

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Títol: DISSENY, FABRICACIÓ I ASSAIG D'UNA BIGA D'EIX CURVILINI PER A L'ESTUDI DE DEFORMACIONS AMB CORRELACIÓ D'IMATGES DIGITALS

Document: Memòria i annexos

Alumne: Eric Castilla Magro

Tutor: Cristina Barris Peña

Departament: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Enginyeria de la construcció

Convocatòria (mes/any): Setembre 2021

Agraïments

En primer lloc, m'agradaria expressar el meu agraïment a la tutora del treball, la Dra. Cristina Barris Peña que ha sigut l'encarregada de proposar-me el tema, guiar-me i ajudar-me a desenvolupar el projecte.

En segon lloc, donar les gràcies a l'alumne Jaume Pons per donar-me suport en la campanya experimental i ajudar en tot el necessari.

Finalment, agrair a la meva família, especialment als meus pares perquè sempre m'han sostingut i animat a tirar endavant el treball.

ÍNDIX

Índex	i
Índex de figures	iii
Índex de taules	vi
1 Introducció	1
1.1 Antecedents	1
1.2 Objectius	1
1.3 Especificacions i Abast.....	2
1.3.1 Especificacions	2
1.3.2 Abast.....	2
2 Correlació digital d'imatges	3
2.1 Introducció a la correlació digital d'imatges	3
2.2 Conceptes d'òptica.....	4
2.3 Aplicacions de la tècnica DIC	7
2.4 Preparació d'espècimens	7
2.5 Qualitat del patró: Mean Intensity Gradient (MIG)	10
2.6 Fonaments de la correlació d'imatges	11
2.7 Diagrama de flux del procés emprat per al càlcul de deformacions	16
3 Disseny i anàlisi de la peça d'estudi	17
3.1 Predimensionament analític	17
3.1.1 Plastificació del braç metàl·lic	18
3.1.2 Plastificació de la peça.....	20
3.1.3 Anàlisi teòric de tensions i deformacions.....	21
3.2 Predimensionament numèric.....	23
3.2.1 Definició de les propietats mecàniques del material	23
3.2.2 Geometria dels models	24
3.2.3 Tipus d'elements.....	25
3.2.4 Condicions de contorn per a dissenyar el model simètric.....	26

3.3	Comparació entre resultats analítics i numèrics	30
4	Caracterització mitjançant instrumentació clàssica.....	32
4.1	Muntatge experimental.....	32
4.2	Obtenció dels resultats experimentals.....	33
4.3	Comparativa entre resultats analítics i experimentals.....	34
5	Caracterització mitjançant DIC	37
5.1	Muntatge experimental.....	37
5.1.1	Cas 2D.....	37
5.1.2	Cas 3D.....	38
5.1.3	Sistema de càmeres del muntatge	40
5.2	Estudi paramètric	42
5.2.1	Influència de la mida del subset i de l'stepsize	42
5.2.2	Influència del criteri de correlació	44
5.3	Obtenció dels resultats.....	46
5.3.1	MIG del patró	46
5.3.2	Desplaçaments verticals	46
5.3.3	Deformacions verticals del cas 2D	48
5.3.4	Anàlisi dels moviments fora del pla	51
5.3.5	Deformacions verticals del cas 3D	53
6	Resum del pressupost.....	56
7	Conclusions	57
8	Relació de documents.....	59
9	Bibliografia	60
	Annex A: Caracterització de les propietats mecàniques de l'alumini	62
	Annex B: Càlcul de la càrrega de plastificació del braç metàl·lic	68
	Annex C: Càlcul de la càrrega de plastificació de la peça d'estudi	73
	Annex D: Mallat del model.....	78
	Annex E: Validació del model simètric.....	81
	Annex F: Valoració de costos.....	85

ÍNDIX DE FIGURES

Figura 1 - Concepte de distància focal [4]	4
Figura 2 - Concepte d'obertura del diafragma [5]	5
Figura 3 - Influència de la distància focal en la profunditat de camp [6]	6
Figura 4 - Influència de l'obertura del diafragma en la profunditat de camp [6]	6
Figura 5 - Gel de transferència	8
Figura 6 - Procés emprat per a la transferència del patró	9
Figura 7 - Correlació d'un subret entre la imatge inicial en l'instant t i la imatge final en l'instant t' [10]	10
Figura 8 - Desplaçament del punt central del subret [12]	14
Figura 9 – Desplaçament horitzontal i vertical del centre del subret [14]	15
Figura 10 - Translacions i desplaçaments de primer ordre [15]	15
Figura 11 – Diagrama de flux del procés de càlcul de deformacions	16
Figura 12 – Geometria i dimensions de la peça d'estudi en mm	17
Figura 13 - Estructura de suport	19
Figura 14 – Factor multiplicador del braç metàl·lic	19
Figura 15 – Tipus de discs del laboratori	21
Figura 16 – Punts crítics a tracció i compressió (esquerra) i secció central d'estudi (dreta)	22
Figura 17 – Diagrama de tensions normals en direcció vertical al llarg de la secció central	23
Figura 18 – Definició de les propietats mecàniques de l'alumini 5754 H111	24
Figura 19 – Geometria del model 1	24
Figura 20 – Regió rectangular (esquerra) i regió corba (dreta)	25
Figura 21 – Element PLANE183 [17]	26
Figura 22 – Element SURF153 [18]	26
Figura 23 – Condició de simetria	27
Figura 24 – Restricció del desplaçament vertical en l'aresta de simetria	27
Figura 25 – Restricció del desplaçament horitzontal del vèrtex de l'aresta de simetria	28
Figura 26 – Reacció generada pels passadors sobre la peça	28
Figura 27 – Tensions normals en direcció vertical Y	29
Figura 28 – Definició dels paràmetres d'entrada i sortida	29
Figura 29 – Comparació entre deformacions analítiques i numèriques per al model 1	30

Figura 30 - Comparació entre deformacions analítiques i numèriques per al model 2	30
Figura 31 - Comparació entre deformacions analítiques i numèriques per al model 3	31
Figura 32 – Característiques principals de les galgues utilitzades (esquerra) i galga extensomètrica (dreta)	32
Figura 33 – Sistema d’adquisició Vishay System 5000 [19]	32
Figura 34 – Cola adhesiva Loctite	32
Figura 35 – Adhesió de les galgues en els extrems de la secció central	33
Figura 36 – Muntatge experimental	33
Figura 37 – Comparació entre deformacions extensomètriques i analítiques per al model 1	35
Figura 38 – Comparació entre deformacions extensomètriques i analítiques per al model 2	36
Figura 39 - Comparació entre deformacions extensomètriques i analítiques per al model 3	36
Figura 40 – Muntatge per al cas 2D [20]	37
Figura 41 – Calibració per al cas 2D	38
Figura 42 – Muntatge per al cas 3D [21]	38
Figura 43 – Diferents inclinacions del panell per a calibrar el sistema 3D	39
Figura 44 – Resultat final de la calibració	39
Figura 45 – Muntatge experimental del DIC	40
Figura 46 – Sistema de càmeres del muntatge	40
Figura 47 – Angle de calibració de les càmeres del sistema 3D	41
Figura 48 – Lents amb una distància focal de 23 mm	41
Figura 49 – Relació entre el valor sigma i la mida del subset	42
Figura 50 – Malla generada sobre l’AOI per a una mida de subset de 13 píxels (esquerra), 33 píxels (centre) i 63 píxels (dreta)	43
Figura 51 – Mida òptima de subset (esquerra) i malla generada (dreta)	43
Figura 52 – Relació entre el valor sigma i la mida de l’stepsize	44
Figura 53 – Deformacions verticals per a cada criteri de correlació	45
Figura 54 – Patró de speckles generat (esquerra) i nombre de píxels de cada tonalitat (dreta)	46
Figura 55 - Comparació entre desplaçaments verticals del cas 2D i 3D per al model 1	47

Figura 56 - Comparació entre desplaçaments verticals del cas 2D i 3D per al model 2	47
Figura 57 - Comparació entre desplaçaments verticals del cas 2D i 3D per al model 3	48
Figura 58 – Comparació entre deformacions verticals obtingudes amb el VIC 2D i analítiques per al model 1	49
Figura 59 - Comparació entre deformacions verticals obtingudes amb el VIC 2D i analítiques per al model 2.....	49
Figura 60 - Comparació entre deformacions verticals obtingudes amb el VIC 2D i analítiques per al model 3.....	50
Figura 61 – Desplaçaments en direcció Z en el model 1 (esquerra) i en el model 2 (dreta).....	52
Figura 62 - Desplaçaments en direcció Z en el model 3	52
Figura 63 – Desplaçaments generats fora del pla en funció de la càrrega.....	53
Figura 64 - Comparació entre deformacions verticals obtingudes amb el VIC 3D i analítiques per al model 1	54
Figura 65 - Comparació entre deformacions verticals obtingudes amb el VIC 3D i analítiques per al model 2.....	54
Figura 66 - Comparació entre deformacions verticals obtingudes amb el VIC 3D i analítiques per al model 3.....	55
Figura 67 – Resultats dels assaigs a tracció de l'alumini 5754 H111.....	62
Figura 68 – Premsa hidràulica del laboratori	62
Figura 69 – Provetes utilitzades per a determinar les propietats mecàniques de l'alumini.....	63
Figura 70 – Corba característica tensió-deformació de les sis provetes assajades	64
Figura 71 – Zona elàstica de la corba característica tensió-deformació.....	65
Figura 72 – Determinació del límit elàstic segons la normativa estàndard E8/E8M-13a	67
Figura 73 – Dimensions de la secció del braç metàl·lic	68
Figura 74 – Diagrama de cos lliure del braç metàl·lic	68
Figura 75 – Diagrama de cos lliure del tram 1	69
Figura 76 – Diagrama de cos lliure del tram 2	70
Figura 77 – Diagrama de tensions normals generades en la secció d'estudi.....	71
Figura 78 – Ubicació de la línia neutra i del centre de gravetat en una biga corba [23]	73
Figura 79 – Parametrització de les dimensions de la peça d'estudi.....	74

Figura 80 – Anàlisi de les forces i moment flector que es generen en la secció central	74
Figura 81 – Secció central d'estudi.....	76
Figura 82 – Superfície rectangular (esquerra) i superfície corba (dreta)	78
Figura 83 – Nombre de divisions al llarg de l'amplada de la peça	78
Figura 84 – Nombre de divisions al llarg de la base rectangular.....	79
Figura 85 – Nombre de divisions al llarg de les arestes de curvatura	79
Figura 86 – Selecció de la superfície de mallat	80
Figura 87 – Mallat final del model.....	80
Figura 88 – Condicions de contorn del model sencer	81
Figura 89 – Opció path per a analitzar la secció central	82
Figura 90 – Model 1 simètric (esquerra) i model 1 sencer (dreta).....	82
Figura 91 – Deformacions verticals al llarg de la secció central per al model 1	83
Figura 92 - Model 2 simètric (esquerra) i model 2 sencer (dreta).....	83
Figura 93 - Deformacions verticals al llarg de la secció central per al model 2	83
Figura 94 - Model 3 simètric (esquerra) i model 3 sencer (dreta).....	84
Figura 95 - Deformacions verticals al llarg de la secció central per al model 3	84

ÍNDIX DE TAULES

Taula 1 - Taula de desitjos i requeriments	2
Taula 2 - Expressions dels diferents criteris de correlació	13
Taula 3 - Dimensions dels diferents models de peça.....	17
Taula 4 - Propietats mecàniques de l'acer S235	19
Taula 5 - Propietats mecàniques de l'alumini 5754 H111	20
Taula 6 - Càrrega límit per a cada model de peça.....	20
Taula 7 - Massa corresponent a cada tipus de disc.....	21
Taula 8 - Ràtio entre deformacions analítiques i numèriques	31
Taula 9 - Coeficient quadràtic de les rectes de regressió	45
Taula 10 - Recta de regressió obtinguda per a cada assaig	65
Taula 11 – Costos de realització del projecte	85

1 INTRODUCCIÓ

La tècnica de correlació d'imatges digitals, *Digital Image Correlation* en anglès, i d'ara endavant DIC, és un mètode que permet mesurar desplaçaments i deformacions a partir de la correlació d'imatges, tal com indica el seu nom.

Per a fer possible la correlació, és necessari que la superfície de l'objecte assajat presenti un patró de taques petites (*speckles*). La funció d'aquest patró consisteix a crear un camp de variacions de tonalitats de gris aleatòriament de tal manera que si es coneixen els gradients de gris en una zona de la superfície, es pot localitzar la mateixa zona en instants posteriors i obtenir els desplaçaments dels punts de la superfície d'estudi. Els desplaçaments generats permeten conèixer les deformacions.

Existeixen dues metodologies diferents en funció de si es vol treballar en el pla (2D) o en l'espai (3D). En el cas de voler treballar en el pla, el muntatge experimental disposa d'una única càmera col·locada perpendicularment a la superfície d'interès de la peça. Per altra banda, en cas de treballar en l'espai, es disposa de dues càmeres inclinades un cert angle respecte el pla perpendicular a la superfície d'interès.

El cas 2D només permet calcular les deformacions generades en el pla de l'àrea d'interès de la peça, en anglès, *Area Of Interest* (AOI), mentre que el cas 3D permet registrar els moviments que es produeixen fora d'aquest pla.

1.1 Antecedents

En l'àmbit de l'assignatura de Solid Mechanics del Màster Mecànica de Materials i Estructures es planteja la preparació d'una nova pràctica per tal d'analitzar problemes estructurals avançats mitjançant el mètode dels elements finits i tècniques de correlació d'imatges digitals. En aquest treball es requereix dissenyar, fabricar i analitzar una biga d'eix curvilini, en forma de "U", que pugui aguantar els esforços generats en una estructura de suport existent. El disseny ha de permetre simular el comportament del material mitjançant eines computacionals, així com el seu assaig a través de tècniques extensomètriques clàssiques i avançades.

1.2 Objectius

L'objectiu del treball és, en primer lloc, dissenyar tres models de peça de diferents dimensions mitjançant mètodes analítics i numèrics (elements finits) i analitzar el seu estat de tensions i deformacions quan se sotmeten a diferents càrregues verticals, tenint en compte que sempre es treballarà per sota del límit elàstic del material de la peça i de l'estructura de suport. En segon lloc, s'encarregarà la fabricació de les tres peces i

s'assajaran aplicant diferents càrregues sobre el muntatge per tal d'obtenir l'estat de deformacions originades. Les deformacions s'avaluaran en els punts extrems de la secció central de la peça a través de galgues extensomètriques i de la tècnica DIC. Per últim, es compararan els resultats experimentals i numèrics amb els resultats analítics.

1.3 Especificacions i Abast

1.3.1 Especificacions

A continuació, en la Taula 1, es mostren les especificacions del treball i es classifiquen en funció de si són un desig (D) o un requeriment (R).

Tema	D/R	Descripció
Desenvolupament analític dels models d'estudi	R	Analitzar teòricament l'estat de tensions i deformacions que es generen en els tres models.
Desenvolupament numèric dels models d'estudi	R	Dissenyar els tres models amb un programa d'elements finits per a simular el seu comportament.
Obtenció de deformacions mitjançant tècniques extensomètriques clàssiques i avançades	R	Avaluar les deformacions que es produeixen en la secció d'estudi mitjançant galgues extensomètriques i la tècnica DIC.
Comparació entre la metodologia DIC 2D i 3D	D	Comparar els resultats obtinguts amb el mètode DIC 2D i 3D per a conèixer quins s'ajusten més als resultats analítics.
Relació entre els resultats analítics, numèrics i experimentals	R	Comparar els resultats numèrics i experimentals amb els analítics.

Taula 1 - Taula de desitjos i requeriments

1.3.2 Abast

L'abast del projecte inclou el disseny de les tres peces així com l'estudi de deformacions i tensions que s'obtingran teòricament; l'estudi de deformacions obtingudes de forma experimental a partir de galgues extensomètriques i la correlació digital d'imatges; i finalment, una comparació entre resultats teòrics i experimentals.

2 CORRELACIÓ DIGITAL D'IMATGES

2.1 Introducció a la correlació digital d'imatges

La mecànica del sòlid és una àrea que s'encarrega de l'estudi dels camps de deformacions i desplaçaments d'una superfície. Existeixen diferents tècniques òptiques que permeten mesurar el camp de desplaçaments sense necessitat de contacte. Es pot distingir entre les tècniques interferomètriques i no interferomètriques.

El principi de funcionament de les tècniques interferomètriques es basa a aplicar un feix de llum a l'objecte d'estudi i obtenir un patró de franges a partir de la mesura de la longitud d'ona abans i després de la deformació [1].

En les tècniques no interferomètriques es troba el mètode de la correlació d'imatges que es tracta en aquest treball. La tècnica DIC és un mètode òptic que utilitza una anàlisi de correlació matemàtica per a examinar les dades de les imatges digitals que es prenen mentre l'element d'estudi és sotmès a assajos mecànics [2].

Per a dur a terme aquesta tècnica, es crea un camp de variacions de tonalitats de gris de manera aleatòria sobre la superfície d'estudi, de tal manera que si es coneixen els gradients de gris d'una zona en un instant "t", és possible localitzar la mateixa zona en un instant posterior "t+1". D'aquesta manera, es poden trobar els desplaçaments originats en els diferents punts de la superfície. Un cop coneguts els desplaçaments, es poden determinar les deformacions, que per al cas d'estat uniaxial de tensions es pot simplificar segons l'Equació 1.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L-L_0}{L_0} \quad (1)$$

On:

ε (èpsilon) és la deformació unitària

L_0 és la longitud inicial entre dos punts de la superfície

L és la longitud final entre els mateixos dos punts de la superfície

Aquesta tècnica presenta diversos avantatges respecte d'altres mètodes per a la mesura de desplaçaments i deformacions [3]:

- El muntatge de l'equip necessari és més senzill que els sistemes làser que utilitzen altres tècniques.
- Facilitat d'enllumenat, ja que la llum necessària per a realitzar els assaigs ha de ser llum blanca, procedent d'un sistema de focus o bé per il·luminació natural.

- Els algoritmes que implementa la tècnica tenen uns requeriments computacionals no molt elevats i, per tant, permet fer anàlisis en temps real.
- És versàtil, podent aplicar-se a diferents problemes. No és invasiva i pot arribar a tenir 0,01 píxels de precisió per a la mesura de desplaçaments i un 0,01% per a la mesura de deformacions.
- No es limita el camp de mesura a un únic punt de posicionament de la galga extensomètrica (mètode molt comú per a mesurar deformacions) i, per tant, permet obtenir informació en tota la zona dintre del camp de visió d'una o diverses càmeres.

Tanmateix, la tècnica també presenta desavantatges destacant la qualitat del sistema d'adquisició d'imatges i del muntatge experimental, ja que ambdós factors poden influir en la precisió dels resultats. La tècnica també requereix generar una distribució aleatòria de grisos mitjançant un patró de *speckles* sobre la superfície d'estudi.

2.2 Conceptes d'òptica

En aquest apartat s'han descrit els principals conceptes d'òptica que cal conèixer per a poder comprendre correctament el muntatge del sistema DIC. Entre ells es troben la distància focal, l'obertura del diafragma i la profunditat de camp.

La distància focal és la distància existent entre el sensor i el centre òptic de la lent. Aquesta distància determina l'angle de visió de tal manera que a major distància focal l'angle de visió disminueix segons es pot veure en la Figura 1.

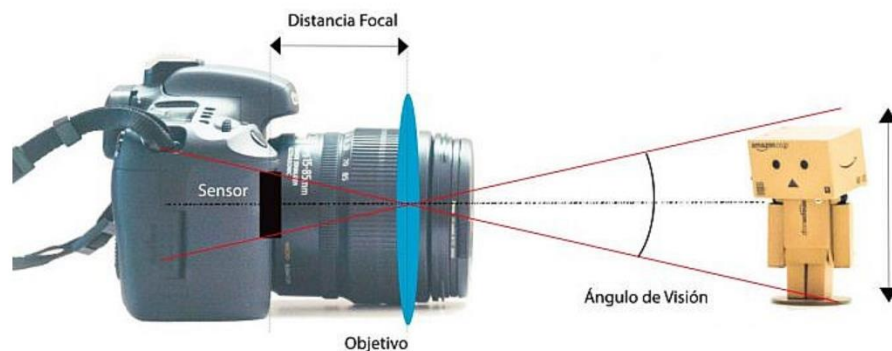


Figura 1 - Concepte de distància focal [4]

L'obertura del diafragma és un altre concepte bàsic que indica la lluminositat d'un objectiu, ja que permet regular la quantitat de llum que entra en la càmera. L'obertura es representa mitjançant la lletra *f* i un número com per exemple *f/5,6*.

A mesura que disminueix l'obertura del diafragma augmenta el valor del número *f* de tal manera que per a un major número de *f* (*f/11* per exemple) es deixarà passar menys

llum, augmentarà la profunditat de camp i s'obtindrà menys desenfocament. En la Figura 2 es mostra com disminueix l'obertura del diafragma a mesura que augmenta el valor de f .



Figura 2 - Concepte d'obertura del diafragma [5]

Si l'àrea d'interès que es vol analitzar es troba a prop de la lent, la distància focal haurà de ser petita i caldrà una major obertura del diafragma (valor f petit) per a deixar entrar més llum.

En canvi, si l'àrea d'interès es troba lluny de la lent, serà necessària una distància focal major i una obertura de diafragma més petita (valor f gran) perquè es deixi passar menys llum i es pugui enfocar correctament.

La profunditat de camp de la càmera indica el marge de nitidesa d'una imatge i es defineix com la zona que compren des del punt més proper fins al més llunyà del nostre camp on la nitidesa és acceptable.

Hi ha 2 factors principals que poden variar la profunditat de camp: la distància focal i l'obertura del diafragma.

Com menor sigui la distància focal de l'objectiu, major serà la profunditat de camp. Tal com es pot veure en la Figura 3, la imatge feta amb una distància focal de 35 mm té una profunditat de camp major que la imatge captada amb una distància focal de 100 mm.

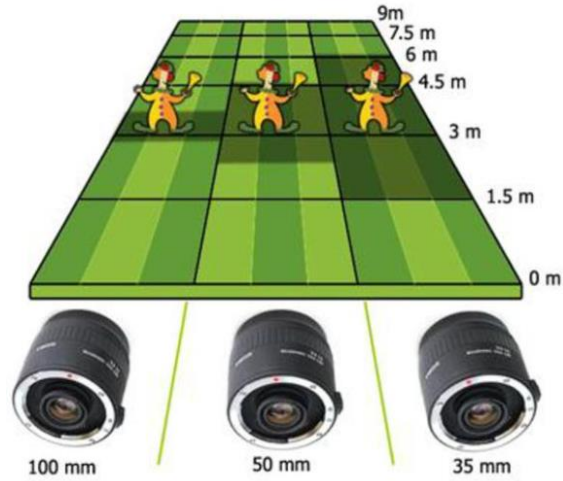


Figura 3 - Influència de la distància focal en la profunditat de camp [6]

En relació amb l'obertura del diafragma, com major sigui aquesta (f/petita), menor serà la profunditat de camp. En la Figura 4 es pot observar com la imatge que s'ha fet a f/2,8 (major obertura del diafragma) presenta una profunditat de camp menor.

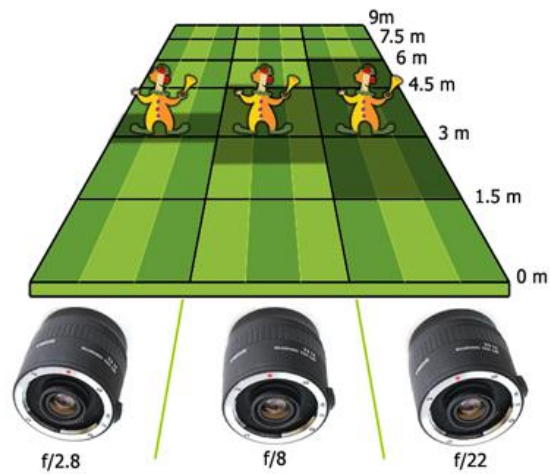


Figura 4 - Influència de l'obertura del diafragma en la profunditat de camp [6]

Per tant, és necessari ajustar correctament la distància focal i l'obertura del diafragma per a troba el punt òptim de nitidesa.

Altrament, per a conèixer la precisió que es pot obtenir en la mesura cal dividir l'amplada de visió entre el nombre de píxels d'alçada i amplada que té la càmera tal com es mostra a l'Equació 2.

$$\text{Mida píxel} \left[\frac{\text{mm}}{\text{píxel}} \right] = \frac{\text{Amplada de visió [mm]}}{\text{Nombre de píxels [píxel]}} \quad (2)$$

2.3 Aplicacions de la tècnica DIC

En els darrers anys, aplicacions basades en DIC s'han desenvolupat per a estudiar el comportament mecànic de materials sotmesos a determinades condicions.

Mitjançant sistemes de videocorrelació s'ha analitzat el comportament de materials carregats a tracció o compressió; s'han investigat materials compostos davant sol·licitacions biaxials obtenint resultats dels desplaçaments originats en el material danyat a causa del sistema de càrregues; també ha sigut emprada en situacions de mecànica de la fractura i termografia; inclús s'ha explorat la deformació plàstica en materials anisòtrops durant assaigs a tracció [3].

La tècnica també s'ha utilitzat en el sector aeronàutic per a l'avaluació de les propietats mecàniques. En el sector automobilístic, mitjançant la correlació, s'ha estudiat l'impacte produït per la col·lisió amb un vianant. En medicina s'han estudiat les propietats mecàniques de la pell humana comparant els resultats amb DIC i elements finits [3].

En aquest treball la tècnica s'ha utilitzat per a obtenir les deformacions originades en l'element d'estudi quan s'apliquen diverses càrregues en el muntatge.

2.4 Preparació d'espècimens

La generació de patrons de *speckles* influeix directament sobre la precisió dels resultats dels assaigs. És necessari aplicar un mètode de generació de patrons que permeti obtenir el patró òptim per tal de disminuir l'error quan el software realitzi la correlació.

Existeix diverses tècniques de generació de patrons. Les més comunes són les tècniques d'esprai, aerògraf, rodet i imprimació [7].

En aquest treball s'ha aplicat la tècnica d'imprimació, també anomenada *Water Transfer Printing* (WTP). Aquest mètode es basa en la transferència d'imatges mitjançant un gel que es pot apreciar en la Figura 5. És important imprimir el patró amb una impressora làser, ja que en cas contrari el patró no pot ser transferit sobre la superfície de la peça [8].



Figura 5 - Gel de transferència

El procés emprat per a aplicar els patrons presenta diverses fases. En la Figura 6 es mostren els diferents passos que s'han realitzat per a transferir el patró imprès sobre la superfície de la peça. Aquest patró s'ha extret d'un codi Matlab de generació de patrons [9].



(1) Pintar la superfície de color blanc per a obtenir el contrast més gran possible.



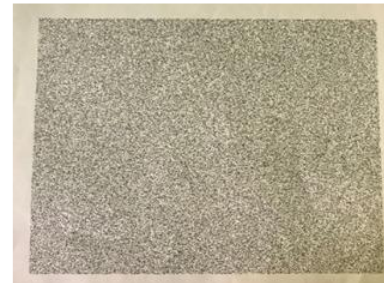
(2) Aplicar el gel sobre la superfície de la peça on es vol transferir el patró.



(4) Col·locar el patró sobre del gel i esperar que es transfereixi.



(5) Mular una mica el paper per tal que es desfaci.



(3) Imprimir el patró de *speckles* amb la impressora làser.



(6) Rascar el paper tou per a eliminar-lo de la superfície de la peça i que només quedi transferit el patró.

Figura 6 - Procés emprat per a la transferència del patró

2.5 Qualitat del patró: Mean Intensity Gradient (MIG)

Per tal que la correlació sigui possible, és necessari que la superfície presenti un patró de *speckles* totalment aleatori. El patró consisteix a pintar un conjunt de punts negres o blancs sobre la superfície en funció de si aquesta és blanca o negra, respectivament. D'aquesta manera es pretén que hi hagi el màxim contrast amb el fons i que el gradient de color sigui el més elevat possible. El patró de *speckles* divideix la superfície en diferents zones on cadascuna d'elles presenta una tonalitat de gris diferent de manera que permet diferenciar cada zona per a cada instant de temps. En la Figura 7 es mostra el desplaçament que ha patit el centre del *subset* entre la imatge de referència i la imatge obtinguda després de la deformació.

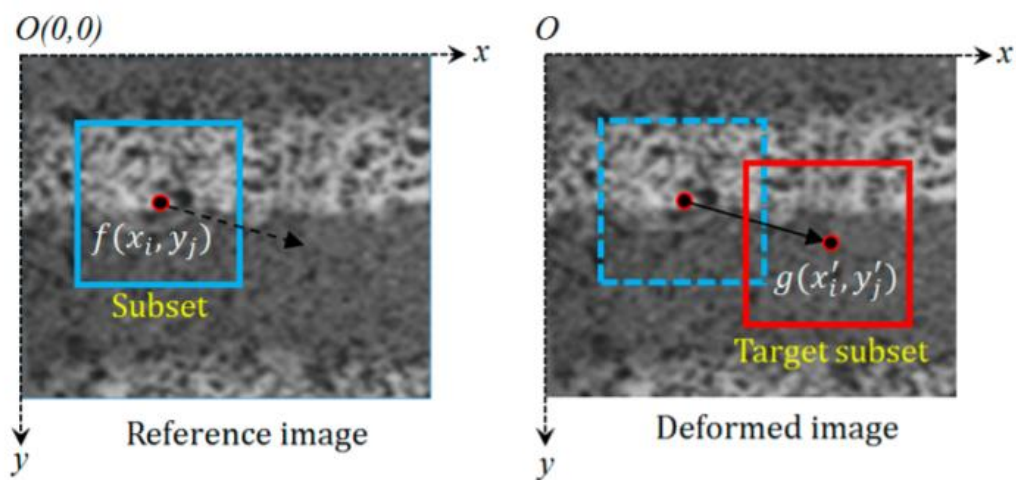


Figura 7 - Correlació d'un subset entre la imatge inicial en l'instant t i la imatge final en l'instant t' [10]

Cada subconjunt de píxels definits en la imatge de referència, anomenat *subset*, presenta un valor de gradient de grisos característic, el qual es diferencia dels altres subconjunts. Per a trobar la nova ubicació del subconjunt de la imatge de referència, cal definir el paràmetre MIG i algun criteri de similitud que es maximitzi o minimitzi quan s'identifiqui el *subset* en la imatge objectiu, per a obtenir d'aquesta manera els desplaçaments.

