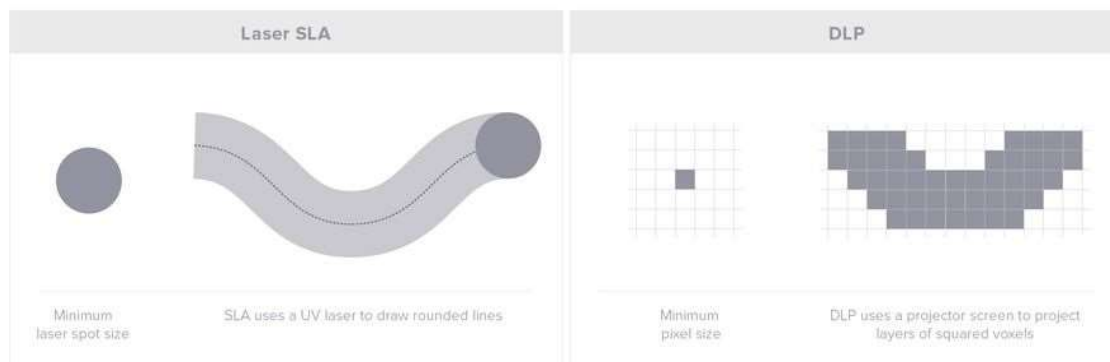


Figura 2.6 Comparativa entre el resultat de fer una corba amb SLA i DLP

El DLP utilitza una pantalla de projector digital per mostrar una sola imatge de cada capa en tota la plataforma a la vegada, és a dir, fa la impressió d'una capa de cop, no com a amb el SLA que es fa amb el moviment del làser. Degut a que el projector és una pantalla digital, la imatge de cada capa està composta per píxels quadrats, que resulta en una capa formada per petits totxos rectangulars.

Totes dues tecnologies treballen la fotopolimerització de maneres diferents, com acabem de veure, el que implica que els acabats superficials d'una tecnologia i l'altra seran diferents.

Els objectes fabricats per capes amb impressió 3D usualment presenten línies horitzontals visibles, no obstant, degut a que el DLP imprimeix utilitzant vòxels rectangulars, també hi ha un efecte de les línies vòxel verticals.



Figura 2.7 Diferència de resolució entre imprimir una mateixa peça en SLA i DLP

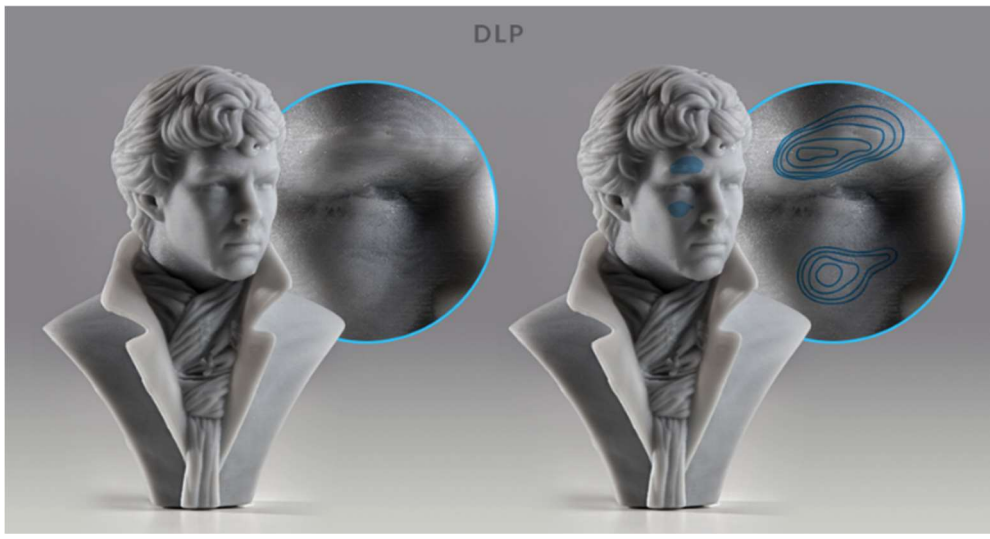


Figura 2.8 Efecte dels vòxels sobre la resolució de la impressió

Com que la unitat és rectangular, els vòxels també tenen un efecte en les vores corbes.



Figura 2.9 Efecte vòxel vist lateralment

Una altra diferència a remarcar seria la velocitat i la mida d'impressió. Amb DLP es poden aconseguir velocitats d'impressió més elevades per algunes parts, ja que la capa sencera es exposada a la llum del projector d'una sola vegada, enlloc de haver-la de dibuixar amb un làser.

Aquest menor temps d'impressió es pot trobar en dos casos. Per a impressions grans i molt denses, on la impressió ompli una bona part de la plataforma, ja que cada capa s'exposarà més ràpidament del que seria si ho dibuixes un làser. Per a impressions molt petites i finament detallades, on pot ser possible canviar les lents del projector d'acord amb l'àrea construcció i, per tant, utilitzar una estreta quantitat de llum per construir petites capes de forma més ràpida [3].

Tenint en compte les diferències i semblances que tenen el SLA i el DLP es pot pressuposar que una tecnologia serà més eficient en algunes coses, mentre que la altra ho serà en diferents. El SLA és molt més recomanable per imprimir [3]:

- Moltes peces petites i complexes d'un sol cop.
- Peces grans molt detallades.

Per una altra banda, el DLP és més utilitzat per imprimir:

- Una sola peça petita i molt complexa.
- Peces grans sense gaire detall.

2.2.3. Propietats mecàniques de les peces fabricades amb DLP

Actualment no existeixen gaires estudis i articles relacionats amb el DLP, degut a que encara és una tecnologia molt jove i no és molt usada. Tot i existir escassos treballs sobre les propietats mecàniques de les provetes fabricades amb DLP, sembla que es vol arribar a la mateixa conclusió en tots ells.

Els articles de B. Steyrer [9], J. Dizona [10] i M. Monzón [8] arriben a la mateixa conclusió que és que les propietats mecàniques de les peces fabricades amb DLP depèn de la direcció de construcció i del tipus de material amb el que s'imprimirà. També acaben deduint que l'anisotropia causada al baix nivell de polimerització, es deguda al pixelat de cada capa, existint així ombres entre els diferents píxels.

De entre el tres articles destaca el d'en M. Monzón [8], ja que és el que aporta més informació sobre les diferents propietats mecàniques i com es veuen afectades segons els processos que es fa després de la impressió. En M. Monzón [8] arriba a diverses conclusions, però de les més interessant serien:

- La ubicació de les mostres a la plataforma de impressió no té una influència significativa sobre les propietats mecàniques.
- La direcció de fabricació de la peça, en particular quan es compara la direcció vertical amb l'horitzontal, té una efecte significatiu sobre les propietats mecàniques, sobretot quan no es realitza el procés de post curació.
- La causa de l'anisotropia en DLP s'ha justificat mitjançant un model teòric d'estructura amb columnes d'un compost de dos materials. L'origen d'aquesta estructura és la pixelació de cada capa amb àrees ombrejades entre píxels, amb un nivell pobre de polimerització.
- El procés de post curació elimina l'anisotropia en aquelles resines on el pigment deixa passar la llum UV a través de la resina.

La part més interessant és la del post-curat, doncs amb aquest procés es poden millorar les propietats mecàniques i fins i tot eliminar l'anisotropia.

3. Experiments realitzats sobre les provetes

Les propietats mecàniques del materials usats en la impressió per DLP no estan del tot definides i estandaritzades, ja que hi ha diversos materials per utilitzar i actualment pocs estudis fets, fet que ja s'ha vist anteriorment en el punt 2.2.3. Per tal de poder comprovar els resultats dels articles anteriors s'han dut a terme assajos sobre provetes impreses en DLP de la resina acrílica fotosensible Resina HT de Spot-A Materials.

3.1. Assajos

Les propietats mecàniques es poden trobar a partir de diferents assajos realitzats sobre unes provetes. Mitjançant els assajos mecànics s'obtenen les deformacions en funció de les tensions a les quals estàn sotmeses les provetes. Amb les deformacions i tensions podem obtenir diferents propietats mecàniques, com el Mòdul de Young (E) o el coeficient de Poisson (ν). Els principals tipus d'assajos són el de tracció, el de flexió i el de compressió.

Els diferents tipus d'assajos, segons la seva respectiva normativa, ens defineixen la geometria de la proveta a fabricar. En l'assaig de tracció la norma *ASTM D638-14 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics* en defineix una geometria descrita a la Figura 3.1.

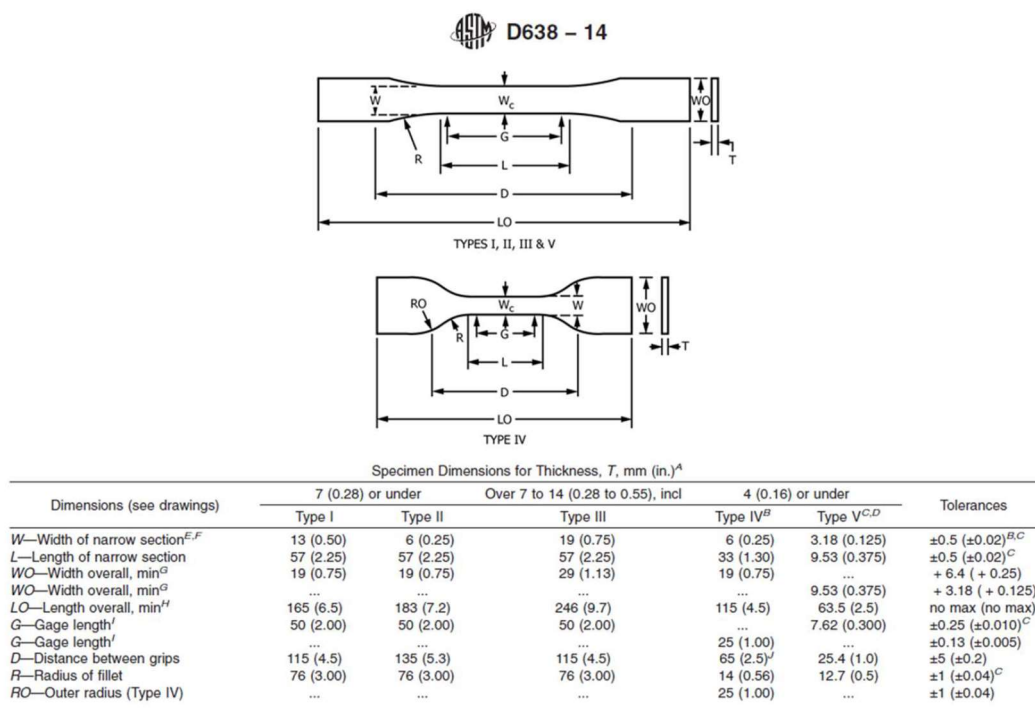


Figura 3.1 Geometria definida per la norma ASTM D638-14 per provetes a tracció

El assaig de flexió ve definit per la norma *ASTM D790-15 Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. Segons la norma *ASTM D790-15*, s'ha d'utilitzar una relació de 16: 1 entre la longitud de la peça i el seu gruix. L'amplada de la proveta no pot superar una quarta part de la longitud, i el mínim de gruix ha de ser de 3,2 mm. A cada extrem de la proveta ha d'haver-hi una part que faci de suport de almenys el 10% de la longitud, però mai inferior a 6,4mm. Utilitzant el que ens diu la norma, es pot crear la proveta límit, és a dir aquella peça el més petita possible sense incomplir la normativa (Figura 3.2).

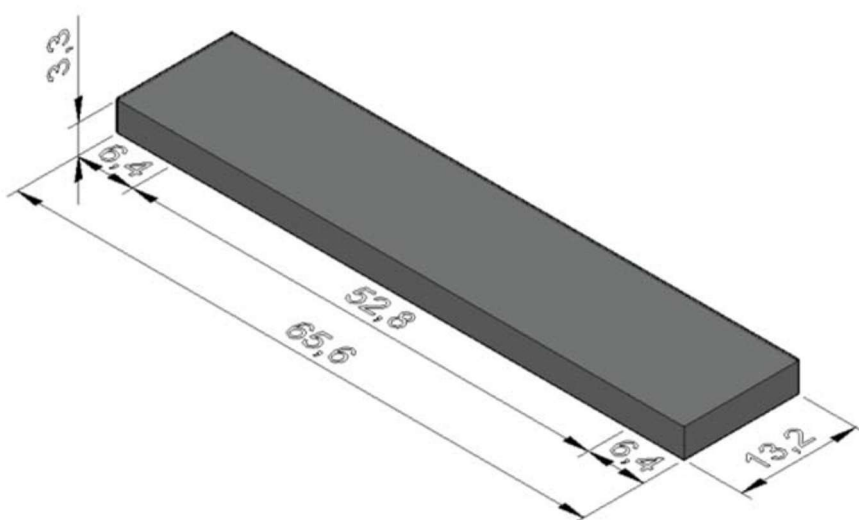


Figura 3.2 Proveta exemple creada a partir de la norma ASTM D790-15 per provetes a flexió

En l'assaig de compressió, regulat per la norma *ASTM D695-15 Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*, existeixen dos geometries diferents segons el tipus de mesures que es volen fer. En el cas de mesures de resistència (tensió de ruptura) es poden fer servir provetes prismàtiques de 12,7 x 12,7 x 25,4 mm (0,50 x 0,50 x 1 in), o cilíndriques de 12,7 mm de diàmetre per 25,4 d'altura (Figura X). En canvi, per a mesures de mòduls elàstics i tensió de límit elàstic es poden usar provetes prismàtiques de 12,7 x 12,7 x 50,8 mm (0,50 x 0,50 x 2 in), o cilíndriques de 12,7 mm de diàmetre per 50,8 mm d'altura (Figura 3.3).

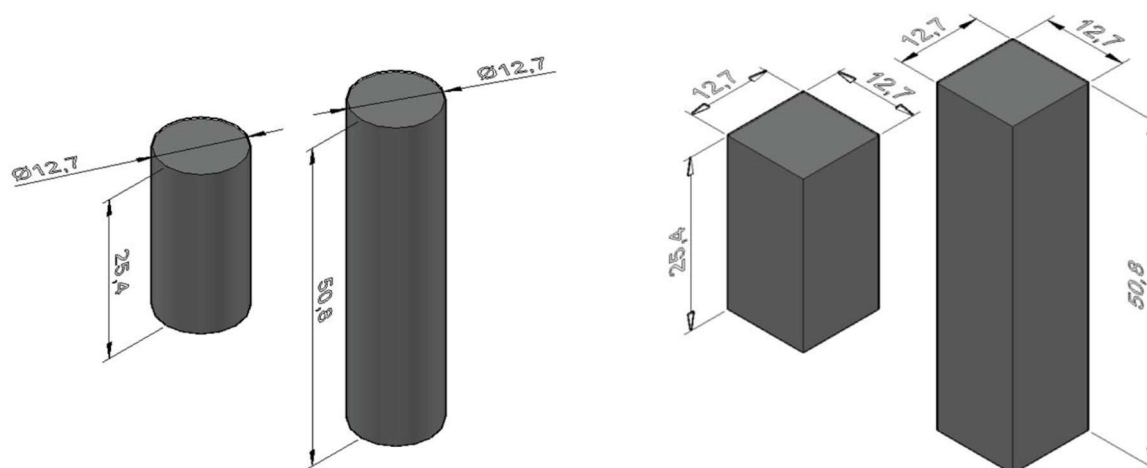


Figura 3.3 Provetes exemple de l'assaig a compressió segon la norma ASTM D695-15

3.2. Provetes

Les peces per assajar que s'han fabricat han estat fetes en sis direccions diferents, per tal de poder comprovar i trobar quines són les seves propietats mecàniques i si aquest material presenta anisotropia o no. Les direccions de fabricació van ser X, XY, Y, XZ, YZ i Z com podem veure a la Figura 3.4. Amb creació d'aquestes provetes es podran trobar totes les constants elàstiques del material. Les propietats a trobar seran: E_x , E_y , E_z , ν_{xy} , ν_{xz} , ν_{yz} , G_{xy} , G_{xz} i G_{yz} (on E és el mòdul de Young o mòdul elàstic (MPa), G el mòdul d'elasticitat transversal (MPa), i ν el coeficient de Poisson).

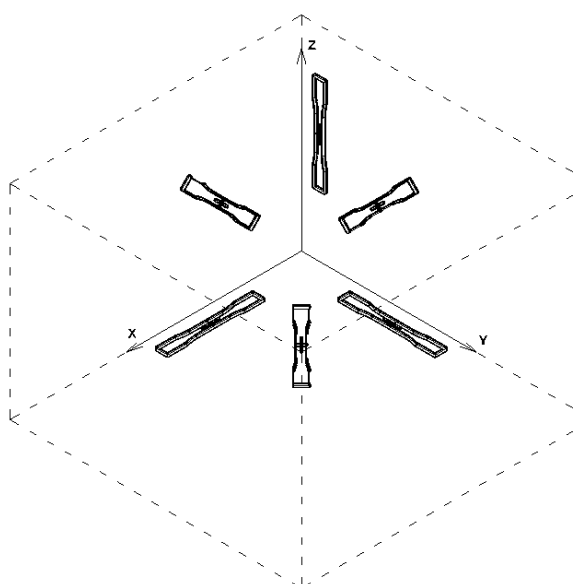


Figura 3.4 Distribució de les provetes segons la direcció de fabricació

La geometria de les peces (superfície, altura i forma) va ser definida segons el tipus d'assaig que es volia realitzar, ja que les normatives dictaminen unes mides o altres segons si el assaig de la proveta és a tracció, flexió o compressió. En aquest cas, es va decidir fer un assaig de compressió, i ja que es volia trobar, en una primera etapa, els mòduls elàstics, es va decidir que les provetes a fabricar serien prismàtiques de 12,7 x 12,7 x 50,8 mm.

Les provetes que es van imprimir van ser diverses en cada direcció per així poder eliminar els diversos errors de fabricació que poguessin existir en alguna peça. Concretament es van fer 11 en la direcció X i Y, 7 en XY, 4 en XZ, 6 en YZ i 9 en Z.

3.3. Experiments sobre les provetes

Per poder trobar les propietats mecàniques de les provetes en van assajar a compressió, i mesurar a la tensió a la que estaven sotmeses i diverses deformacions. A totes les provetes es van mesurar les deformacions amb galgues extensiomètriques (extensimetria elèctrica) i amb el DIC (Digital Image Correlation), que seran explicades després amb detall. Per les provetes fabricades en direcció XZ, YZ i Z també es van mesurar les deformacions amb un extensòmetre mecànic, apart de les altres dos tècniques.

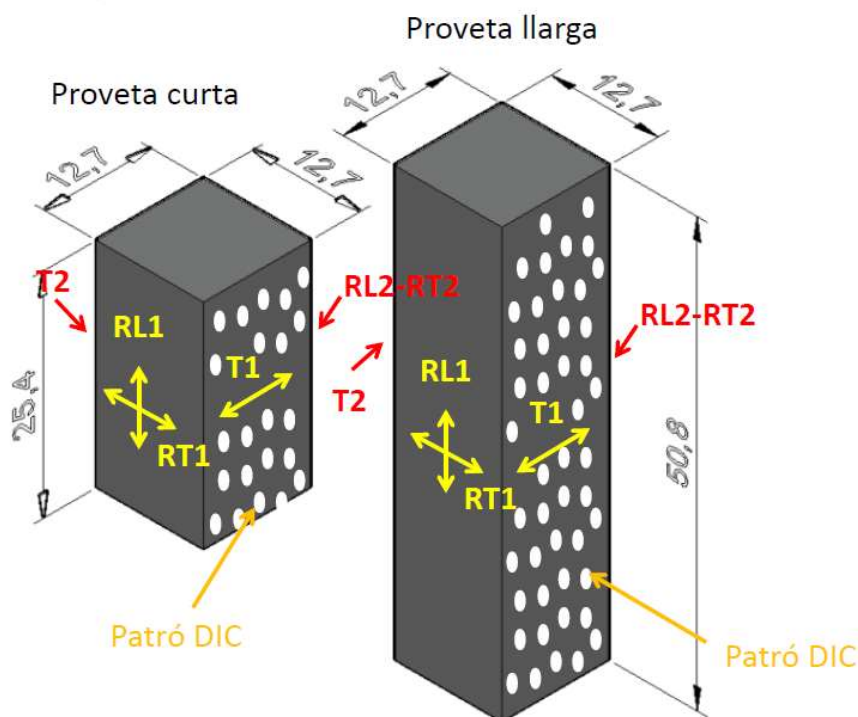


Figura 3.5 Distribució de les galgues en les provetes

La mesura de dades de les galgues es va fer amb dos tipus de galgues diferents rosetes (mesuren la deformació longitudinal i transversal) i galgues transversals (només poden mesurar les deformacions en una direcció, en aquest cas la transversal), com podem apreciar a la Figura 3.5. En tots dos casos hi havia 2 galgues de cada tipus per proveta en cares oposades per així trobar amb millor detall les deformacions. Les rosetes mesuren les deformacions longitudinals com a RL, i les transversal com a RT, en canvi les galgues transversals troben la deformació com a T. Al tenir dos mesures per a cada deformació es va fer la mitja de les dues mesures per així obtenir la deformació final, obtenint els resultats de les equacions 3.1, 3.2 i 3.3.

$$\text{Deformació Longitudinal: } \varepsilon_L = \frac{RL_1 + RL_2}{2} \quad (3.1)$$

$$\text{Deformació Transversal 1: } \varepsilon_{T1} = \frac{RT_1 + RT_2}{2} \quad (3.2)$$

$$\text{Deformació Transversal 2: } \varepsilon_L = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (3.3)$$

La mesura de deformacions del DIC, en canvi, només es va fer en una sola cara de la proveta. Per poder mesurar les deformacions amb DIC és necessari pintar una de les cares de la proveta i anar prenent fotografies d'aquesta cara cada cert temps, per així poder veure la evolució de la pintura i poder deduir la deformació de la peça. Aquest procés es pot veure amb més detall al apartat 4.2.

El procés del assaig d'una proveta és bastant llarg, ja que s'han de dur a terme moltes operacions diferents, però es pot explicar i resumir en els següents passos:

- 1) Mecanitzar la provetes.
- 2) Posar un nom a la proveta, per exemple 1X1 a la primera proveta en X.
- 3) Mesurar les dimensions principals de la proveta: alçada i secció.
- 4) Col·locar les galgues a la proveta.
- 5) Protecció de les galgues per a la pintura del DIC
- 6) Pintar el patró per al DIC.
- 7) Soldar els cables de les galgues.
- 8) Muntar les mordaces de la màquina (assaig a compressió: plats rectificats).
- 9) Col·locació de la proveta en la màquina d'assaig.
- 10) Connexió de les galgues al sistema d'adquisició de dades.
- 11) Inicialització del sistema de lectura de les galgues:
- 12) Ajustar els paràmetres de la càmera i software de captació d'imatges.
- 13) Captar la imatge i verificar la qualitat del patró de pintura en el programa GOM.
- 14) Introduir el nom dels fitxers de fotografies del DIC: data-comptador imatge (en aquest

ordre). No cal indicar l'hora.