Els paràmetres principals que defineixen la qualitat del patró de *speckles* són el gradient de grisos dels píxels i l'aleatorietat de les taques.

El mètode més usat per a calcular el nivell de grisos és l'anomenat *Mean Intensity Gradient* (MIG) el qual calcula el gradient de grisos entre els píxels de tota la imatge segons indica l'Equació 3 [11].

$$\text{MIG} = \frac{\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^H |(\nabla f(x_{ij}))|}{W \cdot H} \quad (3)$$

On:

W és el nombre de píxels d'amplada de la imatge

H és el nombre de píxels d'alçada de la imatge

$|(\nabla f(x_{ij}))|$ és el mòdul del vector gradient d'intensitat local en el píxel x_{ij}

El valor del MIG és directament proporcional al contrast existent i, per tant, com més elevat sigui aquest paràmetre, el contrast serà més gran i els *subsets* es detectaran millor.

A vegades, aquest paràmetre no és suficient per a determinar la qualitat del patró, ja que en algun cas es pot obtenir un valor MIG molt elevat amb un patró que presenti una aleatorietat baixa. Per tant, a l'hora de fer la correlació, el *subset* d'interès no es diferenciaria de la resta de *subsets* en els instants de temps posteriors, i la correlació no es podria dur a terme.

Així doncs, trobar el patró de *speckles* òptim és un procés complicat, ja que l'aleatorietat és un paràmetre difícil de controlar, a diferència del gradient de grisos que es pot calcular a partir del MIG. Els mètodes que s'haurien d'utilitzar per a generar un patró totalment aleatori són aquells amb què es té menys control, ja que permeten obtenir una màxima aleatorietat.

2.6 Fonaments de la correlació d'imatges

La correlació d'imatges es basa a definir una AOI en una imatge de referència, a l'instant inicial de l'assaig, i identificar-la al llarg de l'assaig en els diferents instants de temps. Per a seleccionar l'AOI, cal tenir present que aquesta haurà d'estar en totes les imatges de l'assaig, és a dir, assegurar que no surti del camp de visió de la càmera perquè si sortís del camp de visió, no es podria trobar la mateixa àrea en els posteriors instants de temps. En conseqüència, quan es realitza l'assaig, cal assegurar-se que el camp de visió de la càmera contingui l'àrea d'interès i un marge que consideri el moviment que pot patir aquesta durant l'assaig. D'aquesta manera s'assegura que l'àrea serà visible en tots els instants de temps.

A partir de l'AOI seleccionada, es crea una malla que està dividida en diferents cel·les anomenades *subsets*. La distància entre els centres dels *subsets* s'anomena *stepsize*. Com a norma general, la mida de l'*stepsize* es considera entre 1/3 i 1/4 de la mida del *subset* i, per tant, els *subsets* es troben superposats. D'aquesta manera, el nombre de

subsets que formen l'àrea d'interès és major i s'obtidran més dades quan es realitzi la correlació.

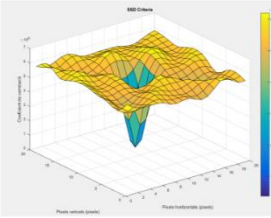
Cada *subset* recull la informació del nivell de grisos del conjunt de píxels que el formen. Aquesta informació s'inclou en una posició de la matriu de correlació. L'objectiu de la funció de correlació és trobar la posició del *subset* durant els diferents instants de temps que comprèn l'assaig.

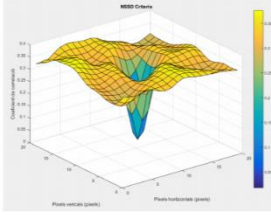
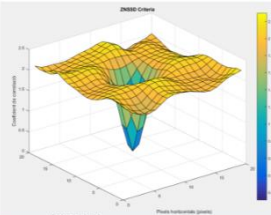
La mida del *subset* és un paràmetre molt important a considerar, ja que si la mida d'aquest augmenta, es pot guardar una quantitat de grisos major i llavors és més complicat que dos *subsets* de l'AOI tinguin el mateix patró de grisos i es puguin confondre durant la correlació.

Per a determinar una nova ubicació del *subset*, hi ha una gran varietat de mètodes de correlació basats en funcions matemàtiques de minimització i maximització que comparen la diferència que hi ha entre les matrius de grisos en diferents instants de temps.

Per una banda, dins dels criteris de minimització, es troben els criteris de correlació SSD (Sumatori de Diferències Creuades) i per altra banda, els basats en la maximització, anomenats criteris de correlació CC (Correlació Creuada).

En aquest treball es mostren els criteris de correlació SSD, ja que són els que utilitza el software VIC 2D i VIC 3D que es disposa en la universitat. A la Taula 2 es mostren les expressions matemàtiques i la representació gràfica dels diferents criteris de correlació SSD [10].

Criteri de correlació	Expressió del coeficient de correlació (C)	Representació gràfica
Sumatori de Diferències Quadrades (SSD)	$C_{SSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - g(x_i', y_j')]^2$	

<p>Sumatori de Diferències Quadrades Normalitzades (NSSD)</p>	$C_{NSSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j)}{\bar{f}} - \frac{g(x_i', y_j')}{\bar{g}} \right]^2$	
<p>Sumatori de Diferències Quadrades Normalitzades a Zero (ZNSSD)</p>	$C_{ZNSSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j) - f_m}{\Delta f} - \frac{g(x_i', y_j') - g_m}{\Delta g} \right]^2$	

Taula 2 - Expressions dels diferents criteris de correlació

On:

M és la meitat de la mida del *subset* $\left(\frac{N}{2}\right)$

$f(x_i, y_j)$ és la matriu de grisos en l'instant inicial

$g(x_i', y_j')$ és la matriu de grisos en l'instant final

$$f_m = \frac{1}{(2M + 1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M f(x_i, y_j) \quad (4)$$

$$g_m = \frac{1}{(2M + 1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M g(x_i', y_j') \quad (5)$$

$$\bar{f} = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j)]^2} \quad (6)$$

$$\bar{g} = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x_i', y_j')]^2} \quad (7)$$

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - f_m]^2} \quad (8)$$

$$\Delta g = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x'_i, y'_j) - g_m]^2} \quad (9)$$

Les expressions anteriors permeten localitzar el *subset* en un nou instant de temps.

La nova posició d'un punt qualsevol dintre del *subset* depèn de la seva posició en la imatge inicial i d'una equació de forma que té en compte la deformació que experimenta el *subset* durant l'assaig. En la Figura 8 es mostra el desplaçament que experimenta el punt central del *subset*.

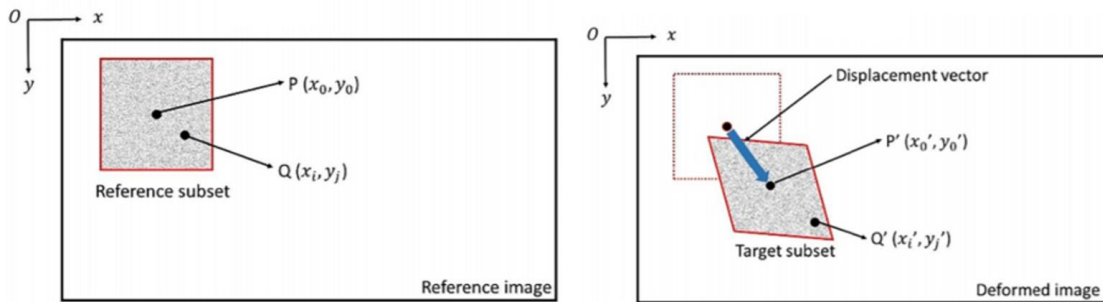


Figura 8 - Desplaçament del punt central del subset [12]

Un cop ubicat el punt central del *subset* (punt P) en la imatge deformada, les Equacions 10 i 11 definides per Yoneyama S & Kikuta H permeten trobar la nova posició d'un punt qualsevol (punt Q) dins del *subset* [13].

$$x'_i = x_i + \varepsilon(x_i, y_j) \quad (10)$$

$$y'_j = y_j + \mu(x_i, y_j) \quad (11)$$

On:

X_i és la posició horitzontal en l'instant inicial

Y_j és la posició vertical en l'instant inicial

X'_i és la nova posició horitzontal en el nou instant de temps

Y'_j és la nova posició vertical en el nou instant de temps

$\varepsilon(x_i, y_j)$ i $\mu(x_i, y_j)$ es corresponen amb les funcions de forma

En la Figura 9 es pot observar el desplaçament horitzontal (u) i vertical (v) del centre del *subset*.

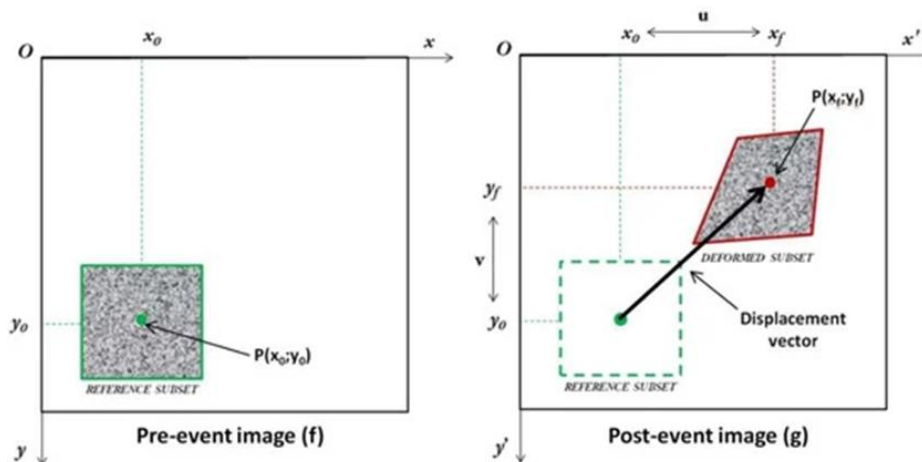


Figura 9 – Desplaçament horitzontal i vertical del centre del *subset* [14]

Les Equacions 12 i 13 fan referència a les funcions de forma que tenen en compte les deformacions que experimenta el *subset* [13].

$$\varepsilon(x_i, y_j) = u + u_x \Delta_x + u_y \Delta_y \quad (12)$$

$$\mu(x_i, y_j) = v + v_x \Delta_x + v_y \Delta_y \quad (13)$$

On:

u es correspon al desplaçament horitzontal (en direcció x)

v es correspon al desplaçament vertical (en direcció y)

u_x, u_y, v_x, v_y són els gradients de desplaçament de primer ordre del *subset*.

Així doncs, u i v representen la translació del *subset* en les direccions x i y , respectivament, mentre que els gradients de desplaçament de primer ordre $\frac{du}{dx}, \frac{du}{dy}, \frac{dv}{dx}$ i $\frac{dv}{dy}$ representen les deformacions del *subset* en les direccions x i y tal com es mostra en la Figura 10.

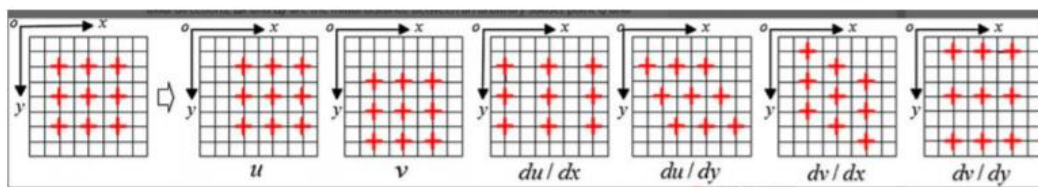


Figura 10 - Translacions i desplaçaments de primer ordre [15]

Δ_x i Δ_y , definits en les Equacions 14 i 15, respectivament, representen la distància en cada direcció entre el punt d'estudi $Q(x_i, y_j)$ i el punt central $P(x_0, y_0)$ del *subset*.

$$\Delta_x = x_i - x_0 \quad (14)$$

$$\Delta_y = y_j - y_0 \quad (15)$$

2.7 Diagrama de flux del procés emprat per al càlcul de deformacions

En la Figura 11 es mostra el diagrama de flux on apareixen els diferents passos que realitza el software internament per a calcular els desplaçaments i poder obtenir el valor de les deformacions.

Perquè el software pugui correlacionar les imatges, és necessari que l'usuari defineixi l'AOI que vol analitzar, la mida del *subset* i de l'*stepsize* així com el criteri de correlació desitjat.

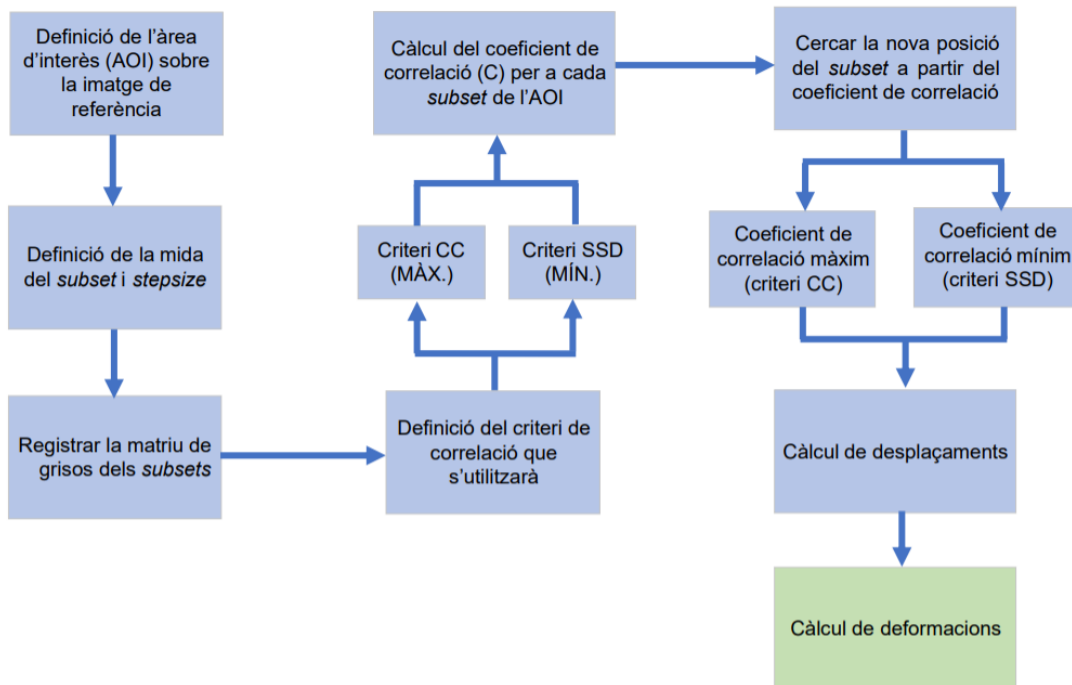


Figura 11 – Diagrama de flux del procés de càlcul de deformacions

3 DISSENY I ANÀLISI DE LA PEÇA D'ESTUDI

3.1 Predimensionament analític

Per a fer una primera estimació dels esforços que s'originen en la peça d'estudi s'han analitzat les tensions generades en la peça i en l'estructura de suport. S'han dissenyat 3 models de peça on cadascun presenta unes dimensions diferents, les quals es troben recollides en la Taula 3.

Model	a [mm]	b [mm]	c [mm]	x [mm]
1	50	10	50	20
2	30	10	60	20
3	50	6	50	20

Taula 3 - Dimensions dels diferents models de peça

On:

a = amplada

b = gruix

c = radi intern

x = distància des del centre del passador fins al centre de curvatura de la peça

En la Figura 12 es mostra la geometria de la peça d'estudi i les seves dimensions, les quals depenen del tipus de model.

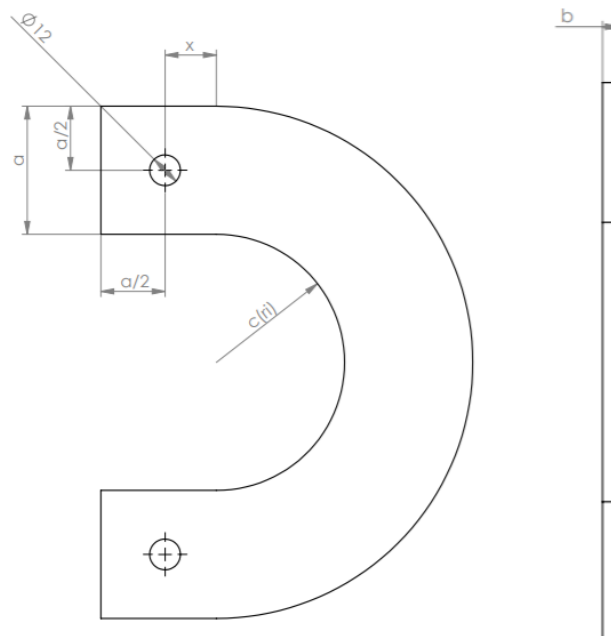


Figura 12 – Geometria i dimensions de la peça d'estudi en mm

La distància entre passadors presenta un valor fix de 150 mm i el diàmetre de 12 mm corresponent als forats dels passadors també és un valor fix per a tots els models.

S'ha decidit fabricar 3 models diferents, ja que d'aquesta manera s'observarà si presenten diferents comportaments durant els assaigs i també s'obtindran més resultats analítics i experimentals per a la posterior comparació.

Tal com s'ha comentat en l'apartat 1.2 Objectius, s'ha treballat per sota del límit elàstic del material de la peça i de l'estructura de suport i, per tant, ha sigut necessari conèixer quina és la màxima càrrega que es pot aplicar en el muntatge per a evitar en qualsevol moment el fenomen de plastificació. La plasticitat és la propietat mecànica d'un material de deformar-se permanentment i irreversiblement quan es troba sotmès a tensions per sobre del seu límit elàstic.

En l'Annex B: Càlcul de la càrrega de plastificació del braç metàl·lic i l'Annex C: Càlcul de la càrrega de plastificació de la peça d'estudi es troba el procediment i els càlculs emprats per a determinar la màxima càrrega que es pot aplicar sobre el muntatge sense que plastifiqui ni el braç ni la peça. Un cop calculat el valor límit de càrrega, s'ha treballat sempre per sota d'aquest. La Taula 4 i la Taula 5 recullen les propietats mecàniques de cada material.

3.1.1 Plastificació del braç metàl·lic

En aquest subapartat es mostra quina és la càrrega màxima que es pot aplicar en el muntatge experimental del laboratori. Per a determinar quina és la càrrega límit per sobre de la qual es produeix el fenomen de plastificació és necessari conèixer les propietats mecàniques del material que constitueix el braç del muntatge. L'estructura de suport on s'ha assajat la peça es mostra en la Figura 13.



Figura 13 - Estructura de suport

En la figura anterior es pot observar que el muntatge està format per un braç que permet la transmissió de la càrrega aplicada a la peça i un sistema de mordaces que permeten fixar-la correctament.

A partir dels càlculs realitzats en l'Annex B: Càlcul de la càrrega de plastificació del braç metàl·lic s'ha determinat que el braç presenta un factor multiplicador de valor 4, de tal manera que si la càrrega aplicada en el muntatge presenta un valor F , la càrrega transmesa a la peça serà de valor $4F$, tal com es mostra en la Figura 14.

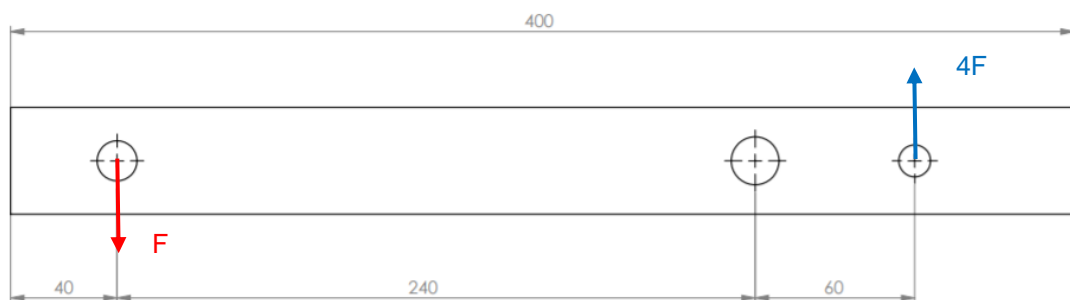


Figura 14 – Factor multiplicador del braç metàl·lic

El braç està format d'acer S235 les propietats mecàniques del qual es troben definides en la Taula 4.

	σ_y [MPa]	E [MPa]
Acer S235	235	210000

Taula 4 - Propietats mecàniques de l'acer S235

A partir dels valors de la taula anterior, en l'Annex B: Càlcul de la càrrega de plastificació del braç metàl·lic s'han desenvolupat els càlculs necessaris per a determinar la màxima càrrega que es pot aplicar en el muntatge sense que el braç plastifiqui. La càrrega límit que s'ha trobat és de 174,22 kg i tenint en compte un coeficient de seguretat de valor 1,5 la càrrega màxima que es pot aplicar és de 116,147 kg.

3.1.2 Plastificació de la peça

Per a determinar la càrrega màxima que pot suportar cada peça és necessari conèixer el material que la constitueix així com les seves propietats mecàniques. Les peces estan formades per alumini 5754 H111 (aliatge Alumini - 3% Magnesi) i les seves propietats mecàniques han sigut determinades en l'Annex A: Caracterització de les propietats mecàniques de l'alumini. La Taula 5 recull els valors del límit elàstic i del mòdul d'elasticitat que s'han obtingut.

	σ_y [MPa]	E [MPa]
Alumini 5754 H111	150	72332

Taula 5 - Propietats mecàniques de l'alumini 5754 H111

Com que es volen analitzar 3 models de peça on cadascun presenta unes dimensions diferents, s'ha calculat la càrrega màxima que es pot aplicar en el muntatge ($F_{límit}$) per a cada un.

L'Equació 57 que es troba en l'Annex C: Càlcul de la càrrega de plastificació de la peça d'estudi determina la càrrega límit aplicable en funció de les dimensions de cada model. El valor de càrrega límit que pot suportar cada model es mostra en la Taula 6.

Model	a [mm]	b [mm]	c [mm]	x [mm]	$F_{límit}$ [kg]
1	50	10	50	20	121,911
2	30	10	60	20	50,055
3	50	6	50	20	73,146

Taula 6 - Càrrega límit per a cada model de peça

Es pot observar que el model 1 és el que presenta un valor de càrrega límit més elevat perquè té una amplada i un gruix superior als altres models.

En canvi, el model 2 és el que presenta una càrrega límit més petita pel fet que la seva amplada és aproximadament la meitat de la qual presenten els altres models.

Els valors que limiten la càrrega aplicada són més restrictius per a les peces que per al braç i, per això, es prendran aquests com a màxims excepte per al model de peça 1,

on el valor que limitarà la càrrega aplicada vindrà definit pel màxim que pot suportar el braç.

3.1.3 Anàlisi teòric de tensions i deformacions

Un cop s'ha predimensionat la peça i s'han parametrizat els càlculs de tensions i deformacions, és necessari analitzar quines deformacions es generen en els extrems de la secció central de la peça quan aquesta és sotmesa a diferents càrregues.

En el laboratori es disposa de sis tipus de discs on cadascun té una massa diferent. En la Figura 15 apareixen els diferents discs que s'han utilitzat per a realitzar els assaigs i en la Taula 7 es mostra la massa de cadascun.



Figura 15 – Tipus de discs del laboratori

Tipus de disc	Massa [kg]
1	1,524
2	1,425
3	1,413
4	5,123
5	5,116
6	13,400 kg

Taula 7 - Massa corresponent a cada tipus de disc

Per a obtenir correctament els resultats i poder analitzar-los posteriorment, s'ha carregat progressivament el muntatge mitjançant combinacions dels diferents tipus de discs. Per a cada valor de càrrega s'han anotat les deformacions que s'han obtingut en els extrems de la secció central.

L'extrem intern de la secció central suporta les tensions màximes a tracció mentre que l'extrem extern suporta les tensions màximes a compressió. En la Figura 16 es mostra una representació gràfica de la secció central i dels punts crítics d'aquesta.

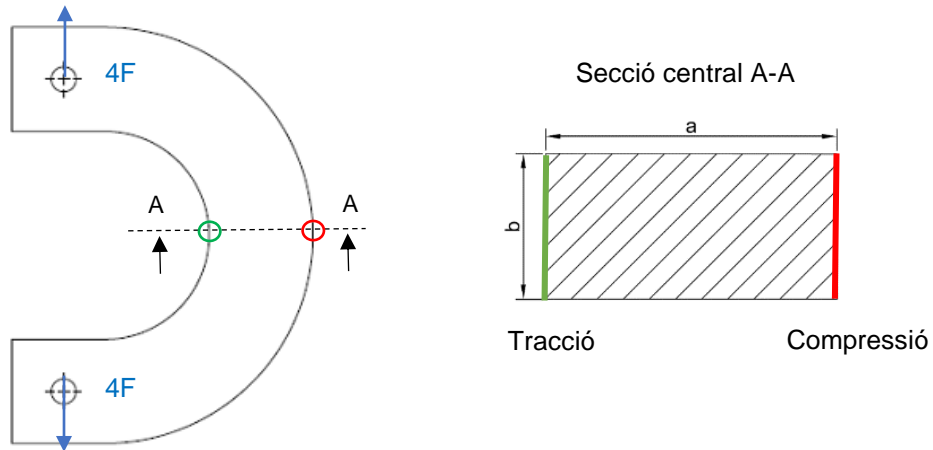


Figura 16 – Punts crítics a tracció i compressió (esquerra) i secció central d'estudi (dreta)

La tensió màxima a tracció es correspon amb la tensió crítica definida en l'Equació 53.

Per a determinar la tensió màxima que es genera a compressió cal considerar que la tensió produïda per la força normal compensa positivament la tensió generada pel moment flector negatiu. Per a desenvolupar l'Equació 16 s'ha seguit el procediment emprat en l'Annex C: Càlcul de la càrrega de plastificació de la peça d'estudi basat en la teoria de la biga corba [16].

$$\sigma \text{ màx. compressió [MPa]} = - \frac{4 \cdot F \left(x + c + \frac{a}{2} \right) \cdot \left(c + a - \frac{a}{\ln \left(1 + \frac{a}{c} \right)} \right)}{a \cdot b \cdot \left(c + \frac{a}{2} - \frac{a}{\ln \left(1 + \frac{a}{c} \right)} \right) \cdot (c + a)} + \frac{4 \cdot F}{a \cdot b} \quad (16)$$

On F es correspon amb la càrrega aplicada en unitats del S.I de força, newtons i els paràmetres a, b, c i x representen les dimensions de cada model de peça en mm.

Com que s'ha treballat en la zona lineal de la corba esforç-deformació les deformacions generades s'obtenen a partir de la llei de Hooke segons l'Equació 17.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (17)$$

On el Mòdul de Young (E) s'ha determinat en l'Annex A: Caracterització de les propietats mecàniques de l'alumini i presenta un valor de 72332 MPa.

El diagrama de tensions normals que s'obté al llarg de la secció central es mostra en la Figura 17. En aquest cas, s'ha considerat com a exemple el model de peça 1 i s'ha carregat el muntatge amb una càrrega F de valor 45 kg que es troba per sota de $F_{límit}$.

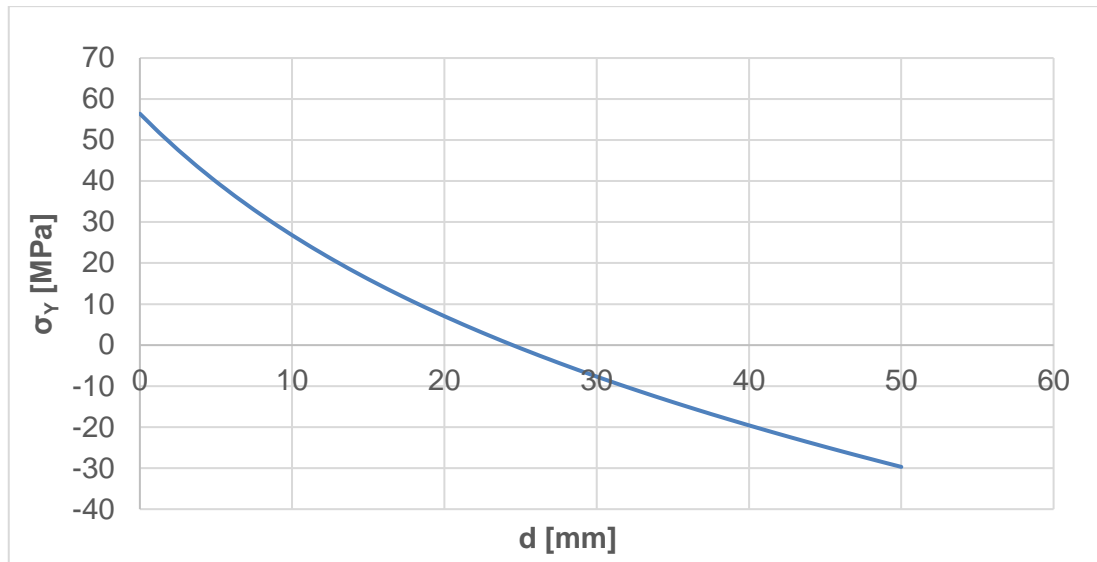


Figura 17 – Diagrama de tensions normals en direcció vertical al llarg de la secció central

En la figura anterior es pot observar que la distribució de tensions normals al llarg de la secció central s'ajusta lleugerament a una paràbola. En l'extrem intern de la secció central ($d=0$ mm) s'obté una tensió màxima i de valor positiu, per tant, indica que treballa a tracció. A mesura que augmenta el paràmetre d , el qual es correspon a la posició al llarg de la secció central, les tensions disminueixen fins a arribar a l'extrem extern de la secció ($d=a=50$ mm) on s'obté la màxima tensió a compressió, ja que es pot veure que la tensió presenta un valor negatiu. La intersecció de la corba amb l'eix d'abscisses correspon a la posició de la línia neutra on les tensions són nul·les i canvien de signe.