- 15) Resetejar el comptador d'imatges.
- 16) Inicialitzar la màquina d'assaig: nom de fitxer de dades, velocitat assaig (1.3 mm/min curtes en compressió, 2.6 mm/min llargues en compressió).
- 17) Iniciar la lectura de les galgues.
- 18) Pre càrrega a 100 N aprox.
- 19) Captació de la primera imatge DIC (4 primeres imatges són de preparació de la màquina i no serveixen, són les imatges de referència).
- 20) Iniciar l'assaig: activar la màquina d'assaig.
- 21) Durant l'assaig captar les diferents imatges per al DIC. Una foto cada 100 N en el tram lineal. Superat el límit elàstic les fotos són cada 250 o 500 N.
- 22) Durada de l'assaig: 400 - 500 s aprox.
- 23) Finalització de l'assaig al nivell de càrrega admissible de la màquina d'assaig (10 kN) o a ruptura de la proveta.
- 24) Tancar fitxer de dades de les galgues. Guardar el fitxer.
- 25) Extreure la proveta de la màquina d'assaig i desconnectar-la del sistema de captació de dades.
- 26) Guardar els fitxers d'imatges captades per a l'anàlisi DIC i els fitxer de lectures de galgues en un disc de seguretat.
- 27) Repetir el procés per a cada proveta, 48 en total.

4. Tècniques Experimentals

Els diversos assajos que s'han dut a terme per poder obtenir les propietats mecàniques la resina acrílica fotosensible Resina HT de Spot-A Materials, s'han dut a terme amb tres tècniques diferents, l'extensimetria elèctrica, el DIC o Digital Image Correlation i l'extensòmetre mecànic. En totes tres tècniques s'han mesurat les deformacions de les provetes, per així posteriorment trobar les propietats mecàniques.

4.1. Extensimetria elèctrica

L'extensimetria elèctrica o, més comunament coneguda com a galgues extensiomètriques, és una tècnica d'adquisició de dades per a la mesura d'esforços i deformacions, basant-se en el canvi de resistència elèctrica, d'un material al ser sotmès a tensions [11].

Les galgues consisteixen d'un fil metàl·lic plegat que es troba sobre una petita lamina de plàstic d'algunes micres d'espessor, que anirà enganxada a la peça. Com que la galga es troba en contacte amb la pròpia proveta, quan aquest rep alguna tensió i, per conseqüència, una deformació, també la rep la galga. Quan la galga rep aquest tensió-deformació el fil metàl·lic experimenta un allargament o escurçament, depenent de la tensió, que fa modificar la seva resistència elèctrica.

Aquesta variació de resistència elèctrica és avaluada pel sistema de mesura, que troba la deformació de manera proporcional a aquesta variació. Cada galga té variacions de resistència diferents ja que hi ha una constant que dependent del fabricant que proporciona la galga.

4.1.1. Preparació de les galgues

Aquesta tècnica destaca per estar en contacte directe amb el les provetes a assajar, així que el primer pas a realitzar és enganxar les galgues a les provetes a assajar, per poder enganxar les galgues a les provetes es va fer servir cola. Les galgues a més d'estar enganxades a la proveta necessiten connectar-se al cable que anirà al sistema de mesura, es pot veure un exemple d'una galga a punt a la Figura 4.1.

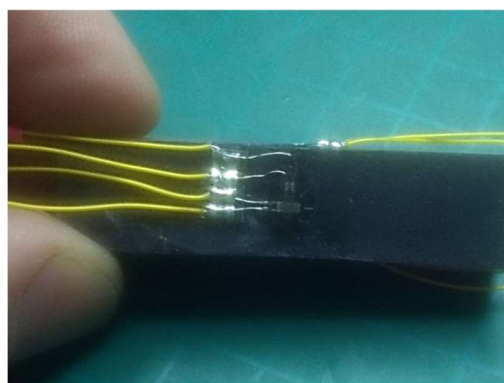


Figura 4.1 Exemple de la col·locació de les galgues a les provetes

4.1.2. Càlcul de les deformacions

Un cop ja estàn col·locades correctament les galgues a les provetes, ja es poden fer els assajos per així obtenir les deformacions. En aquest estudi les mesures estaven proporcionades per 4 galgues diferents per cada proveta. Cada proveta disposava de dues rosetes, galgues que mesuren deformacions longitudinals i transversals, i dues galgues que només mesuraven les deformacions en una única direcció, en aquest cas la transversal.

Les rosetes mesuren les deformacions longitudinals com a RL, i les transversal com a RT, en canvi les galgues transversals troben la deformació com a T, com es pot observar a la Figura 4.2. Al haver-hi dues mesures per a cada deformació, es va fer la mitja de les dues mesures per així obtenir la deformació final, sent així els resultats de les equacions 3.1, 3.2 i 3.3

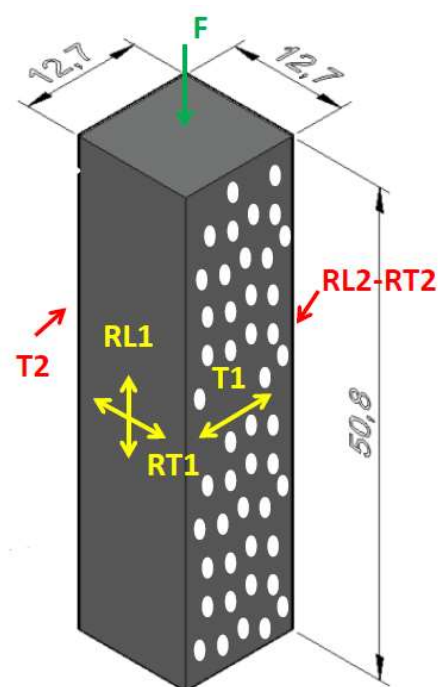


Figura 4.2 Col·locació de les galgues a la proveta

4.2. Digital Image Correlation (DIC)

El DIC, o Digital Image Correlation, és un mètode d'anàlisi d'imatge basat en imatges digitals de valor gris, que pot determinar els desplaçaments d'un objecte sota càrrega en les tres dimensions [13].

4.2.1. Preparació de les provetes

Per poder dur a terme una anàlisi amb DIC és necessari fer abans un preparació prèvia de les provetes que s'assajaran.

El DIC és un sistema basat en imatges que mesura la distància entre dos punts d'una imatge, i que després troba les deformacions a través d'aquetes distàncies.

Com que el DIC troba les distàncies entre punts de les imatges, i les compara amb les anteriors per poder calcular les deformacions, es necessita marcar aquest punts. Per tal que el DIC detecti els diferents punts correctament cal pintar la superfície de la proveta que vol ser assajada, però no pot ser una pintant uniforme, ja que llavors tornariem al punt anterior i no s'hauria avançat res.

El pintat que s'ha de fer a les provetes ha de ser de tal manera que doni un efecte de puntillisme, en aquest cas es van provar dues maneres diferents, un aerògraf i un esprai. Es van fer anàlisis amb els dos mètodes i es va veure que la relació entre punts vàlids i el nombre màxim de punts possibles era superior amb el aerògraf, així que es va utilitzar l'aerògraf per pintar totes provetes que posteriorment serien assajades. Cal remarcar, que va haver-hi peces que es van pintar amb les galgues posades i altres sense les galgues, per tant a l'hora de fer les anàlisis no es podien tenir en compte les zones no pintades.

Un altre aspecte a tenir en compte era la càmera amb les que es van fer les fotografies per poder l'anàlisi. La càmera havia de estar regulada per tal de poder-la sincronitzar amb la càrrega, per així poder fer les fotografies correctament.

La càmera era una IDS UI-3000SE-M-GL, que disposava de un USB 3.0, un monocrom, 12MP, una sortida Mono8, un trigger extern i output de disparador, i una òptica COSMICAR de 50mm i F/1.8.



Figura 4.3 Col·locació de la càmera per prendre les imatges pel DIC

Un cop regulada la càmera i pintades les provetes ja es podia procedir a fer els assajos per trobar les deformacions.

4.2.2. Càlcul de les deformacions

Per trobar les deformacions amb el DIC es van fer unes anàlisis amb el programari GOM Correlate, que és un programa per treballar amb DIC.

El primer pas de tots per trobar les deformacions és inserir totes les imatges de la proveta preses per la càmera al GOM, i definir una àrea d'estudi. En el GOM s'ha de definir una àrea inicial que serà l'objectiu d'estudi, i que anirà canviant automàticament a mesura que la peça es deforma, ja que aquesta superfície no es fixa sinó que agafa diversos punts als principis i es va movent amb ells.

Mentre s'està definint la superfície, és altament recomanable fer una interpolació en el propi GOM, per tal d'evitar fissures a la superfície creada [16]. La interpolació és un dels paràmetres propis del GOM a l'hora de crear noves superfícies, i permet omplir els possibles espais que quedin en buit en crear la superfície. Aquesta interpolació es pot fer de la mida que és vulgui, però gràcies al Manual del GOM i a fer diferents proves, es va fer de 16.

Un cop feta la superfície, s'ha de realitzar l'anàlisi de deformacions. El GOM ofereix la possibilitat de fer trobar dues deformacions diferents la ϵ_y i la ϵ_x , que són les deformacions longitudinals i transversals respectivament en aquest projecte. Com que interessa trobar la deformació longitudinal es va calcular la ϵ_y . Per trobar les deformacions correctament s'ha d'aplicar un filtre espacial de mida 15, per així poder trobar amb més detall les deformacions. La mida de 15 del filtre s'ha trobat gràcies al Manual del GOM [16] i a base de prova i error.

Un cop es fa l'anàlisi de ϵ_y , es fan les mitjanes espacials de cada imatge, ja que cada imatge representa un estat diferent de tensió-deformació, i així poder trobar posteriorment les corbes tensió-deformació. Cal destacar que se sap en quin punt de tensió es troba la proveta de cada imatge feta, per tant sabem quina tensió associada té cada deformació mitja de cada imatge.

4.3. Extensòmetre mecànic

L'extensòmetre mecànic, o extensòmetre, és un instrument de mesura per trobar el canvi de distància entre dos punts. Aquest instrument es col·loca de manera externa o interna, però en aquest projecte va ser un extensòmetre extern, per poder determinar les deformacions lineals, en aquest cas les longitudinals [12].

Aquest sistema de mesura, troba la distància instantània entre dos punts, i d'aquesta manera va trobant les deformacions instantànies, que a l'hora es van emmagatzemar en el sistema de recollida de dades propi extensòmetre.

En el projecte l'extensòmetre només ha estat usat en algunes provetes, i per tant, tot i ser un bon sistema de mesura de deformacions, no ha estat molt present en general. Si que s'han considerat els seus resultats pels mòduls de Young, però no a totes provetes, per tant no sempre se l'ha considerat.

5. Eficiència i precisió de les tècniques de mesura

Les diverses tècniques utilitzades per mesurar les deformacions sobre les provetes obtenen resultats diferents, ja que com s'ha vist abans, utilitzen diferents mètodes per calcular aquestes deformacions.

Mentre que el càlcul de les deformacions varia en cada tècnica, el com s'ha calculat la tensió aplicada a les provetes no. En totes les tècniques la tensió aplicada s'ha calculat de mateixa manera, com indica l'equació 5.1

$$\sigma = \frac{F}{A} [MPa]. \quad (5.1)$$

On, σ és la tensió, F la força variable proporcionada per la màquina d'experimentació, i A la superfície de les de provetes de 12,7x12,7 mm.

Al haver-se utilitzat tres tècniques de mesura diferents, els resultats obtinguts per les tres pot variar i donar millors o pitjors resultats segons la propietat que es vulgui trobar. Degut a aquesta possible variació s'ha fet un estudi de les 3 tècniques usades per veure quina és la més fiable, o quina no serveix per trobar alguna propietat.

5.1. Estudi de precisió sobre el Mòdul de Young

Aquest estudi no s'ha dut a terme en totes les provetes, ja que, entre altres motius, la tècnica de l'extensòmetre mecànic només es va dur a terme en les peces fabricades en les direccions XZ, YZ i Z. De les tres possibles direccions de fabricació es van utilitzar les provetes fabricades en la direcció Z, ja que en general donaven uns resultats per a les propietats amb menys dispersió que les altres dues. Aquests resultats es podran veure amb més detall en el posterior punt 6.

La realització d'aquest estudi es va dur a terme amb l'anàlisi dels Mòduls de Young de les provetes Z, i un cop vist els resultats també es van realitzar a la resta de provetes i veure que donen els mateixos resultats.

5.1.1. Estudi en provetes Z

Primerament, per tal de poder realitzar l'anàlisi, va ser necessari calcular el Mòdul de Young, aquest es va calcular numèricament (regressions i aproximacions lineals, i gràficament (gràfics tensió-deformació).

Els gràfics que es van realitzar van ser de tensió-deformació, ja que el pendent d'aquests és el Mòdul de Young. Tot i així, els gràfics primer van haver de ser retocats una mica, ja que si s'utilitzaven totes les dades es tindria un gràfic complet de la evolució de la tensió-deformació però no es veuria amb claredat la zona lineal, on podem calcular el E. A la Figura 5.1 es pot veure l'evolució tensió-deformació al llarg de tot el assaig en la proveta 1Z9.

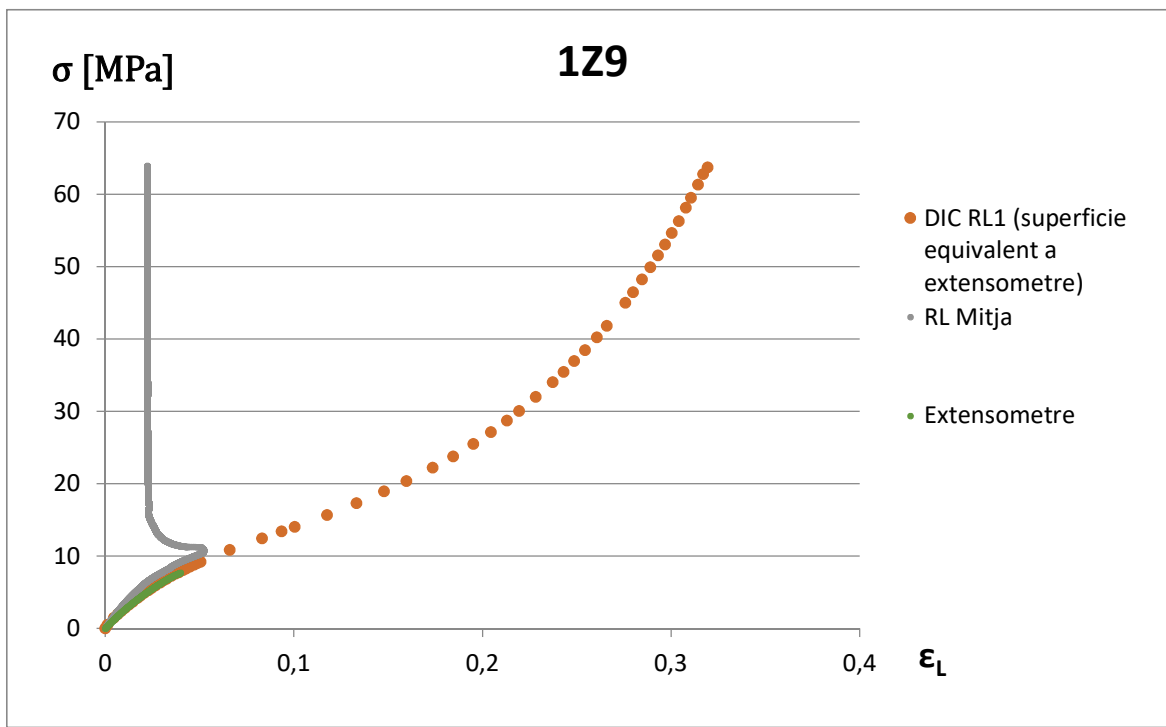


Figura 5.1 Corba tensi-deformació completa de la proveta 1Z9

La part inicial del gràfic és el principi de la corba tensió-deformació, i serà allà on es calcularà la tangent de la corba a l'origen per tal d'obtenir el mòdul de Young. Com es pot veure a la Figura 5.1, aquesta part inicial està localitzada, aproximadament, entre les tensions 0 - 10 MPa i les deformacions 0-0,05, així que per tal de poder visualitzar-la millor es fan uns altres gràfics amb les tensions i deformacions màximes anteriors.

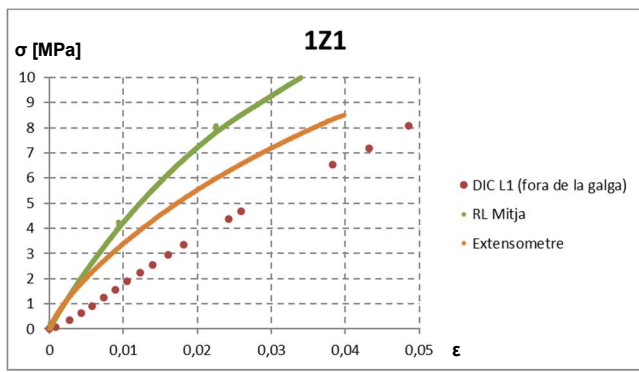


Figura 5.2 Corba tensió-deformació proveta 1Z1

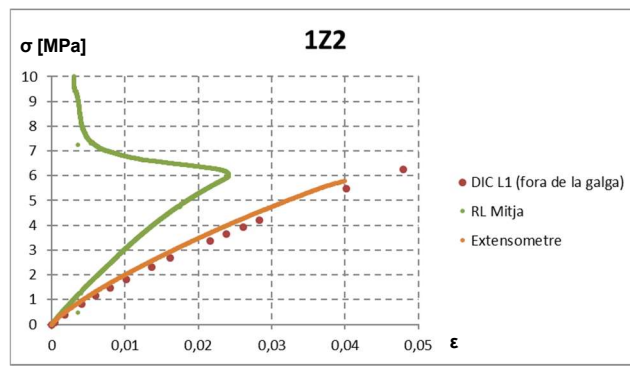


Figura 5.3 Corba tensió-deformació proveta 1Z2

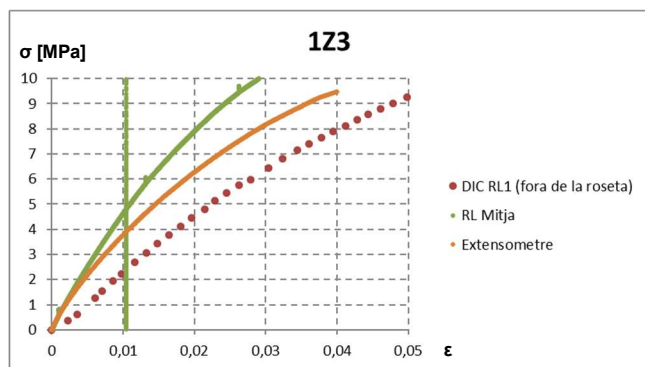


Figura 5.4 Corba tensió-deformació proveta 123

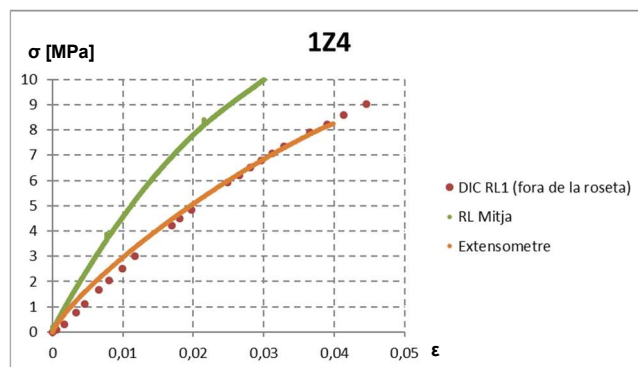


Figura 5.5 Corba tensió-deformació proveta 124

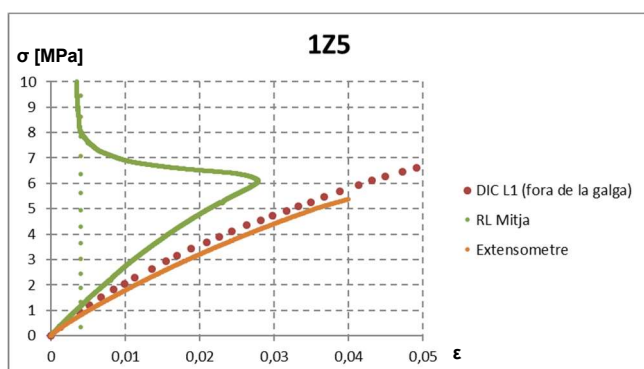


Figura 5.6 Corba tensió-deformació proveta 125

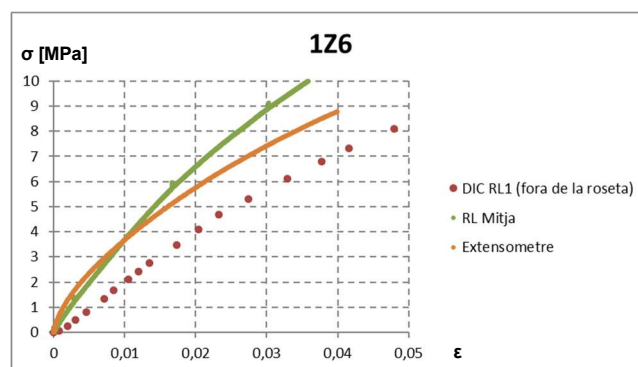


Figura 5.7 Corba tensió-deformació proveta 126

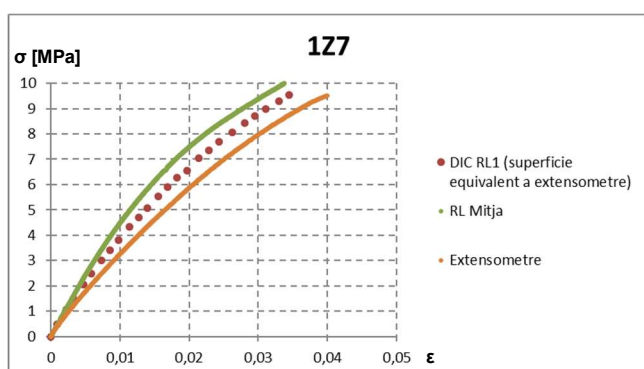


Figura 5.8 Corba tensió-deformació proveta 127

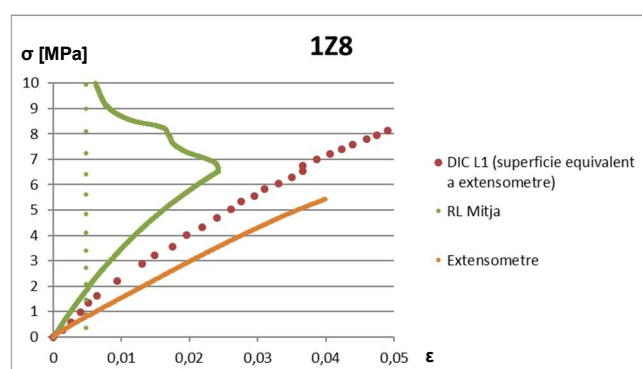


Figura 5.9 Corba tensió-deformació proveta 128

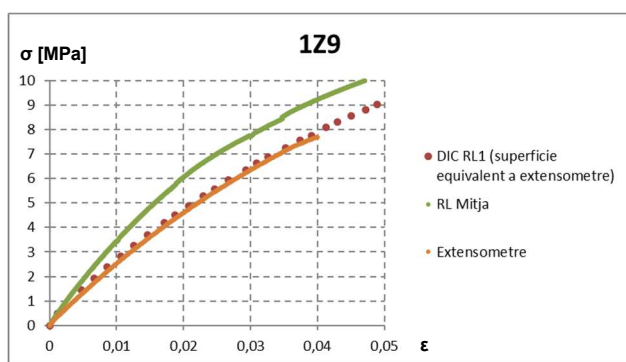


Figura 5.10 Corba tensió-deformació proveta 129

En els gràfics anteriors es pot veure, que tot i ser el mateix tipus de provetes, es poden distingir 3 grups de gràfics segons la disposició de les rectes del E. Els tres grups que hi ha són:

- 1) Les provetes 1Z1, 1Z3 i 1Z6. Aquestes tenen gràfics semblants, on el mòdul de Young del DIC està sempre per sota dels altres 2, i el E del extensòmetre es troba entre els de les galgues i el del DIC.
- 2) Les provetes 1Z2, 1Z4, 1Z5 i 1Z9. Aquestes destaquen per tenir mòduls de Young del DIC i del extensòmetre quasi bé idèntics, i per sota del mòdul de les galgues.
- 3) Les provetes 1Z7 i 1Z8. Aquestes són les provetes on el mòdul de Young del DIC està entre el mòdul de les galgues i el del extensòmetre, sent el mòdul de les galgues l'inferior de tots.

De l'anàlisi gràfica de les provetes Z es pot veure que el mòdul de Young de les galgues és sempre superior als altres 2. També es pot observar que el pendent inicial de la corba tensió-deformació del DIC és molt baix i farà que el mòdul de Young disminueixi. De la mateixa manera, els pendents de les corbes de les galgues i extensòmetre són molt similars, cosa que farà que els mòduls de Young d'ambdós siguin molt pareguts.

Els resultats obtinguts en l'anàlisi de les provetes Z sembla ser prou com per arribar a una conclusió sobre l'eficiència i precisió de les diferents tècniques d'assaig, però abans de donar-ho per segur s'han fet les mateixes anàlisis amb la resta de provetes, incloent-hi les XZ i YZ que també disposaven de l'extensòmetre mecànic.

5.1.2. Estudi de les provetes XZ i YZ

L'estudi realitzat en les provetes XZ i YZ que s'ha realitzat ha estat per veure si s'obtenen els mateixos resultats que en provetes Z. Aquestes provetes, igual que les Z, són les úniques que amb les que també s'ha realitzat l'assaig amb l'extensòmetre, així seran en las úniques on es podrà corroborar la precisió de l'extensòmetre. Per poder veure el comportament d'aquestes provetes en els assajos s'han fet les mateixes anàlisis que en les provetes Z, un estudi de la corba de tensió-deformació.

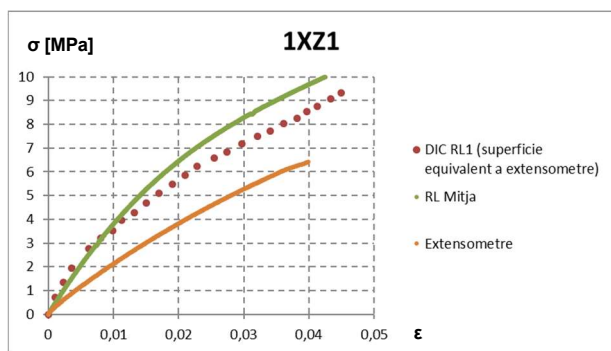


Figura 5.11 Corba tensió-deformació proveta 1XZ1

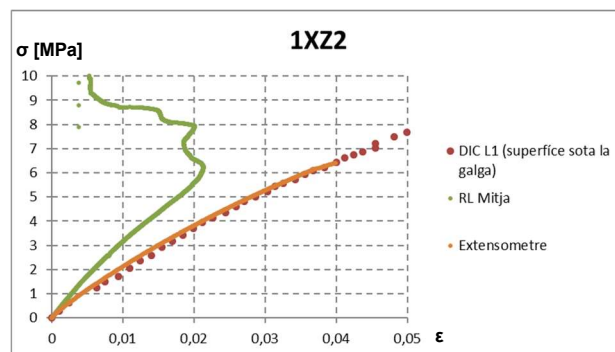


Figura 5.12 Corba tensió-deformació proveta 1XZ2

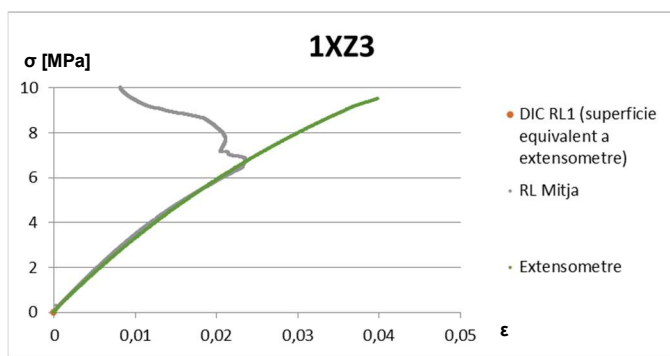


Figura 5.13 Corba tensió-deformació proveta 1XZ3

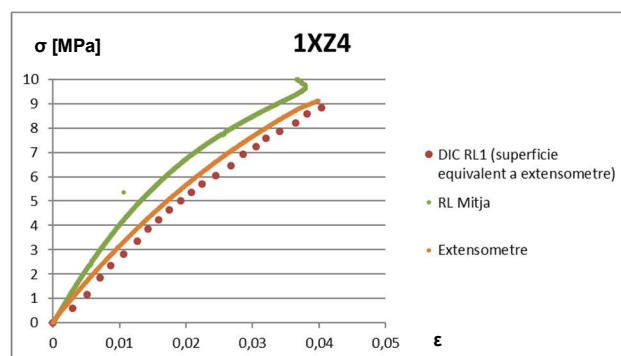


Figura 5.14 Corba tensió-deformació proveta 1XZ4

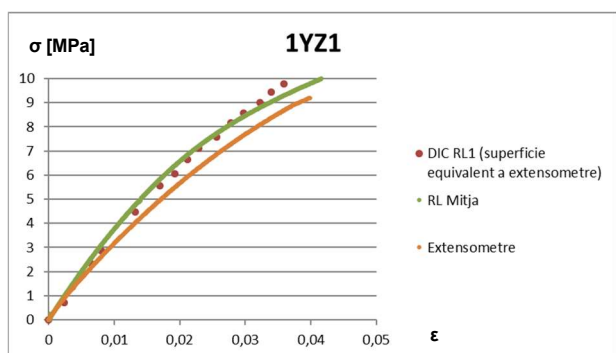


Figura 5.16 Corba tensió-deformació proveta 1YZ1

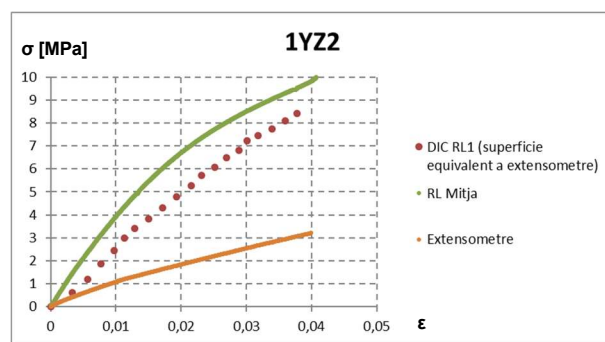


Figura 5.15 Corba tensió-deformació proveta 1YZ2

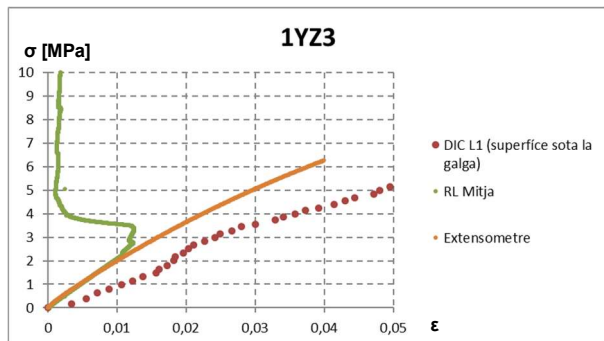


Figura 5.17 Corba tensió-deformació proveta 1YZ3

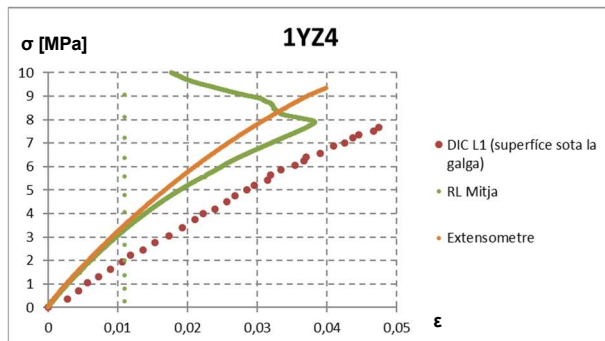


Figura 5.18 Corba tensió-deformació proveta 1YZ4

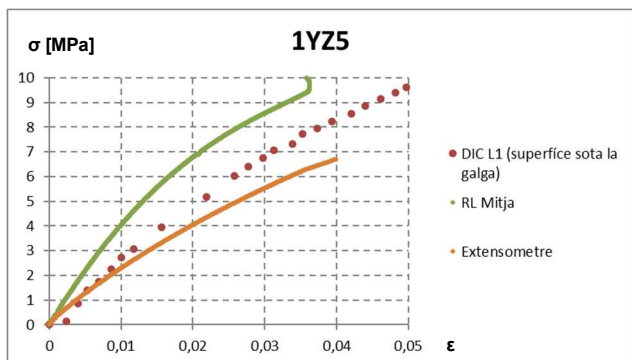


Figura 5.19 Corba tensió-deformació proveta 1YZ5

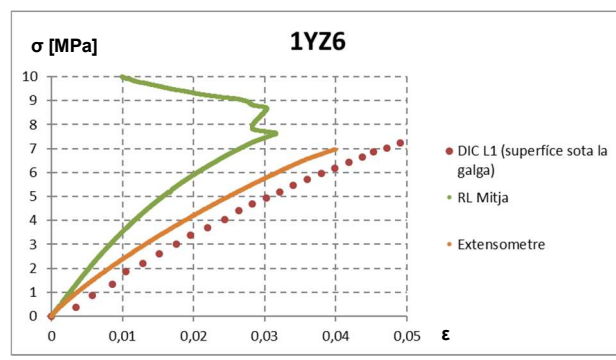


Figura 5.20 Corba tensió-deformació proveta 1YZ6

En aquest cas, igual que en les provetes Z, la corba del mòdul de Young de les galgues és sempre superior al del extensòmetre o el DIC, a excepció de les provetes 1XZ3 i 1YZ3 on les corbes del extensòmetre i les galgues són quasi idèntiques (a la zona lineal). En aquests gràfics també es poden observar algunes anomalies com a la 1XZ3 que no té corba de tensió-deformació del DIC, o la 1YZ3, que la corba del DIC té un comportament estrany.

Tot i aquests casos especials, els resultats de l'anàlisi de les gràfiques de les provetes XZ i YZ són els mateixos que en les provetes Z, ja que la corba tensió-deformació de les galgues sempre està per sobre de la del extensòmetre i DIC, i el pendent inicial de la corba del DIC és insuficient donant així un mòdul de Young inferior al real.

5.1.3. Estudi de la resta de provetes

Els estudis realitzats en les provetes XZ, YZ i Z semblen apuntar a un mateix resultat, que és que el DIC no serveix per mesurar els mòduls de Young, i que hi ha algun error de mesura a les galgues ja que aquestes sempre donen corbes superior a les del extensòmetre o DIC. Per acabar de comprovar aquesta hipòtesis es van fer les mateixes anàlisis gràfiques que les provetes XZ, YZ i Z a la resta de provetes (X, XY i Y).

Els resultats de les anàlisis gràfiques de les provetes X, XY i Y, els gràfics dels quals es troben a l'Annex A, porten a la mateixa conclusió que les altres provetes. En tots els gràfics de les diferents provetes veiem que la corba tensió-deformació de les galgues es troba sempre per sobre de les altres dues, i que el pendent inicial de la corba del DIC és inferior als altres.

Un cop fet l'anàlisi gràfica, també es fa fer una anàlisi amb els resultats numèrics inicials. Per obtenir els mòduls de Young numèricament s'han fet aproximacions lineals entre diferents punts de la part inicial de les corbes tensió-deformació. Aquests punts són els resultats de dividir la tensió (σ [MPa]) entre la deformació corresponent (ϵ), ja que en cada tècnica les deformacions s'obtenien de manera diferent.

El nombre de dades recollides per cada tècnica varia, ja que el mètode de recollida de cada una és diferent. En el cas de les galgues el nombre de dades és molt gran, d'unes 1000-2000 dades en la part inicial, mentre que en l'extensòmetre i el DIC les dades són molt inferior en nombre. Això fa que les aproximacions i regressions lineal siguin més exactes o acurades en el cas de les galgues.

En la taula, es poden veure els resultats de les aproximacions i regressions lineals del mòdul de Young, així com també els resultats trobats gràficament, aquells que s'han trobat fent una regressió lineal a la corba tensió-deformació dels anteriors gràfics. Més endavant, en el punt 6, s'explicarà més clarament com s'ha fet la mesura en cada cas.

Taula 5.1 Resultats del mòdul de Young

| Proveta | Mòdul de Young [MPa] | | | | | |
|----------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| | Numèricament | | | Gràficament | | |
| | DIC | Galgues | Extensòmetre | DIC | Galgues | Extensòmetre |
| 1X1 | 325,1325625 | 382,4101974 | - | 394,88 | 377,56 | - |
| 1X2 | - | 543,3878395 | - | - | 493,58 | - |
| 1X3 | - | 490,0112568 | - | - | 567,29 | - |
| 1X4 | 217,5229967 | 352,216709 | - | 255,49 | 346,41 | - |
| 1X5 | 305,314868 | 402,494758 | - | 353,02 | 386,92 | - |
| 1X6 | - | 382,4730726 | - | - | 405,44 | - |
| 1X7 | 257,0066209 | 353,4714875 | - | 170,17 | 345,47 | - |
| 1X8 | 87,53313496 | 315,2442056 | - | 106,45 | 314,75 | - |
| 1X9 | 167,1115159 | 379,2270547 | - | 149,65 | 341,61 | - |
| 1X10 | 349,8905809 | 422,4404303 | - | 352,27 | 413,06 | - |
| 1X11 | 242,1241234 | 338,3321283 | - | 250,79 | 315,24 | - |
| Mitjana | 243,9545504 | 396,5190127 | - | 254,09 | 391,5754545 | - |
| 1XY1 | 283,5356826 | 299,0153422 | - | 218,26 | 275,42 | - |
| 1XY2 | 437,4170281 | 484,3442506 | - | 353,81 | 421,02 | - |
| 1XY3 | 111,6672257 | 319,3625961 | - | 111,16 | 423,36 | - |
| 1XY4 | 387,9271887 | 405,2916312 | - | 273,11 | 326,13 | - |
| 1XY5 | 556,5656548 | 510,0287575 | - | 447,1 | 470,94 | - |
| 1XY6 | 300,7385069 | 306,9756809 | - | 225,87 | 304,58 | - |
| 1XY7 | 439,7150163 | 480,3789475 | - | 291,37 | 406,51 | - |
| Mitjana | 359,652329 | 400,7710295 | - | 274,3828571 | 375,4228571 | - |
| 1XZ1 | 274,5750741 | 406,9532565 | 236,7895907 | 335,47 | 374,36 | 196,3 |
| 1XZ2 | 174,3757193 | 343,3543496 | 216,1313024 | 211,76 | 322,25 | 187,34 |
| 1XZ3 | - | 362,0002418 | 313,2637555 | - | 322,39 | 328,48 |
| 1XZ4 | 270,2692612 | 436,4620502 | 300,7519934 | 264,62 | 315,36 | 405,25 |
| Mitjana | 239,7400182 | 387,1924745 | 266,7341605 | 270,6166667 | 333,59 | 279,3425 |
| 1Y1 | - | 442,5720524 | - | - | 447,5 | - |
| 1Y2 | 727,0660414 | 370,531572 | - | 353,79 | 351,73 | - |
| 1Y3 | 507,2819524 | 636,8958204 | - | 663,17 | 617,7 | - |
| 1Y4 | 652,4577031 | 456,9955043 | - | 330,98 | 435,99 | - |
| 1Y5 | 1167,799348 | 600,024064 | - | 560,72 | 540,15 | - |
| 1Y6 | 475,70354 | 484,9666321 | - | 432,16 | 463,73 | - |
| 1Y7 | 363,8352804 | 486,5471821 | - | 307,65 | 439,51 | - |
| 1Y8 | 562,4458449 | 494,2435772 | - | 362,21 | 444,36 | - |
| 1Y9 | 405,1836803 | 505,6882249 | - | 262,46 | 461,47 | - |
| 1Y10 | 110,974676 | 290,6521694 | - | 107,14 | 274,88 | - |
| 1Y11 | 371,811325 | 336,6433461 | - | 307,78 | 340,05 | - |
| Mitjana | 534,4559392 | 464,1600132 | - | 368,806 | 437,9154545 | - |
| 1YZ1 | 373,75423 | 395,803739 | 318,1941445 | 364,04 | 392,57 | 316,05 |

| | | | | | | |
|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1YZ2 | 247,9565388 | 417,4266739 | 124,5837968 | 239,99 | 340,75 | 102,77 |
| 1YZ3 | 109,0854676 | 209,1279431 | 242,4121005 | 80,517 | 230,12 | 195,53 |
| 1YZ4 | 184,3245427 | 332,9507549 | 329,4644711 | 177,69 | 291,2 | 322,12 |
| 1YZ5 | 306,6360623 | 424,0582299 | 251,7896097 | 242,64 | 386,55 | 226,01 |
| 1YZ6 | 171,7979708 | 375,1567904 | 253,0403058 | 165,01 | 325,81 | 234,95 |
| Mitjana | 232,2591354 | 359,0873552 | 253,2474047 | 211,6478333 | 327,8333333 | 232,905 |
| 1Z1 | 194,9213291 | 465,3601961 | 528,3892678 | 193,04 | 405,17 | 346,28 |
| 1Z2 | 226,7289806 | 330,5611841 | 262,358097 | 180 | 326,73 | 181,72 |
| 1Z3 | 246,2020048 | 605,6563939 | 538,580624 | 234,96 | 513,66 | 364,09 |
| 1Z4 | 262,9325756 | 514,136782 | 358,390247 | 358,89 | 518,36 | 319 |
| 1Z5 | 245,3948484 | 259,841072 | 166,1346763 | 219,49 | 287,91 | 178,28 |
| 1Z6 | 218,0493613 | 423,030075 | 540,3347587 | 164,41 | 448,94 | 311,63 |
| 1Z7 | 486,9774752 | 480,6414298 | 353,3149299 | 414,19 | 485,64 | 329,15 |
| 1Z8 | 253,9823026 | 414,1683928 | 162,765643 | 250,05 | 383,32 | 152,02 |
| 1Z9 | 412,4123173 | 386,3425012 | 263,8796939 | 271,34 | 361,86 | 250,65 |
| Mitjana | 283,0667994 | 431,082003 | 352,6831042 | 254,0411111 | 414,6211111 | 270,3133333 |

A la Taula 5.1, es pot veure que els mòduls de Young calculats amb la tècnica de les galgues es sempre molt superior al calculat amb l'extensòmetre o el DIC. També es pot observar que els mòduls de l'extensòmetre i DIC són més semblants, sobretot la mitjana, però el del extensòmetre sempre superior al del DIC.

Una altra observació és que hi ha algunes provetes on les mesures del mòdul de Young són estranyament petites o grans, això es degut a una mala lectura pels sistemes de mesura o algun problema amb la proveta abans de començar el assaig. Aquest tipus d'errors els veurem al apartat 5.3.

L'observació més remarcable que es pot fer és que les galgues sempre donen mòduls de Young molt superiors als altres mètodes, cosa que voldrà dir que hi ha algun problema de lectura en les galgues. En l'apartat següent, el 5.2, es veurà a què és degut aquest increment del mòdul de Young per part de les galgues.

Tot i així, excepte algun cas especial, com les provetes Y, els resultats trobats numèricament (aproximacions i regressions lineals) són molt semblants a les que s'han trobat de manera gràfica fent regressions lineals sobre les corbes tensió-deformació, sent així les dues opcions viables per a trobar els mòduls de Young.

5.2. Singularitat de les galgues

Els mòduls de Young trobats amb la tècnica de les galgues, com ja s'ha vist al apartat anterior, és sempre major als mòduls trobats amb les altres dues tècniques, això segurament sigui degut a un error de lectura de les pròpies galgues per un factor intern o extern.

La primera hipòtesi plantejada és que el mòdul de Young de material de les provetes és de, aproximadament, 250-350 MPa, bastant inferior a 1000 MPa. Ja que, segons A. Ajovalasit [14], quan el material de les provetes que es volen analitzar és inferior a aquests 1000 MPa pot ser que hi hagi problemes de lectura en les galgues. En aquest casos també es recomana usar un coeficient corrector per tal d'evitar aquest errors de lectura, el qual està explicat al punt 6.3.

Com que perquè la galga faci la lectura correctament ha d'estar adherida a la proveta crea un efecte de major rigidesa al voltant de la zona de lectura fent així que el valor mesura sigui menor al real i donant així uns valors de resistència del material de les provetes major al que realment tenen. Per comprovar aquest efecte de rigidesa de les galgues s'han fet anàlisis amb el DIC amb diferents provetes de totes les direccions, per així poder observar si realment les deformacions al voltant de la galga són menors a les de la resta de peça.

Una anàlisi realitzada amb el DIC proporcionarà una imatge clara de la dispersió de deformacions al voltant d'una zona de la proveta, és a dir, mostrarà com estan distribuïdes les deformacions a la voltant de la peça indicant on trobem les majors i menors deformacions. Amb aquesta anàlisi es podrà veure si les deformacions al voltant de la galga són iguals o diferents a la resta de la peça. En cas que les deformacions a les galgues siguin molt diferents a la distribució de deformacions de les altres zones de la proveta voldrà dir que la galga com a tal és una singularitat ella mateixa.

La singularitat de la galga implicarà que les mesures realitzades per aquesta no seran correctes, i en alguns càlculs s'hauran de tenir en compte els errors de mesura per tal d'obtenir un resultat satisfactori.

5.2.1. Anàlisi amb DIC

L'anàlisi realitzada amb el DIC consistirà de veure la evolució de la dispersió de deformacions a una de les provetes, mitjançant el programari GOM Correlate, per veure quina diferencia hi ha entre la proveta i les galgues. Un cop feta una anàlisi en una de les provetes es fan les mateixes anàlisis a una proveta de cadascuna de les altres direccions de fabricació.

La realització de l'anàlisi es va realitzar amb el procediment explicat al 4.2.2. Per dur a terme l'estudi, a l'hora de crear la nova superfície es va fer una interpolació lineal de 16, ja que el

Manual de GOM Correlate [16] recomana fer-la entre 15 i 20, i per assaig i error, una interpolació de 16 ja donava bons resultats. Un cop feta la nova superfície d'anàlisi, incloent-hi la galga, es va procedir a calcular la Èpsilon Y, que en el GOM és la deformació longitudinal de la proveta.