3.2 Predimensionament numèric

Mitjançant un programa d'elements finits, en aquest cas l'ANSYS, s'ha modelat la peça d'estudi. El disseny numèric permet simular el comportament del material quan s'apliquen diferents càrregues en el muntatge del laboratori.

3.2.1 Definició de les propietats mecàniques del material

En primer lloc, s'ha seleccionat el material que compon la peça. El programa presenta una llibreria de materials entre els quals es troba l'alumini. No obstant això, les propietats mecàniques de l'alumini que té per defecte l'ANSYS no es corresponen amb les calculades en l'Annex A: Caracterització de les propietats mecàniques de l'alumini, ja que el programa no té en compte que l'alumini en qüestió es tracta d'un aliatge amb magnesi. Per tant, s'han introduït els valors del límit elàstic i del mòdul de Young definits en la Taula 5. Aquests valors es poden apreciar en la Figura 18.

Material			
	Aluminum Alloy		General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-5H, page 3-277.
8	Young's Modulus	72332	MPa
16	Tensile Yield Strength	150	MPa

Figura 18 – Definició de les propietats mecàniques de l'alumini 5754 H111

3.2.2 Geometria dels models

En aquest subapartat es mostra la geometria de la peça. En la Figura 19 es pot observar el disseny simètric del primer model que s'ha assajat experimentalment. La resta de models presenten la mateixa geometria, però amb diferents dimensions, les quals es troben en la Taula 3.

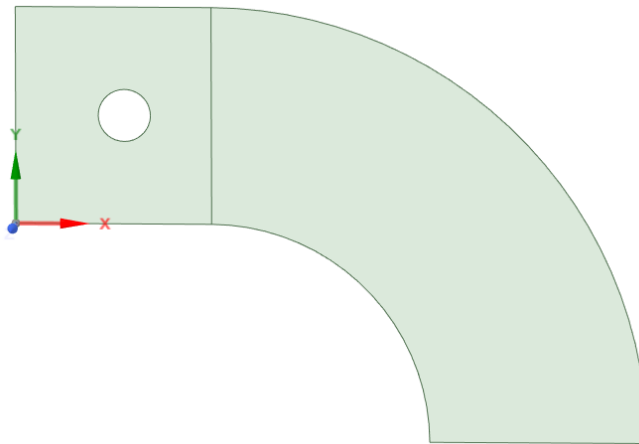


Figura 19 – Geometria del model 1

En la figura anterior es pot observar que només s'ha modelat la meitat de la peça ja aquesta és totalment simètrica respecte de l'eix X. El fet d'aplicar la simetria ha facilitat el disseny dels tres models i l'obtenció de les tensions i deformacions que s'originen en la secció central d'estudi, ja que aquesta secció es correspon amb l'aresta horitzontal de simetria.

La superfície de la peça s'ha dividit en dues regions. La primera regió consta d'un rectangle mentre que l'altra regió fa referència a la curvatura de la peça (Figura 20).

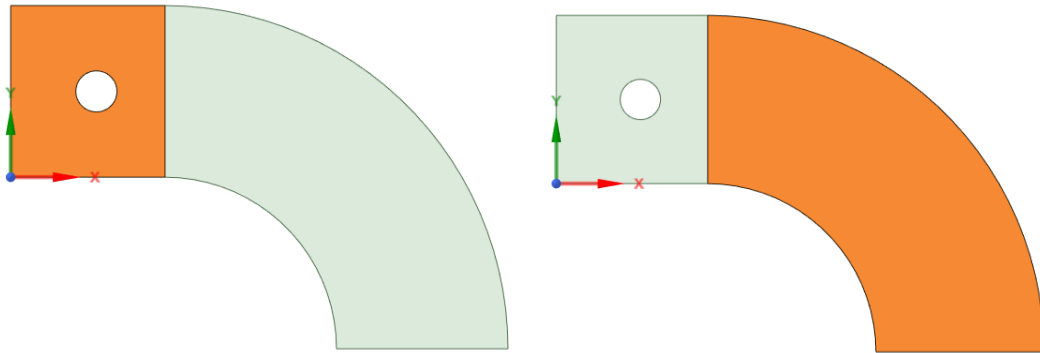


Figura 20 – Regió rectangular (esquerra) i regió corba (dreta)

S'ha decidit dividir la superfície en dues regions per a poder establir un mallat uniforme al llarg de la superfície de la peça. El procediment emprat per a generar el mallat es mostra en l'Annex D: Mallat del model.

3.2.3 Tipus d'elements

L'assignació del tipus d'elements s'ha realitzat amb l'eina *Element Type* la qual permet escollir el tipus d'element que el programa utilitzarà per a l'anàlisi d'elements finits. Hi ha elements de molts tipus en funció de les càrregues que es necessiten aplicar. Els elements poden ser bidimensionals o tridimensionals depenent de si es treballa en el pla o en l'espai, respectivament. En aquest cas, s'ha decidit treballar en el pla XY perquè es pretén obtenir de manera acurada el camp de deformacions al llarg de la direcció vertical Y.

En els dissenys realitzats s'han utilitzat els elements bidimensionals PLANE183 i SURF153. El primer, representat en la Figura 21, es tracta d'un element de 2D que està definit per vuit o sis nodes i es pot utilitzar com a element pla (tensió plana i deformació plana) o bé per a models axialment simètrics (amb torsió o sense). En aquest cas, el modelatge axialment simètric ha permès elaborar una anàlisi tridimensional a partir d'una geometria bidimensional que és simètrica respecte d'un eix. En la majoria dels casos, l'element té dos graus de llibertat a cada node.

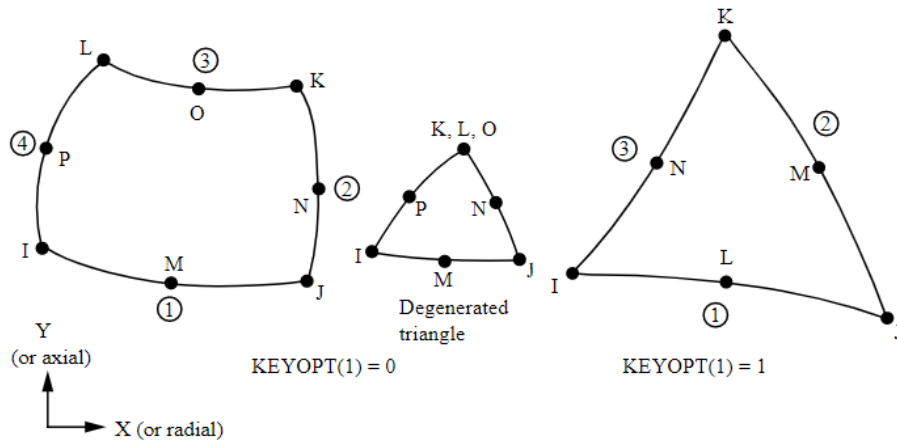


Figura 21 – Element PLANE183 [17]

L'element SURF153, mostrat en la Figura 22, permet recobrir una cara de qualsevol element 2D i s'utilitza per a diverses aplicacions de càrregues i efectes superficials.

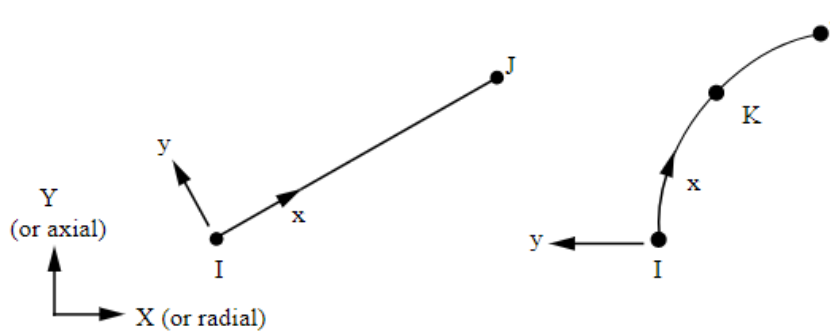


Figura 22 – Element SURF153 [18]

3.2.4 Condicions de contorn per a dissenyar el model simètric

La peça d'estudi és totalment simètrica respecte de l'eix horitzontal X de manera que s'ha simplificat el disseny dels models aplicant la simetria corresponent.

Per a aplicar la simetria s'ha utilitzat l'opció *Symmetry Region* i s'ha seleccionat l'aresta inferior mostrada en la Figura 23 com a referència de simetria. L'eix normal de simetria es correspon amb l'eix vertical Y perquè la peça és simètrica respecte de l'eix horitzontal.

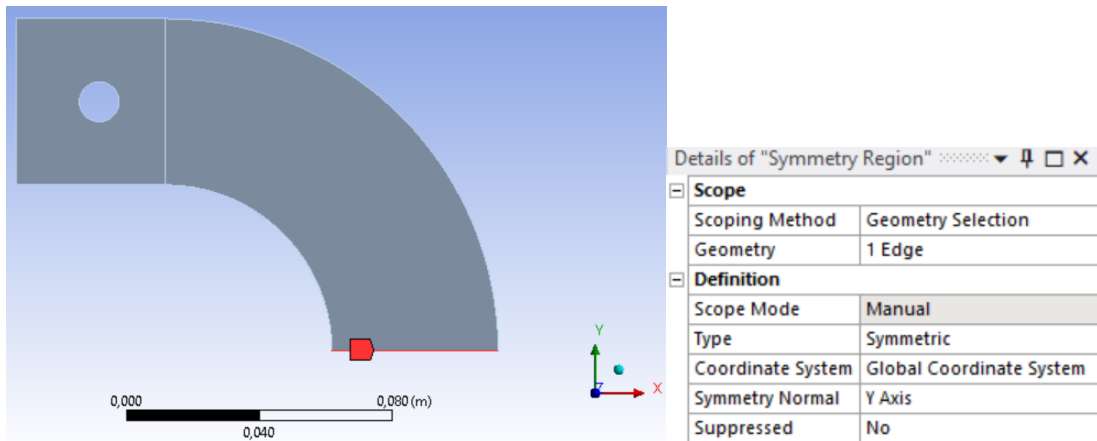


Figura 23 – Condició de simetria

Un cop introduïda la condició de simetria, s'han introduït les condicions de contorn corresponents.

Per a restringir desplaçaments en les direccions del pla s'ha utilitzat l'opció *Displacement*. En primer lloc s'ha restringit el desplaçament vertical de l'aresta de simetria (Figura 24).

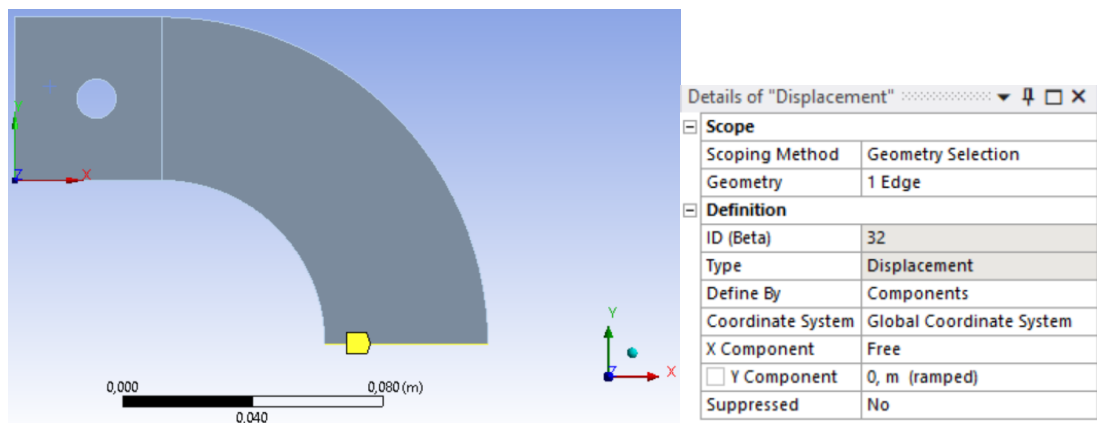


Figura 24 – Restricció del desplaçament vertical en l'aresta de simetria

També s'ha restringit el desplaçament horitzontal del vèrtex esquerre de l'aresta de simetria. Es pot observar en la Figura 25.

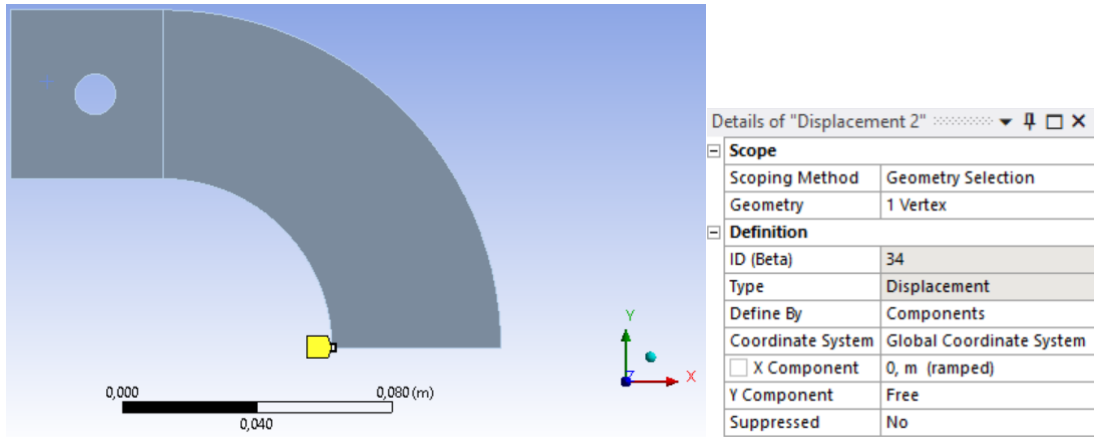


Figura 25 – Restricció del desplaçament horitzontal del vèrtex de l'aresta de simetria

Per tal de considerar les reaccions que generen els passadors sobre la peça quan es carrega el muntatge s'ha utilitzat l'opció *Bearing Load*, la qual permet simular les forces radials aplicades en l'interior d'un cilindre. La Figura 26 mostra la força aplicada i la seva direcció.

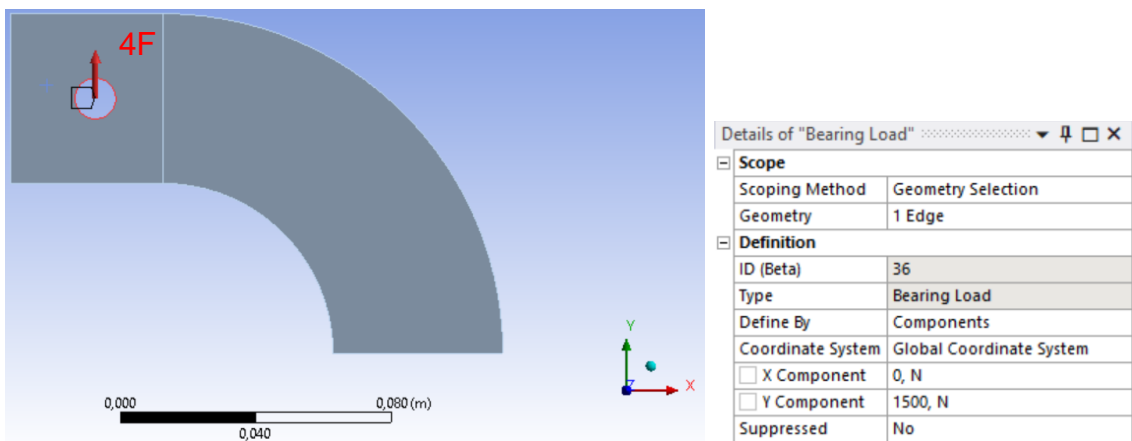


Figura 26 – Reacció generada pels passadors sobre la peça

Un cop realitzat el disseny numèric mitjançant elements finits, es pot variar el valor de la reacció $4F$ per a obtenir el valor de les tensions i deformacions que es generen en la secció central de la peça quan el muntatge és carregat amb una càrrega F , essent aquesta el pes dels discs.

La secció central de la peça és la que es troba assenyalada en la Figura 27 i es pot observar que quan es carrega el muntatge amb qualsevol càrrega F , aquesta secció és la que suporta unes tensions majors tant de tracció com de compressió en la direcció vertical (σ_y).

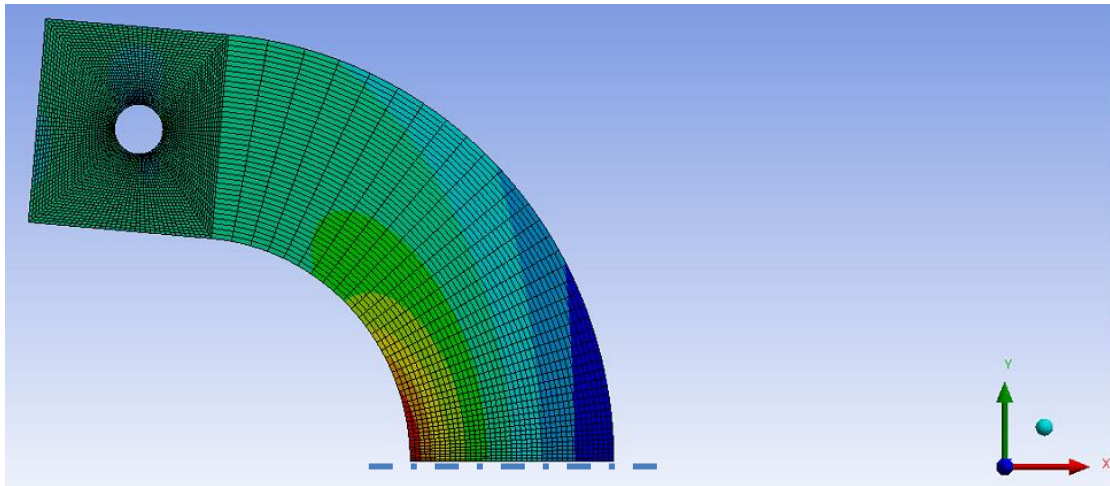


Figura 27 – Tensions normals en direcció vertical Y

A partir de l'opció *Bearing Load* comentada anteriorment, s'han aplicat diferents càrregues de manera progressiva de la mateixa manera que s'ha fet experimentalment amb els discs del laboratori. D'aquesta forma s'han obtingut els valors numèrics de les deformacions en els extrems de la secció central.

Per a obtenir les deformacions generades en els extrems de la secció central per a cada sistema de càrregues, s'ha definit un paràmetre d'entrada i dos paràmetres de sortida. Segons indica la Figura 28, el paràmetre d'entrada es correspon amb el valor de la reacció $4F$ (*Bearing Load*) i els paràmetres de sortida són les deformacions verticals dels dos extrems de la secció central.

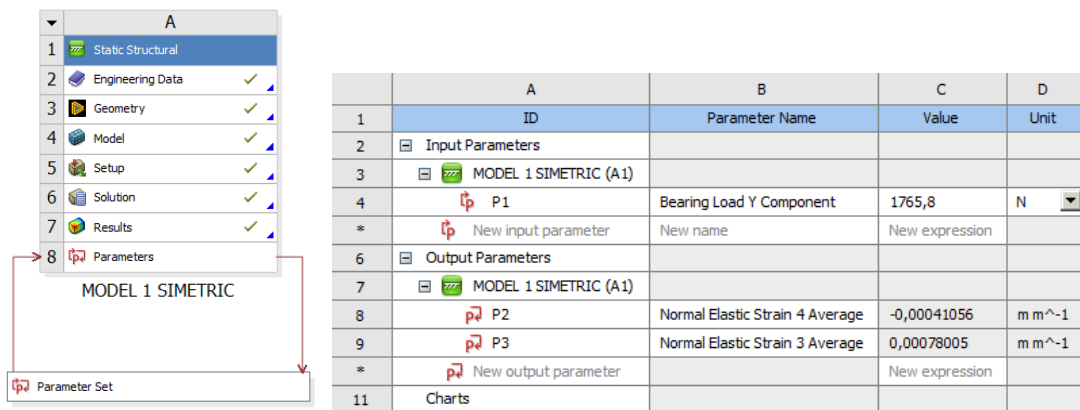


Figura 28 – Definició dels paràmetres d'entrada i sortida

D'aquesta manera s'han obtingut els resultats numèrics de les deformacions generades en els extrems de la secció central per a cada sistema de càrregues.

3.3 Comparació entre resultats analítics i numèrics

En aquest apartat s'ha realitzat una comparativa entre les deformacions verticals analítiques i numèriques. Les deformacions analítiques s'han obtingut a partir de l'Equació 17, tenint en compte les màximes tensions generades a tracció i compressió (Equació 53 i 16), mentre que les deformacions numèriques s'han obtingut mitjançant l'ANSYS. La validació del model analític permetrà obtenir estimacions sobre les deformacions que s'obtidran experimentalment.

En la Figura 29, Figura 30 i Figura 31 es mostren els resultats obtinguts per a cada model de peça. L'eix d'abscisses positiu representa les deformacions generades en l'extrem que treballa a tracció mentre que la part negativa de l'eix recull les deformacions en l'extrem de compressió.

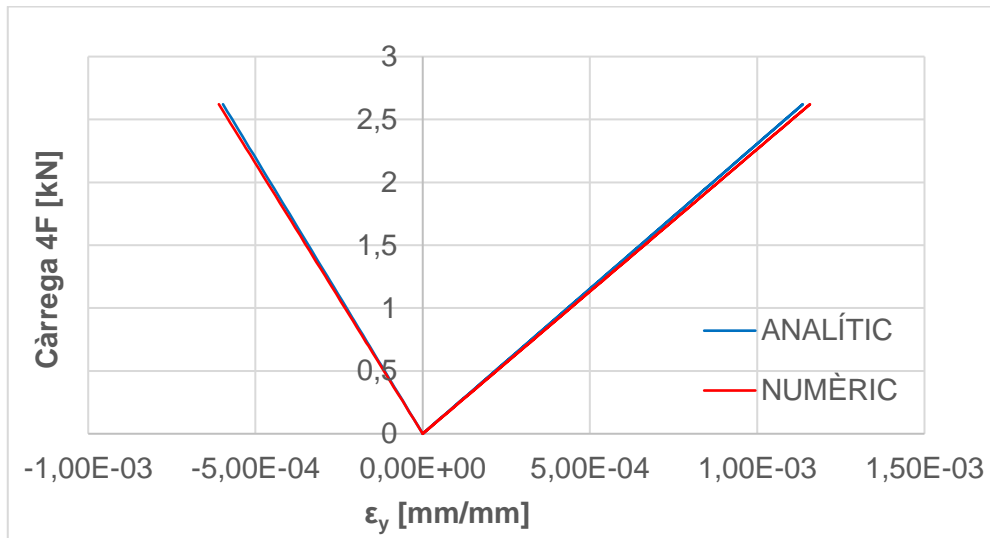


Figura 29 – Comparació entre deformacions analítiques i numèriques per al model 1

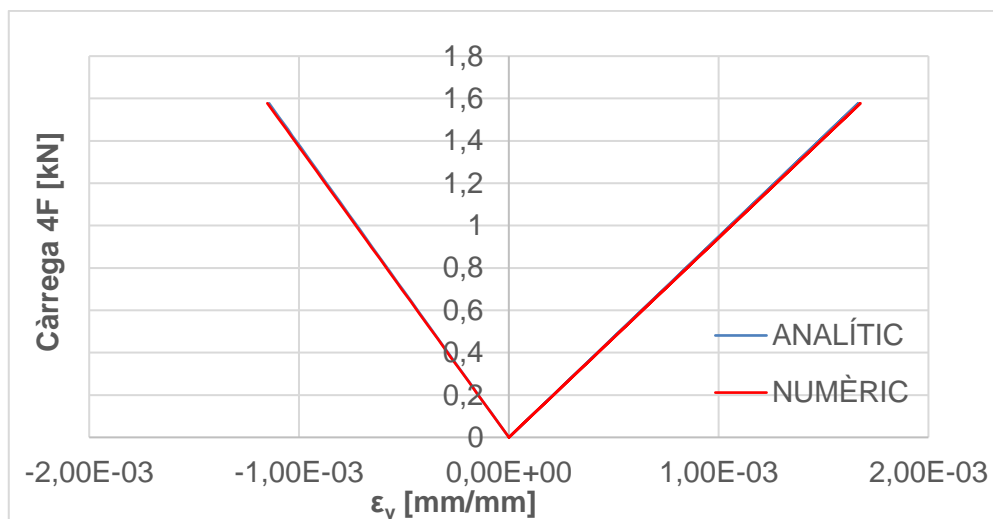


Figura 30 - Comparació entre deformacions analítiques i numèriques per al model 2

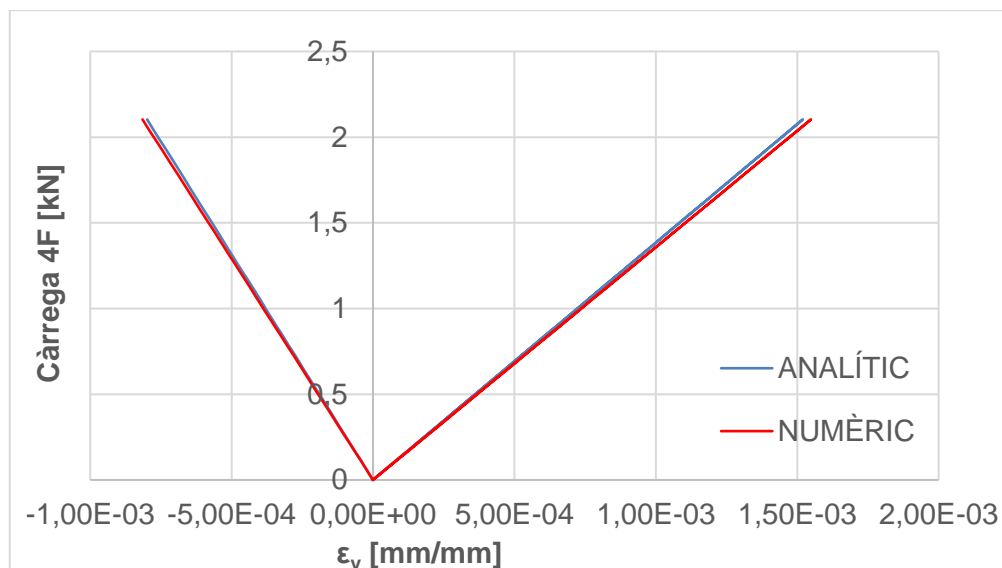


Figura 31 - Comparació entre deformacions analítiques i numèriques per al model 3

	Model 1	Model 2	Model 3
\bar{x} (ϵ_y analític / ϵ_y numèric)	0,980	0,993	0,981

Taula 8 - Ràtio entre deformacions analítiques i numèriques

En les figures anteriors es pot observar que a mesura que s'augmenta progressivament la càrrega aplicada sobre el muntatge les deformacions augmenten de manera lineal. Per als tres models de peça els resultats analítics s'ajusten als resultats numèrics proporcionats per l'ANSYS, ja que les rectes de càrrega-deformació es troben pràcticament sobreposades.

Per a cada càrrega s'ha calculat la relació entre les deformacions analítiques i numèriques i finalment s'ha aplicat la mitjana aritmètica. En la Taula 8 es mostra que per als tres models de peça el valor mitjà de la ràtio entre les deformacions analítiques i numèriques presenta un valor molt proper a la unitat. Per al model 1 i el model 3 la diferència entre els valors analítics i numèrics es troba molt propera al 2% mentre que per al model 2 els resultats s'ajusten encara més i la diferència existent és inferior a l'1%.

Per tant, en aquest apartat s'han validat els càlculs analítics de tensions i deformacions, ja que els resultats obtinguts són molt similars als que ens ofereix el programa d'elements finits.

4 CARACTERITZACIÓ MITJANÇANT INSTRUMENTACIÓ CLÀSSICA

L'extensometria és una tècnica experimental que s'utilitza per a la mesura d'esforços i deformacions a partir del canvi de la resistència elèctrica d'un material sotmès a tensions. En aquest apartat s'ha procedit a realitzar el càlcul de deformacions en els extrems de la secció central a partir de galgues extensomètriques.

4.1 Muntatge experimental

El material que s'ha utilitzat per al càlcul de deformacions es mostra a continuació:

-Galgues extensomètriques (Figura 32)



Figura 32 – Característiques principals de les galgues utilitzades (esquerra) i galga extensomètrica (dreta)

-Sistema d'adquisició Vishay System 5000 (Figura 33)



Figura 33 – Sistema d'adquisició Vishay System 5000 [19]

-Software informàtic *StrainSmart*

-Cola adhesiva Loctite (Figura 34)



Figura 34 – Cola adhesiva Loctite

4.2 Obtenció dels resultats experimentals

Per a obtenir les deformacions verticals que es produeixen en els extrems de la secció central d'estudi s'ha adherit una galga en cada extrem de la secció. En la Figura 35 es mostra la posició on s'han situat les galgues.