La primera anàlisi es va realitzar en les provetes Z, ja que aquestes són les que havien estat utilitzades per al anterior estudi. De les peces en Z es va escollir la Z9 ja que semblava que era una de les quals s'obtenien un resultat més clars i precisos en l'anàlisi del mòdul de Young.

Aquest estudi s'ha realitzat a llarg de tota la vida útil de la peça a l'experiment, és a dir mentre es trobava a la part inicial de la corba tensió-deformació. En les següents imatges es veuran els resultats obtinguts en tres punt d'aquesta corba. A la Figura 5.21, es trobaria a uns 3 MPa, a la Figura 5.22, a uns 6 MPa, i a la Figura 5.23 a uns 9 MPa. En totes les imatges, a la part esquerra, hi ha una llegenda que indica les deformacions en una escala de colors, com més vermell és el punt de la imatge on mirem menor és la deformació, en canvi com més blau major és la deformació.

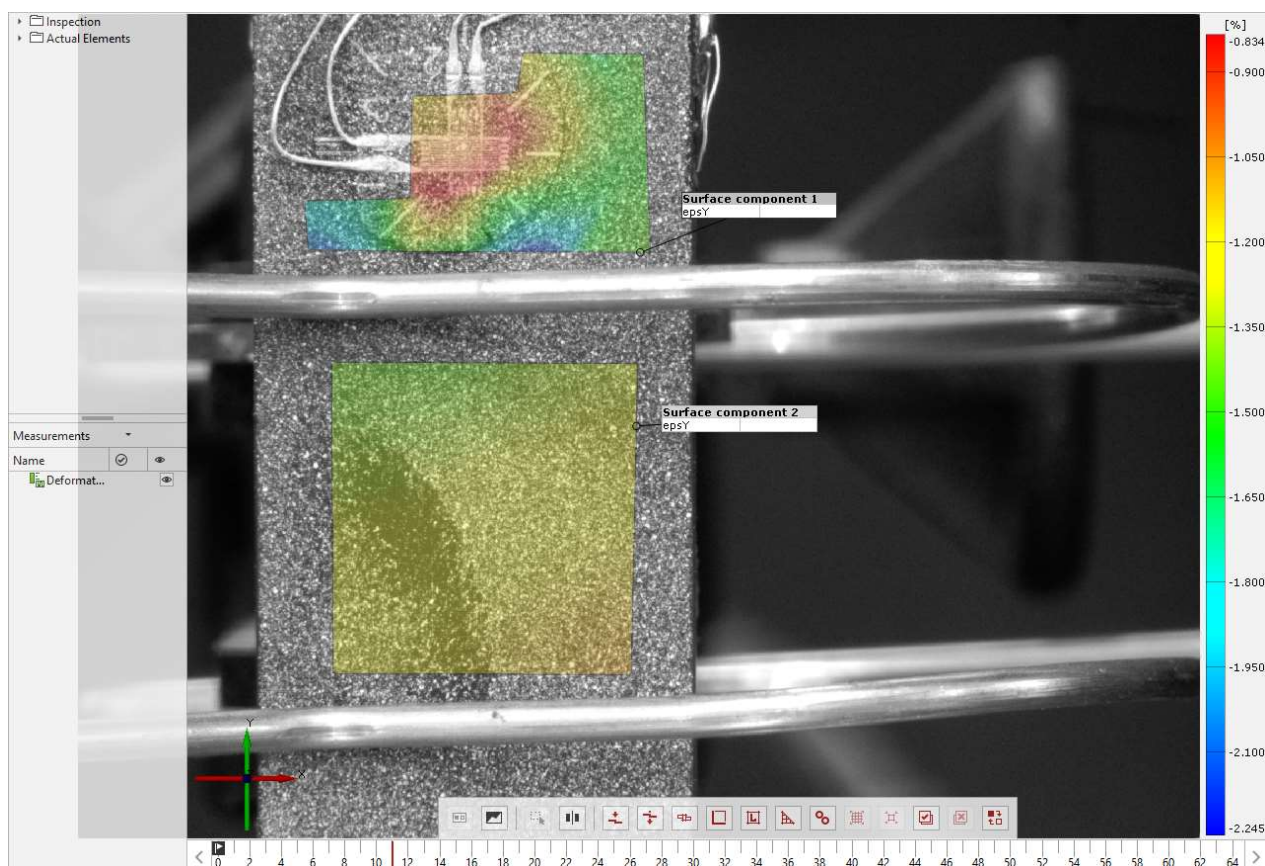


Figura 5.21 Estudi DIC de la proveta 1Z9 a 3 MPa

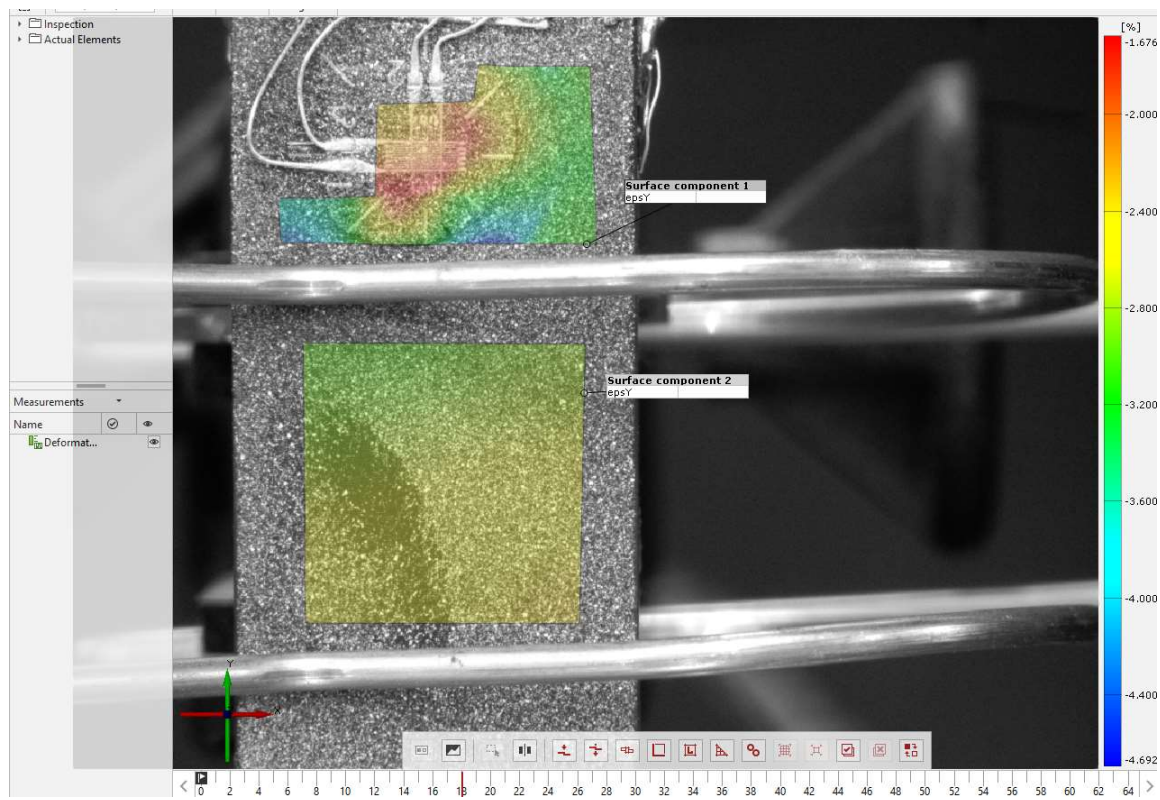


Figura 5.23 Estudi DIC de la proveta 1Z9 a 6 MPa

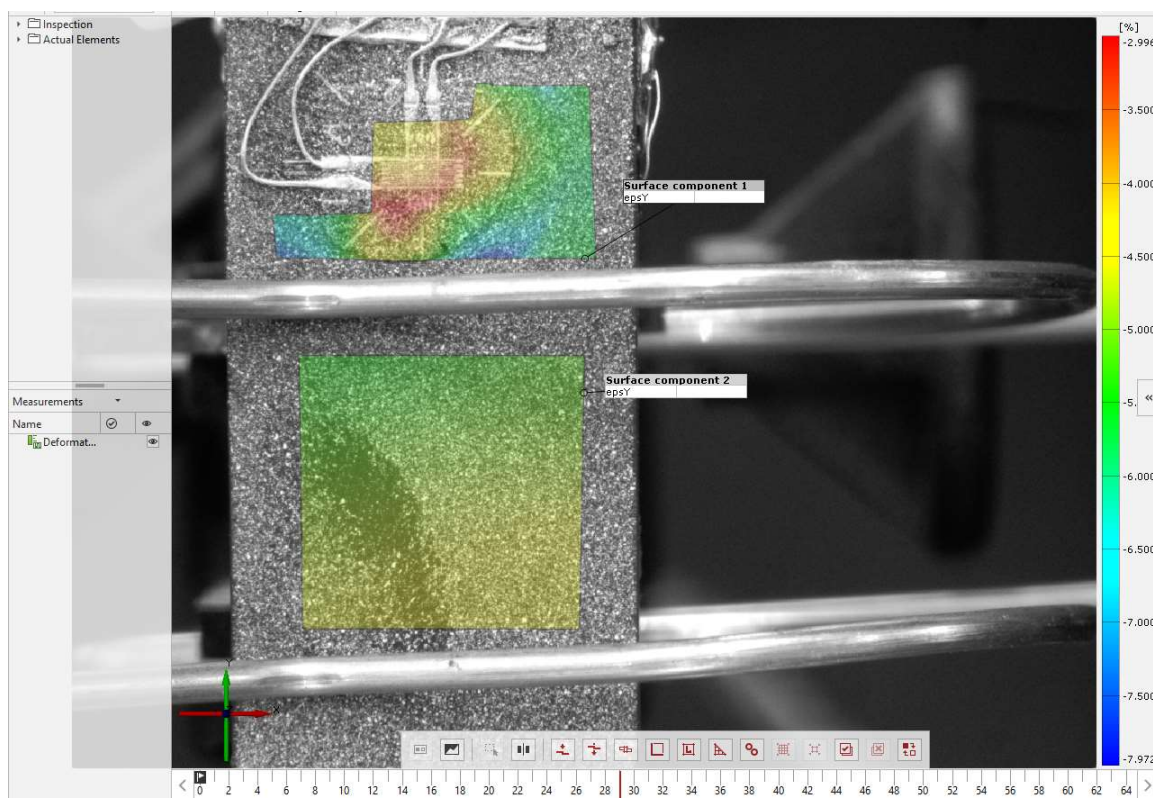


Figura 5.22 Estudi DIC de la proveta 1Z9 a 9 MPa

A les imatges anteriors es pot observar que, tot i ser punts diferents de la corba tensió-deformació, les deformacions a la galga són sempre considerablement més petites que a la resta de la peça. Això indica que les galgues no es deformen igual que les provetes, i per tant la lectura realitzada per aquestes no és correcte, ja que mesura unes deformacions menors a les que realment hi ha, causant així un efecte de rigidització sobre la proveta a la zona de lectura. Aquest fenomen es causat, en gran part, a que les galgues i les provetes no estan fabricades del mateix material, així que no poden tenir les mateixes deformacions.

Tot i que la galga crea un efecte de rigidització sobre la zona de lectura, amb el GOM es poden calcular les deformacions sense tenir en compte aquest fenomen. Per trobar les deformacions reals amb el DIC només cal escollir una superfície prou allunyada a la galga per així poder realitzar els càlculs pertinents sense cap problema. Es pot veure aquesta superfície a les anteriors imatges, ja que és la que es troba entre els dos braços del extensòmetre. En aquesta superfície, es pot observar que les deformacions són bastant regulars i no hi ha gaire variació, fet que indica que les deformacions a tota la proveta seran constants.

També és interessant veure que just per sota de la galga hi ha una zona de concentració de grans deformacions, l'origen del qual no és del tot conegut, però segurament sigui degut a un efecte de compensació de deformacions. La galga al ser més rígida que la resta de la peça no es deforma al mateix ritme que la proveta, fent que la zona de galga pateixi menors deformacions que la resta de la superfície de la proveta, però tota la proveta és deforma uniformement. Que tota la proveta es deformi uniformement implica que les zones del voltant de la galga hauran de compensar les seves menors deformacions, per aquest motiu es veuen deformacions majors al voltant de les galgues.

Un cop fet l'estudi amb la proveta Z9, es va fer amb provetes fabricades en altres direccions per comprovar si els resultats obtinguts anteriorment serien el mateixos o no. Les provetes que han estat utilitzades en les anàlisis han estat escollides algunes de manera selectiva. Les provetes han estat escollides per poder aprofitar l'estudi posteriorment, per poder analitzar altres variables. Les peces escollides han estat la 1X8, 1XY3, 1Y5, 1XZ2 i 1YZ2, ja que eren peces que donaven resultats estranys en l'estudi del mòdul de Young.

En les següents imatges podem trobar els resultats del càlculs amb el GOM, amb les mateixes condicions que amb la proveta 1Z9. A la memòria només es presenten les imatges de les provetes 1X8 i 1Y5 ja que són les direccions principals de fabricació i que es poden trobar a les Figura 5.24 i Figura 5.25 respectivament, les altres es troben a l'Annex B.

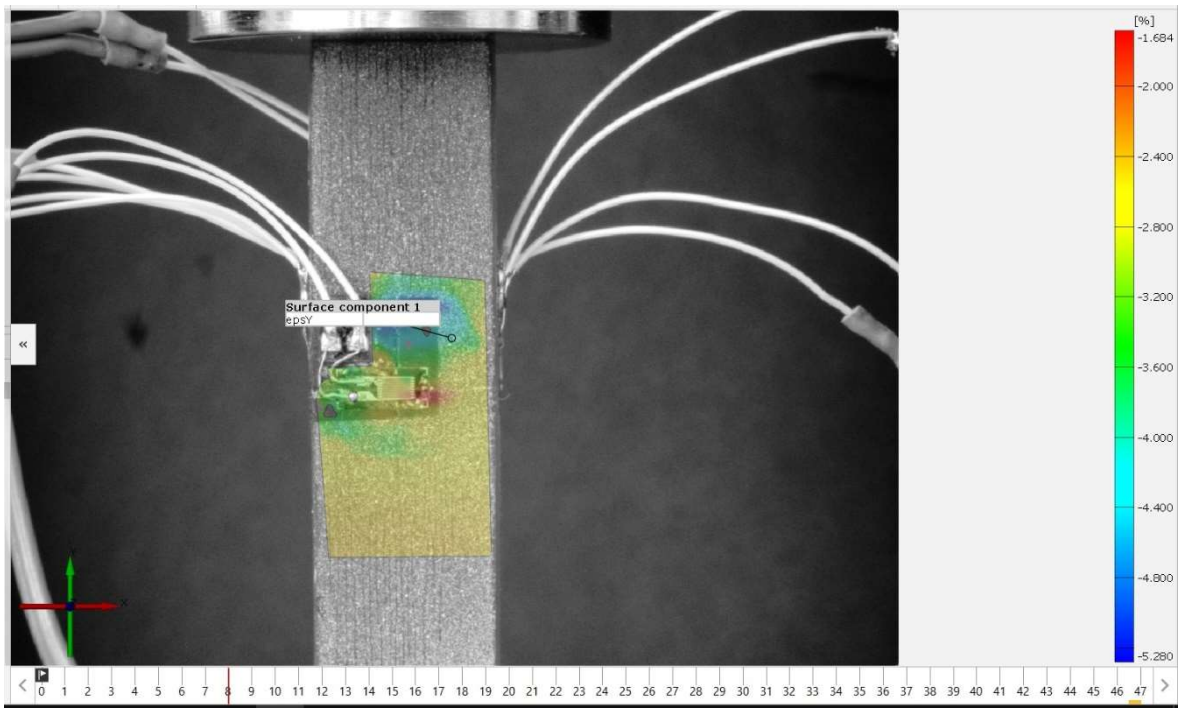


Figura 5.25 Estudi DIC de la proveta 1X8

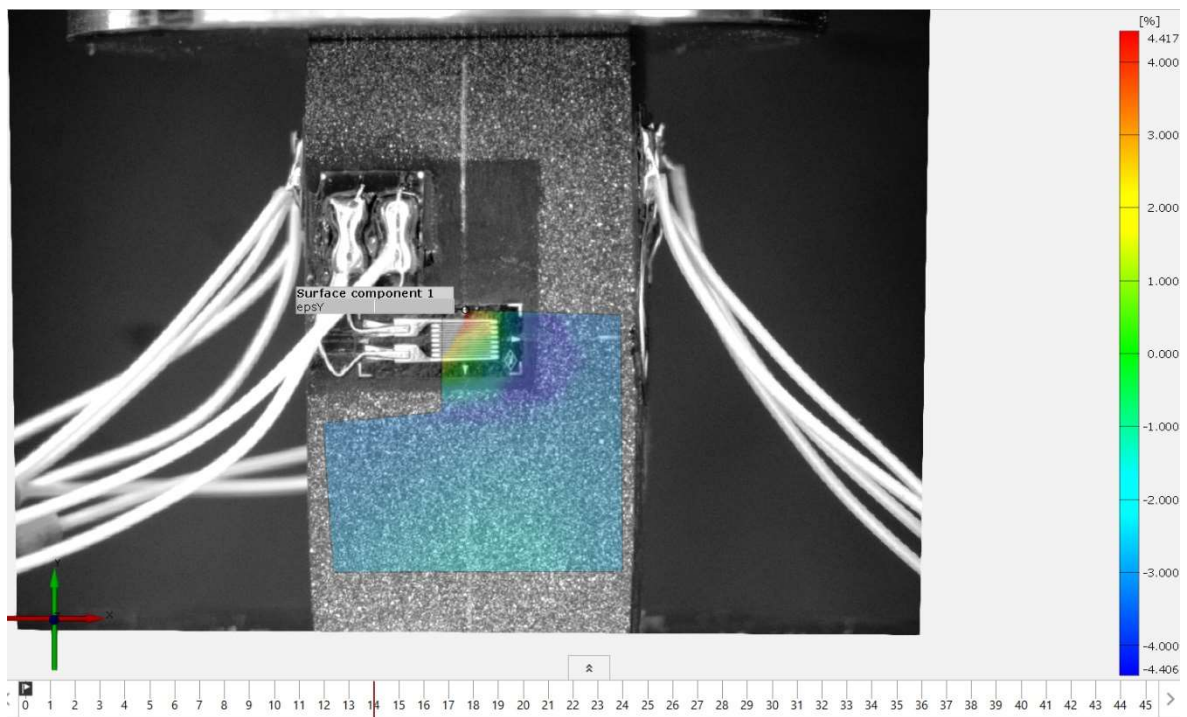


Figura 5.24 Estudi DIC de la proveta 1Y5

En ambdós casos, les menors deformacions també es troben concentrades al voltant de les galgues, igual que passa amb les altres 3 provetes. Que les deformacions més petites de totes les provetes, independentment de la direcció de fabricació, sempre estiguin concentrades a les galgues, confirma el que s'havia suposat abans, les galgues creen un efecte de rigidesa allà un mesuren, donant així unes deformacions més petites del que realment són. El fenomen de rigidesa afectar en el càlcul de les propietats mecàniques, ja que unes menors deformacions acabaran donant mòduls de Young majors, però ja es veurà en el apartat 6 com es tractaran aquest resultat i com es tindrà en compte aquest efecte.

5.3. Errors de mesura

Els errors són una part intrínseca de qualsevol de part de la nostra vida, i un estudi no és diferent, doncs fer totes les mesures sense cap tipus d'error es impossible. El tipus d'error més comú és el humà, tot i que les màquines també poden fallar. En aquest estudi s'han trobat més d'un problema i error amb les mesures fetes o amb els resultats obtinguts, ja que no sempre eren coherents amb la resta.

Els mòduls de Young trobats en el apartat 5.1, a la Taula 5.1, han estat analitzats prèviament, i s'ha observat que hi havia alguns valors que eren incoherents amb la resta. Alguns d'aquest valors estranys han estat causats per motius desconeguts, ja que fent diferents anàlisis sobre les respectives provetes no s'ha trobat cap indicador de que hi hagués algun error. Per altra banda sí que hi ha hagut provetes que amb una ràpida anàlisi ha esta fàcil veure quins eren els problemes.

5.3.1. Galgues i extensòmetre

A les galgues no s'han trobat errors identificables amb el mòdul de Young, ja que a tots els mòduls d'una mateixa direcció tenen valors semblants. L'únic error remarcable, en general, és el que s'ha comentat anteriorment, el efecte rigiditzador que influeix en la mesura correcta de les deformacions. Les galgues al ser una tècnica on el aparell de mesura està amb contacte directe amb la peça és més difícil trobar errors de lectura, això si els defectes que poden aparèixer poden ser per una mala connexió dels cables a les galgues o a la màquina que s'encarregava d'enregistrar la sortida d'aquestes.

L'extensòmetre, en canvi, sí que genera més resultats erronis que les galgues, o si més no incoherents amb la resta de resultats. Òbviament, els errors sorgits amb l'extensòmetre només es troben en les provetes XZ, YZ i Z ja que eren les provetes que disposaven d'ell. Els mòduls de les provetes 1XZ1, 1XZ2, 1YZ2, 1Z5, 1Z8 donen valors menors als de la mitja d'aquelles direccions, tant numèricament com gràficament. El perquè el extensòmetre ha donat aquest errors ja en cap d'aquestes peces hi ha fissures o estaven trencades abans de començar el

assaig. La raó principal, segurament, ha estat per una mala col·locació de la proveta respecte l'extensòmetre o un error de lectura en els instants inicials, fent així que el mòdul de Young disminueixi, ja que al principi és quan es prenen les mesures per determinar-lo.

En ambdós casos, aquest resultat erroni han estat eliminats posteriorment de les mitges, ja que han estat tractats com a errors estadístics puntuals, de manera que aquests errors no influeixin en els resultats finals.

5.3.2. DIC

Les provetes analitzades mitjançant el DIC han donat resultats bastant semblants entre les de igual direcció de fabricació, tot i així hi ha hagut certes provetes que han donat valors del mòdul e Young summament grans, com la 1Y5, així com de molt petits, com la 1X8.

Aquestes provetes que han donat resultats estranys, s'han analitzat novament amb el DIC per poder observar qualsevol comportament inusual. Tot i així, no ha estat possible trobar cap error en algunes de les provetes, com la 1XZ1, que el seu mòdul és bastant menor als altres e les provetes 1XZ, que com es veu a la Taula 5.1.

Per tal de veure a què era degut aquesta disminució del valor del mòdul de Young, es va realitzar una anàlisi amb el DIC, com en al apartat 5.2.1. En aquest cas, l'anàlisi amb el DIC no va donar cap resultat que pogués informar d'aquesta anomalia, com es pot observar a la Figura 5.26. Això va passar amb gran part de les provetes, com les 1Y5, 1X8, 1XY3 i 1YZ2, que eren les que tenien valors de mòduls molt diferents a les altres.

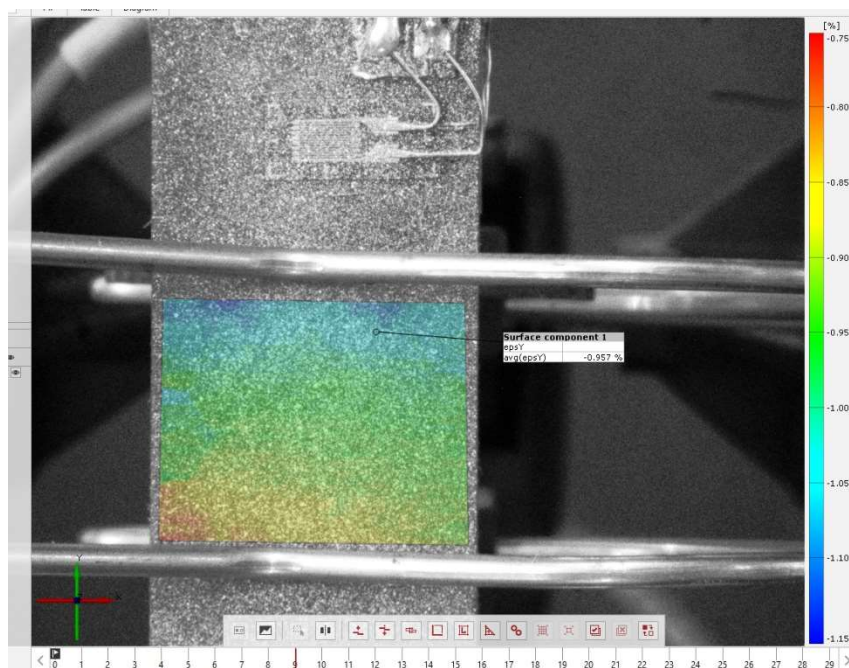


Figura 5.26 Estudi DIC de la proveta 1XZ1

Per una altra banda, en certes provetes el DIC sí que va ajudar per veure quins eren els defectes de les provetes, o quins errors de càlcul havia fet el propi DIC anteriorment. El errors que s'han trobat en els càlculs del DIC han estat deguts a una singularitat, les provetes estaven esquerdades abans de començar l'assaig.

Les provetes estaven trencades abans de començar el assaig, i d'això hi ha dos exemples molt clars, les provetes 1XZ3 i la 1Z5. En el cas de la 1XZ3, també es pot veure que la corba tensió-deformació, Figura 5.27, no té el comportament esperat, sinó que té increments del pendent esporàdics, enlloc de tenir un increment lineal.

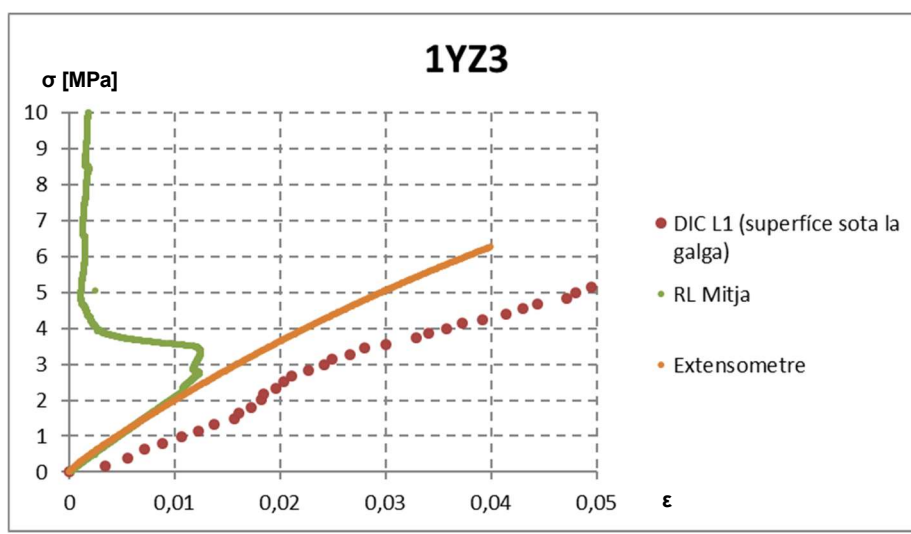


Figura 5.27 Corba tensió-deformació proveta 1YZ3

Les anàlisis fetes amb DIC en les provetes 1XZ3 i 1Z5, mostren clarament com totes les majors deformacions es concentren al voltant de les fissures, creant així zones de singularitat. Aquestes zones concentren majors deformacions que la resta de la proveta, de manera que la lectura fet pel DIC no és correcte, ja hi ha valors pic que no haurien de existir. Aquestes singularitats fan increment els valor total de les deformacions sobre aquella proveta, de manera fa disminuir el mòdul de Young d'aquella. En la Figura 5.28 i la Figura 5.29, es pot veure la distribució de deformacions de les provetes 1XZ3 i 1Z5 respectivament.

En aquest cas, la proveta 1XZ3 té moltes esquerdes, així que les majors deformacions es concentren en les esquerdes de major dimensió, casi obviant algun de més petita. Per contra, la proveta 1Z5 només té una gran esquerda.

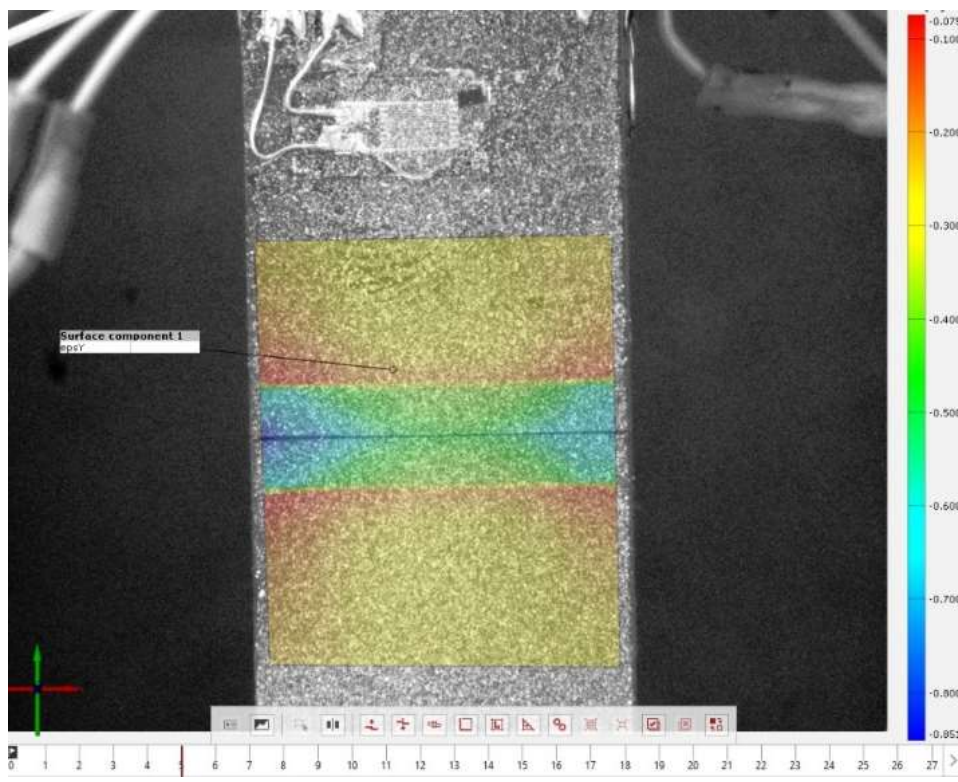


Figura 5.28 Estudi DIC de la proveta 1XZ3

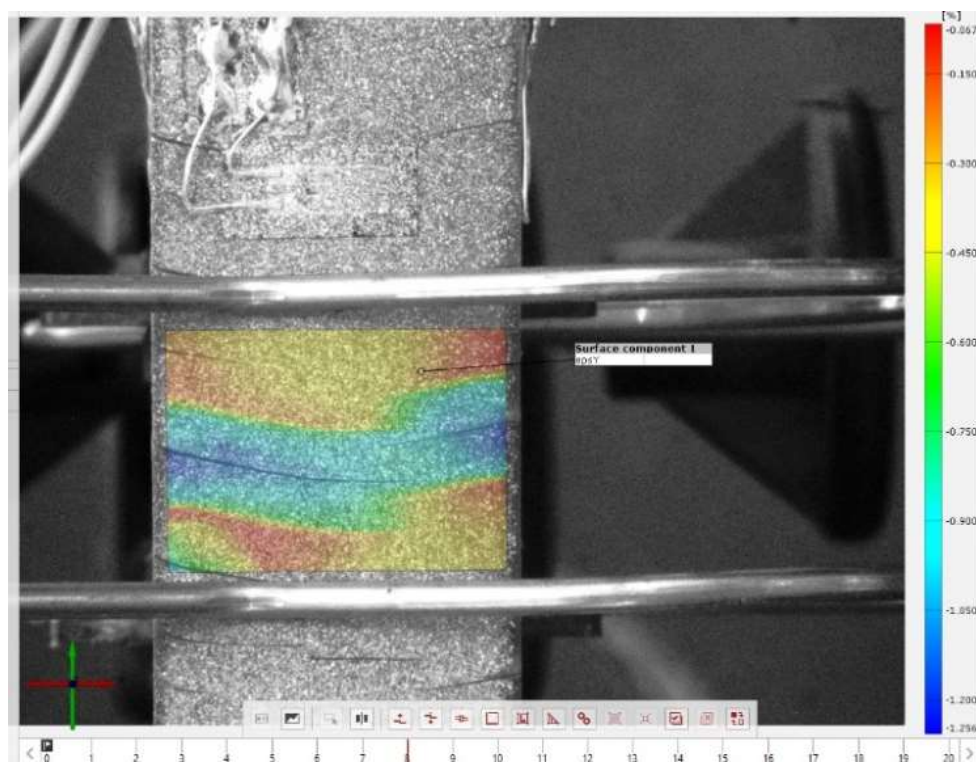


Figura 5.29 Estudi DIC de la proveta 1Z5

Aquest errors trobats amb el DIC no tenen cap tipus de solució, ja que a l'estar la proveta esquerdada abans de començar a assajar-la fa que aquest experiment sigui inútil, ja que no s'obtindran els resultats reals.

Per una altra banda, aquests valors erronis que s'han trobat amb el DIC seran ignorats a l'hora de trobar tots els valors de les propietats mecàniques, ja que clarament són anomalies estadístiques i no seria correcte tenir-les en compte en el càlculs, sobretot en els mòduls de Young.

6. Propietats mecàniques del material

Las propietats mecàniques d'un material són aquelles que descriuen com es comportarà sota l'efecte de forces de tracció, compressió i tracció, per aquest motiu és molt important poder-les definir correctament. Entre aquestes propietats es veurà el mòdul de Young i el coeficient de Poisson.

6.1. Mòdul de Young

El mòdul de Young és aquell que ens defineix la rigidesa d'un material elàstic, el que vol dir que quan més rígid sigui, més força, amb àrees iguals, s'haurà de fer per poder deformar-lo el mateix que un de menor rigidesa. El mòdul de Young és proporcional a la rigidesa, quan més gran és més rígid és la peça. Trobar el mòdul de Young aportarà una gran informació sobre el possible comportament del material estudiat.

El mòdul de Young ja s'ha calculat anteriorment al apartat 5.1, però no va ser explicat amb detall el seu càlcul. El mòdul de Young o E, es troba com a la relació entre la tensió que rep la proveta i la deformació que pateix, aquest es troba segons l'equació 6.1

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [MPa] \quad (6.1)$$

On la σ és la tensió que rep la proveta en MPa o N/mm², i la ε la deformació que pateix la proveta a causa d'aquesta tensió.

Al projecte, s'ha calculat el mòdul de dues metodologies diferents.

- La primera ha estat el càlcul numèric de les diferents tensions i deformacions obtingudes experimentalment, però al ser tan gran el numero de dades obtingudes no s'han trobat tots el mòduls i després s'ha fet una mitjana, sinó que es va optar per un altre mètode. Es va decidir fer una aproximació lineal entre dos punts de la part inicial de la corba tensió-deformació, obtenint així un únic valor del mòdul de Young per proveta.

Els punts escollits per a fer la regressió lineal no eren aleatoris, tots es troben entre el rang de 0,005 mm i 0,05 mm d'escurçament. Es va escollir aquest rang de formacions degut a que no hi havia el mateix nombre de dades en les tres tècniques utilitzades, d'aquesta manera, tot i la diferencia de dades, els resultats és podrien comparar ja que s'estaria estudiant els mateix tram de les cobres en les tres tècniques.

- La segona va ser l'opció de trobar la corba tensió-deformació de les tres tècniques en un sol gràfic i poder comparar-les així. El mòdul de Young és, també, el pendent

de la corba tensió-deformació, així que si es troba aquest corba, es pot calcular sense gaire esforç el mòdul de Young. Tot i la senzillesa d'aquesta opció, seguia existint el mateix problema que amb l'anterior, el nombre de dades recollides per cada una de les tècniques usades era diferent. Al tenir el mateix problema, es va optar per la mateixa solució, fer el gràfics entre 0 mm i 0,025 mm, i així poder trobar el pendent, i per tant el mòdul de Young.

6.1.1. Resultats sense filtrar

Un cop fets els càlculs pertinents es van obtenir un resultat inicials, als que es van anomenar sense filtrar. Aquests valors ja s'havien vist en el apartat 5.1.3, per a la comparativa de l'eficiència de les diverses tècniques. A la taula 6.1, podem observar novament aquests valors del mòdul de Young, però ara amb els resultats que es van considerar com a defectuosos remarcats.

Taula 6.1 Resultats del mòdul de Young sense filtrar

| Proveta | Mòdul de Young [MPa] | | | | | |
|-----------|----------------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| | Numèricament | | | Gràficament | | |
| | DIC | Galgues | Extensòmetre | DIC | Galgues | Extensòmetre |
| 1X1 | 325,1325625 | 382,4101974 | - | 394,88 | 377,56 | - |
| 1X2 | - | 543,3878395 | - | - | 493,58 | - |
| 1X3 | - | 490,0112568 | - | - | 567,29 | - |
| 1X4 | 217,5229967 | 352,216709 | - | 255,49 | 346,41 | - |
| 1X5 | 305,314868 | 402,494758 | - | 353,02 | 386,92 | - |
| 1X6 | - | 382,4730726 | - | - | 405,44 | - |
| 1X7 | 257,0066209 | 353,4714875 | - | 170,17 | 345,47 | - |
| 1X8 | 87,53313496 | 315,2442056 | - | 106,45 | 314,75 | - |
| 1X9 | 167,1115159 | 379,2270547 | - | 149,65 | 341,61 | - |
| 1X10 | 349,8905809 | 422,4404303 | - | 352,27 | 413,06 | - |
| 1X11 | 242,1241234 | 338,3321283 | - | 250,79 | 315,24 | - |
| Mitjana | 243,9545504 | 396,5190127 | - | 254,09 | 391,5754545 | - |
| Desviació | 86,86791777 | 67,46949803 | - | 106,2402809 | 77,80994556 | - |
| 1XY1 | 283,5356826 | 299,0153422 | - | 218,26 | 275,42 | - |
| 1XY2 | 437,4170281 | 484,3442506 | - | 353,81 | 421,02 | - |
| 1XY3 | 111,6672257 | 319,3625961 | - | 111,16 | 423,36 | - |
| 1XY4 | 387,9271887 | 405,2916312 | - | 273,11 | 326,13 | - |
| 1XY5 | 556,5656548 | 510,0287575 | - | 447,1 | 470,94 | - |
| 1XY6 | 300,7385069 | 306,9756809 | - | 225,87 | 304,58 | - |
| 1XY7 | 439,7150163 | 480,3789475 | - | 291,37 | 406,51 | - |
| Mitjana | 359,652329 | 400,7710295 | - | 274,3828571 | 375,4228571 | - |

| | | | | | | |
|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Desviació | 143,0576234 | 92,248497 | - | 106,9073112 | 72,93384187 | - |
| 1XZ1 | 274,5750741 | 406,9532565 | 236,7895907 | 335,47 | 374,36 | 196,3 |
| 1XZ2 | 174,3757193 | 343,3543496 | 216,1313024 | 211,76 | 322,25 | 187,34 |
| 1XZ3 | - | 362,0002418 | 313,2637555 | - | 322,39 | 328,48 |
| 1XZ4 | 270,2692612 | 436,4620502 | 300,7519934 | 264,62 | 315,36 | 405,25 |
| Mitjana | 239,7400182 | 387,1924745 | 266,7341605 | 270,6166667 | 333,59 | 279,3425 |
| Desviació | 56,64806868 | 42,32575802 | 47,53785396 | 62,07262709 | 27,37737143 | 105,8736815 |
| 1Y1 | - | 442,5720524 | - | - | 447,5 | - |
| 1Y2 | 727,0660414 | 370,531572 | - | 353,79 | 351,73 | - |
| 1Y3 | 507,2819524 | 636,8958204 | - | 663,17 | 617,7 | - |
| 1Y4 | 652,4577031 | 456,9955043 | - | 330,98 | 435,99 | - |
| 1Y5 | 1167,799348 | 600,024064 | - | 560,72 | 540,15 | - |
| 1Y6 | 475,70354 | 484,9666321 | - | 432,16 | 463,73 | - |
| 1Y7 | 363,8352804 | 486,5471821 | - | 307,65 | 439,51 | - |
| 1Y8 | 562,4458449 | 494,2435772 | - | 362,21 | 444,36 | - |
| 1Y9 | 405,1836803 | 505,6882249 | - | 262,46 | 461,47 | - |
| 1Y10 | 110,974676 | 290,6521694 | - | 107,14 | 274,88 | - |
| 1Y11 | 371,811325 | 336,6433461 | - | 307,78 | 340,05 | - |
| Mitjana | 534,4559392 | 464,1600132 | - | 368,806 | 437,9154545 | - |
| Desviació | 280,6209431 | 103,6868076 | - | 155,0761344 | 93,65969105 | - |
| 1YZ1 | 373,75423 | 395,803739 | 318,1941445 | 364,04 | 392,57 | 316,05 |
| 1YZ2 | 247,9565388 | 417,4266739 | 124,5837968 | 239,99 | 340,75 | 102,77 |
| 1YZ3 | 109,0854676 | 209,1279431 | 242,4121005 | 80,517 | 230,12 | 195,53 |
| 1YZ4 | 184,3245427 | 332,9507549 | 329,4644711 | 177,69 | 291,2 | 322,12 |
| 1YZ5 | 306,6360623 | 424,0582299 | 251,7896097 | 242,64 | 386,55 | 226,01 |
| 1YZ6 | 171,7979708 | 375,1567904 | 253,0403058 | 165,01 | 325,81 | 234,95 |
| Mitjana | 232,2591354 | 359,0873552 | 253,2474047 | 211,6478333 | 327,8333333 | 232,905 |
| Desviació | 96,87541232 | 80,50087875 | 73,07669408 | 95,40511796 | 61,15441723 | 81,55506011 |
| 1Z1 | 194,9213291 | 465,3601961 | 528,3892678 | 193,04 | 405,17 | 346,28 |
| 1Z2 | 226,7289806 | 330,5611841 | 262,358097 | 180 | 326,73 | 181,72 |
| 1Z3 | 246,2020048 | 605,6563939 | 538,580624 | 234,96 | 513,66 | 364,09 |
| 1Z4 | 262,9325756 | 514,136782 | 358,390247 | 358,89 | 518,36 | 319 |
| 1Z5 | 245,3948484 | 259,841072 | 166,1346763 | 219,49 | 287,91 | 178,28 |
| 1Z6 | 218,0493613 | 423,030075 | 540,3347587 | 164,41 | 448,94 | 311,63 |
| 1Z7 | 486,9774752 | 480,6414298 | 353,3149299 | 414,19 | 485,64 | 329,15 |
| 1Z8 | 253,9823026 | 414,1683928 | 162,765643 | 250,05 | 383,32 | 152,02 |
| 1Z9 | 412,4123173 | 386,3425012 | 263,8796939 | 271,34 | 361,86 | 250,65 |
| Mitjana | 283,0667994 | 431,082003 | 352,6831042 | 254,0411111 | 414,6211111 | 270,3133333 |
| Desviació | 98,43154449 | 101,726265 | 153,1299565 | 83,47975989 | 82,48128446 | 81,24275506 |

En aquesta taula, es pot observar clarament que els valors marcats en groc són anòmals, ja que, comparats amb la mitjana de les provetes en aquella direcció, són molt diferents. També es pot observar que les desviacions mitjanes són bastant grans, el què indica que hi ha una gran variabilitat en els valors obtinguts del mòdul de Young. Tot i que en aquesta taula tenim tots els valors calculats, és difícil poder apreciar amb claredat les diferències que hi ha entre els mòduls en les direccions de fabricació. Per tal de poder compara els resultats dels mòduls obtinguts, es va fer la Taula, una taula resum amb només les mitjanes de cada direcció de fabricació.

Taula 6.2 Resum resultats del mòduls de Young sense filtrar

| Resultats Mitjanes [MPa] | | | | | | |
|---------------------------------|---------------------|----------------|---------------------|--------------------|----------------|---------------------|
| | Numèricament | | | Gràficament | | |
| Proveta | DIC | Galgues | Extensòmetre | DIC | Galgues | Extensòmetre |
| X | 243,9545504 | 396,5190127 | - | 254,09 | 391,58 | - |
| XY | 359,652329 | 400,7710295 | - | 274,3829 | 375,42 | - |
| XZ | 239,7400182 | 387,1924745 | 266,7341605 | 270,6167 | 333,59 | 279,3425 |
| Y | 534,4559392 | 464,1600132 | - | 368,806 | 437,92 | - |
| YZ | 232,2591354 | 359,0873552 | 253,2474047 | 211,6478 | 327,83 | 232,905 |
| Z | 283,0667994 | 431,082003 | 352,6831042 | 254,0411 | 414,62 | 270,3133333 |

A aquesta Taula 6.2, tot i encara no tenir filtrats els resultats, ja es pot observar que hi ha una diferència important entre els valors obtinguts amb les galgues que amb les altres dues tècniques. També es pot veure que les desviacions obtingudes sobre les mitjanes de provetes és bastant gran, el què indica que segurament el material sigui anisòtrop.

Aquest resultats sense filtrar ja ofereixen molta informació, però tot i així l'existència de valors erronis fa que no siguin del tot correctes. Per aquest motiu es va fer una anàlisi dels valors, però sense tenir en compte els valors anòmals.

6.1.2. Resultats filtrats

Els primer resultats obtinguts, tot i ser bastant aclaridors i fiables, necessitaven d'un filtrat de valors anòmals. A la Taula 6.3, es troben els valors mostrats anteriorment, però aquest cop sense cap anomalia.