Figura 35 – Adhesió de les galgues en els extrems de la secció central

El centre de les galgues s'ha situat a una distància de 4 mm respecte de cada extrem a causa de la dificultat experimental que comporta col·locar-les just en el punt extrem de la secció. Aquesta distància s'ha tingut en compte a l'hora de comparar les deformacions experimentals amb els valors analítics, ja que les deformacions disminueixen a mesura que s'allunyen dels punts extrems de la secció central.

Per a fixar correctament les galgues i evitar que aquestes es desplacin durant l'assaig s'ha utilitzat cinta adhesiva i Loctite. Un cop adherides sobre la superfície, s'ha dut a terme l'assaig experimental aplicant, de manera progressiva, diferents combinacions de discs sobre el muntatge que es mostra en la Figura 36.



Figura 36 – Muntatge experimental

Per a cada sistema de càrregues s'ha registrat el valor de les deformacions en els punts on s'han col·locat les galgues per a poder comparar els resultats experimentals amb els analítics.

4.3 Comparativa entre resultats analítics i experimentals

En aquest apartat s'ha realitzat una comparativa entre les deformacions verticals registrades amb les galgues extensomètriques i les deformacions obtingudes analíticament.

Com que les galgues s'han posicionat a 4 mm respecte dels punts extrems de la secció, s'ha calculat l'expressió analítica que determina la tensió generada en els punts situats a aquesta distància.

Els paràmetres r_i i r_o definits respectivament en les Equacions 40 i 41 determinen la posició dels punts d'estudi. En aquest cas es volen analitzar els punts situats a una distància de 4 mm respecte de cada extrem i, per tant, les expressions anteriors queden modificades segons les Equacions 18 i 19.

$$r_i' [\text{mm}] = c + 4 \rightarrow c_i' [\text{mm}] = r_n - r_i' = \frac{a}{\ln\left(1 + \frac{a}{c}\right)} - c - 4 \quad (18)$$

$$r_o' [\text{mm}] = c + a - 4 \rightarrow c_o' [\text{mm}] = r_o' - r_n = c + a - 4 - \frac{a}{\ln\left(1 + \frac{a}{c}\right)} \quad (19)$$

Essent r_i' , r_o' els radis des del centre de curvatura fins als punts d'estudi i els paràmetres c_i' , c_o' les distàncies des de la línia neutra fins als punts d'estudi.

Per a calcular les tensions generades en els punts desitjats s'ha seguit el mateix procediment emprat en l'Annex C: Càlcul de la càrrega de plastificació de la peça d'estudi tenint en compte les noves expressions de r_i' , r_o' , c_i' i c_o' . Les tensions originades s'han definit en les Equacions 20 i 21.

$$\sigma \text{ tracció [MPa]} = \frac{4 \cdot F \left(x + c + \frac{a}{2}\right) \cdot \left(\frac{a}{\ln\left(1 + \frac{a}{c}\right)} - c - 4\right)}{a \cdot b \cdot \left(c + \frac{a}{2} - \frac{a}{\ln\left(1 + \frac{a}{c}\right)}\right) \cdot (c + 4)} + \frac{4 \cdot F}{a \cdot b} \quad (20)$$

$$\sigma \text{ compressió [MPa]} = - \frac{4 \cdot F \left(x + c + \frac{a}{2} \right) \cdot \left(c + a - 4 - \frac{a}{\ln \left(1 + \frac{a}{c} \right)} \right)}{a \cdot b \cdot \left(c + \frac{a}{2} - \frac{a}{\ln \left(1 + \frac{a}{c} \right)} \right) \cdot (c + a - 4)} + \frac{4 \cdot F}{a \cdot b} \quad (21)$$

Un cop conegudes les tensions generades en els punts d'estudi, les deformacions s'han calculat a partir de l'Equació 17 tenint en compte que el Mòdul de Young (E) ha sigut trobat en l'Annex A: Caracterització de les propietats mecàniques de l'alumini i presenta un valor de 72332 MPa.

Per a cada càrrega aplicada sobre la peça s'ha obtingut el valor de la deformació corresponent. D'aquesta manera s'ha creat la corba de càrrega-deformació per a cada model de peça. Els resultats que es mostren en la Figura 37, Figura 38 i Figura 39 han permès comparar les deformacions experimentals obtingudes mitjançant les galgues amb les deformacions analítiques.

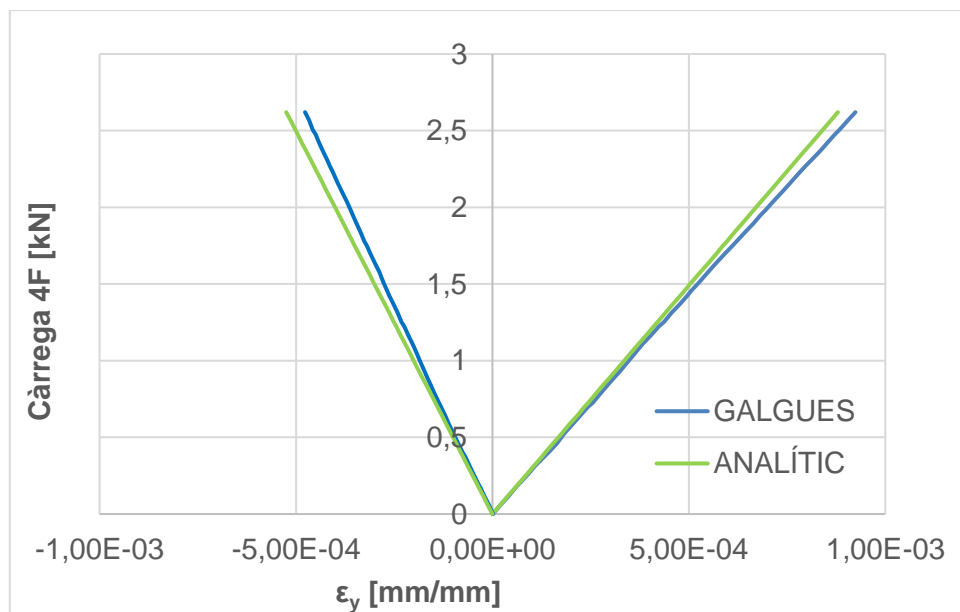


Figura 37 – Comparació entre deformacions extensomètriques i analítiques per al model 1

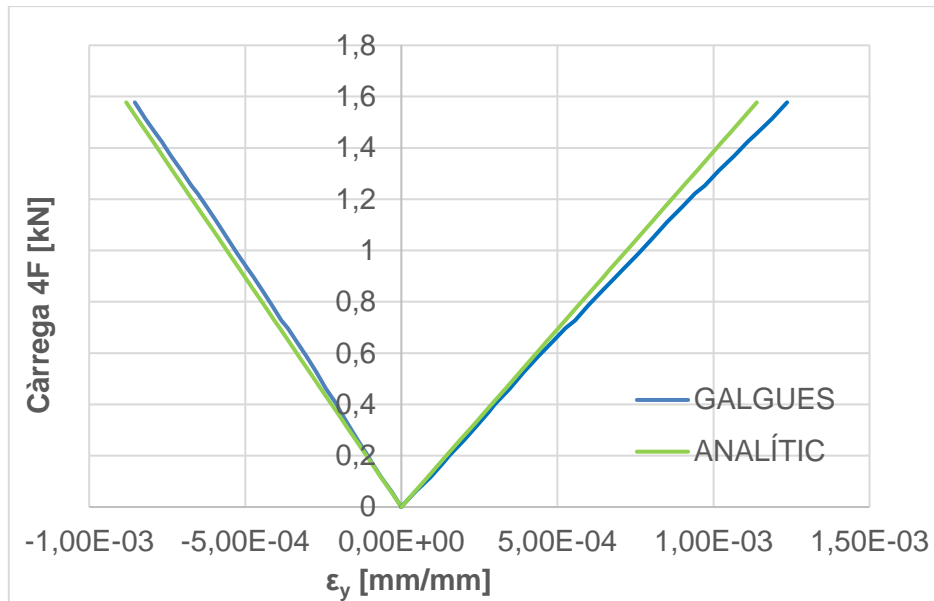


Figura 38 – Comparació entre deformacions extensomètriques i analítiques per al model 2

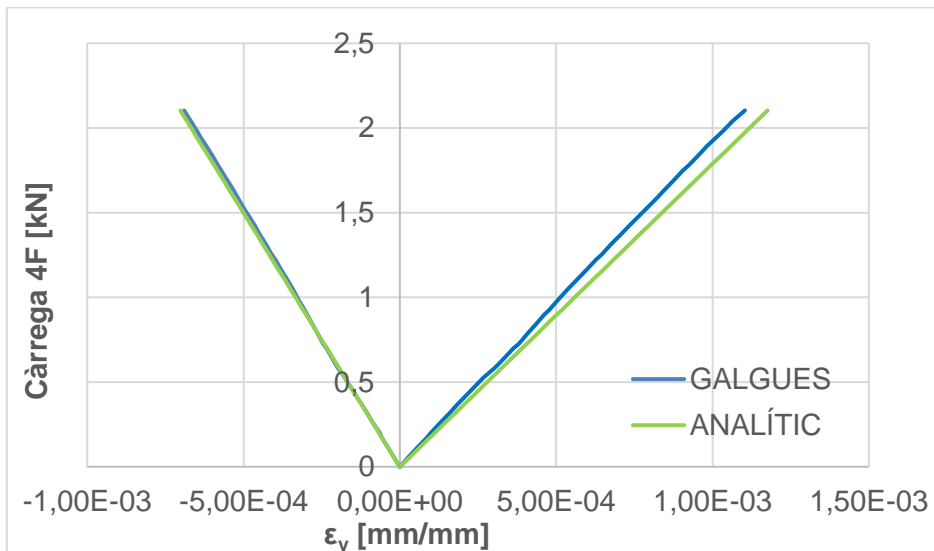


Figura 39 - Comparació entre deformacions extensomètriques i analítiques per al model 3

En les figures anteriors es pot observar que les deformacions obtingudes mitjançant les galgues extensomètriques segueixen una tendència lineal i s'ajusten significativament a les deformacions analítiques. Tot i això, per als tres models existeix una petita desviació entre els valors experimentals i analítics. Aquesta diferència pot ser deguda a una desalineació entre els forats de les mordaces per on s'introdueixen els passadors i els forats de la peça, de tal manera que la peça pateix una rotació a l'hora de ser fixada i la càrrega aplicada no es transmet exactament com s'ha calculat. També ha pogut afectar la precisió requerida per a adherir manualment les galgues en els punts desitjats, deixant un marge de 4 mm respecte de cada extrem de la secció.

5 CARACTERITZACIÓ MITJANÇANT DIC

5.1 Muntatge experimental

5.1.1 Cas 2D

El muntatge del cas 2D consisteix a col·locar una càmera completament perpendicular a l'AOI. És necessari ajustar correctament la distància focal de la càmera i l'obertura del diafragma de la lent per a focalitzar l'àrea d'interès. També cal disposar d'un focus que ofereixi una bona il·luminació en la superfície d'estudi i evitar en tot moment la generació d'ombres sobre aquesta.

En la Figura 40 es mostra una representació gràfica del muntatge per al cas 2D.

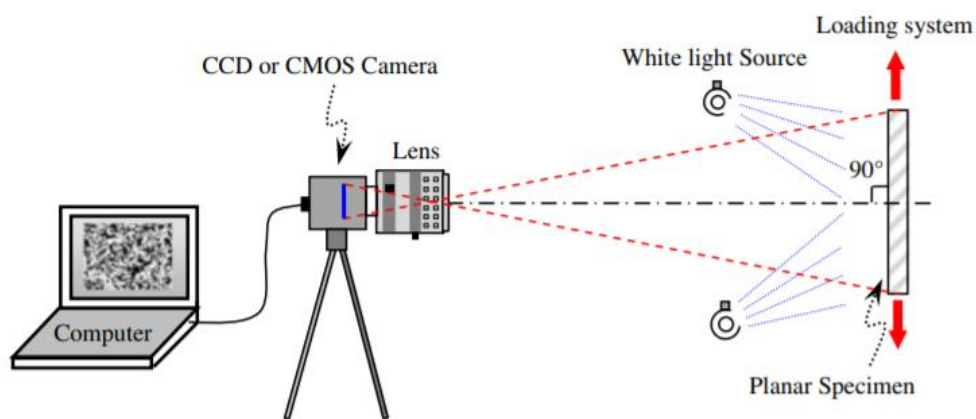


Figura 40 – Muntatge per al cas 2D [20]

Un cop es disposa del muntatge, és necessari calibrar el sistema per a poder obtenir el desplaçament que pateix qualsevol punt de l'àrea d'interès.

Per a calibrar el sistema en el cas 2D, com que la càmera es troba perpendicular a l'àrea d'interès, només cal seleccionar dos punts sobre la superfície de la peça i donar-li una distància. En la Figura 41 es mostra el procediment emprat per a calibrar el sistema 2D. S'ha col·locat un regle sobre la superfície de la peça per a poder definir la distància existent entre dos punts qualsevol.

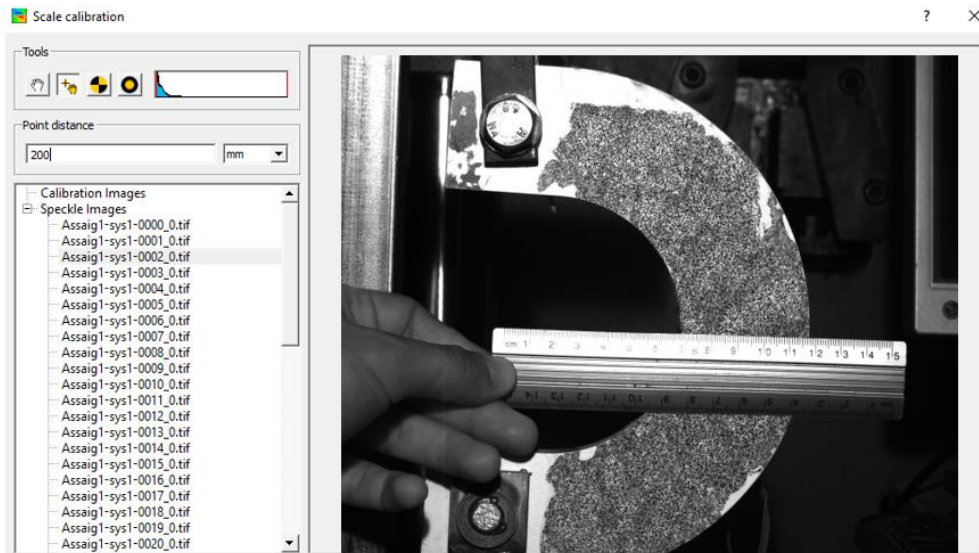


Figura 41 – Calibració per al cas 2D

5.1.2 Cas 3D

En el muntatge del cas 3D s'utilitzen dues càmeres distanciades entre elles i formant un cert angle beta (β) amb l'AOI per a poder registrar els desplaçaments que es produeixen fora del pla. En la Figura 42 es mostra un esquema del muntatge per al cas 3D.

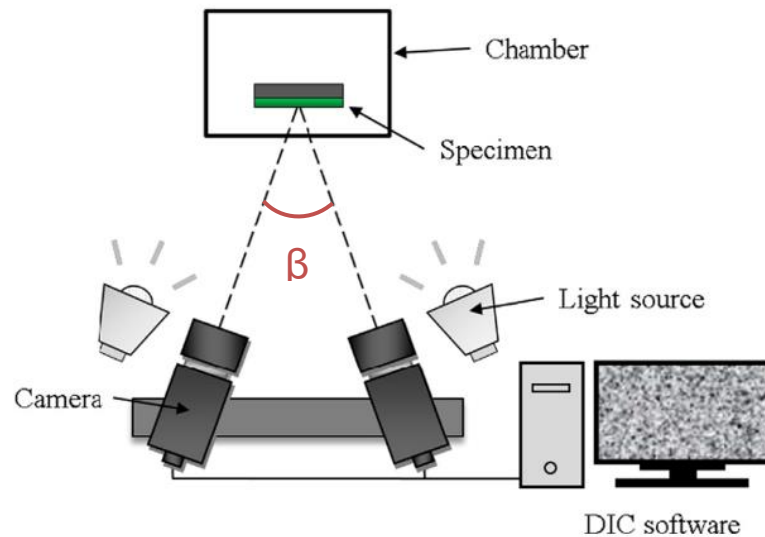


Figura 42 – Muntatge per al cas 3D [21]

La focalització i la resolució de la càmera són dos paràmetres molt importants que afecten la precisió. A més a més, un altre paràmetre que influeix decisivament en els resultats és la calibració del sistema. Com que en el cas 3D les càmeres no es troben perpendiculars a l'àrea d'interès, la mida del píxel no és constant al llarg de la superfície i llavors no és vàlid el mètode de calibració anterior.

Disseny, fabricació i assaig d'una biga d'eix curvilini per a l'estudi de deformacions amb DIC

Per a calibrar el sistema, el software VIC 3D utilitza uns panells que tenen una sèrie de punts separats entre ells i d'una mida concreta. Un cop s'han col·locat correctament les càmeres, el procés de calibració consisteix a realitzar entre 20 i 30 fotografies movent el panell en diferents inclinacions (Figura 43).

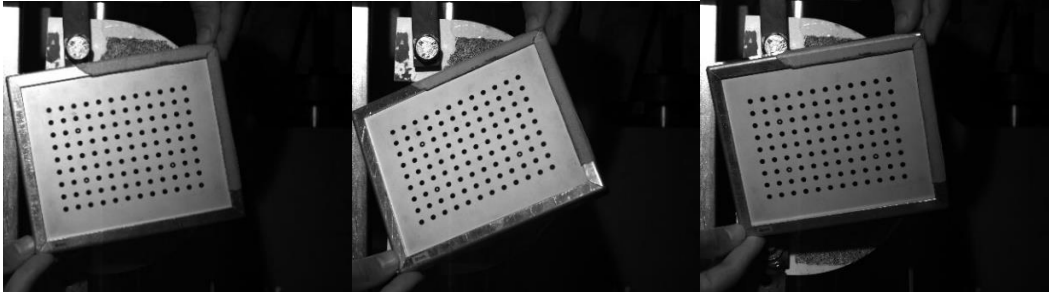


Figura 43 – Diferents inclinacions del panell per a calibrar el sistema 3D

Una vegada s'han realitzat les fotografies, cal carregar-les en el software VIC 3D perquè realitzi els càlculs necessaris per a trobar les distàncies i els angles en què estan situades les càmeres. Un cop realitzada la calibració es pot realitzar l'assaig experimental. En la Figura 44 es mostra el resultat final de la calibració.

The screenshot shows the 'Stereo System Calibration' software interface. The main window displays a grid of points on a target panel, with some points highlighted in cyan, blue, and yellow. The interface includes a toolbar with buttons for 'Analyze', 'Recalibrate', and 'Report'. A table on the right side of the window displays the calibration results for two cameras (0 and 1) across six rows. The table has columns for 'Value', 'Result', and 'StDev'. Below the table, a 'Score: 0.057' is displayed in green. The bottom of the interface shows camera settings: 'Camera: Generic', 'Distortion order: 1', 'High mag: [unchecked]', and 'Coordinate system: Auto'.

	0	1
0	0.023	0.023
1	0.014	0.014
2	0.056	0.056
3	0.035	0.034
4	0.041	0.040
5	0.019	0.018
6	0.073	0.073

Value Result StDev
Camera 0
Camera 1
Rig

Score: 0.057

Camera: Generic Distortion order: 1 High mag: [unchecked] Coordinate system: Auto Report Accept

Figura 44 – Resultat final de la calibració

5.1.3 Sistema de càmeres del muntatge

El muntatge que s'ha utilitzat per a dur a terme els assaigs experimentals es mostra en la Figura 45. S'ha utilitzat un focus de llum per a il·luminar l'àrea d'interès i un total de tres càmeres. La càmera central s'ha emprat per al cas 2D i les dues càmeres restants que es troben en els extrems han sigut utilitzades per al cas 3D.



Figura 45 – Muntatge experimental del DIC

Les dues càmeres del 3D es troben distanciades una distància de 20 cm respecte de la càmera central, formant un angle beta de 30° entre elles i 15° respecte al pla perpendicular a l'AOI. Les distàncies i els angles es troben indicats en la Figura 46.



Figura 46 – Sistema de càmeres del muntatge

Un cop s'ha realitzat la calibració del sistema, el software VIC 3D és capaç de calcular l'angle beta que formen les càmeres. Aquest angle, tal com es pot veure en la Figura 47, presenta un valor de $29,2153^\circ$ molt proper a 30° .

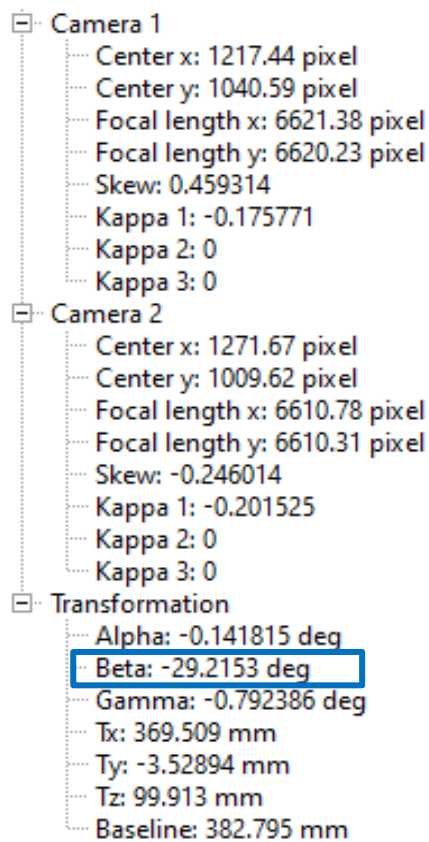


Figura 47 – Angle de calibració de les càmeres del sistema 3D

Les lents de les càmeres utilitzades en els assaigs experimentals es mostren en la Figura 48 i presenten una distància focal de 23 mm.



Figura 48 – Lents amb una distància focal de 23 mm

5.2 Estudi paramètric

5.2.1 Influència de la mida del subset i de l'stepsize

En aquest apartat s'ha analitzat la influència que té la mida del *subset* i de l'*stepsize* en el valor de sigma. El paràmetre sigma indica la precisió que presenten els resultats i, per tant, a mesura que la sigma disminueix els resultats són més precisos.

La teoria diu que quan augmenta la mida del *subset* es pot guardar més informació de grisos en la matriu associada, de manera que es disposarà de més informació per a trobar la nova posició del *subset*. Per a veure com afecta la mida del *subset* en el paràmetre sigma s'ha seleccionat un punt qualsevol de la secció central. En aquest cas s'ha seleccionat el punt extrem que treballa a tracció i s'ha calculat la mitjana del valor sigma per a cada mida de *subset*.

S'han estudiat unes mides de *subset* de 13, 23, 33, 43, 53 i 63 píxels amb un *stepsize* constant de valor 11 píxels. Els resultats obtinguts es mostren en la Figura 49.

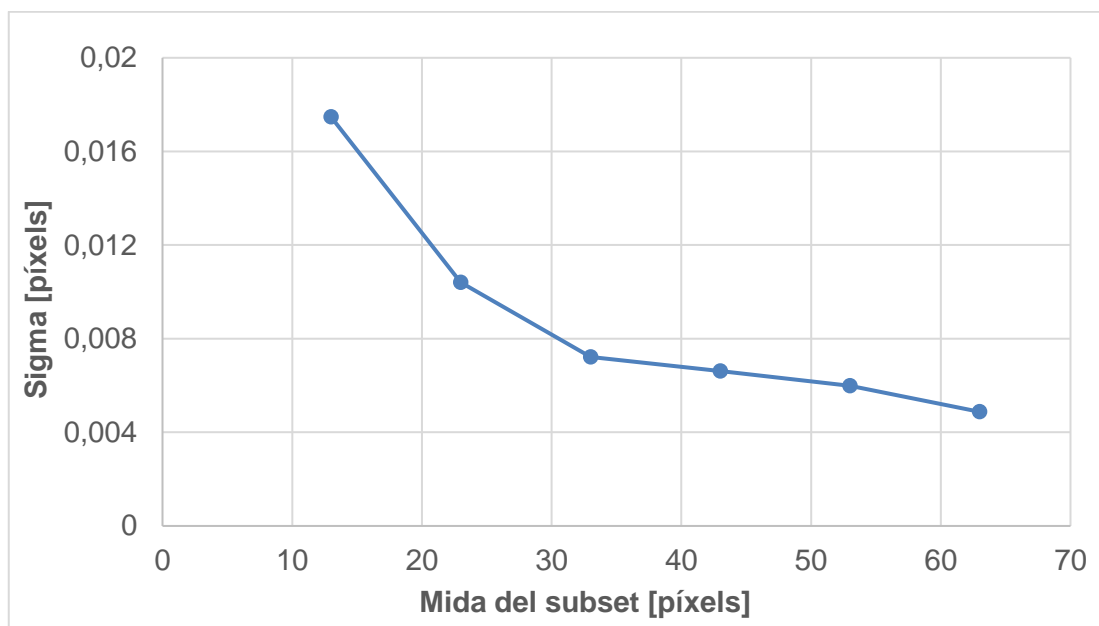


Figura 49 – Relació entre el valor sigma i la mida del subset

Es pot observar que a mesura que s'augmenta la mida del *subset* el valor de sigma disminueix, tal com diu la teoria. Per tant, si es vol obtenir una millor precisió en els resultats, caldrà escollir la mida del *subset* més gran possible, però tenint en compte que a mesura que s'augmenta la mida del *subset* també ho fa el cost computacional, és a dir, el programa necessita més temps per a poder realitzar els càlculs.

En la Figura 50 es mostren les malles generades sobre l'AOI per a diferents mides de *subset*.

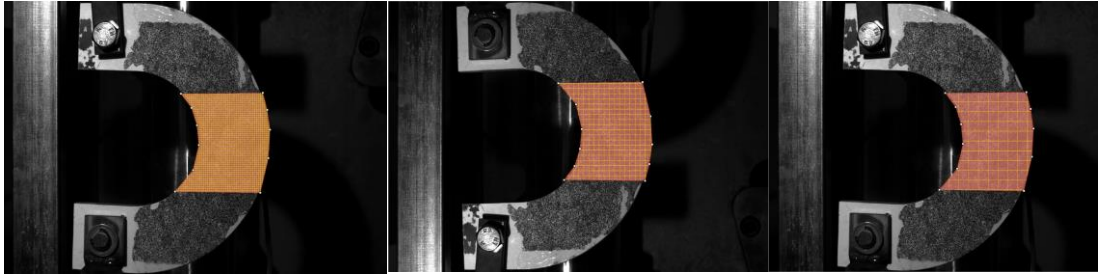


Figura 50 – Malla generada sobre l'AOI per a una mida de subset de 13 píxels (esquerra), 33 píxels (centre) i 63 píxels (dreta)

El software VIC presenta una opció que proposa la mida de *subset* òptima en funció de l'àrea d'interès seleccionada. En aquest cas, segons la Figura 51, el programa recomana una mida òptima de *subset* de 59 píxels.

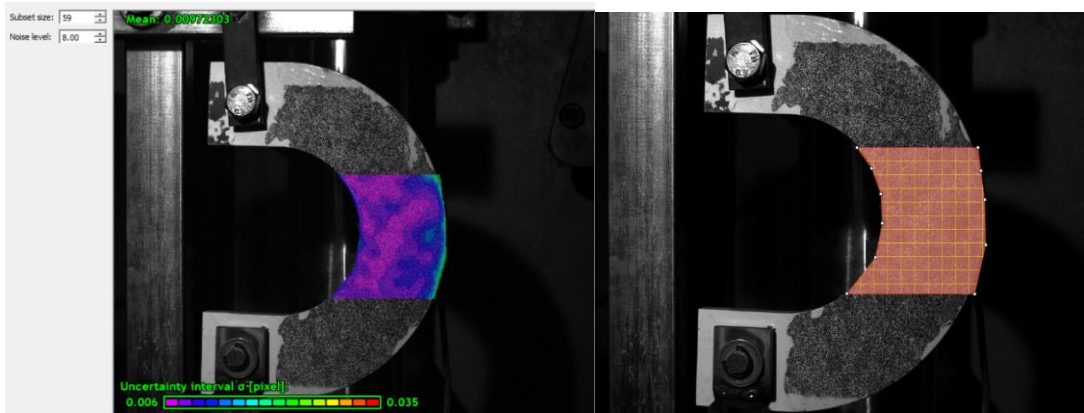


Figura 51 – Mida òptima de subset (esquerra) i malla generada (dreta)

Per a una mida de *subset* de 59 píxels, la mitjana del paràmetre sigma en el punt extrem que treballa a tracció presenta un valor de 0,005344 píxels. Per tant, els valors de les deformacions que s'obtidran en aquell punt presentaran una bona precisió.

Per altra banda, s'ha analitzat la influència de l'*stepsize* en el valor sigma. A partir de la mida òptima del *subset* de 59 píxels obtinguda anteriorment s'ha calculat el valor mitjà de sigma per a diferents valors de *stepsize*. Els valors de *stepsize* que s'han seleccionat són de 3, 9, 17, 21 i 30 píxels, tal com es mostra en la Figura 52.

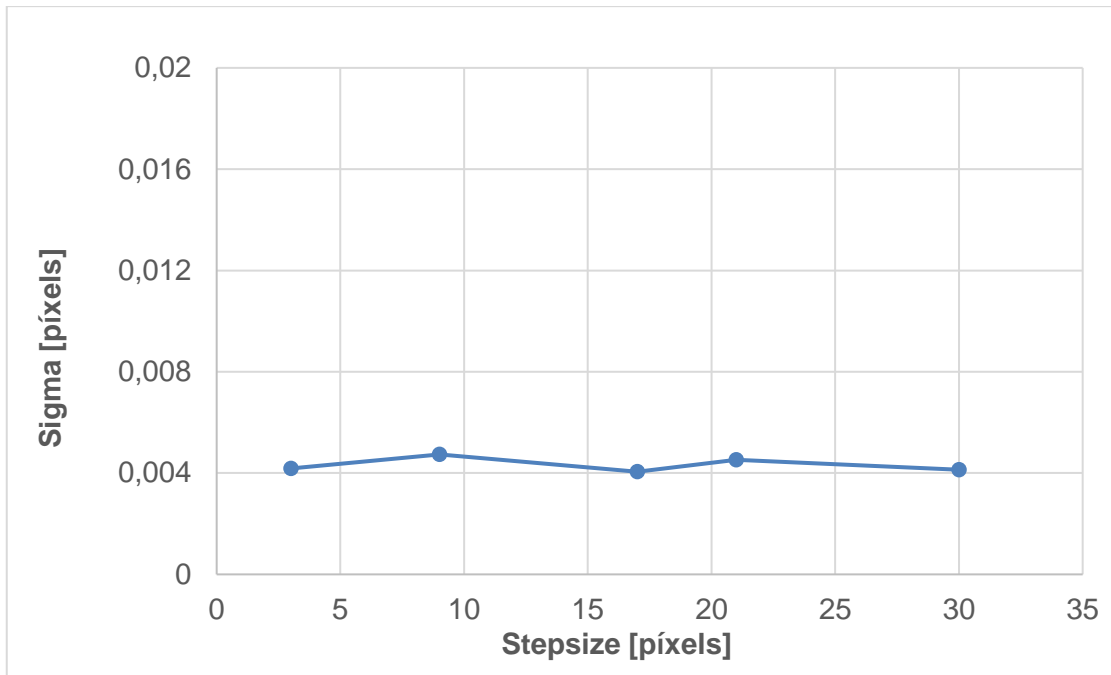


Figura 52 – Relació entre el valor sigma i la mida de l'stepsize

En la figura anterior es pot veure que en augmentar el valor de l'stepsize el valor sigma varia molt poc. La corba obtinguda no presenta cap tendència i, per tant, indica que la mida de l'stepsize no té influència sobre el valor de sigma.

Malgrat això, cal tenir en compte que si el valor de l'stepsize disminueix, el programa requerirà més temps per a realitzar els càlculs perquè hi haurà més subsets dins de l'àrea d'interès i llavors tindrà més punts per a correlacionar. Per tant, el cost computacional també està influenciat per la mida de l'stepsize.

Segons s'ha comentat anteriorment en l'apartat 2.6 Fonaments de la correlació d'imatges, es considera que la mida adequada de l'stepsize es troba entre 1/3 i 1/4 de la mida del subset.

5.2.2 Influència del criteri de correlació

El programa VIC presenta diferents criteris de correlació i en aquest subapartat s'ha analitzat com influeix cada criteri en els resultats experimentals. Per a realitzar la correlació s'ha considerat la mida òptima del subset de 59 píxels i un stepsize de 15 píxels el qual representa una quarta part de la mida òptima del subset.

Per a cada criteri de correlació s'han calculat les deformacions verticals originades en el punt extrem que treballa a tracció del model 1 i s'han comparat amb els valors analítics per a veure quin criteri s'ajusta més. La Figura 53 recull els resultats obtinguts per a cada criteri.

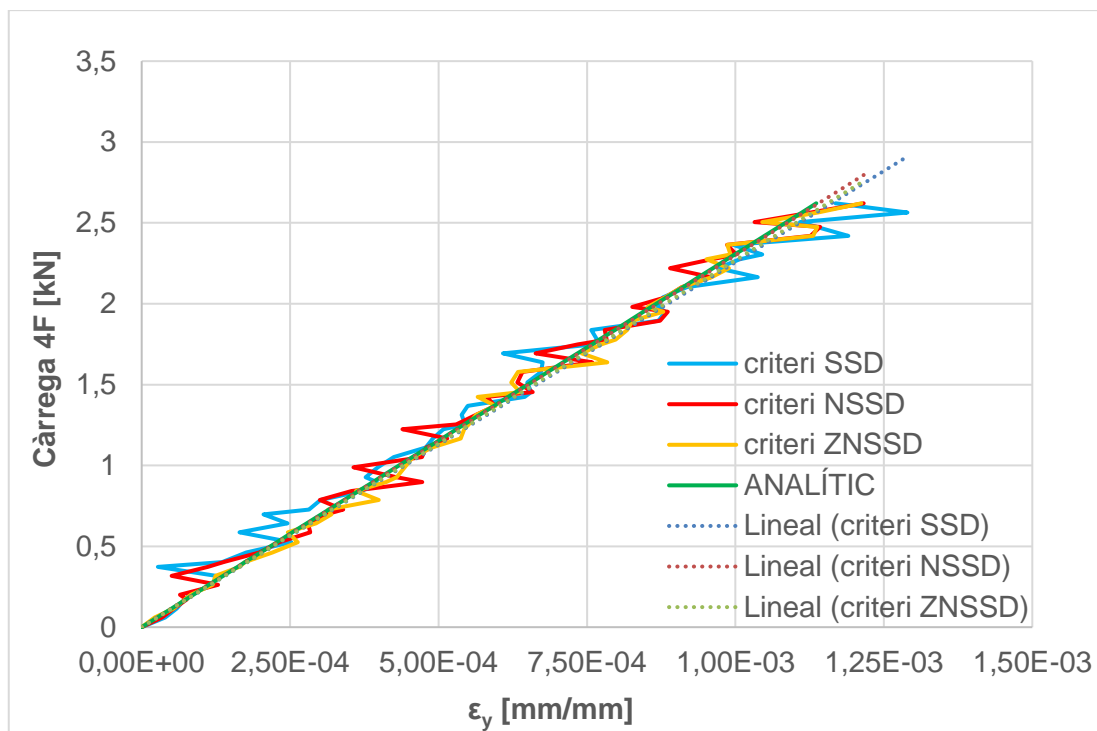


Figura 53 – Deformacions verticals per a cada criteri de correlació

En la figura anterior es pot observar que els tres criteris de correlació s'ajusten adequadament a la recta analítica de deformacions. Per a conèixer quin criteri s'ajusta més als resultats analítics, s'han comparat els coeficients quadràtics de cada recta de regressió que apareixen en la Taula 9.

Criteri de correlació	R ²
SSD	0,994
NSSD	0,996
ZNSSD	0,998

Taula 9 - Coeficient quadràtic de les rectes de regressió

Segons la taula anterior, el criteri de correlació que presenta un coeficient quadràtic més proper a la unitat i que, per tant, s'ajusta millors als resultats analítics és el criteri de Sumatori de Diferències Quadrades Normalitzades a Zero (ZNSSD), però també cal tenir en compte que aquest és el que requereix un major cost computacional.

Per a extreure els resultats s'ha decidit utilitzar el criteri de correlació NSSD, ja que el temps de càlcul computacional és significativament menor i els resultats obtinguts presenten una diferència pràcticament negligible respecte el criteri ZNSSD.

5.3 Obtenció dels resultats

5.3.1 MIG del patró

El MIG del patró que s'ha adherit en la superfície de les peces presenta un valor de 16,5 i ha sigut calculat a partir d'un codi Matlab de generació de patrons [9]. En la Figura 54 es mostra el patró de *speckles* generat i el nombre de píxels de cada tonalitat.

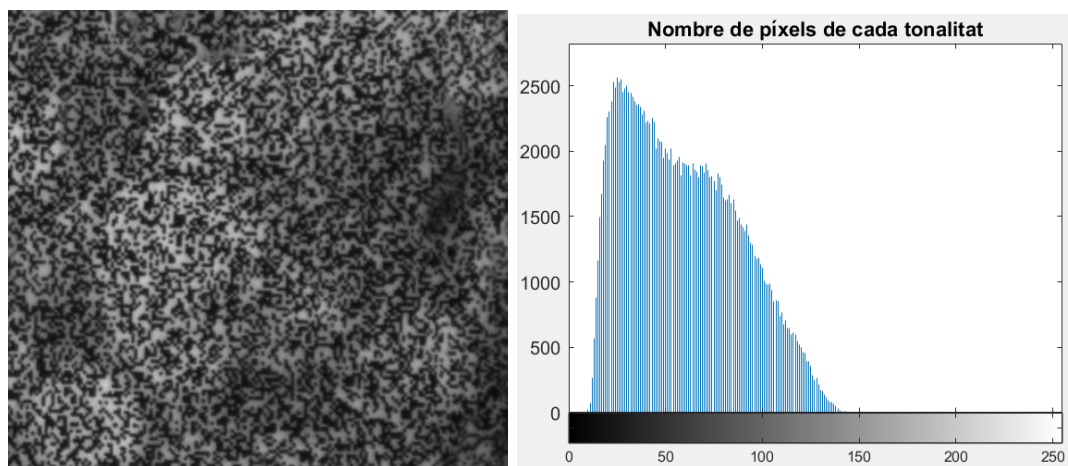


Figura 54 – Patró de *speckles* generat (esquerra) i nombre de píxels de cada tonalitat (dreta)

El valor MIG obtingut és un valor acceptat habitualment en l'ús d'aquesta tècnica tenint en compte que el valor llindar està situat al voltant de 10. Per tant, es pot considerar que el contrast existent amb la superfície de la peça és prou adequat per a poder distingir els *subsets* al llarg de l'assaig i fer possible la correlació.

En l'histograma de la Figura 54, l'eix d'abscisses representa l'escala de grisos i compren des del valor 0 (píxel més fosc) fins al valor 255 (píxel més clar) mentre que l'eix d'ordenades fa referència al nombre de píxels que presenten aquella tonalitat de gris. Es pot observar una major quantitat de píxels foscos que clars perquè les barres de l'histograma es troben desplaçades cap a l'extrem esquerre de l'eix d'abscisses. Si s'hagués obtingut un major equilibri entre píxels foscos i clars el valor del MIG hauria augmentat encara més millorant d'aquesta manera la qualitat del patró.

5.3.2 Desplaçaments verticals

Per a calcular les deformacions que es generen en la secció central d'estudi, el programa VIC calcula prèviament els desplaçaments. En aquest subapartat es mostren els desplaçaments verticals que es produeixen al llarg dels assaigs en el punt extrem que treballa a tracció. S'han comparat en un mateix gràfic els desplaçaments obtinguts amb el mètode 2D i 3D per tal d'assegurar que el primer mètode, tot i no ser capaç de registrar moviments fora de pla, calculi correctament els moviments continguts en el pla.

En la Figura 55, Figura 56 i Figura 57 es poden observar els desplaçaments verticals originats en cada model.

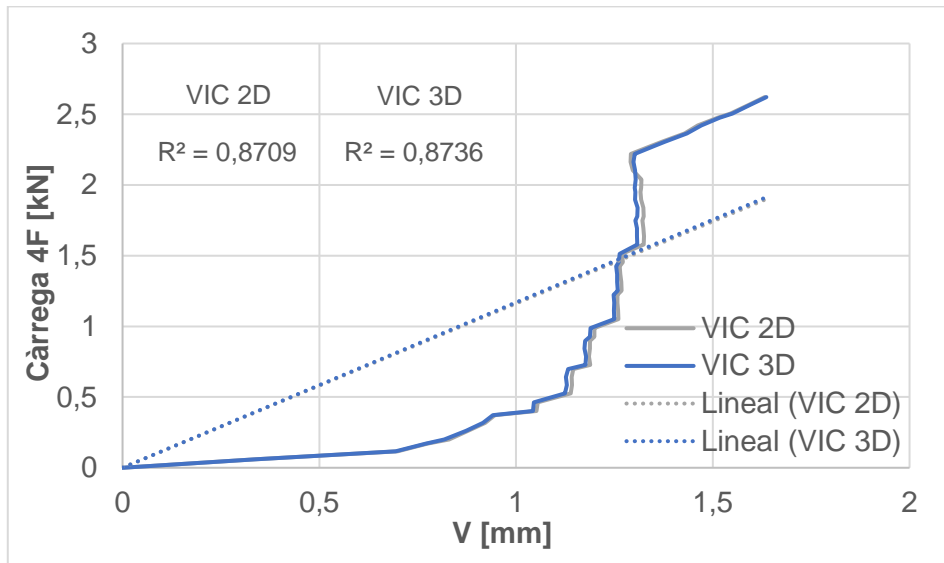


Figura 55 - Comparació entre desplaçaments verticals del cas 2D i 3D per al model 1

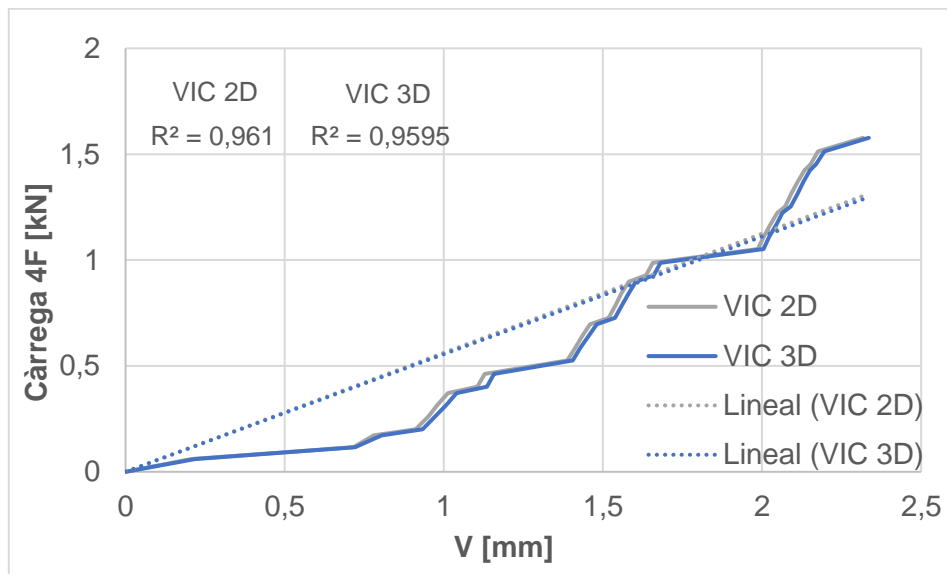


Figura 56 - Comparació entre desplaçaments verticals del cas 2D i 3D per al model 2

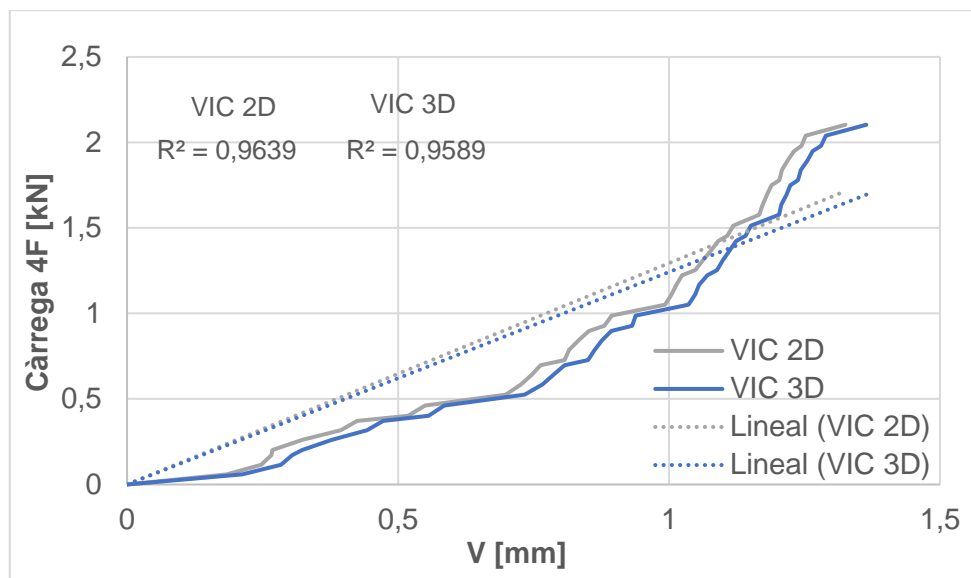


Figura 57 - Comparació entre desplaçaments verticals del cas 2D i 3D per al model 3

En les figures anteriors es pot observar que els desplaçaments obtinguts en el punt extrem de la secció central són molt similars per als casos 2D i 3D. Les corbes segueixen una tendència moderadament lineal i els desplaçaments augmenten a mesura que també ho fa la càrrega. Per tant, s'ha comprovat que el VIC 2D permet calcular igual de correctament els moviments continguts en el pla que el VIC 3D.

Els desplaçaments verticals obtinguts amb el VIC no s'han pogut comparar amb els valors numèrics oferits per l'ANSYS, ja que el DIC capta tots els moviments possibles respecte de les càmeres, incloent-hi els moviments del muntatge i els moviments del sòlid rígid de la peça mentre que l'ANSYS no té en compte aquests possibles moviments. S'entén com a moviment de sòlid rígid la rotació i translació que pot patir un sòlid sense deformar-se i treballant en el mateix pla.

5.3.3 Deformacions verticals del cas 2D

En aquest subapartat es mostren els resultats de les deformacions unitàries que s'han obtingut amb el VIC 2D. Per a determinar si els resultats experimentals es poden considerar una bona estimació s'ha decidit comparar-los amb els resultats analítics mitjançant les gràfiques de càrrega-deformació. Les deformacions obtingudes es mostren en la Figura 58, Figura 59 i Figura 60.

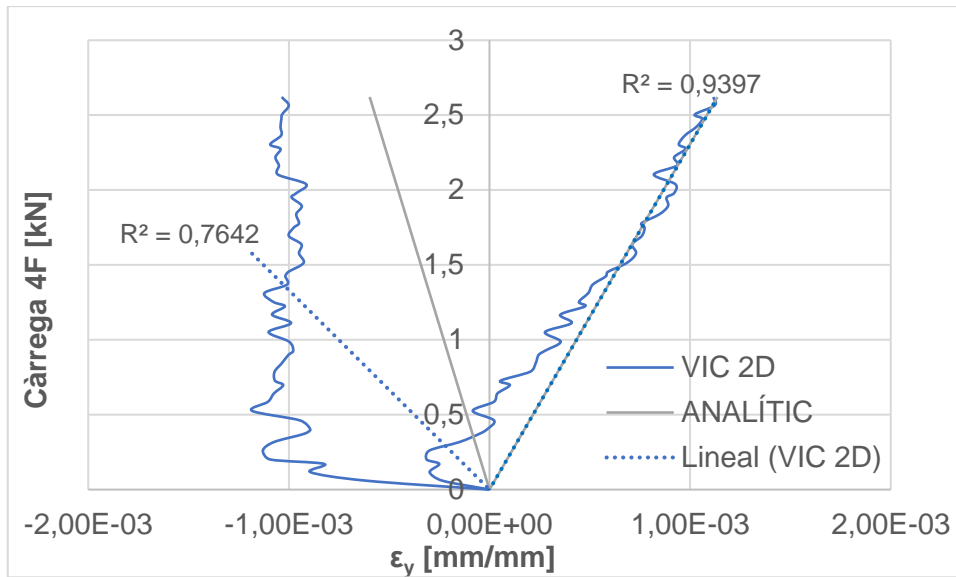


Figura 58 – Comparació entre deformacions verticals obtingudes amb el VIC 2D i analítiques per al model 1

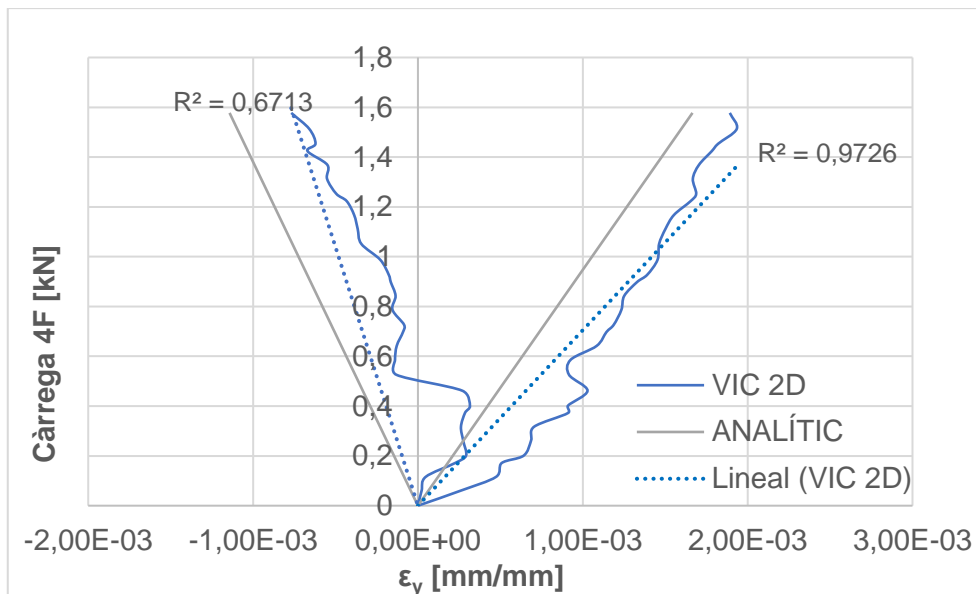


Figura 59 - Comparació entre deformacions verticals obtingudes amb el VIC 2D i analítiques per al model 2

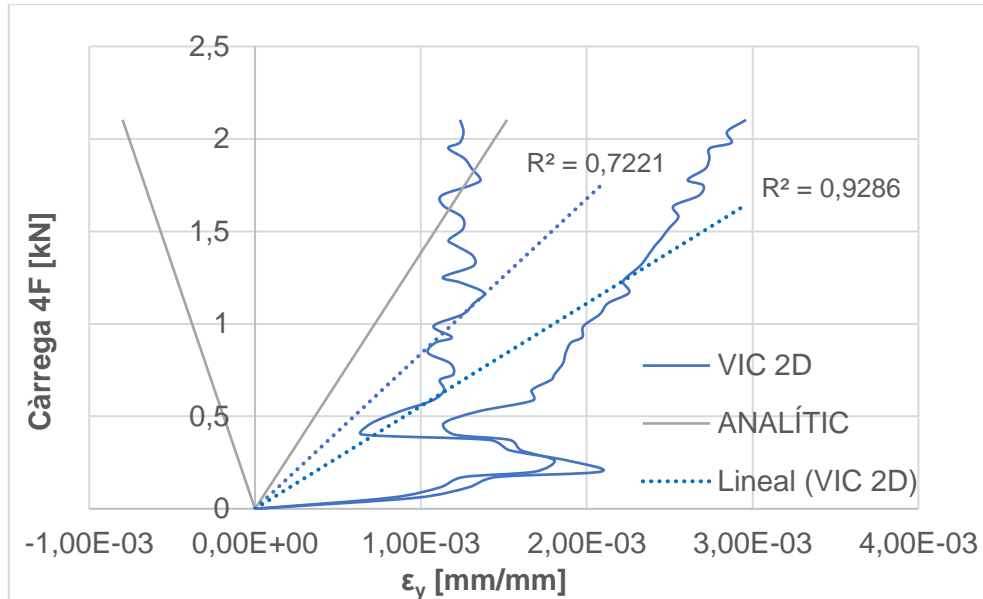


Figura 60 - Comparació entre deformacions verticals obtingudes amb el VIC 2D i analítiques per al model 3

En les figures anteriors es pot observar que per als 3 models de peça els resultats obtinguts amb el VIC 2D no s'ajusten als resultats analítics. Existeix una desviació entre els resultats experimentals i els resultats analítics pel fet que el mètode 2D, tal com s'ha comentat en l'apartat 1 Introducció, no permet calcular les deformacions que es generen fora del pla i, per tant, si durant l'assaig s'han produït moviments fora del pla, el camp de deformacions obtingut no els té en compte.

La divergència entre els resultats experimentals i analítics pot ser causada perquè la peça d'estudi pateix moviments fora del pla durant els assaigs. L'origen d'aquests moviments es troba en petits defectes del muntatge. En primer lloc, el muntatge no disposa de cap element per a ser fixat sobre una superfície i és possible que durant l'assaig, en anar carregant discs, s'hagi pogut moure. Per altra banda, s'ha observat que els forats de les mordaces per on s'introdueixen els passadors no estan correctament alineats amb els forats de la peça. Aquesta desalineació pot provocar que un cop fixada la peça sobre el muntatge, l'àrea d'interès no quedi perfectament perpendicular a la càmera. També cal considerar el joc que existeix entre els diferents elements que componen el muntatge, especialment entre els passadors i les mordaces que permeten fixar la peça.

Es van dissenyar 3 peces de diferents dimensions perquè es volia comprovar si el fet de disposar d'una secció central més rígida podia evitar que la peça vinclés en la direcció perpendicular al pla d'estudi. El vinclament és un fenomen d'inestabilitat elàstica que pot donar-se en elements esvelts que treballen a compressió i es caracteritza per l'aparició

de desplaçaments transversals a la direcció principal de compressió. La proposta de dissenyar tres models amb diferents mides d'amplada i gruix no ha sigut suficient per a evitar el vinclament d'aquests durant els assaigs, ja que s'han produït moviments fora del pla d'estudi que no han permès calcular correctament les deformacions amb el mètode 2D.

Per últim, un altre factor que ha pogut afectar en els resultats és el moviment del sòlid rígid que s'ha pogut produir en la peça. Pel que fa a les condicions de contorn de la peça, aquesta té fixats els desplaçaments del punt de suport inferior mentre que el punt superior on es transmet la càrrega es pot desplaçar verticalment i horitzontalment. Quan es carrega el muntatge i el braç metàl·lic s'escurça, el punt superior de la peça es desplaça horitzontalment provocant un moviment de sòlid rígid que no influeix en la deformació de la peça. El mateix succeeix amb els desplaçaments verticals que pateix la peça a causa del joc que existeix entre els elements del muntatge. Per tant, el DIC pot haver considerat que aquests desplaçaments originats incideixen en les deformacions de la peça, creant d'aquesta manera un camp de deformacions fictici.

5.3.4 Anàlisi dels moviments fora del pla

El programa VIC 3D permet calcular els desplaçaments que es produeixen en la direcció perpendicular a l'AOI de la peça (direcció Z). Per a comprovar que efectivament s'han produït moviments fora del pla que han influït decisivament en el càlcul de deformacions del mètode 2D, s'ha analitzat com varia aquest moviment al llarg dels assaigs. El fet de disposar de tres models de peça, on la secció central de cadascun presenta unes dimensions diferents, ha permès analitzar si l'amplada i el gruix tenen incidència en el moviment que es genera fora del pla. En la Figura 61 i la Figura 62 es poden observar els desplaçaments fora del pla que han patit les peces durant els assaigs.

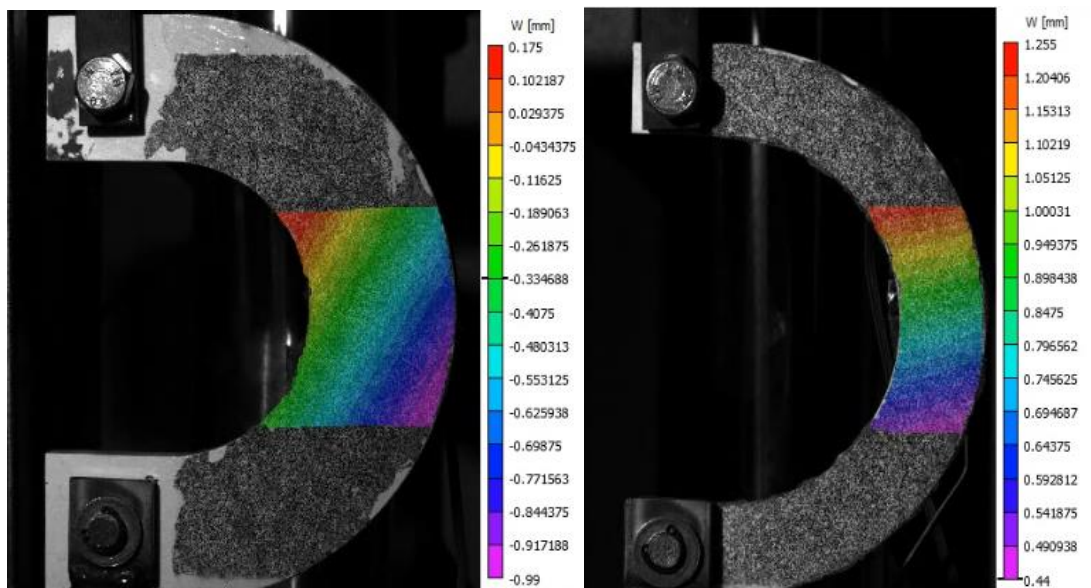


Figura 61 – Desplaçaments en direcció Z en el model 1 (esquerra) i en el model 2 (dreta)

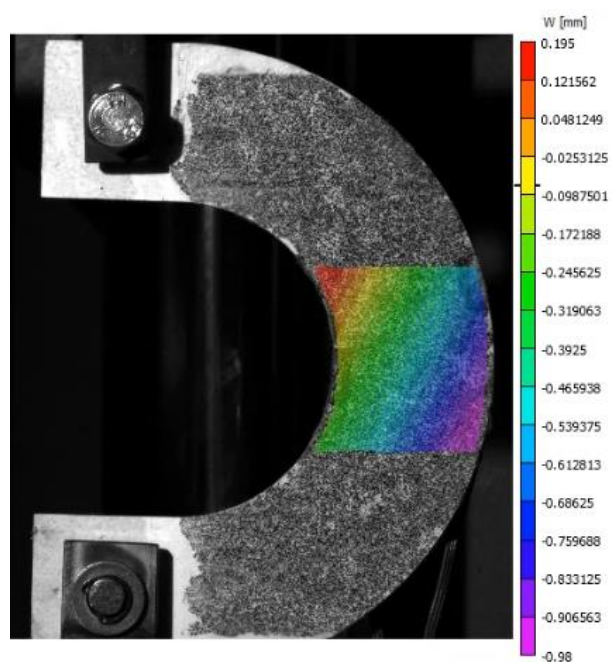


Figura 62 - Desplaçaments en direcció Z en el model 3

En les figures anteriors es pot observar que el model 2 pateix majors desplaçaments fora del pla d'estudi i es correspon amb el model que té una menor amplada. Per tant, es pot concloure que en el model amb menor rigidesa de secció s'originen més deformacions fora del pla.