Taula 6.3 Resultats del mòdul de Young filtrats

| Proveta | Mòdul de Young [MPa] | | | | | |
|------------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | Numèricament | | | Gràficament | | |
| | DIC | Galgues | Extensòmetre | DIC | Galgues | Extensòmetre |
| 1X1 | 325,1325625 | 382,4101974 | - | 394,88 | 377,56 | - |
| 1X2 | - | 543,3878395 | - | - | 493,58 | - |
| 1X3 | - | 490,0112568 | - | - | 567,29 | - |
| 1X4 | 217,5229967 | 352,216709 | - | 255,49 | 346,41 | - |
| 1X5 | 305,314868 | 402,494758 | - | 353,02 | 386,92 | - |
| 1X6 | - | 382,4730726 | - | - | 405,44 | - |
| 1X7 | 257,0066209 | 353,4714875 | - | 170,17 | 345,47 | - |
| 1X8 | - | 315,2442056 | - | - | 314,75 | - |
| 1X9 | 167,1115159 | 379,2270547 | - | 149,65 | 341,61 | - |
| 1X10 | 349,8905809 | 422,4404303 | - | 352,27 | 413,06 | - |
| 1X11 | 242,1241234 | 338,3321283 | - | 250,79 | 315,24 | - |
| Mitjana | 266,3004669 | 396,5190127 | - | 275,1814286 | 391,5754545 | - |
| Desviació | 64,36770267 | 67,46949803 | - | 94,9539124 | 77,80994556 | - |
| 1XY1 | 283,5356826 | 299,0153422 | - | 218,26 | 275,42 | - |
| 1XY2 | 437,4170281 | 484,3442506 | - | 353,81 | 421,02 | - |
| 1XY3 | - | 319,3625961 | - | - | 423,36 | - |
| 1XY4 | 387,9271887 | 405,2916312 | - | 273,11 | 326,13 | - |
| 1XY5 | 556,5656548 | 510,0287575 | - | 447,1 | 470,94 | - |
| 1XY6 | 300,7385069 | 306,9756809 | - | 225,87 | 304,58 | - |
| 1XY7 | 439,7150163 | 480,3789475 | - | 291,37 | 406,51 | - |
| Mitjana | 400,9831796 | 400,7710295 | - | 301,5866667 | 375,4228571 | - |
| Desviació | 101,041432 | 92,248497 | - | 86,59452007 | 72,93384187 | - |
| 1XZ1 | 274,5750741 | 406,9532565 | 236,7895907 | 335,47 | 374,36 | - |
| 1XZ2 | 174,3757193 | 343,3543496 | 216,1313024 | 211,76 | 322,25 | - |
| 1XZ3 | - | 362,0002418 | 313,2637555 | - | 322,39 | 328,48 |
| 1XZ4 | 270,2692612 | 436,4620502 | 300,7519934 | 264,62 | 315,36 | 405,25 |
| Mitjana | 239,7400182 | 387,1924745 | 266,7341605 | 270,6166667 | 333,59 | 366,865 |
| Desviació | 56,64806868 | 42,32575802 | 47,53785396 | 62,07262709 | 27,37737143 | 54,28458759 |
| 1Y1 | - | 442,5720524 | - | - | 447,5 | - |
| 1Y2 | 727,0660414 | 370,531572 | - | 353,79 | 351,73 | - |
| 1Y3 | 507,2819524 | 636,8958204 | - | 663,17 | 617,7 | - |
| 1Y4 | 652,4577031 | 456,9955043 | - | 330,98 | 435,99 | - |
| 1Y5 | - | 600,024064 | - | 560,72 | 540,15 | - |
| 1Y6 | 475,70354 | 484,9666321 | - | 432,16 | 463,73 | - |
| 1Y7 | 363,8352804 | 486,5471821 | - | 307,65 | 439,51 | - |
| 1Y8 | 562,4458449 | 494,2435772 | - | 362,21 | 444,36 | - |
| 1Y9 | 405,1836803 | 505,6882249 | - | 262,46 | 461,47 | - |
| 1Y10 | - | 290,6521694 | - | - | 274,88 | - |

| | | | | | | |
|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1Y11 | 371,811325 | 336,6433461 | - | 307,78 | 340,05 | - |
| Mitjana | 508,2231709 | 464,1600132 | - | 397,88 | 437,9154545 | - |
| Desviació | 280,6209431 | 103,6868076 | | 132,457868 | 93,65969105 | |
| 1YZ1 | 373,75423 | 395,803739 | 318,1941445 | 364,04 | 392,57 | 316,05 |
| 1YZ2 | 247,9565388 | 417,4266739 | - | 239,99 | 340,75 | - |
| 1YZ3 | 109,0854676 | 209,1279431 | 242,4121005 | 80,517 | 230,12 | 195,53 |
| 1YZ4 | 184,3245427 | 332,9507549 | 329,4644711 | 177,69 | 291,2 | 322,12 |
| 1YZ5 | 306,6360623 | 424,0582299 | 251,7896097 | 242,64 | 386,55 | 226,01 |
| 1YZ6 | 171,7979708 | 375,1567904 | 253,0403058 | 165,01 | 325,81 | 234,95 |
| Mitjana | 232,2591354 | 359,0873552 | 278,9801263 | 211,6478333 | 327,8333333 | 258,932 |
| Desviació | 96,87541232 | 80,50087875 | 73,07669408 | 95,40511796 | 61,15441723 | 81,55506011 |
| 1Z1 | 194,9213291 | 465,3601961 | 528,3892678 | 193,04 | 405,17 | 346,28 |
| 1Z2 | 226,7289806 | 330,5611841 | 262,358097 | 180 | 326,73 | 181,72 |
| 1Z3 | 246,2020048 | 605,6563939 | 538,580624 | 234,96 | 513,66 | 364,09 |
| 1Z4 | 262,9325756 | 514,136782 | 358,390247 | 358,89 | 518,36 | 319 |
| 1Z5 | 245,3948484 | 259,841072 | - | 219,49 | 287,91 | - |
| 1Z6 | 218,0493613 | 423,030075 | 540,3347587 | 164,41 | 448,94 | 311,63 |
| 1Z7 | 486,9774752 | 480,6414298 | 353,3149299 | 414,19 | 485,64 | 329,15 |
| 1Z8 | 253,9823026 | 414,1683928 | - | 250,05 | 383,32 | - |
| 1Z9 | 412,4123173 | 386,3425012 | 263,8796939 | 271,34 | 361,86 | 250,65 |
| Mitjana | 283,0667994 | 431,082003 | 406,4639455 | 254,0411111 | 414,6211111 | 300,36 |
| Desviació | 98,43154449 | 101,726265 | 126,8034295 | 83,47975989 | 82,48128446 | 81,24275506 |

A la taula, es pot observar que tot i que no hi ha gaires canvis en les mitjanes de les direccions de fabricació amb els resultats sense filtrar, doncs tampoc hi havia gaires valors anòmals, però sí que hi ha una reducció de les desviacions. Les desviacions anteriorment eren en gran majoria superiors a 100, però amb els canvis realitzats poques superen aquest valor, del que podem deduir que sense els valors anòmals s'ha disminuït la variació en els mòduls de Young de les provetes.

Igual que a l'apartat anterior, s'ha confeccionat la Taula 6.4, una taula que recull totes les mitjanes del mòduls de Young segons la direcció de fabricació. Gràcies a aquesta taula es pot estudiar amb més calma i deteniment les diferències entre els mòduls de Young de les diferents direccions, doncs el que ens interessa saber és quant val el mòdul en cada direcció (X, Y, Z) i si són molt diferents entre ells.

Si els valors obtinguts de les mitjanes dels mòduls de Young són massa diferents entre ells significarà que el material amb el que s'ha fet l'experiment és anisòtrop, és a dir, tindrà diferents propietats segons la direcció on es miri.

Taula 6.4 Resum resultats del mòduls de Young filtrats

| Proveta | Resultats Mitjanes [MPa] | | | | | |
|-----------|--------------------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| | Numèricament | | | Gràficament | | |
| | DIC | Galgues | Extensòmetre | DIC | Galgues | Extensòmetre |
| X | 266,3004669 | 396,5190127 | - | 275,1814286 | 391,5754545 | - |
| XY | 400,9831796 | 400,7710295 | - | 301,5866667 | 375,4228571 | - |
| XZ | 239,7400182 | 387,1924745 | 266,7341605 | 270,6166667 | 333,59 | 366,865 |
| Y | 508,2231709 | 464,1600132 | - | 397,88 | 437,9154545 | - |
| YZ | 232,2591354 | 359,0873552 | 278,9801263 | 397,88 | 437,9154545 | - |
| Z | 283,0667994 | 431,082003 | 406,4639455 | 254,0411111 | 414,6211111 | 300,36 |

L'eliminació dels valors anòmals ha fet que els resultats dels mòduls de Young del extensòmetre i el DIC s'assemblin encara més que abans del filtrats. Amb aquest filtrats els valors del mòduls calculats amb les galgues no ha canviat, ja que no s'havia trobat cap valor estrany entre ells.

Amb aquest resultats també es veu que els mòduls calculats gràficament són més semblants entre ells, si es miren les diferents direccions de fabricació, que els trobats numèricament, per tant es pot assumir que els mòduls trobats gràficament tenen una menor dispersió i variabilitat que els calculats numèricament. Tot i aquesta petita diferència, els mòduls de Young trobats amb les tres tècniques s'assemblen molt entre les dues metodologies de càlcul, el que significarà que qualsevols de les metodologies pot ser vàlida.

Tot i que, tal i com s'esperava, els valors obtinguts amb les galgues són molt superior als altres degut a la singularitat ja explicada, sembla que els valors de les direccions principals són molt semblant, però no sabem si el suficient com per que el material sigui isotròpic o pel contrari anisòtrop. Tot i que té més possibilitats que sigui anisòtrop, donat que les diferències entre els mòduls de les direccions principals no pot superar el 5% per a que es compleixi aquesta condició [8].

6.1.3. Anisotropia del material

Els resultats filtrats que s'acaben d'obtenir no acaben de deixar clar si el material serà realment anisòtrop o no, així que es farà un estudi més exhaustiu del mòduls de Young de les direccions principals (X, Y, Z) per veure si les diferències entre els mòduls difereix més d'un 5% o no. Aquest 5% és el queda generalment establert per decidir si dues propietats són prou semblants o no [8].

El estudi s'ha fet diferenciant per la tècnica utilitzada per trobar les deformacions, sense contar amb el extensòmetre que només es troba en les provetes Z, i també per la metodologia de càlcul emprada, obtenint així els resultats mostrats en la Taula 6.5.

Taula 6.5 Variacions dels mòduls de Young de les direccions principals

| | | X (MPa) | Y (MPa) | Z (MPa) | Variació X-Y (%) | Variació X-Z (%) | Variació Y-Z (%) |
|--------------|-------|----------|----------|----------|------------------|------------------|------------------|
| Numèricament | DIC | 266,3005 | 508,223 | 283,0668 | 47,6016675 | 5,92310105 | 44,3026576 |
| | Galga | 396,519 | 464,16 | 431,082 | 14,5727763 | 8,01772982 | 7,12642392 |
| Gràficament | DIC | 275,182 | 397,88 | 254,041 | 30,8380847 | 8,32161274 | 36,1513242 |
| | Galga | 391,5755 | 437,9155 | 414,621 | 10,5819513 | 5,55824485 | 5,31937003 |

Els valors obtinguts a la Taula 6.5, mostren que les variacions entre les direccions calculades amb el DIC són molt superior al 5% màxim. Tant la variació entre X-Y i Y-Z supera el 40% amb els valors calculats numèricament, i el 30% amb els calculats gràficament. En canvi, la variació XZ si que s'apropa al 5%, però igualment segueix sent superior.

Per una altra banda, les variacions entre els mòduls de Young trobats amb les galgues donen reculats molt prometedors, ja que en tots el casos la variació entre direccions no arriba a superar el 15%. Que la variació màxima sigui de 14,57% indica que no hi ha una gran diferència entre les propietats mecàniques de les direccions principals, tot i així que la variació mínima sigui del 5,31%, superior al 5%, fa que el material no es pugui considerar coma isotròpic.

En aquest apartat s'ha vist que el material és anisòtrop, però el que més pot sorprendre és que les galgues, tot i tenir errors de mesura deguts a la singularitat pròpia de rigidització, són les que han donat menor variació de les propietats mecàniques del material. Aquest fet fa pensar que, tot i la singularitat, les galgues són les recullen les dades de manera més efectiva i eficient, per tant s'hauria de buscar algun mètode per tal de eliminar el efecte de la glaga sense perdre la constància de la mesura.

6.2. Coeficient de Poisson

El coeficient de Poisson, magnitud sense unitats, indica quina relació hi haurà entre les deformacions longitudinals de les transversals, és a dir, quantifica quan s'estirarà o escurçarà una secció en les direccions perpendiculars a on és aplicada la força, en relació amb el que s'acurçarà o estirarà la direcció on s'aplica la força.

El coeficient de Poisson es pot calcular com la relació entre la deformació transversal i la deformació longitudinal d'una cara de la peça, tal i com indica l'equació 6.2.

$$v = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} \quad (6.2)$$

En aquest projecte, s'ha volgut calcular el coeficient de Poisson de totes les provetes, així poder trobar els diferents coeficients per a totes les direccions de fabricació principals (X, Y, Z). En aquest cas, només s'han trobat els coeficients de Poisson amb les deformacions mesurades amb les galgues i el DIC, ja que l'extensòmetre no permet el càlcul del coeficient de Poisson, degut a que només pot mesurar la deformació longitudinal.

De les galgues s'han trobat dos coeficients, el les dues cares diferents, on hi havia la roseta i on hi havia la galga transversal. Per trobar les deformacions de les galgues, ja s'ha explicat anteriorment, es va fer una mitja entre les deformacions de les cares oposades, ja que es considerava que serien igual o molt semblants i no valia la pena diferenciar-les, per aquest motiu només es calculen 2 coeficients, perquè només tenim deformacions transversal i una de longitudinal. Les deformacions transversals són ε_T i ε_{RT} , mentre que la deformació longitudinal és ε_{RL} , les qual ja es van explicar com és trobaven.

Els dos coeficients de Poisson que es van trobar amb les deformacions de les galgues van ser:

- El coeficient RT, aquell que es troba dividint ε_{RT} entre ε_{RL} , és a dir aquell coeficient de la cara on es troba la roseta, que es calcula segons l'equació 6.3.

$$v_{RT} = \frac{\varepsilon_{RT}}{\varepsilon_{RL}} \quad (6.3)$$

- El coeficient T, aquell que es troba dividint ε_T entre ε_{RL} , és a dir aquell coeficient de la cara on es troba la galga transversal, que es calcula segons l'equació 6.4.

$$v_T = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_{RL}} \quad (6.4)$$

Per una altra banda, amb el DIC només s'ha trobat un coeficient de Poisson, el que relaciona les deformacions transversals amb les longitudinals trobades amb el DIC. Aquestes deformacions s'anomenen T1 i L1, com ja s'havia explicat amb anterioritat. Però tot i que només s'ha de trobar un únic coeficient, s'ha de anar amb compte perquè les deformacions transversals no sempre han estat mesurades a la mateixa cara, és a dir, dintre les provetes amb la mateixa direcció de fabricació la cara on mesuraven les deformacions transversals podia variar de direcció de fabricació, per exemple en les provetes X hi ha algunes on la ε_T està calculada en una direcció Y o Z. Aquest fet que implica que a les mitjanes del coeficient de Poisson del DIC s'haurà d'identificar la direcció de fabricació on s'ha mesurat la deformació transversal. Igualment el coeficient de Poisson es calcularà com a l'equació 6.5.

$$v_{DIC} = \frac{\varepsilon_{T1}}{\varepsilon_{L1}} \quad (6.5)$$

6.2.1. Resultats inicials

Un cop fet tots els càlculs amb totes les provetes, els resultats trobats es veuen a la Taula 6.6, on també hi ha especificada la direcció de fabricació de la cara on s'ha mesurat la deformació transversal del DIC. Igual que amb el mòdul de Young, trobarem que hi ha resultats que donen valors estranys, i que posteriorment seran filtrats.

Taula 6.6 Resultats dels coeficients de Poisson inicials

| Coeficient de Poisson | | | | |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| Proveta | Poisson RT | Poisson T | Poisson DIC | Direcció Fabricació |
| 1X1 | -0,17862815 | 0,430222385 | 1,820271114 | Z |
| 1X2 | 0,508257787 | 0,300229882 | - | - |
| 1X3 | 0,507823227 | 1,027352865 | - | - |
| 1X4 | 1,222131451 | 0,376885325 | 0,513971415 | Z |
| 1X5 | 1,139965937 | 0,400066798 | 0,547736145 | Z |
| 1X6 | 0,453979807 | - | - | - |
| 1X7 | 0,504226961 | 0,275259992 | 0,605423605 | Z |
| 1X8 | 0,574940435 | 0,296590115 | 0,527987424 | Z |
| 1X9 | 0,547025197 | 0,41478655 | 0,544319549 | Z |
| 1X10 | 0,735599325 | 0,366654197 | 0,548587836 | Y |
| 1X11 | 0,605271695 | 0,466022205 | 0,51610088 | Y |
| Mitjana Y | 0,601872152 | 0,435407031 | 0,532344358 | |
| Mitjana Z | 0,601872152 | 0,435407031 | 0,759951542 | |
| 1XY1 | 0,910981568 | 0,474044009 | 0,521125487 | XY |
| 1XY2 | 0,59227421 | 0,403959743 | 0,475074637 | Z |
| 1XY3 | 0,55704195 | 0,35012673 | 0,553667309 | XY |
| 1XY4 | 0,542149962 | 0,339688302 | 0,512647927 | XY |
| 1XY5 | 0,515647768 | 0,353976302 | 0,508959592 | Z |
| 1XY6 | 0,518879415 | 0,309185367 | 0,519764739 | XY |
| 1XY7 | 0,554440003 | 0,389494117 | 0,51610088 | XY |
| Mitjana XY | 0,598773554 | 0,37435351 | 0,524661268 | |
| Mitjana Z | 0,598773554 | 0,37435351 | 0,492017114 | |
| 1XZ1 | 0,51747889 | 0,401225686 | 0,53882286 | Y |
| 1XZ2 | 0,550949365 | 0,440975858 | 0,490414529 | Y |
| 1XZ3 | 0,572545675 | 0,446983759 | - | Z |
| 1XZ4 | 0,557867572 | 0,451025886 | 0,517444649 | Z |
| Mitjana y | 0,549710376 | 0,435052797 | 0,514618694 | |
| Mitjana Z | 0,549710376 | 0,435052797 | 0,517444649 | |
| 1Y1 | 0,572938004 | 0,300393119 | 0,635837285 | Z |

| | | | | |
|-----------|-------------|-------------|-------------|---|
| 1Y2 | 0,585191225 | 0,350828723 | 0,547655904 | Z |
| 1Y3 | 0,593013445 | 0,377705131 | 0,528566155 | Z |
| 1Y4 | 0,550180789 | 0,309962338 | 0,55444794 | Z |
| 1Y5 | 0,532959542 | 0,211633312 | 0,501884042 | Z |
| 1Y6 | 0,566355035 | 0,313195303 | 0,519060203 | Z |
| 1Y7 | 0,575806129 | 0,398442184 | 0,499961411 | Z |
| 1Y8 | 0,559453605 | 0,435787205 | 0,550084482 | Z |
| 1Y9 | 0,616119132 | 0,448082922 | 0,510341258 | Z |
| 1Y10 | 0,633691831 | 0,154155939 | 0,578376924 | Y |
| 1Y11 | 0,571591725 | 0,351744449 | 0,548269025 | Y |
| Mitjana Y | 0,577936406 | 0,331993693 | 0,563322974 | |
| Mitjana Z | 0,577936406 | 0,331993693 | 0,538648742 | |
| 1YZ1 | 0,507922118 | 0,357095421 | 0,538323503 | Z |
| 1YZ2 | 0,548780616 | 0,429065415 | 0,530867798 | Z |
| 1YZ3 | 0,57489417 | 0,406450047 | 0,590886925 | Y |
| 1YZ4 | 0,553692877 | 0,437895236 | 0,500458008 | Y |
| 1YZ5 | 0,539205354 | 0,411323703 | 0,488259634 | - |
| 1YZ6 | 0,590702138 | 0,471624772 | 0,488030418 | - |
| Mitjana Y | 0,552532879 | 0,418909099 | 0,516908746 | |
| Mitjana Z | 0,552532879 | 0,418909099 | 0,511370338 | |
| 1Z1 | 0,440887804 | 0,338425781 | 0,487719026 | - |
| 1Z2 | 0,528875465 | 0,352584439 | 0,506500743 | - |
| 1Z3 | 0,494968992 | 0,385344228 | 0,534695742 | - |
| 1Z4 | 0,458840485 | 0,334100486 | 0,542000885 | - |
| 1Z5 | 0,526610896 | 0,327394235 | 0,574714053 | - |
| 1Z6 | 0,48747087 | 0,40138574 | 0,512008007 | - |
| 1Z7 | 0,543938796 | 0,411617964 | 0,521812759 | - |
| 1Z8 | 0,58006605 | 0,416244686 | 0,53770959 | - |
| 1Z9 | 0,547042382 | 0,390422285 | 0,499253665 | - |
| Mitjana Z | 0,512077971 | 0,37305776 | 0,524046052 | |

Com es pot veure a la taula, els coeficient amb valors estranys s'han marcat amb groc per així ser més fàcil la identificació d'aquests. També cal destacar que totes les provetes, excepte les Z, sempre tenen algunes de les cares on s'ha calculat la deformació transversal del DIC en la direcció Z, i que totes aquelles que no especifica la direcció de fabricació a la taula és perquè no va ser possible trobar quina era.

Un fet important a destacar és que els Poissons trobats pel DIC i els Poissons RT trobats amb les galgues donen valors quasi idèntics, el que vol dir que tots dos sistemes de mesura són vàlids per al càlcul del coeficient de Poisson.

A la taula següent, la Taula 6.7, es troben els resultats agrupats només amb les mitjanes de tots els coeficients de Poisson.

Taula 6.7 Resum resultats dels coeficients de Poisson inicials

| Resultats Mitjanes | | | | | |
|---------------------------|-------------------|------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| Proveta | Poisson RT | Poisson T | Poisson DIC Y | Poisson DIC XY | Poisson DIC Z |
| X | 0,601872152 | 0,435407031 | 0,532344358 | - | 0,759951542 |
| XY | 0,598773554 | 0,37435351 | - | 0,524661268 | 0,492017114 |
| XZ | 0,549710376 | 0,435052797 | 0,514618694 | - | 0,517444649 |
| Y | 0,577936406 | 0,331993693 | 0,563322974 | - | 0,538648742 |
| YZ | 0,552532879 | 0,418909099 | 0,516908746 | - | 0,511370338 |
| Z | 0,512077971 | 0,37305776 | - | - | 0,524046052 |

Cal destacar que quasi tots el coeficients donen valors superiors 0,5 que és límit per considerar a un material d'elàstic i isotrop. Un cop vistos aquest resultats es va procedir a eliminar del càlculs els coeficients amb valors anòmals, per així realitzar un segon estudi.

6.2.2. Resultats filtrats

Els resultats anterior tenien alguns valors anòmals, així que per acabar de garantir la valia dels càlculs fets, en tots els coeficients de Poisson, es van eliminar i obtenir així unes noves mitjanes. Aquestes noves mitjanes es troben a la Taula 6.8, on també hi ha diferenciats els coeficients de Poisson del DIC segons l direcció de fabricació de la cara de mesura.