Per a veure l'evolució del desplaçament en direcció Z al llarg dels assaigs s'ha seleccionat un mateix punt d'estudi per als tres models. En aquest cas, s'ha escollit el vèrtex esquerre superior de l'AOI, ja que presenta els majors desplaçaments fora del

pla. El gràfic de la Figura 63 recull els desplaçaments generats fora del pla d'estudi per a cada model.

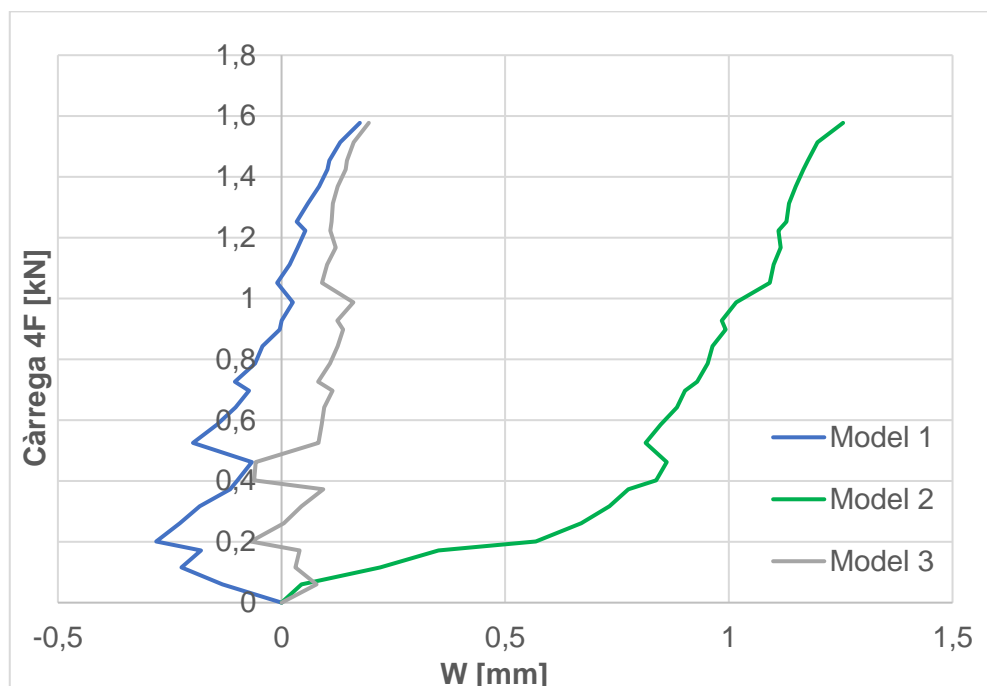


Figura 63 – Desplaçaments generats fora del pla en funció de la càrrega

En la figura anterior es pot observar que les corbes segueixen una tendència lleugerament lineal. Generalment, a mesura que augmenta la càrrega aplicada també augmenten els desplaçaments originats fora del pla tot i les petites oscil·lacions que presenten els resultats a causa del soroll generat pel programa a l'hora de correlacionar les imatges. El model que pateix majors desplaçaments és el model 2 i es pot veure que a mesura que augmenta la càrrega, els desplaçaments creixen més ràpidament que en els altres dos models. Per tant, es pot concloure que el model 2 és el que ha patit majors moviments fora del pla a causa de les seves dimensions. La seva amplada és significativament menor respecte dels altres models i això fa que aquest model sigui el menys rígid, és a dir, el que té una inèrcia més petita.

5.3.5 Deformacions verticals del cas 3D

En aquest cas es presenten els resultats de les deformacions unitàries obtingudes mitjançant el mètode 3D. El fet de disposar de dues càmeres inclinades un cert angle respecte la direcció perpendicular a l'AOI permet registrar els moviments que es produeixen fora del pla. Per tant, el camp de deformacions que s'obté amb aquesta metodologia és més acurat. En la Figura 64, Figura 65 i Figura 66 es poden observar els resultats obtinguts en el cas 3D.

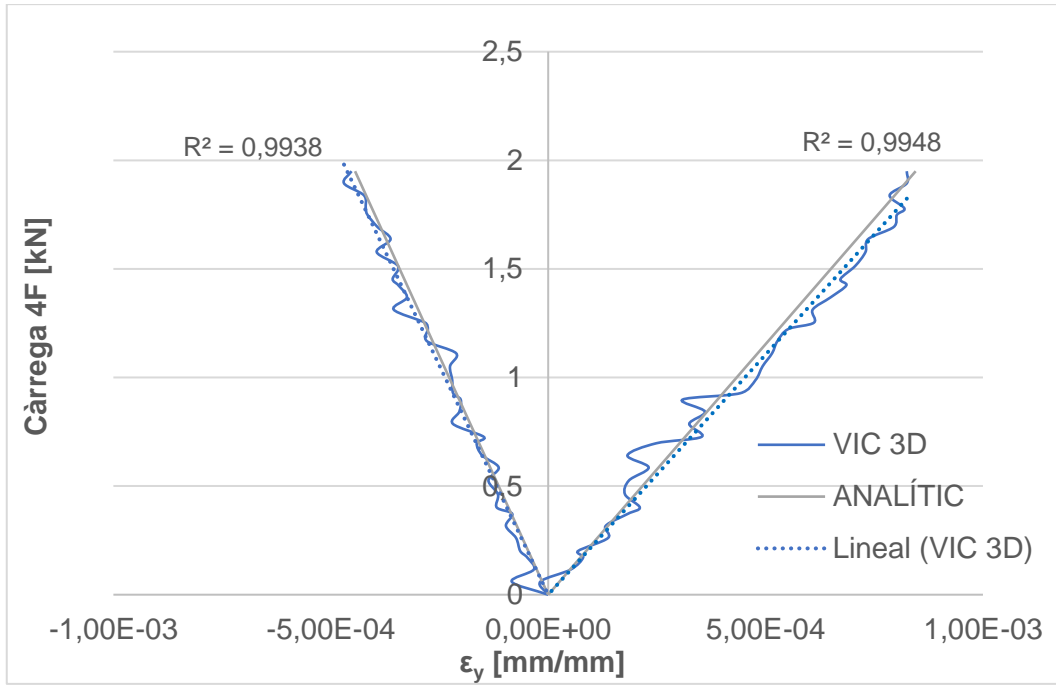


Figura 64 - Comparació entre deformacions verticals obtingudes amb el VIC 3D i analítiques per al model 1

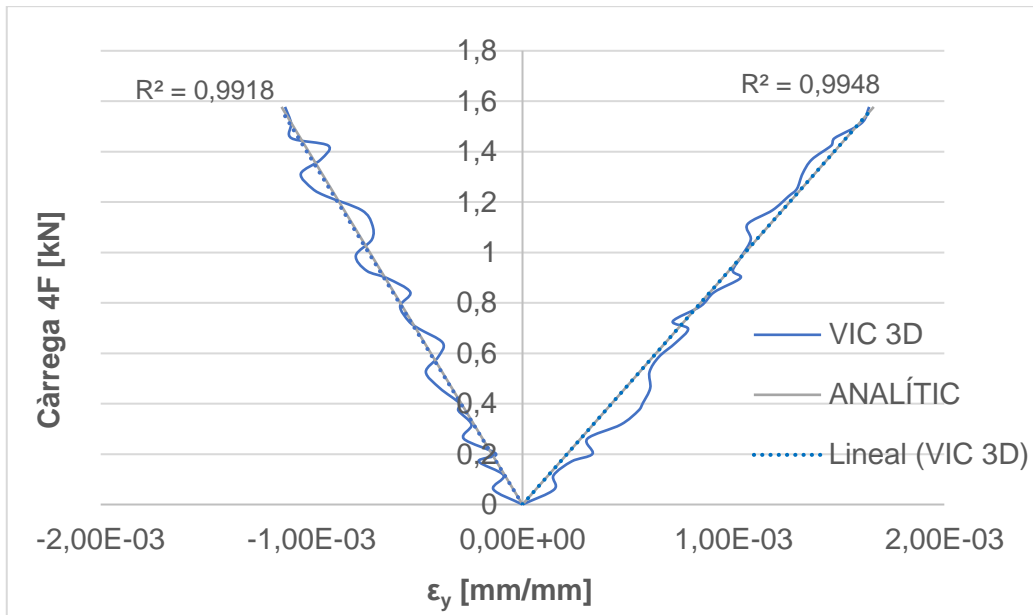


Figura 65 - Comparació entre deformacions verticals obtingudes amb el VIC 3D i analítiques per al model 2

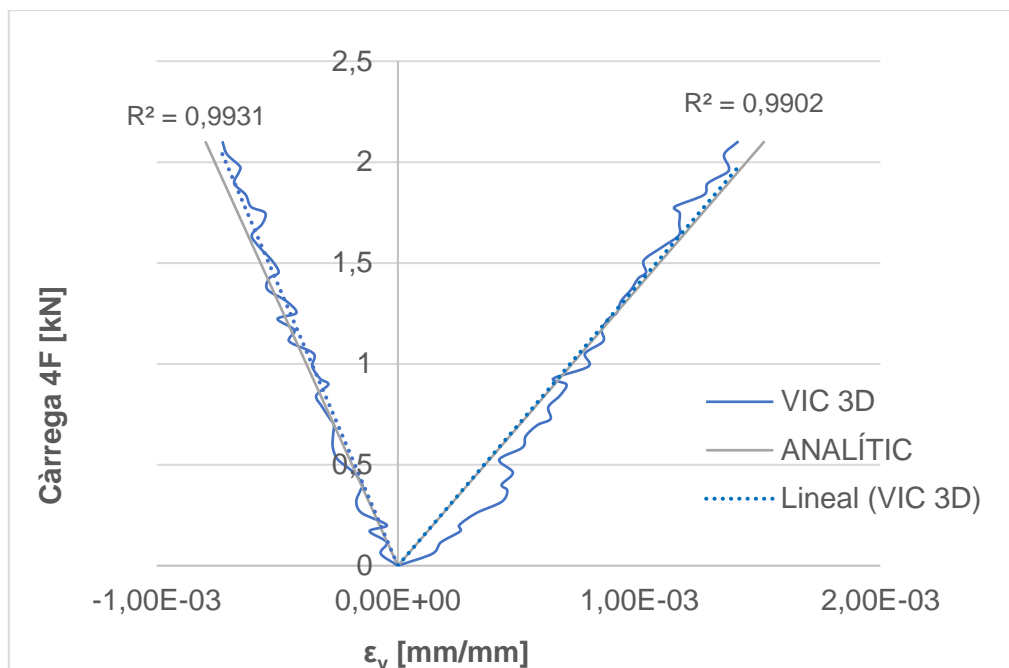


Figura 66 - Comparació entre deformacions verticals obtingudes amb el VIC 3D i analítiques per al model 3

En les figures anteriors es pot observar que les corbes de càrrega-deformació s'ajusten significativament. Així doncs, el mètode 3D permet obtenir el camp de deformacions de manera més precisa que el 2D. No obstant això, les dades experimentals també presenten soroll que pot ser degut al mateix software a l'hora de correlacionar els punts de l'àrea d'interès.

Per tant, es pot concloure que el camp de deformacions que s'ha obtingut amb el mètode 3D s'aproxima millor als resultats analítics. En canvi, el mètode 2D, tot i haver proporcionat uns desplaçaments verticals molt similars al 3D, a l'hora de calcular les deformacions, les corbes obtingudes no s'han ajustat correctament als resultats analítics perquè s'hi han produït moviments fora del pla a causa d'imperficcions del muntatge i de la seva inestabilitat. També ha incidit negativament el vinclament de les peces i els moviments del sòlid rígid que s'han generat durant els assaigs.

6 RESUM DEL PRESSUPOST

El cost econòmic d'aquest projecte es troba desglossat en l'Annex F: Valoració de costos i és de 3.809,38 € (tres mil vuit-cents nou euros amb trenta-vuit cèntims). Tenint en compte el 13% en concepte de Despeses Generals, el 9% en concepte de Benefici Industrial i el 21% d'IVA, el cost final del projecte ascendeix a 5.677,34 € (cinc mil sis-cents setanta-set euros amb trenta-quatre cèntims).

7 CONCLUSIONS

Un cop desenvolupat el treball, es pot afirmar que s'han assolit tots els objectius plantejats inicialment. L'objectiu principal del treball ha consistit a validar la tècnica de correlació digital d'imatges mitjançant el càlcul de deformacions que es produeixen en la secció central de la peça d'estudi. També s'ha fet ús de galgues extensomètriques per a avaluar les deformacions generades. La campanya experimental del treball ha pretès comparar la precisió que poden oferir mètodes de càlcul avançats, en aquest cas la tècnica DIC, davant mètodes clàssics com poden ser les galgues.

Inicialment s'ha dissenyat el model numèric amb l'ANSYS per tal de validar el càlcul de tensions i deformacions que s'ha realitzat analíticament. En l'apartat 3.3 Comparació entre resultats analítics i numèrics es pot observar que les deformacions obtingudes analíticament i numèricament són pràcticament les mateixes per a diferents càrregues aplicades. D'aquesta manera, mitjançant el programa d'elements finits, s'ha comprovat que les expressions analítiques que determinen les deformacions generades en la secció central són correctes.

S'han dissenyat tres models de peça diferents perquè prèviament als assaigs experimentals, es va valorar la possibilitat que la peça pogués vinclar fora del pla d'estudi quan es carregués el muntatge. L'aparició d'aquest fenomen és totalment indesitjable perquè la metodologia 2D no permet registrar moviments que es generen fora del pla d'estudi i, per tant, els resultats experimentals es poden veure afectats. Tot i disposar de models amb diferents inèrcies, no ha sigut suficient per a evitar el vinclament de les peces i per aquest motiu el camp de deformacions obtingut amb el mètode 2D no s'ha ajustat correctament als valors analítics. Durant els assaigs també han aparegut altres factors inesperats comentats en l'apartat 5.3.3 Deformacions verticals del cas 2D que han tingut una influència negativa en l'obtenció de deformacions. En canvi, el camp de deformacions obtingut amb la metodologia 3D s'ha ajustat adequadament als valors analítics, ja que les dues càmeres inclinades un cert angle respecte l'AOI han permès registrar els moviments de la peça fora del pla.

Les deformacions obtingudes amb les galgues extensomètriques s'han ajustat de forma adequada als valors analítics. Les galgues han sigut col·locades a una distància de 4 mm respecte als extrems de la secció central, ja que a causa de la curvatura de la peça s'han trobat dificultats per a adherir-les just en els extrems. Els resultats obtinguts no han presentat soroll i s'ha observat que les deformacions augmenten de manera lineal a mesura que també augmenta la càrrega. En les gràfiques que es mostren en l'apartat 4.3 Comparativa entre resultats analítics i experimentals es pot observar que

els resultats experimentals s'aproximen significativament als analítics de manera que la precisió obtinguda amb les galgues ha sigut correcta.

Tot i que inicialment s'esperava obtenir una major precisió de resultats amb la tècnica DIC, els resultats experimentals que s'han ajustat millor als valors analítics han sigut els obtinguts amb les galgues extensomètriques. Durant la realització del treball s'ha comprovat que la tècnica DIC presenta més complexitat que els mètodes clàssics perquè existeix un major nombre de paràmetres que poden afectar els resultats, destacant la qualitat del patró i del sistema d'adquisició d'imatges. Un altre factor que ha influït en la precisió dels resultats és el soroll que genera el mateix software de correlació quan realitza els càlculs.

Per últim, per a assaigs futurs, seria interessant corregir els petits defectes que presenta el muntatge del laboratori perquè s'ha comprovat que aquest no és suficientment robust. Caldria incorporar un sistema que permeti fixar-lo correctament en el lloc de treball i intentar disminuir el joc que existeix entre els diferents elements que el componen. Una opció seria realitzar els assaigs en una màquina universal de tracció, ja que aquesta és molt més estable que el muntatge del laboratori. També seria necessari dissenyar una peça amb major inèrcia per a evitar que aquesta vincli fora del pla d'estudi. D'aquesta manera, intentant negligir els moviments fora del pla, es podria avaluar la precisió de càlcul que ofereix la metodologia 2D.

8 RELACIÓ DE DOCUMENTS

El projecte està format per un únic document dividit en dues seccions.

La primera part del document està formada per la memòria, on s'exposen els capítols de teoria, assaigs experimentals i anàlisi de resultats. La segona part són els annexos, on s'adjunten els càlculs realitzats, el mallat del model numèric, la validació del model simètric i la valoració econòmica del projecte.

9 BIBLIOGRAFIA

- [1] Duarte, Julio, Flavio Fernández, and Mauricio Moreno Sereno. 2009. "Measuring Techniques for Manoeuvres." *Dyna* 76(158):167–76.
- [2] Pan, Bing, Huimin Xie, Zhaoyang Wang, Kemao Qian, and Zhiyong Wang. 2008. "Study on Subset Size Selection in Digital Image Correlation for Speckle Patterns." *Optics Express* 16(10):7037. doi: 10.1364/oe.16.007037.
- [3] López-Alba, E.) R López-García, R. Dorado, and F. A. Díaz. 2012. "Asociación Española de Ingeniería Mecánica XIX CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA Aplicación de Correlación Digital de Imágenes Para El Análisis de Problemas de Contacto." *Xixcnim.Uji.E* 8.
- [4] Illescas, Silvia. "La Distancia Focal Explicada Con Ejemplos." (<https://www.dzoom.org.es/la-distancia-focal-todo-lo-que-necesitas-saber-explicado-con-ejemplos/>).
- [5] Illescas, Silvia. "La Apertura En Fotografía Explicada Con Ejemplos." (<https://www.dzoom.org.es/curso-de-fotografia-entendiendo-la-apertura/>).
- [6] Rodríguez, Carmen. 2011. "Profundidad de Campo." *Fotocinema. Revista Científica de Cine y Fotografía* (2). doi: 10.24310/fotocinema.2011.v0i2.5864.
- [7] Correlation, Digital Image. n.d. "Solid Mechanics Displacement and Strain Measurements Based on Digital Image Correlation (DIC)." (Dic).
- [8] Quino, Gustavo, Yanhong Chen, Karthik Ram Ramakrishnan, Francisca Martínez-Hergueta, Giuseppe Zumpano, Antonio Pellegrino, and Nik Petrinic. 2021. "Speckle Patterns for DIC in Challenging Scenarios: Rapid Application and Impact Endurance." *Measurement Science and Technology* 32(1). doi: 10.1088/1361-6501/abaae8.
- [9] Gómez, Javier. 2017. "Estudi i desenvolupament d'eines per a la correlació digital d'imatges aplicat a la mesura de desplaçaments en assaigs estructurals."
- [10] Park, Nak Gye, Kyung Min Hong, and Kyu Hyeung Kwon. 2020. "A Study on Tensile Strain Distribution and Fracture Coordinate of Nanofiber Mat by Digital Image Correlation System." *Applied Sciences (Switzerland)* 10(17):1–21. doi: 10.3390/app10175992.
- [11] Pan, Bing, Zixing Lu, and Huimin Xie. 2010. "Mean Intensity Gradient: An Effective Global Parameter for Quality Assessment of the Speckle Patterns Used in Digital Image Correlation." *Optics and Lasers in Engineering* 48(4):469–77. doi: 10.1016/j.optlaseng.2009.08.010.
- [12] Chen, Terry Yuan Fang, Tzu Ching Chen, Fa Yen Cheng, Ang Ting Tsai, and Ming Tzer Lin. 2018. "Digital Image Correlation of SEM Images for Surface Deformation of CMOS IC." *Microelectronic Engineering* 201(October):16–21. doi: 10.1016/j.mee.2018.09.007.

- [13] Yoneyama, Satoru, Akikazu Kitagawa, Koji Kitamura, and Hisao Kikuta. 2006. "In-Plane Displacement Measurement Using Digital Image Correlation with Lens Distortion Correction." *JSME International Journal, Series A: Solid Mechanics and Material Engineering* 49(3):458–67. doi: 10.1299/jsmea.49.458.
- [14] Caporossi, Paolo, Paolo Mazzanti, and Francesca Bozzano. 2018. "Digital Image Correlation (DIC) Analysis of the 3 December 2013 Montescaglioso Landslide (Basilicata, Southern Italy): Results from a Multi-Dataset Investigation." *Canadian Historical Review* 7(9). doi: 10.3390/ijgi7090372.
- [15] García-Martin, Roberto, Jorge López-Rebollo, Luis Javier Sánchez-Aparicio, José G. Fueyo, Javier Pisonero, and Diego González-Aguilera. 2020. "Digital Image Correlation and Reliability-Based Methods for the Design and Repair of Pressure Pipes through Composite Solutions." *Construction and Building Materials* 248:16–18. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118625.
- [16] Introducció, I. 2015. "Vigas Curvas 1 Introducció."
- [17] Ansys. n.d. "PLANE183 Element Description." Retrieved (https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_PLANE183.html).
- [18] Ansys. n.d. "SURF153 Element Description." Retrieved (https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_SURF153.html).
- [19] TRUESDALE WB, and SCHWAB RB. 1967. *Soil Strain Gage Instrumentation*.
- [20] Pan, Bing, Liping Yu, and Dafang Wu. 2013. "High-Accuracy 2D Digital Image Correlation Measurements with Bilateral Telecentric Lenses: Error Analysis and Experimental Verification." *Experimental Mechanics* 53(9):1719–33. doi: 10.1007/s11340-013-9774-x.
- [21] Kim, Yeonsung, Dapeng Liu, Hohyung Lee, Ruiyang Liu, Dipak Sengupta, and Seungbae Park. 2015. "Investigation of Stress in MEMS Sensor Device Due to Hygroscopic and Viscoelastic Behavior of Molding Compound." *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* 5(7):945–55. doi: 10.1109/TCPMT.2015.2442751.
- [22] ASTM E8. 2010. "ASTM E8/E8M Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials 1." *Annual Book of ASTM Standards* 4 (C):1–27. doi: 10.1520/E0008.
- [23] Jorge F . Ma San Zapata. 2016. "Ingº Jorge F . Ma San Zapata Primera Edició."

ANNEX A: CARACTERITZACIÓ DE LES PROPIETATS MECÀNIQUES DE L'ALUMINI

En aquest annex s'han calculat les propietats mecàniques de l'alumini 5754 H111 que compon la peça d'estudi. L'empresa encarregada de la fabricació de les peces ha realitzat assaigs a tracció per a determinar les propietats mecàniques del material. Els resultats dels assaigs es mostren en la Figura 67.

Test de propiedades mecanicas / Mechanical properties test:							
TEST NR.	Temp. Test Test Temp	Test Conformación Yield Strenght	Test Tensión Tensile Strength	Test alargamiento Elongation	Test dureza Hardness		
		Mpa	Mpa	%	HB		
GFG2002W50356		110	207	26			
GFG2002W50355		147	221	25			
GFG2002W50356		110	207	26			
GFA2002W50031		140	222	21			
GFA2002W50179		141	206	18			
GFG2001W50333		122	205	29			

Figura 67 – Resultats dels assaigs a tracció de l'alumini 5754 H111

Els allargaments de la figura anterior són referits al punt de ruptura del material i, per tant, no són d'interès per al treball, ja que en l'apartat 1.2 Objectius s'ha comentat que es treballaria per sota del límit elàstic, és a dir, en la zona elàstica del material.

Per a obtenir les propietats mecàniques de l'alumini corresponent s'han assajat sis provetes en la premsa hidràulica del laboratori que disposa d'una cèl·lula de càrrega de 100 kN. Els assaigs uniaxials a tracció s'han realitzat a una velocitat constant de 0,02 mm/s. En la Figura 68 es pot apreciar la premsa on s'han realitzat els assaigs.



Figura 68 – Premsa hidràulica del laboratori

Disseny, fabricació i assaig d'una biga d'eix curvilini per a l'estudi de deformacions amb DIC

S'han adherit galgues extensomètriques en el punt central de cada proveta per a mesurar el camp de deformacions que pateix cadascuna (Figura 69).

Les galgues utilitzades presenten una capacitat màxima de deformació de $15000 \mu\epsilon$, però no suposa cap inconvenient a l'hora d'obtenir la gràfica de tensió-deformació perquè el rang de deformacions comprès en la zona elàstica del material es troba per sota d'aquest valor.



Figura 69 – Provetes utilitzades per a determinar les propietats mecàniques de l'alumini

S'han assajat dos tipus de provetes que bàsicament es diferencien en el seu gruix. La secció central del primer tipus presenta unes dimensions de $12,5 \times 6$ mm mentre que el segon tipus té unes dimensions de $12,5 \times 10$ mm.

Per a registrar les deformacions que es generen en les diferents provetes al llarg dels assaigs s'ha utilitzat el sistema d'adquisició *Vishay System 5000* que es troba en el laboratori. En la Figura 70 es mostra la corba característica de tensió-deformació per a cada proveta assajada.

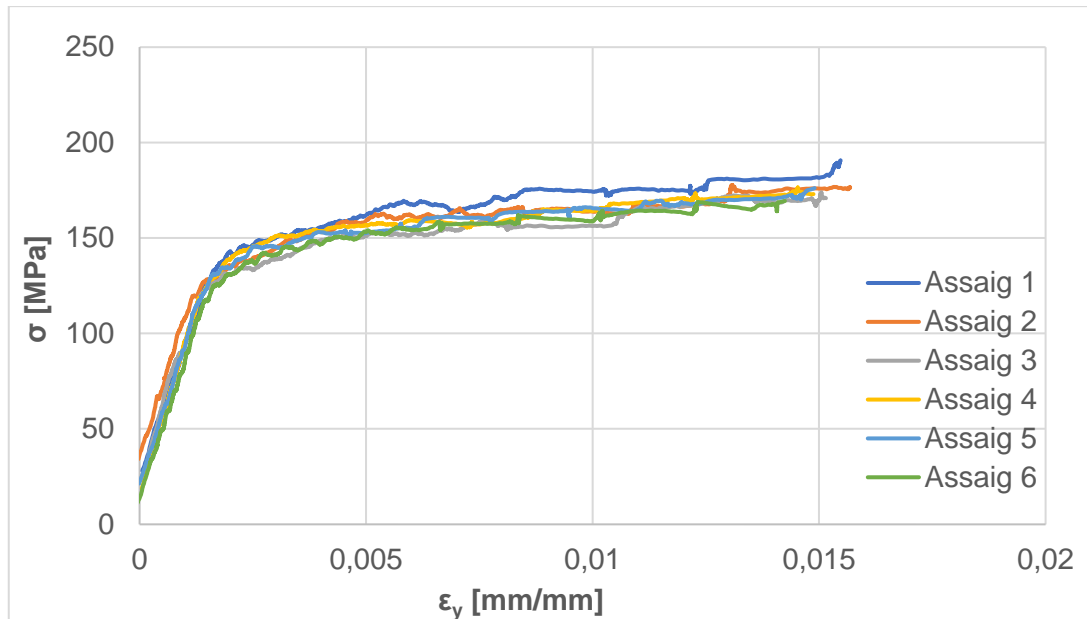


Figura 70 – Corba característica tensió-deformació de les sis provetes assajades

En la figura anterior es pot observar que inicialment les corbes segueixen una tendència lineal fins a un punt de càrrega on la corba perd la seva linealitat i el material comença a patir deformacions plàstiques.

Les sis provetes assajades presenten una corba de tensió-deformació molt similar, però és necessari analitzar la zona elàstica per a extreure el valor del límit elàstic i del mòdul d'elasticitat del material també conegut com a mòdul de Young.

Per a extreure el mòdul de Young, s'ha calculat el pendent existent entre dos punts del gràfic que presenten una deformació unitària de 200 i 1200 με, respectivament i per al càlcul del límit elàstic, s'ha utilitzat l'*Offset Method* indicat a la normativa estàndard E8/E8M-13a [22].

En la Figura 71 es mostra la corba característica compresa entre els dos punts que presenten una deformació unitària de 200 i 1200 με.