Taula 6.8 Resum resultats dels coeficients de Poisson filtrats

| Resultats Mitjanes | | | | | |
|---------------------------|-------------------|------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| Proveta | Poisson RT | Poisson T | Poisson DIC Y | Poisson DIC XY | Poisson DIC Z |
| X | 0,554640554 | 0,369635272 | 0,532344358 | - | 0,547887627 |
| XY | 0,546738885 | 0,37435351 | - | 0,517409758 | 0,492017114 |
| XZ | 0,549710376 | 0,435052797 | 0,514618694 | - | 0,517444649 |
| Y | 0,577936406 | 0,349777469 | 0,563322974 | - | 0,523130987 |
| YZ | 0,552532879 | 0,418909099 | 0,492249354 | - | 0,511370338 |
| Z | 0,512077971 | 0,37305776 | - | - | 0,517712552 |

Tot i haver eliminat els valors que podien provocar un error per la seva diferencia amb la mitjana, es veu que els coeficients de Poisson són superiors a 0,5. Per tant, encara que s'ha fet aquest filtrat, es pot dir que el material no pot ser isotrop [15], cosa que ja coincideix amb els resultats obtinguts del mòdul de Young.

Igualment, per assegurar l'anisotropia del material es va fer el mateix estudi que en el mòdul de Young, comparar la variació dels valors entre les direccions principals. Aquest estudi es

troba relaxat a la Taula 6.9, on les variacions estan en %.

Taula 6.9 Variacions dels coeficients de Poisson de les direccions principals

| | X | Y | Z | Variació XY | Variació XZ | Variació YZ |
|---------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Poisson RT | 0,55464055 | 0,57793641 | 0,51207797 | 4,0308676 | 8,31173871 | 11,3954466 |
| Poisson T | 0,36963527 | 0,34977747 | 0,37305776 | 5,67726772 | 0,91741518 | 6,6557437 |
| Poisson DIC | 0,53234436 | 0,56332297 | 0,51771255 | 5,49926378 | 2,82624129 | 8,09667354 |
| Poisson DIC Z | 0,54788763 | 0,52313099 | 0,51771255 | 4,73239794 | 5,82853849 | 1,03577028 |

En aquest cas, al contrari del dels mòduls de Young, quasi tot els valors es troben al voltant del 5%, el que voldria dir que és un material isòtrop, però al existir varies variacions entre coeficients majors de 5, no es pot considerar com a material isòtrop.

El material amb el que s'han fet les provetes, tot i presentar anisotropia, no presenta una diferència gaire significativa entre les direccions principals de fabricació, el que vol dir que la relació entre les deformacions longitudinals i transversals no canviarà gaire independentment de la direcció de fabricació.

6.3. Coeficient Corrector

Els resultats obtinguts per les galgues són els que han donat una menor dispersió de valors, i una menor variació entre els mòduls de Young de les direccions principals, però al tenir una singularitat tan significativa, els valors no poden ser considerats del tot correctes. Com que aquest valors no eren del tot encertats es va buscar una manera de poder eliminar el efecte de la singularitat sense eliminar la seva precisió.

Gracies al article de A. Ajovalasit [14], es va poder trobar un coeficient corrector que relacionava dues deformacions diferents de dos sistemes de mesura. Per aquest cas això era perfecte doncs, podíem relacionar la deformació trobada amb el DIC amb les mesurades amb les galgues. El coeficient corrector vindria definit per l'equació 6.6.

$$K = \frac{\varepsilon_{DIC}}{\varepsilon_{galga}} = \frac{E_{DIC}}{E'_{galga}} \quad (6.6)$$

Com aquest coeficient només depèn de les deformacions, també es pot relacionar directament amb el mòdul de Young, doncs la tensió que rebien era la mateixa per ambdues tècniques.

El coeficient corrector ja s'ha vist com es calcula, així que només falta calcular-lo. El coeficient es va calcular, com s'indica a la equació anterior, només per a les direccions principals (X, Y, Z), ja que les altres direccions dependrien d'una d'aquestes. Els resultats trobats dels coeficients de cada direcció es poden veure a la Taula 6.10.

Taula 6.10 Resultats coeficients correctors de les direccions principals

| Provetes X | K' | Provetes Y | K' | Provetes Z | K' |
|--------------|----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|
| 1X1 | - | 1Y1 | 0,785691 | 1Z1 | 2,381478 |
| 1X2 | - | 1Y2 | 1,065535 | 1Z2 | 1,846046 |
| 1X3 | - | 1Y3 | 1,002753 | 1Z3 | 1,989898 |
| 1X4 | 1,365375 | 1Y4 | 1,586303 | 1Z4 | 1,813423 |
| 1X5 | 1,143221 | 1Y5 | - | 1Z5 | 1,429587 |
| 1X6 | - | 1Y6 | - | 1Z6 | 1,844149 |
| 1X7 | 1,820584 | 1Y7 | 1,414509 | 1Z7 | 1,144701 |
| 1X8 | 3,005044 | 1Y8 | 1,282443 | 1Z8 | 1,603152 |
| 1X9 | 2,288313 | 1Y9 | 1,752206 | 1Z9 | 1,320102 |
| 1X10 | 1,042869 | 1Y10 | 2,296518 | Total | 1,623882 |
| 1X11 | 1,203655 | 1Y11 | 1,105694 | | |
| Total | 1,69558 | Total | 1,365739 | | |

De la taula s'observa que els coeficients correctors de X i Z s'assemblen molt, mentre que el de Y es bastant diferent. Tots els coeficients són superiors a 1, com era de esperar, ja que les deformacions de les galgues eren menors degut a la seva singularitat.

Un cop trobats els diversos coeficients es va procedir a trobar els nous valors dels mòduls de Young corregits, per fer-ho es va dividir el valor actual del mòdul entre el valor de la mitjana del coeficient corresponent, obtenint així els nous resultats de les mitjanes a la Taula 6.11.

Taula 6.11 Resultats del mòdul de Young corregits per a les galgues

| Proveta | Resultats Mitjanes [MPa] | | | | | |
|---------|--------------------------|-----------|--------------|-------------|-----------|--------------|
| | Numèricament | | | Gràficament | | |
| | DIC | Galgues | Extensòmetre | DIC | Galgues | Extensòmetre |
| X | 266,30047 | 244,17966 | - | 275,18143 | 241,13537 | - |
| XY | 400,98318 | 276,9118 | - | 301,58667 | 260,05469 | - |
| XZ | 239,74002 | 260,26950 | 266,73416 | 270,61667 | 225,69811 | 279,3425 |
| Y | 508,22317 | 285,83354 | - | 397,88 | 269,67192 | - |
| YZ | 232,25914 | 262,92528 | 278,980126 | 397,88 | 269,67192 | - |
| Z | 283,0668 | 265,46383 | 406,463945 | 254,04111 | 240,04095 | 300,36 |

Es veu clarament com amb el coeficient corrector els valors dels mòduls de Young trobats per les galgues decreix considerablement, pareixent-se més als valors del extensòmetre i del DIC.

Però tot i semblar-se encara no es sap si amb aquest coeficient corrector podem disminuir o no la variació entre les direccions principals. Per poder comprovar-ho es va fer el mateix que al anterior apartat i es van calcular les variacions del mòdul, contenint així els resultats de la Taula 6.12.

Taula 6.12 Nova variació de l mòduls de Young de les direccions principals

| | | X | Y | Z | Variació X-Y | Variació X-Z | Variació Y-Z |
|--------------|-------|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|
| Numèricament | DIC | 266,300467 | 508,223171 | 283,066799 | 47,6016675 | 5,92310105 | 44,3026576 |
| | Galga | 244,179655 | 285,833537 | 265,463827 | 14,5727763 | 8,01772982 | 7,12642392 |
| Gràficament | DIC | 275,181429 | 397,88 | 254,041111 | 30,8380847 | 8,32161274 | 36,1513242 |
| | Galga | 241,135371 | 269,671923 | 240,040949 | 10,5819513 | 0,45593135 | 10,9877859 |

Com es pot comprovar, els valors de variació de les direccions principals disminueix una mica, però no varia gaire, ja que els coeficient correctors eren molt semblants, i per tant les variacions seguiran paregudes a les que s'havien trobat anteriorment.

Aquest coeficient corrector ha ajudat a disminuir el mòdul de Young a uns valors semblants als de les altres dues tècniques, tot i així veiem que fa variar gaire la variació entre direccions principals.

Conclusions

La informació que hi ha sobre les propietats sobre les peces fabricades amb el DLP és escassa, i el que diu es que aquestes peces seran anisotròpiques, i que es podria solucionar aquesta anisotropia amb un post curat.

Finalment, es poden arribar a les següents conclusions:

- No es pot acabar de concloure quina és la millor de les tècniques de mesura usades, ja que totes els sistemes de mesura tenen algun inconvenient.
 - El DIC presenta un pendent a la part inicial de la corba-tensió deformació molt petit i pot causar un mal càlcul del mòdul de Young.
 - Les galgues presenten una clara singularitat que fa que hi hagi menors deformacions al seu voltant fent així que el mòdul de Young sigui molt elevat.
 - L'extensòmetre, tot i semblar que les mesures fetes no tenen cap problema, no ha estat fet en totes les peces, i no es pot saber si realment si és un sistema de mesura fiable.
- Les galgues són el sistema de mesura que presenta menys variabilitat en el resultats, indicant així que poder és el millor sistema de mesura, sempre que es pugui eliminar la seva singularitat.
- Els mòduls de Young del DIC i l'extensòmetre donen valors semblants.
- La variació entre els valors del Mòdul de Young de les direccions principals és superior al 5%, així que al material se'l considera anisòtrop.
- Els coeficients de Poisson trobats per el DIC i les galgues són molt semblants, el que indica que qualsevol dels dos mètodes és viable per trobar-los.
- La variació dels valors dels coeficients entre les direccions principals és massa gran, superior al 5%, i confirma que el material és anisòtrop.
- El coeficient corrector ha ajudat a disminuir el mòdul de Young a uns valors semblants als del IDC i l'extensòmetre, tot i així es veu que no fa canviar gaire la variació dels seus valors entre direccions principals, fent que el material segueixi sent anisòtrop.

Futures línies de recerca

Un cop finalitzat el projecte sorgeixen noves àrees on seguir investigant per tal d'acabar de resoldre totes les qüestions no resoltes. Aquestes noves línies d'investigació poden ser:

- Realitzar més assajos sobre unes altres provetes iguals, on estiguin presents totes les tècniques de mesura de deformacions. És a dir, dur a terme més experiments on també estigui l'extensòmetre per així poder trobar la seva variabilitat i efectivitat de mesura.
- Tornar a fer les experiments, però aquest cop amb el mateix nombre de provetes en totes les direccions de fabricació, per poder evitar amb major facilitat els errors de construcció de les provetes. Si hi ha poques provetes, quan es troba més d'una defectuosa poden induir molta variació al no haver prou provetes per confirmar els resultats obtinguts.
- Investigar el perquè les mitjanes de les provetes en X i Y no són iguals, quan el pla de construcció és el mateix i la teoria afirma que tal i com s'han construït haurien de ser iguals o molt semblants. Amb DLP tot allò imprès en el mateix pla hauria de tenir les mateixes propietats mecàniques, ja que els píxels del projectors són, teòricament, quadrats i no s'hauria de apreciar diferència en la construcció entre X i Y. Segurament això serà degut a que els píxels no són realment quadrats, sinó que són rectangulars, però tot i així, s'hauria de comprovar.
- Utilitzar una metodologia per trobar les propietats mecàniques de les provetes diferent a les ja utilitzades, i veure si dona resultats semblants al DIC. Ja que, el DIC tot i donar valors dels mòduls de Young més baixos, aquests són molt semblants al de l'extensòmetre, cosa que voldria dir que el DIC sí que pot fer-se servir per trobar el mòdul de Young. Per aquets motiu, es necessitaria un mètode diferent als utilitzats, però que es sabs amb anterioritat que és vàlid. Un exemple podria ser amb el moviment del capçal amb el que s'han realitzats els assajos.

Agraïments

En primer lloc m'agradaria agrair a en Miquel per l'oportunitat de dur a terme aquest treball de grau. També agrair-li tota la ajuda prestada en tot moment. Ja que aquest treball no hagués estat el mateix sense els seus consell, experiència i suport. També es imprescindible agrair a Laura Rey tota la feina anterior abans de que jo entres en el projecte, ja que sense ella no hauria estat possible fer tots els assajos. Gràcies a Laura per fer els càlculs de les deformacions i de organitzar totes les dades recollides durant els assajos.

En segon lloc, vull agrair el immesurable suport rebut per la meva família des de que vaig començar el grau, en especial als meus pares Juan Carlos i Montse, i als meus avis Pere, Carme i Leonor. S'agreix també els consells i suport dels amics de la família, que amb l'experiència pròpia han sabut donar. Sense totes aquestes persones no estaria on estic ara.

Per últim, agrair als meus companys d'universitat, amics, els mentors d'Aula Lliure, els diferents alumnes que han passat per les meves classes, i a tots aquells companys que hem compartit algun treball que altre, i aquells amb els que he compartit alguna que altra activitat amb ells. Gràcies a tots ells he sigut capaç de convertir-me en la persona que soc ara, i acompanyar-me en aquests etapa de la vida tant important.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] BLOG de HXX. *Tecnologías de impresión 3D (III): Extrusión de material*. 2014.
[<http://hxx.es/2014/12/20/tecnologias-de-impresion-3d-iii-extrusion-de-material/>, 18 de setembre de 2018]*. *[URL, data de consulta].
- [2] 3D HUBS. *Introduction to SLA 3D Printing*.
[<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing>, 08 de setembre de 2018]*. *[URL, data de consulta].
- [3] FORMLABS. *SLA vs DLP: A 3D Printing Technology Comparison*. Juliol 2017.
[<https://formlabs.com/blog/3d-printing-technology-comparison-sla-dlp/>, 08 de setembre de 2018]*. *[URL, data de consulta].
- [4] ALL3DP. *What is a DLP 3D Printer? – Simply Explained*.
[<https://all3dp.com/2/what-is-a-dlp-3d-printer-3d-printing-simply-explained/#ampf=undefined>, 09 de setembre de 2018]*. *[URL, data de consulta].
- [5] THINK 3D. *Digital Light Processing (DLP)*. Agost 2016.
[<https://www.think3d.in/digital-light-processing-dlp-3d-printing-technology-overview/>, 19 de setembre de 2018]*. *[URL, data de consulta].
- [6] 3D PRINTER PRO. *Digital Light Processing rapid prototyping & DLP 3D printing services*.
[<http://www.3dprinterpro.com/digital-light-processing/>, 19 de setembre de 2018]*. *[URL, data de consulta].
- [7] 3D PRINT EXPO. *Whats is Digital Light Porcessing?*. Decembre 2017.
[<https://3d-expo.ru/en/article/chto-takoe-tsifrovaya-svetodiodnaya-proektsiya-dlp-80503>, 19 de setembre de 2018]*. *[URL, data de consulta].
- [8] M. MONZÓN, Z. ORTEGA, A. HERNÁNDEZ, R. PAZ, F. ORTEGA. *Anisotropy of Photopolymer Parts Made by Digital Light Processing*. *Materials* 2017, 10, 64.
- [9] BERNHARD STEYRER, BERNHARD BUSETTIA, GYÖRGY HAKÁLYB, ROBERT LISKAB, JÜRGEN STAMPFLA. *Hot Lithography vs. room temperature DLP 3D-printing of a dimethacrylate*. *Additive Manufacturing* 21 (2018), p. 209–214.

- [10] JOHN RYAN C. DIZONA, ALEJANDRO H. ESPERA JR., QIYI CHENA, RIGOBERTO C. ADVINCULA. *Mechanical characterization of 3D-printed polymers*. Additive Manufacturing 20 (2018), p. 44–67.
- [11] OMEGA. *Galgas extensiométricas. ¿Qué son las galgas extensiométricas?*. [<https://es.omega.com/prodinfo/galgas-extensiometricas.html>, 07 de gener de 2019]*. *[URL, data de consulta].
- [12] PATOLOGÍA + REHABILITACIÓN +CONSTRUCCIÓN. *Instrumentación aplicada a la edificación (5) Extensómetros*. [<https://www.patologiasconstruccion.net/2016/05/instrumentacion-aplicada-la-edificacion-5-extensometros-1-2/>, 07 de gener de 2019]*. *[URL, data de consulta].
- [13] DANTE DYNAMICS. *Measurement Principles of (DIC)*. [<https://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-dic>, 07 de gener de 2019]*. *[URL, data de consulta].
- [14] A. AJOVALASIT, L. D'ACQUISTO, S. FRAGAPANE, B. ZUCCARELLO. *Stiffness and Reinforcement Effect of Electrical Resistance Strain Gauges*. Strain (2007), 43, p. 299–305.
- [15] POLYMER PROPERTIES DATABASE. *Poisson Ratio of Polymeric Materials* [<https://polymerdatabase.com/polymer%20physics/Poisson.html>, 10 de gener de 2019]*. *[URL, data de consulta].
- [16] GOM CORRELATE. *GOM Software 2017*. 0000000171_011_ES_19-07-2017.

Bibliografia complementària

MICHAEL LAYANI, XIAOFENG WANG, SHLOMO MAGDASSI. *Novel Materials for 3D Printing by Photopolymerization*. Advanced Materials, 2018, 1706344.

MIN-JOO KIM, SEU-RAN LEE, MIN-YOUNG LEE, JASON W. SOHN, HYONG GEON YUN, JOON YONG CHOI, SANG WON JEON, TAE SUK SUH. *Characterization of 3D printing techniques: Toward patient specific quality assurance spine-shaped phantom for stereotactic body radiation therapy*. PLOS ONE, [<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176227>], May 4, 2017.



EMIL TYGE, JENS J. PALLISGAARD, MORTEN LILLETHORUP, NANNA G. HJALTALIN, MARY K. THOMPSON, AND LINE H. CLEMMENSEN. *Characterizing Digital Light Processing (DLP) 3D Printed Primitives*. R.R. Paulsen and K.S. Pedersen (Eds.): SCIA 2015, LNCS 9127, p. 302–313.

ANDREW T. CULLEN, AARON D. PRICE. *Digital light processing for the fabrication of 3D intrinsically conductive polymer structures*. *Synthetic Metals* 235 (2018), p. 34–41.

GIFTYMOL VARGHESE, MÓNICA MORAL, MIGUEL CASTRO-GARCÍA, JUAN JOSÉ LÓPEZ-LÓPEZ, JUAN RAMÓN MARÍN-RUEDA, VICENTE YAGÜE-ALCARAZ, LORENA HERNÁNDEZ-AFONSO, JUAN CARLOS RUIZ-MORALES, JESUS CANALES-VÁZQUEZ. *Fabrication and characterisation of ceramics via low-cost DLP 3D printing*. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio* 57 (2018), p. 9–18.

J. BONADA, A. MUGURUZA, X. FERNÁNDEZ-FRANCOS, X. RAMIS. *Influence of exposure time on mechanical properties and photocuring conversion ratios for photosensitive materials used in Additive Manufacturing*. *Procedia Manufacturing* 13 (2017), p. 762–769.

JOHANNA SCHMIDT, HAMADA ELSAYED, ENRICO BERNARDO, PAOLO COLOMBO. *Digital light processing of wollastonite-diopside glass-ceramic complex structures*. *Journal of the European Ceramic Society* 38 (2018), p. 4580–4584.

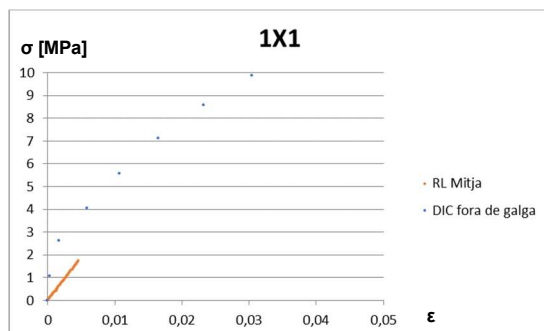
LISEN GE, LONGTENG DONG, DONG WANG, QI GE, GUOYING GU. *A digital light processing 3D printer for fast and high-precision fabrication of soft pneumatic actuators*. *Sensors and Actuators A* 273 (2018), p. 285–292.

HENRY H. HWANG, WEI ZHU, GRACE VICTORINE, NATALIE LAWRENCE, SHAOCHEN CHEN. *3D-Printing of Functional Biomedical Microdevices via Light- and Extrusion-Based Approaches*. *Small Methods* 2018, 2, 1700277.

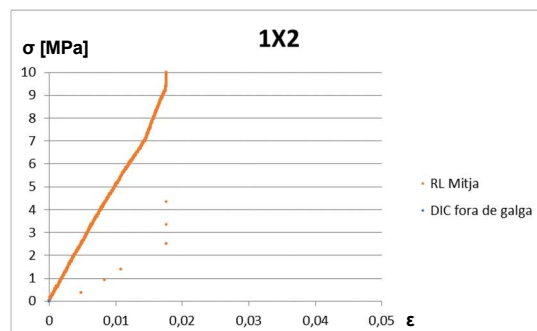
Annexos

Annex A. Gràfics tensió-deformació de les provetes X, Y i XY

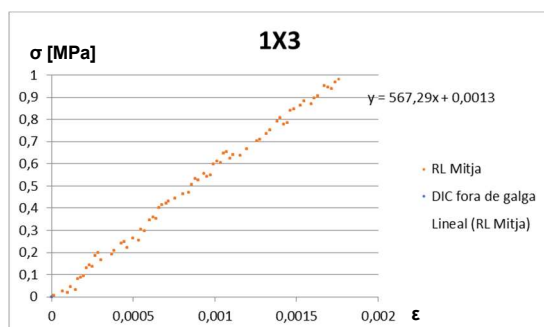
A aquest annex es veuran els gràfics restants de les corbes tensió-deformació trobades al apartat 5.1, en aquest cas trobarem els de les provetes X, XY i Y.