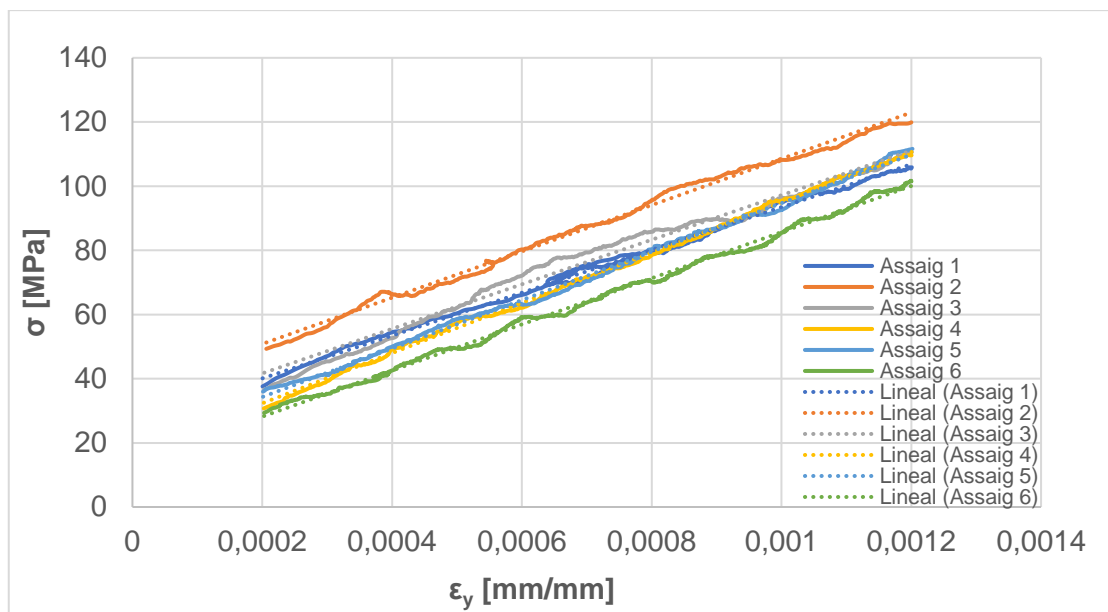


Figura 71 – Zona elàstica de la corba característica tensió-deformació

Assaig	Equació de la recta de regressió	Pendent	R ²
1	$y = 66740 \cdot x + 26,73$	66740	0,995
2	$y = 72132 \cdot x + 36,39$	72132	0,994
3	$y = 69416 \cdot x + 27,76$	69416	0,982
4	$y = 78294 \cdot x + 16,65$	78294	0,999
5	$y = 75521 \cdot x + 19,18$	75521	0,997
6	$y = 71889 \cdot x + 13,78$	71889	0,997

Taula 10 - Recta de regressió obtinguda per a cada assaig

Encara que les corbes obtingudes no parteixen exactament des de l'origen de coordenades, a causa de la càrrega residual que té la premsa a l'inici dels assaigs, en la Taula 10 es pot observar que el coeficient R² obtingut en cada assaig presenta un valor molt proper a la unitat, indicant que les corbes segueixen una tendència lineal. D'aquesta manera es pot assegurar que s'ha treballat dins de la zona elàstica on la deformació és proporcional a la tensió.

Durant la realització dels assaigs s'ha registrat la deformació que pateix la proveta en dos punts fixos així com la càrrega associada a la deformació. D'aquesta manera s'han pogut obtenir les corbes de tensió enginyeril-deformació enginyeril (σ vs ϵ). Aquest tipus de corbes que representen de forma gràfica les propietats mecàniques del material, no tenen en compte els canvis dimensionals que es generen en la secció de la proveta a conseqüència de la càrrega aplicada. Aquest fet pot portar a interpretar incorrectament els resultats, sobretot en materials susceptibles a canvis geomètrics considerables durant aquests assaigs.

En aquest cas, s'ha considerat que en la zona elàstica el canvi dimensional que pateix la secció de la proveta és petit i per això s'han utilitzat les fórmules de tensió i deformació enginyeril considerant que la secció inicial de la proveta es manté constant al llarg de l'assaig (Equació 22).

$$\sigma \text{ [MPa]} = \frac{F}{A_0} \quad (22)$$

On F , en newtons, correspon a la força aplicada en la secció de la proveta i A_0 , en mm^2 , representa la secció inicial de la proveta abans d'aplicar cap càrrega.

De la mateixa manera, si es vol mesurar el camp de deformacions, aquest es pot obtenir a partir de la relació existent entre l'increment de desplaçament generat entre dos punts (Δl) i la longitud inicial entre els mateixos dos punts (L_0) tal com indica l'Equació 1.

Si els valors de tensió i deformació es representen en un sistema de coordenades on l'eix de les ordenades representa la tensió i l'eix d'abscisses representa la deformació, s'obté la corba de tensió i deformació enginyeril basada en l'Equació 17 de la Llei de Hooke on el mòdul d'elasticitat o mòdul de Young (E) correspon al pendent de la recta.

Aquesta fórmula només és vàlida quan es treballa per sota del límit elàstic del material (σ_y), ja que es considera que la deformació és proporcional a la tensió.

En aquest treball, com que es treballa en la zona proporcional de la corba tensió-deformació, el pendent es correspon amb el mòdul de Young (E) i per a obtenir el corresponent valor s'ha calculat el pendent mitjà dels assaigs (Equació 23).

$$E = \frac{66740 + 72132 + 69416 + 78294 + 75521 + 71889}{6} = 72332 \text{ MPa} \quad (23)$$

El límit elàstic, també anomenat límit de fluència, és la tensió màxima que un material pot suportar sense patir deformacions permanents. Si s'apliquen tensions superiors a aquest límit, el material experimentarà deformacions permanents i no recuperarà la seva forma original quan es retirin les càrregues.

Per a calcular el seu valor, seguint la normativa estàndard E8/E8M-13a, cal situar-se en el punt de l'eix d'abscisses que presenta una deformació unitària de valor 0,002 i traçar una recta de pendent E , és a dir, una recta paral·lela a la zona lineal fins a tocar les corbes de tensió-deformació. Per últim, en aquest punt de contacte amb les corbes, cal desplaçar-se horitzontalment per a trobar el valor de la tensió que es correspon al límit elàstic del material. En la Figura 72 es mostra gràficament el procediment emprat.

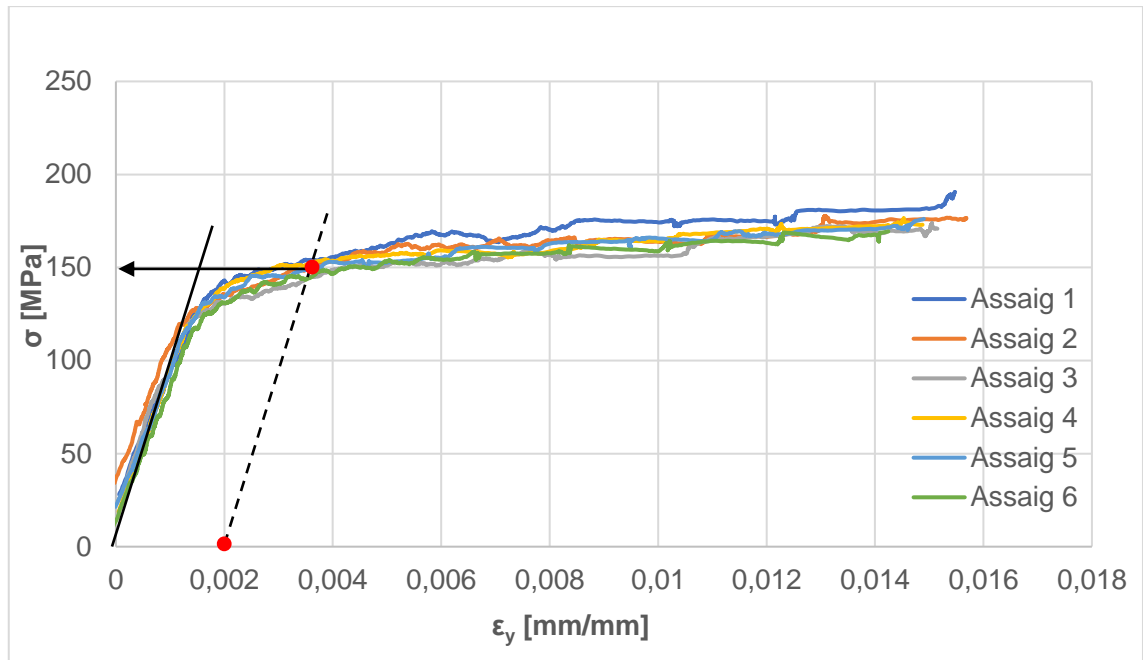


Figura 72 – Determinació del límit elàstic segons la normativa estàndard E8/E8M-13a

En la figura anterior es pot observar que el límit elàstic, segons la normativa estàndard E8/E8M-13a, presenta un valor de 150 MPa.

ANNEX B: CÀLCUL DE LA CÀRREGA DE PLASTIFICACIÓ DEL BRAÇ METÀL·LIC

En aquest annex s'ha calculat quina és la càrrega màxima a partir de la qual es produeix la plastificació del braç de l'estructura de suport. El braç està format d'acer S235 que presenta un límit elàstic (σ_y) de 235 MPa i un mòdul de Young (E) de 210000 MPa.

La secció del braç presenta unes dimensions de 20 x 40 x 1,5 mm tal com es mostra en la Figura 73.

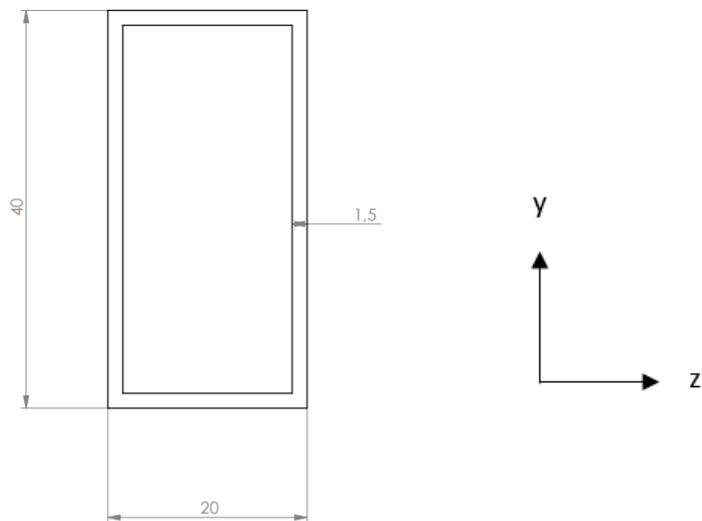


Figura 73 – Dimensions de la secció del braç metàl·lic

En la Figura 74 es mostra el diagrama de cos lliure del braç metàl·lic on apareixen les forces aplicades sobre aquest i les reaccions que es generen en les articulacions.

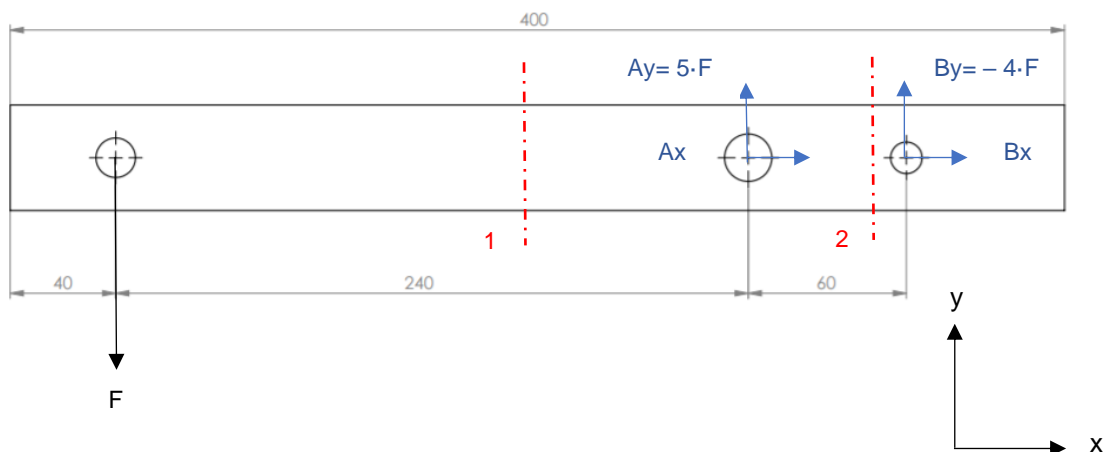


Figura 74 – Diagrama de cos lliure del braç metàl·lic

A partir del diagrama de cos lliure de la figura anterior, en les Equacions 24, 25 i 26 s'han aplicat les condicions de l'estàtica per a determinar els valors de les reaccions.

$$\sum F_x=0) A_x = -B_x \quad (24)$$

$$\sum F_y=0) A_y + B_y = F \rightarrow A_y - 4 \cdot F = F \rightarrow A_y = 5 \cdot F \quad (25)$$

$$\sum M_A=0) 240 \cdot F + 60 \cdot B_y = 0 \rightarrow B_y = -4 \cdot F \quad (26)$$

Seguidament s'ha determinat la secció més desfavorable que presenta un moment flector més elevat. Per a determinar la secció crítica s'ha dividit el braç en dos trams i s'han analitzat els esforços interns que es generen en cadascun d'ells.

Tram 1 ($0 \leq x \leq 240 \text{ mm}$)

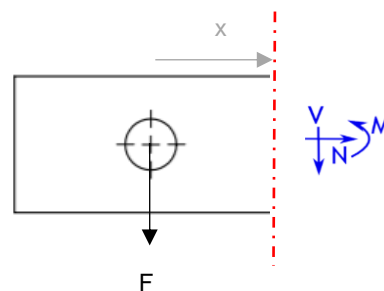


Figura 75 – Diagrama de cos lliure del tram 1

A partir del diagrama de la Figura 75, aplicant les condicions de l'estàtica definides en les Equacions 27, 28 i 29 s'ha determinat el valor de la normal, el tallant i el moment flector.

$$\sum F_x=0) N = 0 \quad (27)$$

$$\sum F_y=0) V = -F \quad (28)$$

$$\sum M=0) M_z + F \cdot x = 0 \rightarrow M_z = -F \cdot x \quad (29)$$

Segons l'Equació 29, en el tram 1, el moment flector màxim es produeix a una distància de $x=240 \text{ mm}$ i, per tant, el moment flector generat pren un valor de $M_z = -240 \cdot F$.

Un cop determinada la secció crítica del tram 1, s'ha emprat el mateix procediment per a trobar la secció més desfavorable del tram 2.

Tram 2 ($0 \leq x \leq 60 \text{ mm}$)

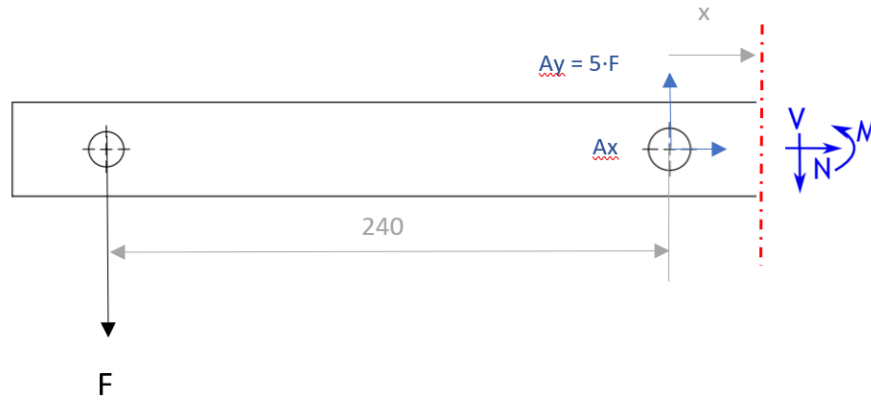


Figura 76 – Diagrama de cos lliure del tram 2

A partir del diagrama de la Figura 76, s'han aplicat les expressions de l'estàtica (Equacions 30, 31 i 32) per a determinar el valor de la normal, el tallant i el moment flector.

$$\sum F_x=0) N = - Ax \quad (30)$$

$$\sum F_y=0) F + V = 5 \cdot F \rightarrow V = 4 \cdot F \quad (31)$$

$$\sum M=0) M_z - 5 \cdot F \cdot x + F (240 + x) = 0 \rightarrow M_z = 4 \cdot F \cdot x - 240 \cdot F \quad (32)$$

Segons l'Equació 32, el màxim moment flector es produeix a una distància de $x=0$ mm de tal manera que el moment flector genera un valor de $M_z = -240 \cdot F$.

Un cop analitzats els dos trams del braç metàl·lic s'ha determinat que la secció on es produeix el màxim moment flector es correspon amb l'articulació A, i per tant, serà la secció d'estudi. Per a determinar les tensions que es generen en la secció d'estudi és necessari calcular el moment d'inèrcia de la mateixa secció. L'expressió del moment d'inèrcia es defineix en l'Equació 33.

$$I_z = \frac{1}{12} \cdot B \cdot H^3 - \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 \quad (33)$$

On:

I_z [mm⁴] = moment d'inèrcia

B [mm] = base del rectangle gran

H [mm] = altura del rectangle gran

b [mm] = base del rectangle petit

h [mm] = altura del rectangle petit

Si es substitueixen les dimensions de la secció del braç (Figura 73) en l'Equació 33, s'obté un moment d'inèrcia de valor 34908,25 mm⁴ tal com indica l'Equació 34.

$$I_z = \frac{1}{12} \cdot 20 \cdot 40^3 - \frac{1}{12} \cdot 17 \cdot 37^3 = 34908,25 \text{ mm}^4 \quad (34)$$

Les tensions que es generen al llarg de la secció venen determinades per l'Equació 35.

$$\sigma = \frac{M_z \cdot y}{I_z} \quad (35)$$

On:

M_z [N·mm] = moment flector

y [mm] = distància respecte de la línia neutra on es calcula la tensió

I_z [mm⁴] = moment d'inèrcia

Segons l'Equació 35 i tenint en compte que el moment d'inèrcia i el moment flector són constants al llarg de la secció, la màxima tensió es produirà en els punts més allunyats de la línia neutra. En les Equacions 36 i 37 es mostren els valors de les màximes tensions generades a tracció i compressió, respectivament.

$$\sigma \text{ màx tracc.} = \frac{M_z \cdot y_{\text{màx}}}{I_z} = \frac{240 \cdot F \cdot 20}{34908,25} = 0,1375 \cdot F \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (36)$$

$$\sigma \text{ màx comp.} = \frac{M_z \cdot y_{\text{màx}}}{I_z} = \frac{240 \cdot F \cdot (-20)}{34908,25} = -0,1375 \cdot F \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (37)$$

En la Figura 77 es mostra el diagrama de tensions normals de la secció d'estudi. La línia neutra on les tensions són nul·les separa la part que treballa a tracció de la part que treballa a compressió.

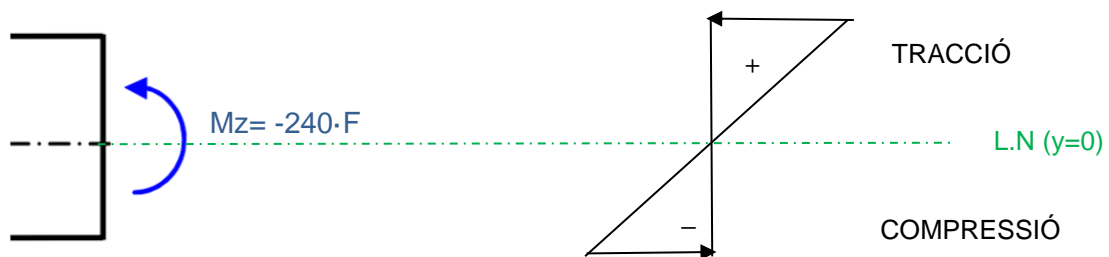


Figura 77 – Diagrama de tensions normals generades en la secció d'estudi

Per a determinar la màxima càrrega que pot suportar el braç abans de plastificar ($F_{\text{màx}}$) s'ha igualat l'Equació 36 referent a la màxima tensió generada ($\sigma_{\text{màx}}$) amb el valor del límit elàstic del material (σ_y) tal com es mostra en l'Equació 38.

$$235 = 0,1375 \cdot F_{\text{màx}} \rightarrow F_{\text{màx}} = 1709,09 \text{ N} = 174,22 \text{ kg.} \quad (38)$$

En l'Equació 39 s'ha aplicat un coeficient de seguretat de valor 1,5 per tal d'evitar el cas límit.

$$f.s = 1,5 \rightarrow 1,5 \cdot F_{f.s} = F_{m\grave{a}x} = 174,22 \rightarrow F_{f.s} = 116,147 \text{ kg} \quad (39)$$

Per tant, la càrrega aplicada en el muntatge del laboratori no pot superar un valor de 116,147 kg.

La ubicació de la línia neutra i del centre de gravetat de la peça d'estudi es pot observar en la Figura 79.

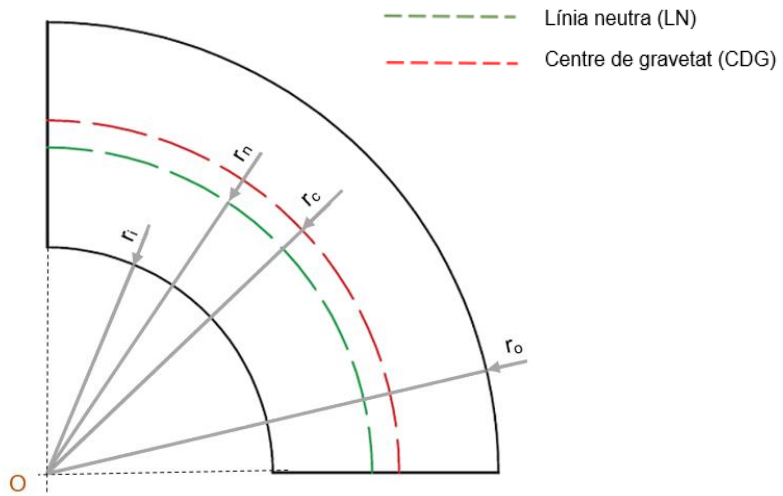


Figura 79 – Parametrització de les dimensions de la peça d'estudi

Les distàncies que apareixen en la figura anterior s'han definit en funció de les dimensions de cada model de peça segons les Equacions 40,41 i 42.

$$r_i = c \quad (40)$$

$$r_o = c + a \quad (41)$$

$$r_c = c + \frac{a}{2} \quad (42)$$

La secció central d'estudi està sotmesa a una força normal, una força tallant i un moment flector que es poden observar en la Figura 80.

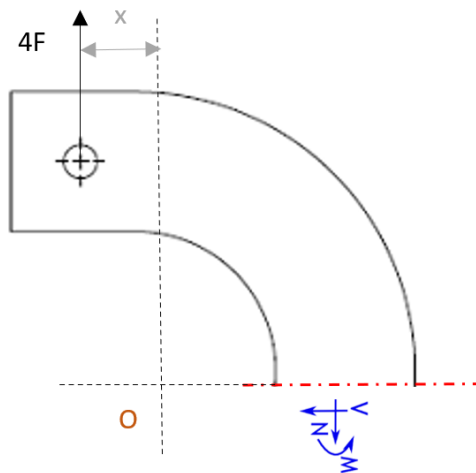


Figura 80 – Anàlisi de les forces i moment flector que es generen en la secció central

Si s'aplica l'equilibri de forces i moments en el diagrama de la figura anterior (Equacions 43, 44 i 45), s'obtenen els valors de les forces internes i del moment flector en funció de les dimensions de cada model i de la càrrega aplicada.

$$\sum F_x=0) V = 0 \quad (43)$$

$$\sum F_y=0) N = 4 \cdot F \quad (44)$$

$$\sum M=0) M = 4 \cdot F \left(x + c + \frac{a}{2} \right) \quad (45)$$

La posició de la línia neutra (r_n) on les tensions i deformacions són nul·les es calcula mitjançant l'Equació 46.

$$r_n = \frac{A}{\int_{r_i}^{r_o} \frac{dA}{r}} = \frac{a \cdot b}{\int_c^{c+a} \frac{b \cdot dr}{r}} = \frac{a}{\int_c^{c+a} \frac{dr}{r}} = \frac{a}{\ln \left(1 + \frac{a}{c} \right)} \quad (46)$$

On A és l'àrea de la secció

L'excentricitat de la peça és la distància entre el centre de gravetat i la posició de la línia neutra. La seva expressió es troba definida en l'equació 47.

$$e = r_c - r_n = \left(c + \frac{a}{2} \right) - \left(\frac{a}{\ln \left(1 + \frac{a}{c} \right)} \right) \quad (47)$$

El paràmetre c_i , definit en l'Equació 48, és la distància que hi ha entre l'extrem intern de la secció central i la posició de la línia neutra.

$$c_i = r_n - r_i = \frac{a}{\ln \left(1 + \frac{a}{c} \right)} - c \quad (48)$$

En canvi, el paràmetre c_o és la distància des de la línia neutra fins a l'extrem extern de la secció central (Equació 49).

$$c_o = r_o - r_n = (c + a) - \left(\frac{a}{\ln \left(1 + \frac{a}{c} \right)} \right) \quad (49)$$

Un cop s'han parametritzat les dimensions de la peça, s'han calculat les tensions que es generen en els extrems de la secció central d'estudi. Les tensions degudes a la flexió provocades pel moment flector es calculen segons les Equacions 50 i 51.

$$\sigma_i \text{ [MPa]} = \frac{M \cdot c_i}{A \cdot e \cdot r_i} = \frac{4 \cdot F \left(x + c + \frac{a}{2} \right) \cdot \left(\frac{a}{\ln \left(1 + \frac{a}{c} \right)} - c \right)}{a \cdot b \cdot \left(c + \frac{a}{2} - \frac{a}{\ln \left(1 + \frac{a}{c} \right)} \right) \cdot c} \quad (50)$$

$$\sigma_o \text{ [MPa]} = \frac{M \cdot c_o}{A \cdot e \cdot r_o} = - \frac{4 \cdot F \left(x + c + \frac{a}{2} \right) \cdot \left(c + a - \frac{a}{\ln \left(1 + \frac{a}{c} \right)} \right)}{a \cdot b \cdot \left(c + \frac{a}{2} - \frac{a}{\ln \left(1 + \frac{a}{c} \right)} \right) \cdot (c + a)} \quad (51)$$

On:

σ_i són les tensions a tracció generades en l'extrem intern de la secció central

σ_o són les tensions a compressió generades en l'extrem extern de la secció central

Per altra banda, també cal considerar la tensió a tracció provocada per la força normal que es genera en la secció d'estudi. La seva expressió es mostra en l'Equació 52.

$$\sigma \text{ [MPa]} = \frac{N}{A} = \frac{4 \cdot F}{a \cdot b} \quad (52)$$

On N es correspon amb la força normal en newtons i A és l'àrea de la secció en mm².

A partir de les tensions generades en els extrems de la secció central, és possible conèixer quins punts estan sotmesos a majors tensions. En aquest cas, els punts més crítics són aquells que treballen a tracció perquè se sumen les tensions generades pel moment flector positiu i les tensions generades per la normal.

En canvi, en els punts que treballen a compressió, la tensió produïda per la normal compensa positivament la tensió generada pel moment flector negatiu.

En la Figura 81 es mostren els punts extrems de la secció d'estudi i s'ha indicat si aquests treballen a tracció o compressió.

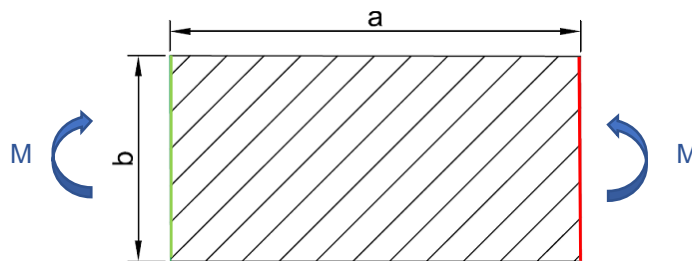


Figura 81 – Secció central d'estudi

Punts a **tracció** → $\sigma_{\text{tracció}} = \sigma_i \text{ [+]} + \sigma \text{ [+]}$

Punts a **compressió** → $\sigma_{\text{compressió}} = \sigma_o \text{ [-]} + \sigma \text{ [+]}$

Per tant, com que els punts més crítics són els que es troben en l'extrem de tracció, en l'Equació 53 s'han analitzat les tensions generades en aquest extrem.

$$\sigma_{\text{crítica}} [\text{MPa}] = \sigma_i + \sigma = \frac{M \cdot c_i}{A \cdot e \cdot r_i} + \frac{N}{A} = \frac{4 \cdot F \left(x + c + \frac{a}{2} \right) \cdot \left(\frac{a}{\ln \left(1 + \frac{a}{c} \right)} - c \right)}{a \cdot b \cdot \left(c + \frac{a}{2} - \frac{a}{\ln \left(1 + \frac{a}{c} \right)} \right) \cdot c} + \frac{4 \cdot F}{a \cdot b} \quad (53)$$

Per a determinar la màxima càrrega amb la qual es pot carregar el muntatge sense que la peça plastifiqui, en l'Equació 54 s'ha igualat el valor de la tensió crítica ($\sigma_{\text{crítica}}$) amb el valor del límit elàstic del material (σ_y) que s'ha obtingut en l'Annex A: Caracterització de les propietats mecàniques de l'alumini.

$$\sigma_{\text{crítica}} = \sigma_y \rightarrow \frac{4 \cdot F \left(x + c + \frac{a}{2} \right) \cdot \left(\frac{a}{\ln \left(1 + \frac{a}{c} \right)} - c \right)}{a \cdot b \cdot \left(c + \frac{a}{2} - \frac{a}{\ln \left(1 + \frac{a}{c} \right)} \right) \cdot c} + \frac{4 \cdot F}{a \cdot b} = 150 \quad (54)$$

Si s'aïlla el valor F de l'equació anterior s'obté la càrrega límit de plastificació (Equació 55).

$$F_{\text{límit}} [\text{N}] = \frac{75 \cdot a^2 \cdot b \cdot c \cdot \ln \left(\frac{a+c}{c} \right) - 150 \cdot a^2 \cdot b \cdot c + 150 \cdot a \cdot b \cdot c^2 \cdot \ln \left(\frac{a+c}{c} \right)}{[2 \cdot a^2 + 4 \cdot a \cdot x - 4 \cdot c \cdot x \cdot \ln \left(\frac{a+c}{c} \right)]} \quad (55)$$

L'expressió simplificada es mostra en l'Equació 56.

$$F_{\text{límit}} [\text{N}] = \frac{75 \cdot a^2 \cdot b \cdot c \cdot \ln \left(\frac{a+c}{c} \right) + 150 \cdot a \cdot b \cdot c \left(-a + c \cdot \ln \left(\frac{a+c}{c} \right) \right)}{[2 \cdot a^2 + 4 \cdot x \cdot (a - c \cdot \ln \left(\frac{a+c}{c} \right))]} \quad (56)$$

Si finalment es vol obtenir la càrrega límit en kilograms només cal dividir l'Equació 56 entre el valor de la gravetat de 9,81 m/s².

$$F_{\text{límit}} [\text{kg}] = \frac{75 \cdot a^2 \cdot b \cdot c \cdot \ln \left(\frac{a+c}{c} \right) + 150 \cdot a \cdot b \cdot c \left(-a + c \cdot \ln \left(\frac{a+c}{c} \right) \right)}{9,81 \cdot [2 \cdot a^2 + 4 \cdot x \cdot (a - c \cdot \ln \left(\frac{a+c}{c} \right))]} \quad (57)$$

Segons l'Equació 57, es pot conèixer per a cada model de peça quina és la càrrega límit que es pot aplicar en el muntatge a partir de la qual es produiria la plastificació de la peça d'estudi.

ANNEX D: MALLAT DEL MODEL

En aquest annex s'ha definit el procés emprat per a generar el mallat de la peça d'estudi. El mallat és un factor important que cal definir acuradament perquè pot fer variar significativament els resultats.

Tal com s'ha comentat en l'apartat 3.2.2 Geometria dels models, la superfície de la peça s'ha dividit en dues regions (Figura 82). La primera regió consta d'un rectangle metre que l'altra regió fa referència a la curvatura de la peça.

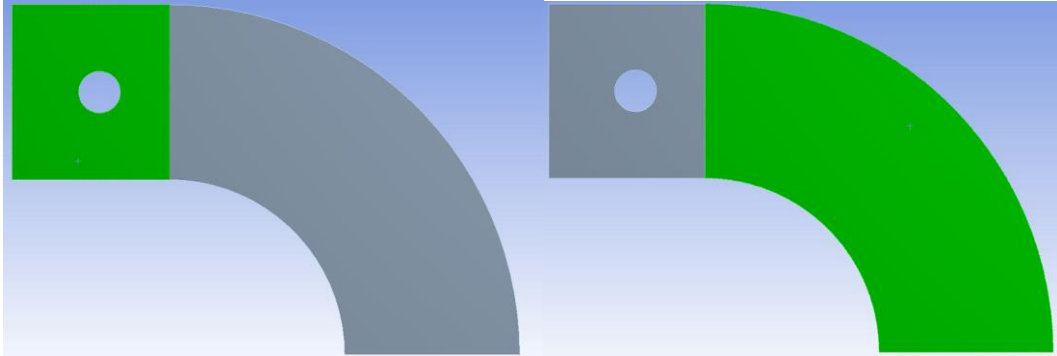


Figura 82 – Superfície rectangular (esquerra) i superfície corba (dreta)

El motiu pel qual s'ha decidit dividir la superfície de la peça en dues regions ha sigut per a poder establir el nombre de divisions desitjades al llarg de cada aresta i poder obtenir d'aquesta manera un mallat uniforme.

L'opció *Edge Sizing* permet definir el nombre de divisions que es volen obtenir al llarg d'una o diverses arestes.

En primer lloc, tal com es mostra en la Figura 83, s'han seleccionat les tres arestes que defineixen l'amplada de la peça i s'ha introduït el nombre de divisions desitjades. S'ha decidit establir una mida d'element d'1,25 mm x 1,25 mm i, per tant, el nombre de divisions dependrà de l'amplada (a) de cada peça.

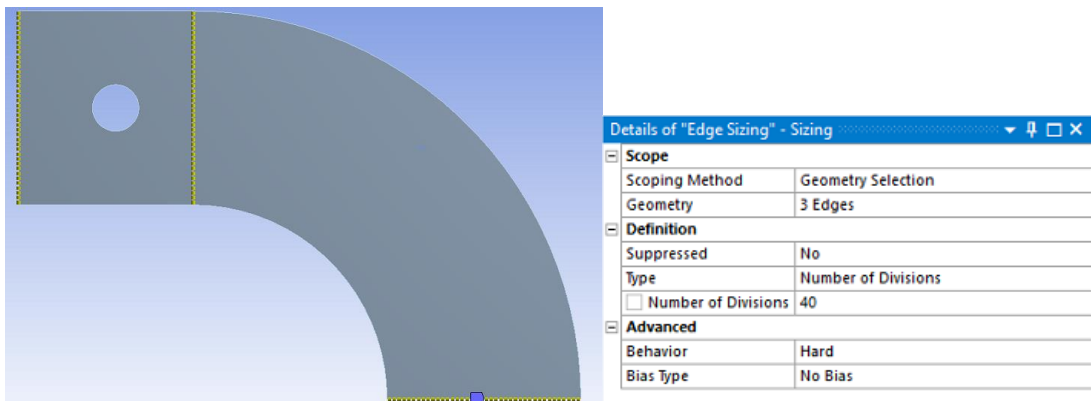


Figura 83 – Nombre de divisions al llarg de l'amplada de la peça

A continuació, en la Figura 84, s'han seleccionat les dues arestes que defineixen la base de la superfície rectangular i s'ha introduït el nombre de divisions considerant la mateixa mida d'element d'1,25 mm x 1,25 mm. Per tant, el nombre de divisions al llarg d'aquestes dues arestes també variarà en funció de les dimensions de cada model de peça.

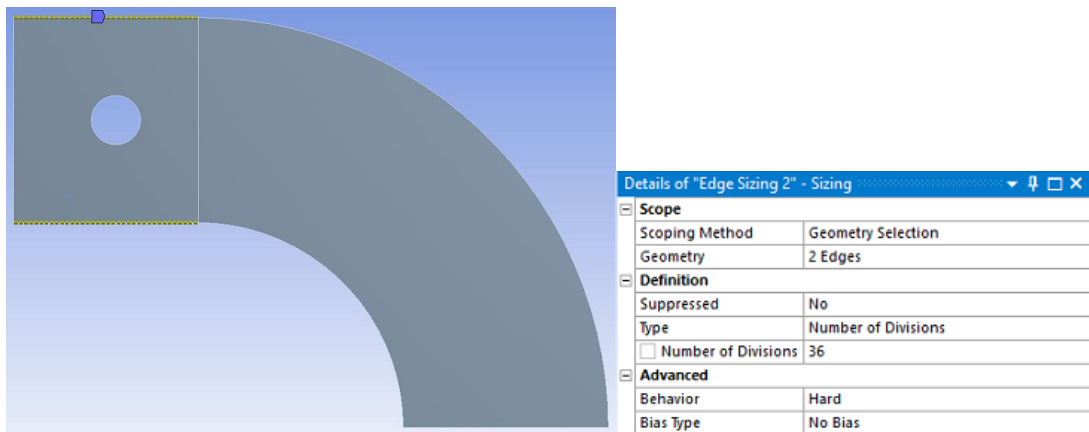


Figura 84 – Nombre de divisions al llarg de la base rectangular

Per a definir la mida de l'element en les dues arestes curvilínies s'ha decidit establir 40 divisions per a les tres peces. Per tal d'obtenir una major precisió en la secció d'estudi s'ha afegit un biaix en el mallat (Figura 85). Un biaix consisteix a ajustar la proporció d'espai entre nodes per a disminuir la mida de l'element en la zona desitjada. S'ha considerat un factor de biaix de valor 10, de tal manera que en la zona de la secció central de la peça els elements tindran una mida 10 vegades més petita que la resta.

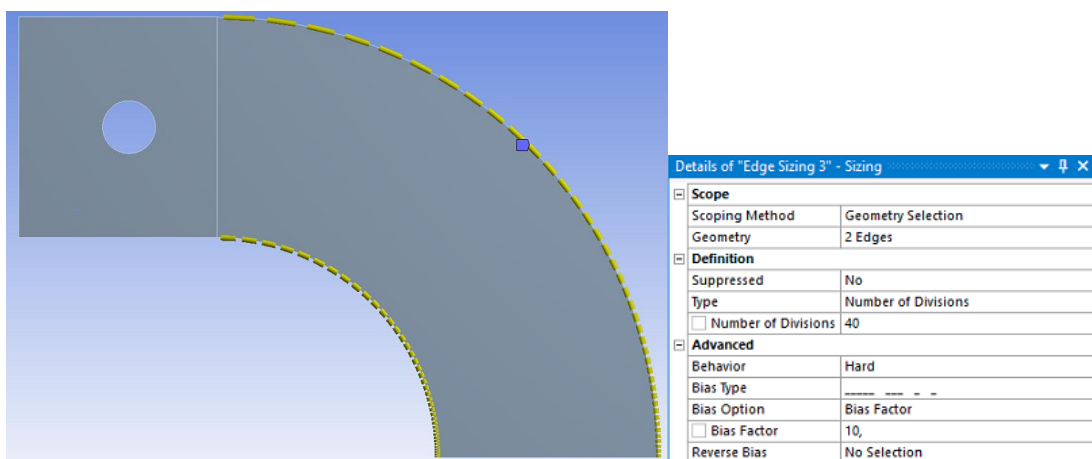


Figura 85 – Nombre de divisions al llarg de les arestes de curvatura

Per últim, mitjançant l'opció *Face Meshing*, s'han seleccionat les dues regions en les quals es vol generar el mallat. La superfície de mallat es pot apreciar en la Figura 86.

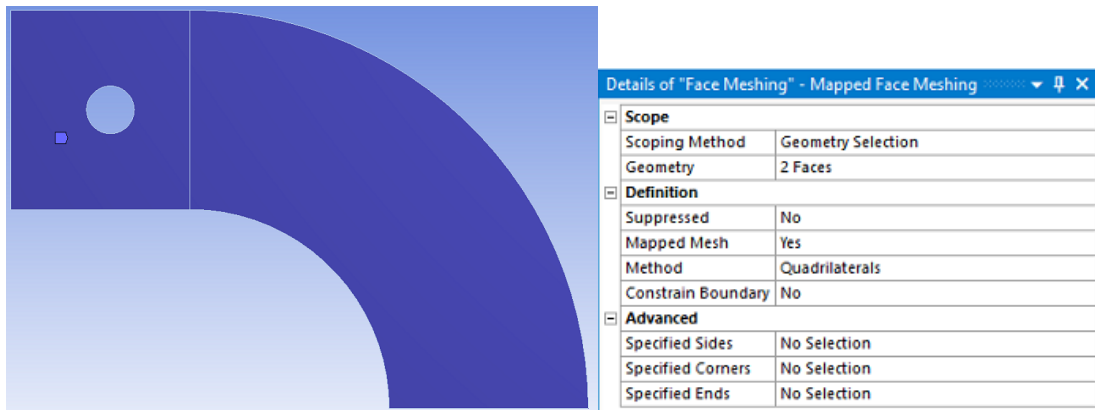


Figura 86 – Selecció de la superfície de mallat

El resultat final del mallat es pot observar en la Figura 87.

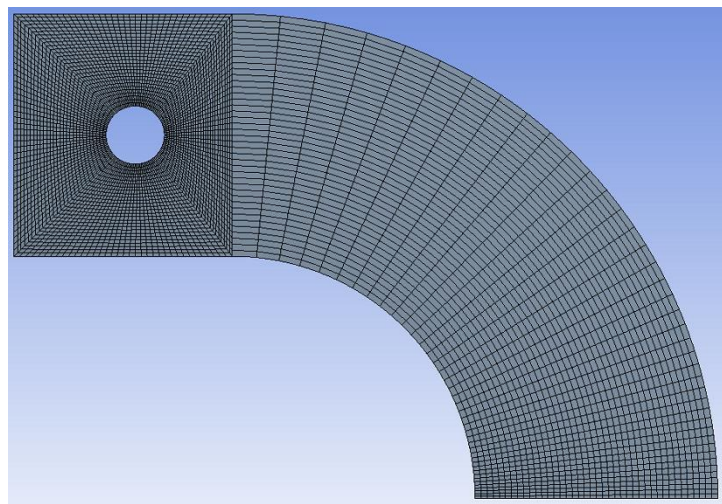


Figura 87 – Mallat final del model

En la figura anterior es pot observar que el mallat és uniforme al llarg de tota la superfície de la peça. A mesura que el mallat s'aproxima a la secció central d'estudi es pot apreciar que la mida dels elements disminueix a causa del biaix incorporat i, per tant, proporcionarà una major precisió en els resultats quan es faci l'anàlisi de tensions i deformacions.

ANNEX E: VALIDACIÓ DEL MODEL SIMÈTRIC

En aquest annex s'ha realitzat la validació del model simètric, ja que en els estudis de tensions i deformacions desenvolupats en el treball s'ha utilitzat el model simètric en comptes del model sencer per tal de simplificar els càlculs. Per tant, és necessari comprovar i validar que la simetria s'ha efectuat correctament per a considerar correctes els resultats obtinguts.

Per a la validació s'han comparat les deformacions verticals que s'obtenen al llarg de la secció central del model simètric i del model sencer per a un sistema de càrregues determinat. Si les condicions de simetria i contorn s'han aplicat correctament, els resultats obtinguts en ambdós models han de ser els mateixos.

El mallat que s'ha generat en el model sencer és exactament el mateix que conté el model simètric, ja que si els mallats no presentessin les mateixes característiques els resultats es podrien veure afectats. Les condicions de contorn aplicades en el model sencer es troben en la Figura 88.

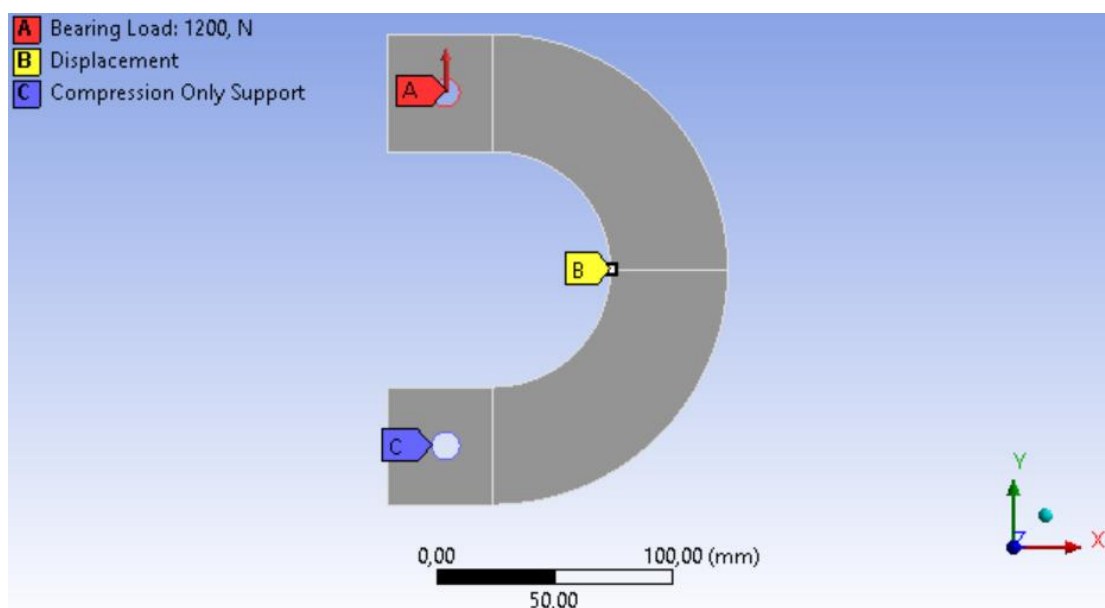


Figura 88 – Condicions de contorn del model sencer

Mitjançant la condició *Displacement* s'ha restringit el desplaçament horitzontal, en direcció X, del vèrtex esquerre de la secció central. En el forat inferior de la peça s'ha aplicat la condició *Compression Only Support* per a inserir un suport que treballi només a compressió simulant d'aquesta manera l'efecte del passador del muntatge. Finalment, s'ha considerat la càrrega aplicada amb l'opció *Bearing Load* tal com s'ha fet en el model simètric.

A partir de l'opció *Path* indicada en la Figura 89, s'ha definit un segment rectilini al llarg de la secció central que es vol estudiar. D'aquesta manera és possible extreure els resultats en la secció desitjada.

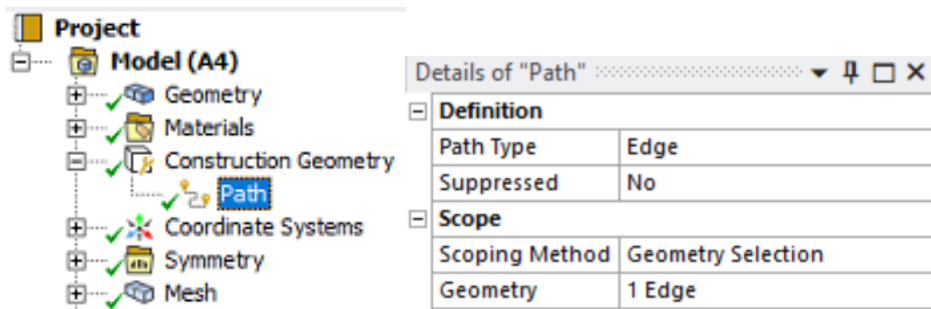


Figura 89 – Opció path per a analitzar la secció central

Per a dur a terme la validació del model simètric s'ha aplicat una càrrega de valor $4F=1200\text{ N}$ en els tres models i s'han analitzat gràficament els resultats obtinguts en la secció central. S'ha tingut en compte que la càrrega aplicada per a realitzar els estudis es troba per sota de la càrrega límit de plastificació de tots els models.

A continuació es mostren els resultats obtinguts.

MODEL 1

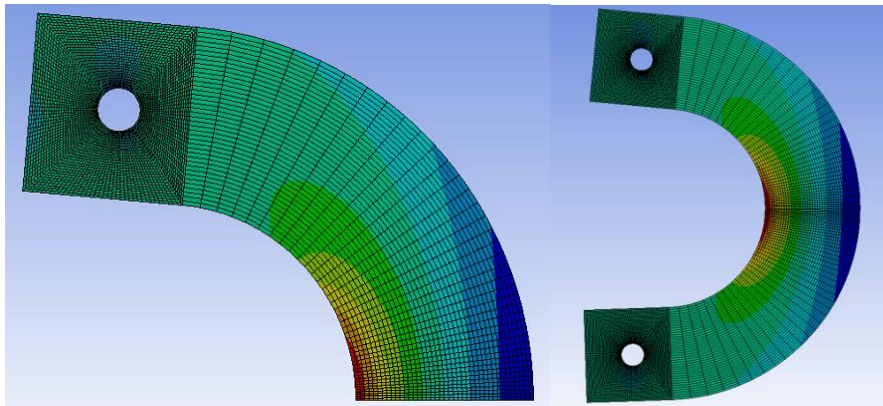


Figura 90 – Model 1 simètric (esquerra) i model 1 sencer (dreta)

Les deformacions produïdes al llarg de la secció central es mostren en la Figura 91.

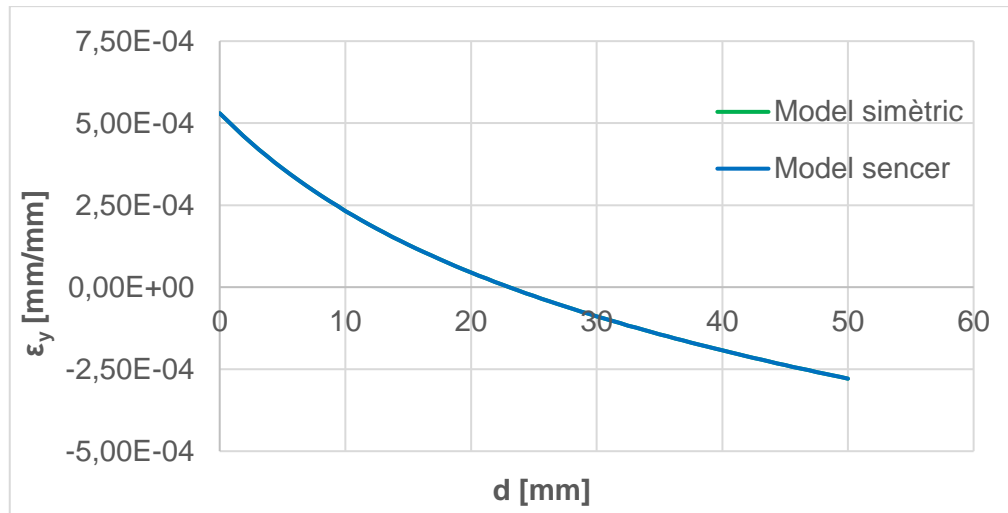


Figura 91 – Deformacions verticals al llarg de la secció central per al model 1

MODEL 2

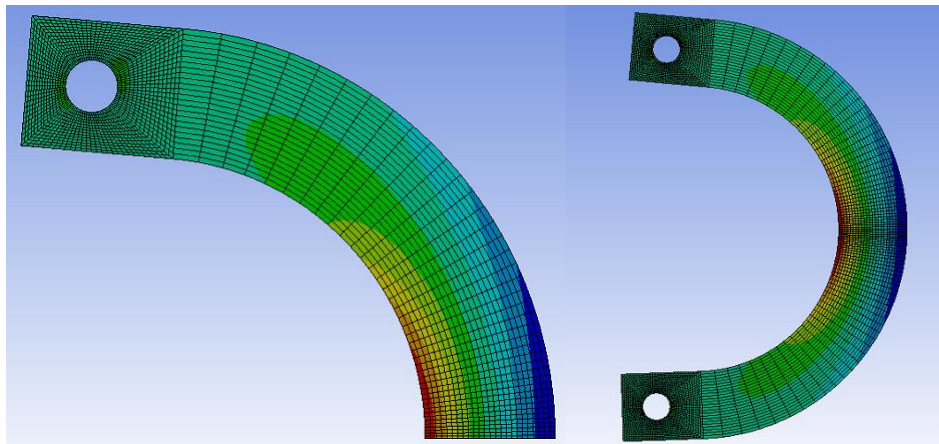


Figura 92 - Model 2 simètric (esquerra) i model 2 sencer (dreta)

Les deformacions produïdes al llarg de la secció central es mostren en la Figura 93.

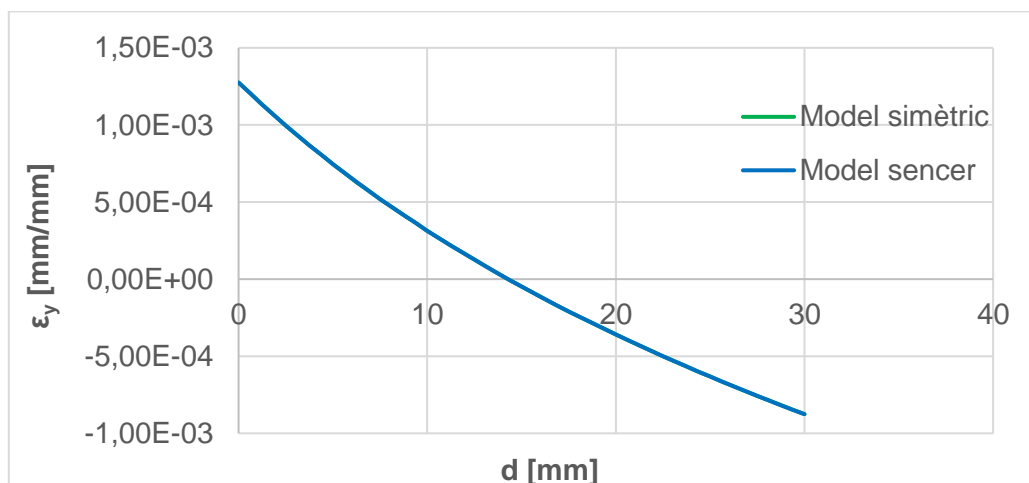


Figura 93 - Deformacions verticals al llarg de la secció central per al model 2

MODEL 3

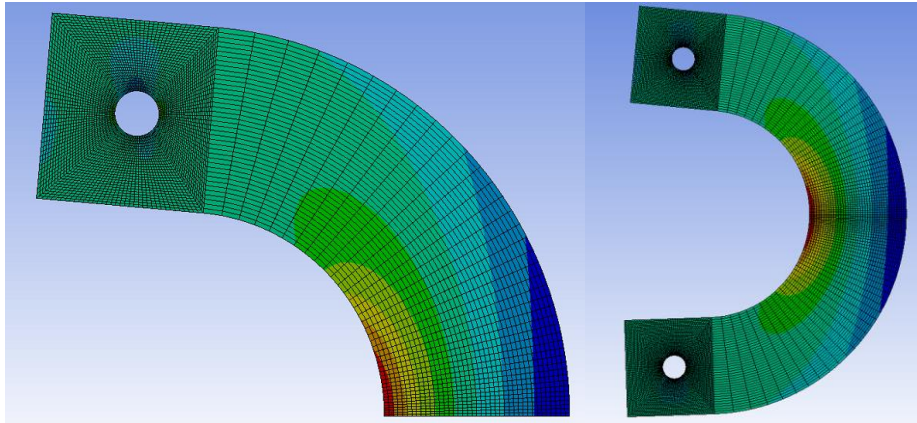


Figura 94 - Model 3 simètric (esquerra) i model 3 sencer (dreta)

Les deformacions produïdes al llarg de la secció central es mostren en la Figura 95.

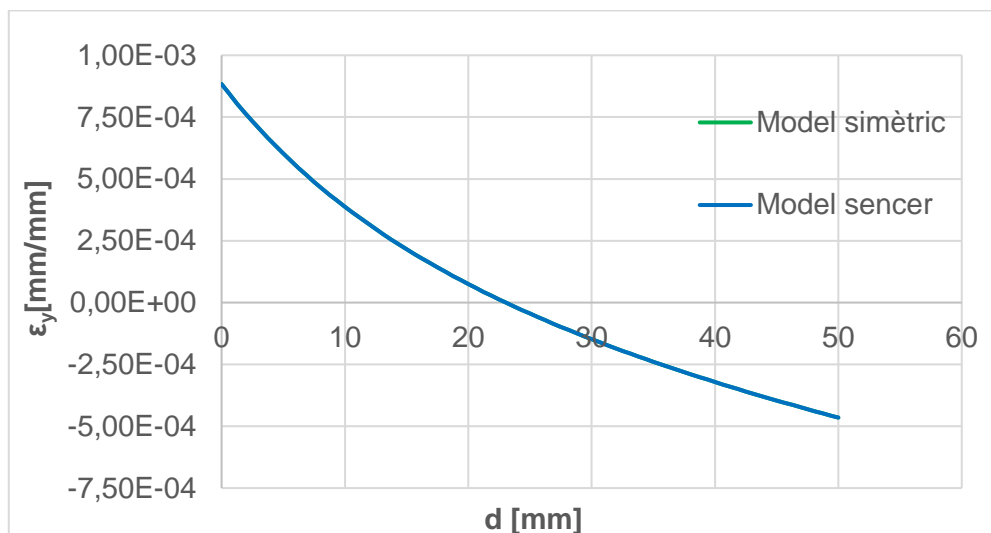


Figura 95 - Deformacions verticals al llarg de la secció central per al model 3

Es pot observar que per als tres models de peça les deformacions verticals que es produeixen al llarg de la secció central són exactament les mateixes per al model simètric i per al model sencer, ja que les corbes es troben sobreposades.

El punt inicial de la gràfica representa la màxima deformació que pateix la secció en l'extrem que treballa a tracció mentre que el darrer punt de la gràfica correspon a la màxima deformació a compressió que pateix l'altre extrem de la secció central. La intersecció de la corba amb l'eix d'abscisses correspon a la posició de la línia neutra on les tensions i les deformacions prenen un valor de zero.

Per tant, s'ha comprovat que les condicions de simetria i contorn s'han aplicat correctament atès que per a una distribució de càrregues qualsevol s'han obtingut les mateixes deformacions al llarg de la secció central d'estudi.

ANNEX F: VALORACIÓ DE COSTOS

En aquest annex es mostra la valoració econòmica del projecte. A l'hora de calcular el pressupost s'ha tingut en compte el cost de la realització de la part experimental i el cost associat a la part de redacció del projecte.

Per a realitzar la part experimental s'han utilitzat les tres peces que representen un cost total de 67,42 €. També s'han utilitzat sis provetes per a determinar les propietats mecàniques de l'alumini amb un preu total de 23,45 €. El preu unitari de les galgues extensomètriques és de 4,98 €, i com s'han adherit un total de dotze galgues, sis en les peces i sis en les provetes, el preu total ascendeix fins a 59,76 €. A més, s'ha fet servir un pot de pintura blanca, gel transfer i locite, que representen un cost de 8,5 €, 6,5 € i 7,75 € respectivament. Per tant, el cost total de la part experimental ascendeix fins a 173,38 €.

En la Taula 11 s'han desglossat els costos de realització del projecte.

Descripció	Preu unitari [€/h]	Unitats [h]	Preu total [€]
Mà d'obra			
Recerca d'informació i anàlisi de resultats	12	105	1.260
Realització dels assaigs	16	40	640
Redacció del treball	10	85	850
Amortització			
Amortització de l'ordinador	0,04	275	11
Amortització de la llicència de software	5	115	575
Programes utilitzats: Word, Excel, Power Point i Ansys	2	150	300
Material			
Material emprat en els assaigs	-	-	173,38
Subtotal			3.809,38
Despeses Generals (13%)			495,22
			4.304,60
Benefici Industrial (9%)			387,41
			4.692,01
21% IVA			985,32
TOTAL			5.677,34

Taula 11 – Costos de realització del projecte