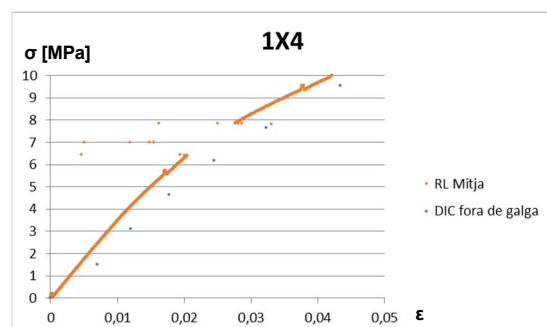
Corba tensió-deformació proveta 1X1



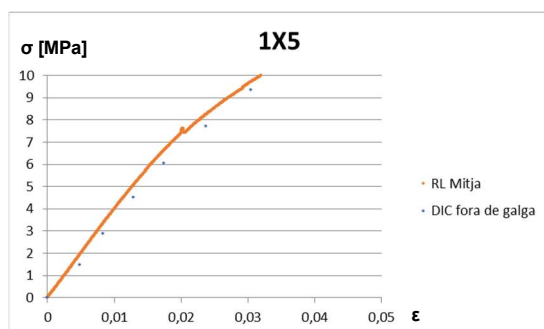
Corba tensió-deformació proveta 1X2



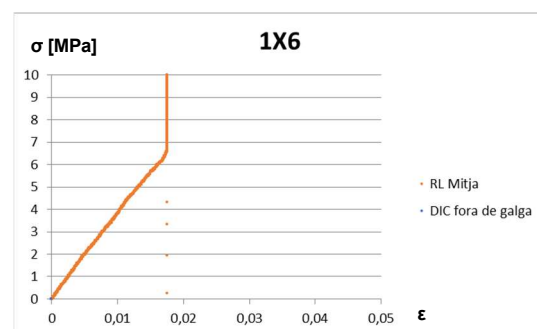
Corba tensió-deformació proveta 1X3



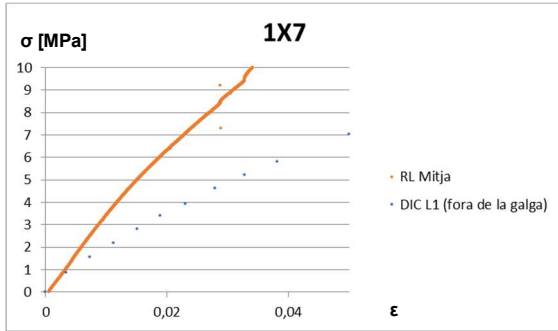
Corba tensió-deformació proveta 1X4



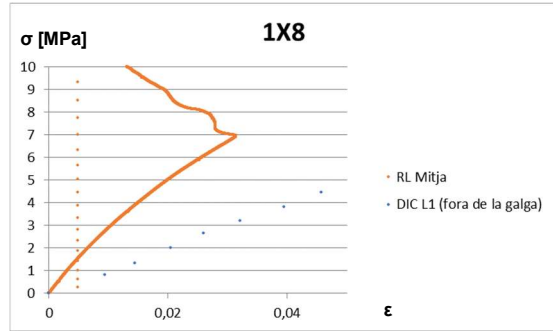
Corba tensió-deformació proveta 1X5



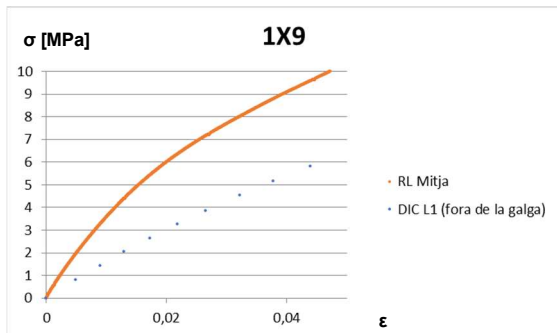
Corba tensió-deformació proveta 1X6



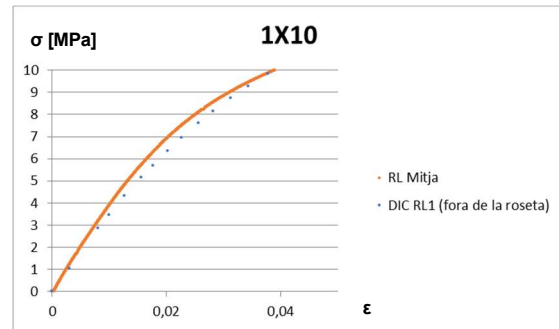
Corba tensió-deformació proveta 1X7



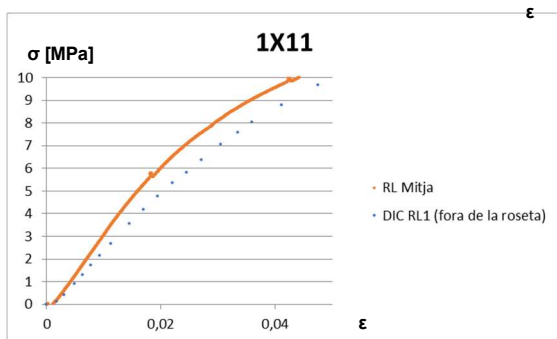
Corba tensió-deformació proveta 1X8



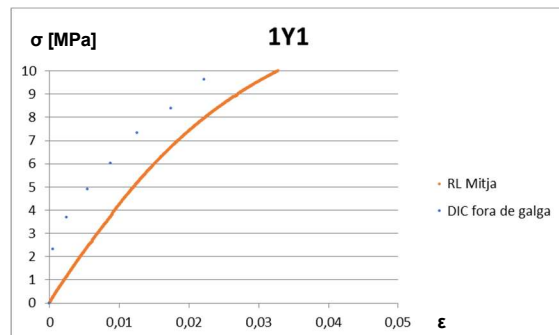
Corba tensió-deformació proveta 1X9



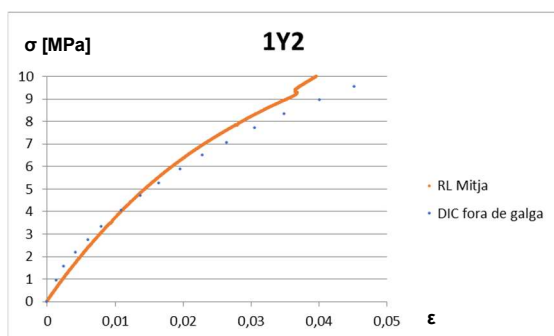
Corba tensió-deformació proveta 1X10



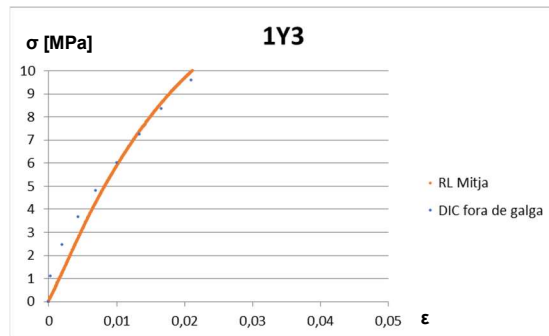
Corba tensió-deformació proveta 1X11



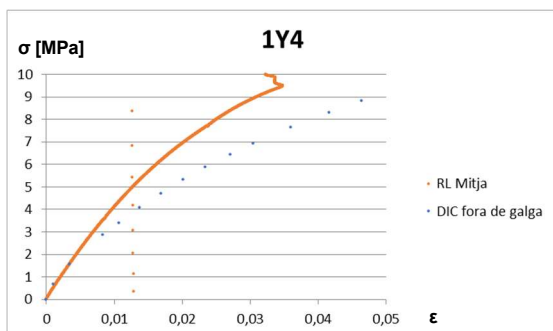
Corba tensió-deformació proveta 1Y1



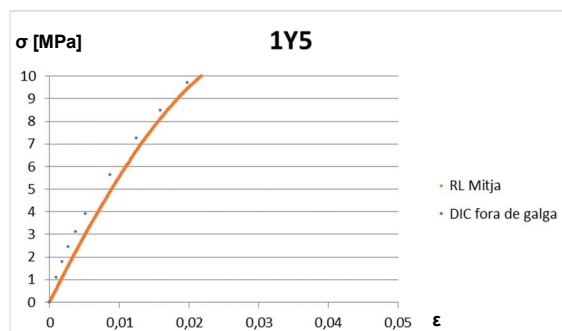
Corba tensió-deformació proveta 1Y2



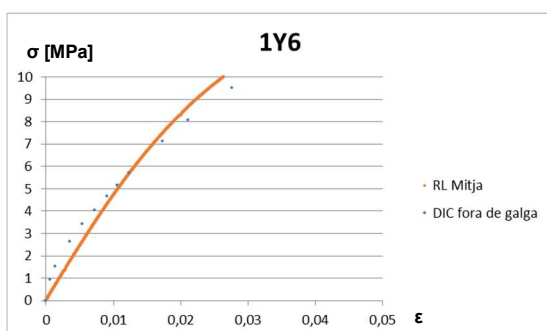
Corba tensió-deformació proveta 1Y3



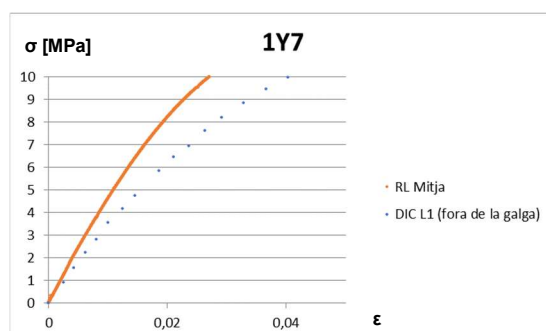
Corba tensió-deformació proveta 1Y4



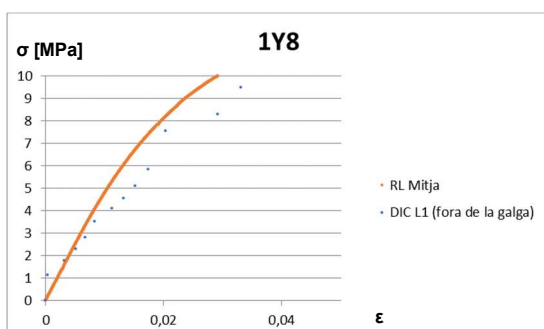
Corba tensió-deformació proveta 1Y5



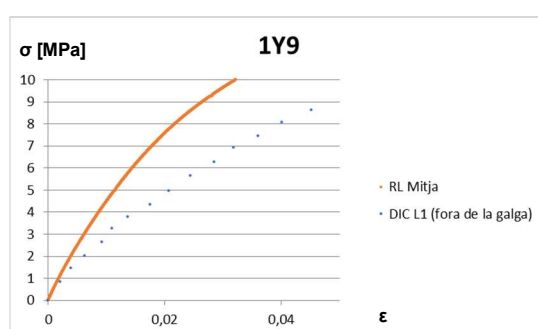
Corba tensió-deformació proveta 1Y6



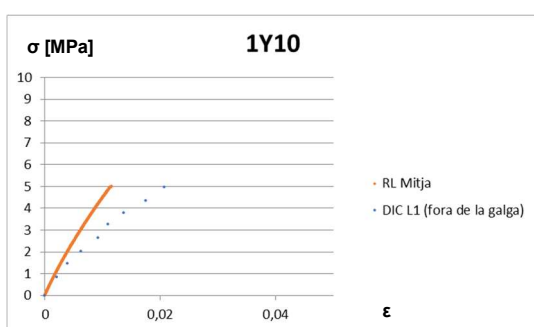
Corba tensió-deformació proveta 1Y7



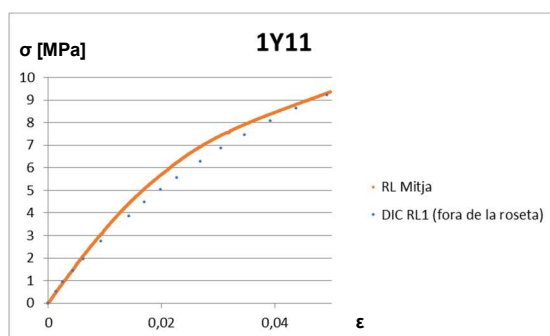
Corba tensió-deformació proveta 1Y8



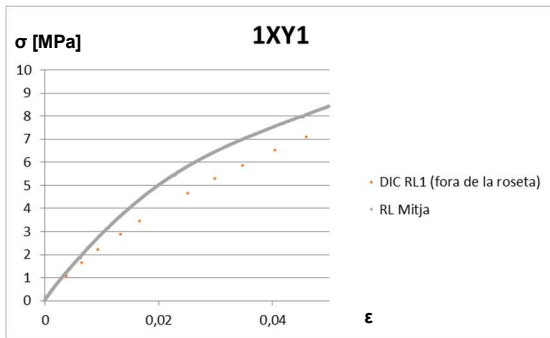
Corba tensió-deformació proveta 1Y9



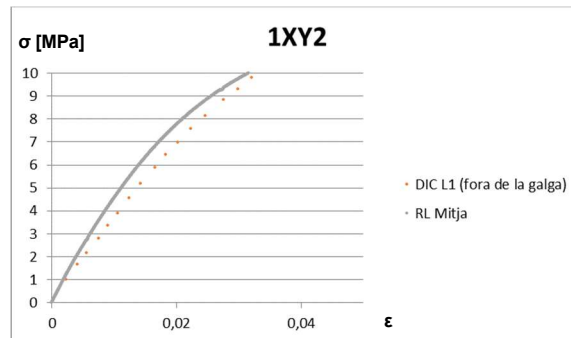
Corba tensió-deformació proveta 1Y10



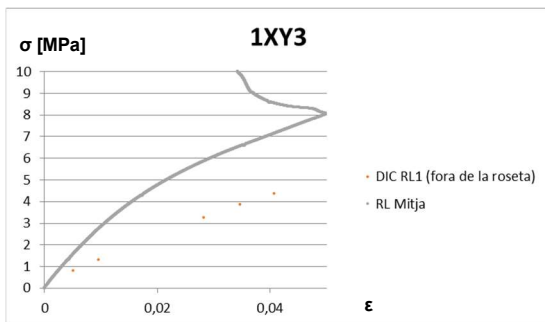
Corba tensió-deformació proveta 1Y11



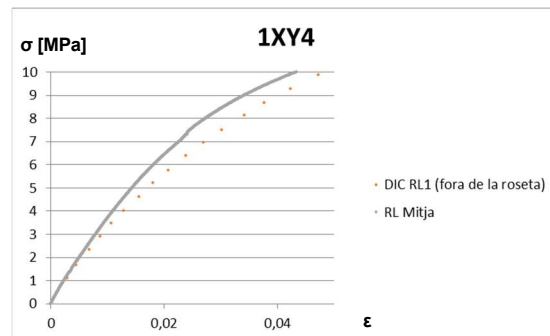
Corba tensió-deformació proveta 1XY1



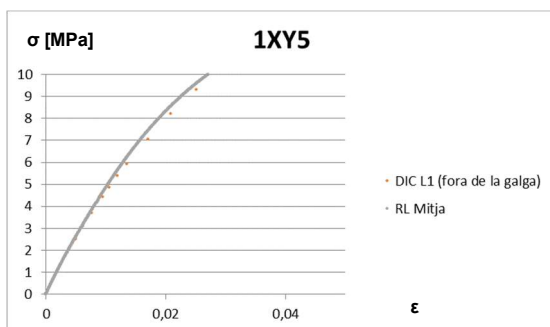
Corba tensió-deformació proveta 1XY2



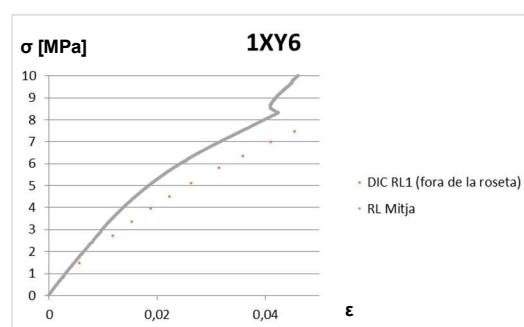
Corba tensió-deformació proveta 1XY3



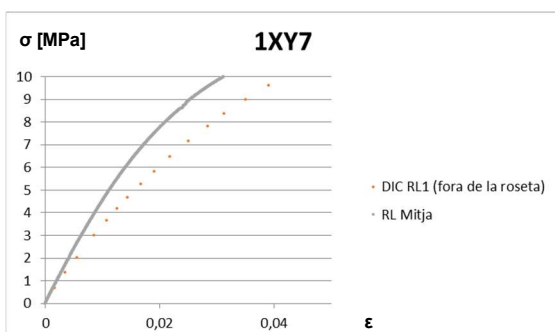
Corba tensió-deformació proveta 1XY4



Corba tensió-deformació proveta 1XY5



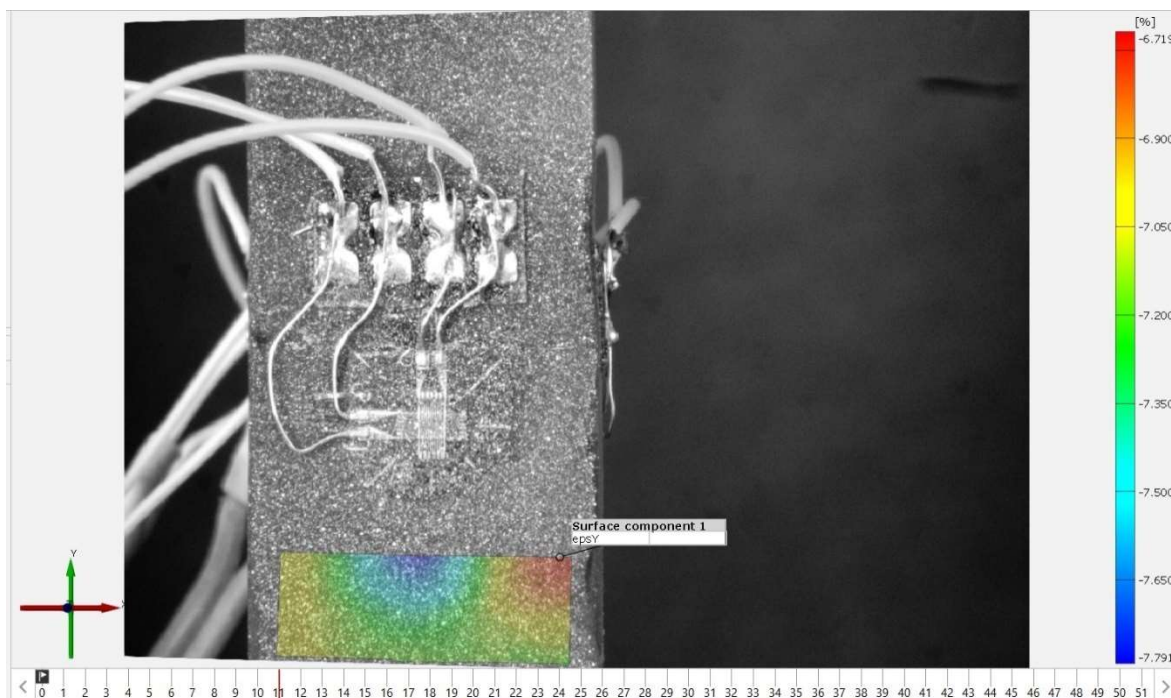
Corba tensió-deformació proveta 1XY6



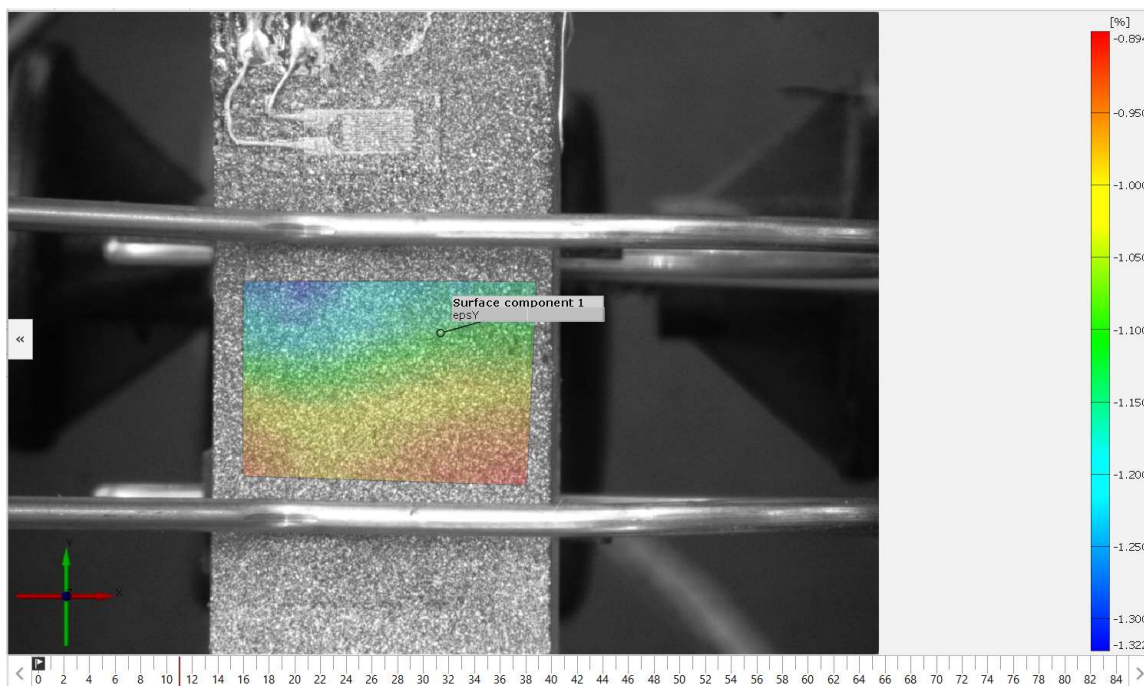
Corba tensió-deformació proveta 1XY7

Annex B. Imatges de la singularitat de les galgues

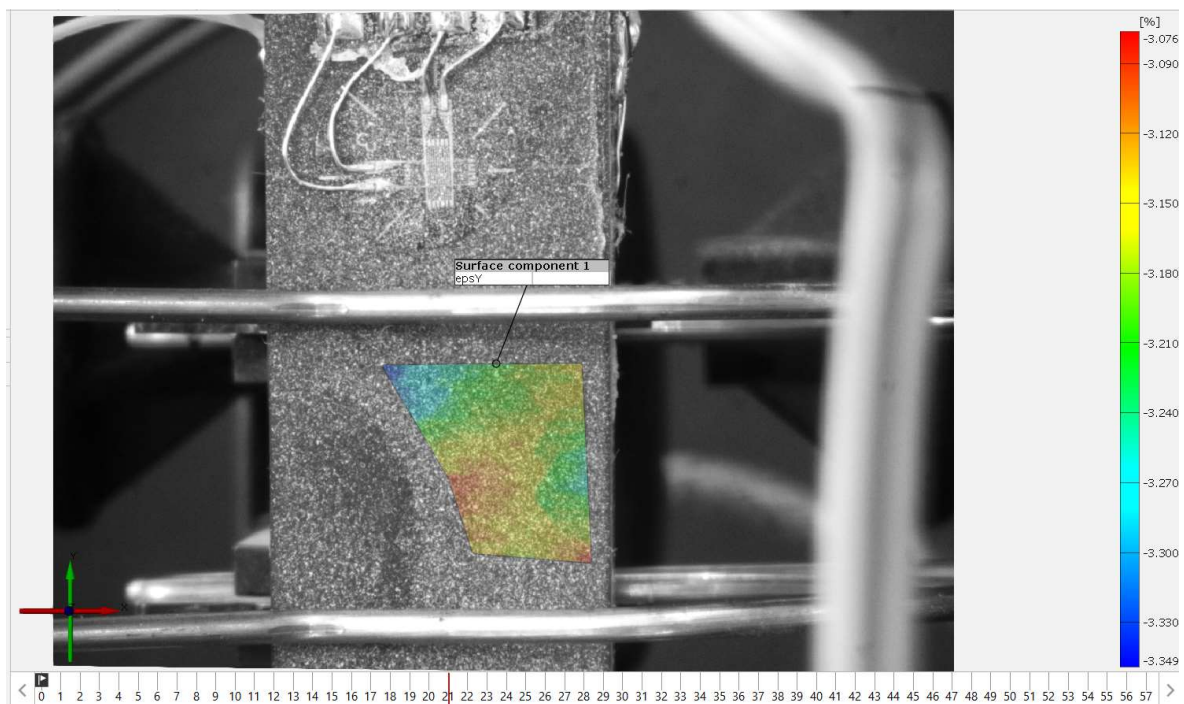
En aquest annex es veuran les imatges de l'anàlisi realitzats amb el DIC de les provetes 1XY3, 1XZ2, i 1YZ2.



Estudi DIC de la proveta 1XY3



Estudi DIC de la proveta 1XZ2



Estudi DIC de la proveta 1YZ2

