



EPS

Escola Politècnica
Superior

Projecte/Treball Fi de Carrera

Estudi: Enginyeria Industrial. Pla 2002

Títol: Disseny dels elements constitutius per adaptar un centre de mecanitzat de control numèric a la tecnologia Incremental Sheet Forming (ISF)

Document: Memòria i Annexos

Alumne: Isabel Bagudanch Frigolé

Director/Tutor: Maria Luisa García-Romeu de Luna
Departament: Eng. Mecànica i de la Construcció Industrial
Àrea: Enginyeria de Processos de Fabricació

Convocatòria (mes/any): Setembre 2011

Índex

MEMÒRIA.....	4
1 Introducció	5
1.1 Antecedents	5
1.2 Objecte	8
1.3 Abast.....	8
1.4 Especificacions	8
2 Descripció de la solució	11
2.1 Conceptes previs	11
2.2 Disseny final	13
2.2.1 Descripció de l'utilatge per a subjectar la xapa.....	14
2.2.1.1 Plataforma inferior (Bottom plate).	14
2.2.1.2 Quatre suports (Supports).....	14
2.2.1.3 Plataforma superior (Top plate).	14
2.2.1.4 Plataforma de fixació (Clamping plate).	15
2.2.2 Descripció de l'eina de conformat.....	15
2.2.3 Muntatge.....	16
3 Generació de la trajectòria de l'eina	18
3.1 Conceptes previs	18
3.2 Adaptació del CAM per a processos de mecanitzat	19
3.3 Programació d'una rutina pròpia per a la generació de les trajectòries...	24
4 Validació	26
4.1 Proves preliminars	26
4.1.1 Velocitat de rotació	26
4.1.2 Velocitat d'avanç.....	27
4.1.3 Influència del lubricant	27
4.1.4 Influència de la trajectòria de l'eina	30
4.2 Geometria	32
4.3 Característiques de les xapes.....	34
4.3.1 Elecció del material.....	34
4.3.2 Assaig a tracció	34
4.4 Disseny d'experiments (DOE).....	35
4.5 Mesures i adquisició de dades.....	37
4.5.1 Forces.....	37
4.5.2 Límits de formabilitat.....	37

4.5.3	Precisió	38
4.6	Simulació per elements finits	39
5	Resultats	41
5.1	Assaig a tracció	41
5.2	Forces	42
5.3	Límits de formabilitat.....	44
5.4	Precisió	45
5.5	Simulació per elements finits	61
5.5.1	Forces.....	61
5.5.2	Precisió	63
6	Anàlisi i discussió dels resultats	65
6.1	Forces	65
6.2	Límits de formabilitat.....	70
6.3	Precisió	72
7	Resum del pressupost	73
8	Conclusions	74
9	Línies futures	79
9.1	Camps d'aplicació.....	79
9.2	Materials	79
9.3	Acabat/precisió de la peça final	80
9.4	Control del procés.....	80
10	Relació de documents	81
11	Bibliografia	82
12	Glossari.....	84
12.1	Abreviacions	84
12.2	Símbols.....	84
ANNEXOS	86
A	Estat de l'art.....	87
A.1	Tipus de procés	87
A.1.1	Single Point Incremental Forming (SPIF)	87
A.1.2	Two Point Incremental Forming (TPIF)	87
A.1.3	ISF en calent	88
A.1.4	ISF combinat amb estirat (Stretch Forming)	90
A.2	Màquines	90
A.2.1	Centres de mecanitzat CNC.....	91
A.2.2	Màquines destinades únicament a ISF	91

A.2.3	Robots industrials.....	92
A.2.4	Plataformes Stewart.....	92
A.3	Materials utilitzats.....	93
A.4	Mecanismes de deformació.....	94
A.5	Paràmetres i especificacions d'entrada del procés.....	96
A.6	Paràmetres de sortida del procés.....	98
A.6.5	Formabilitat del material.....	98
A.6.6	Rugositat superficial.....	99
A.6.7	Forces de conformat.....	99
A.6.8	Precisió dimensional.....	101
A.7	Cadena de procés.....	101
A.8	Camps d'aplicació.....	102
A.9	Referències.....	105
B	Aparells utilitzats.....	109
B.1	Centre de mecanitzat Kondia HS1000.....	109
B.2	Taula dinamomètrica Kistler 9257B.....	110
B.3	Màquina de mesura de coordenades Mitutoyo Crysta Apex 544.....	111
C	Programació d'una rutina pròpia per a la generació de les trajectòries.....	112
D	Obtenció dels paràmetres de la llei d'enduriment.....	116

MEMÒRIA

1 Introducció

1.1 Antecedents

Un dels processos tradicionals de conformació de xapa més utilitzats a nivell industrial, degut a la seva rapidesa d'operació i la seva maduresa del procés, és l'embotició. Per a dur a terme aquest procés és necessària la construcció d'uns utillatges (matriu i punxó) per a cada tipus de producte. Aquests utillatges estan fabricats amb materials altament resistents ja que han de poder suportar càrregues molt importants durant la deformació. A més, s'han de garantir unes precisions dimensionals molt bones per tal d'evitar el xoc entre les dues parts de l'utilatge i per a assegurar que la peça obtinguda tingui les dimensions desitjades. Aquest fet implica que el procés d'obtenció de les matrius i punxons té un cost molt elevat i per a amortitzar-lo és necessari que la producció sigui en massa.

Com que la majoria dels processos tradicionals de deformació de xapa no són econòmicament viables per a la producció de lots baixos, és imprescindible utilitzar processos més innovadors. Un dels que ha despertat més interès en els darrers anys és la conformació incremental de xapa, anomenat en anglès *Incremental Sheet Forming (ISF)*.

Aquesta tecnologia consisteix en el fet que una eina (generalment un punxó amb punta semiesfèrica) es mou en un pla seguint una trajectòria prèviament programada i aplica una deformació local a la xapa. Aleshores l'eina baixa una determinada profunditat i es torna a moure seguint la trajectòria definida en aquest nou pla i així successivament fins a obtenir el producte final. L'eina no està dissenyada per un producte en concret sinó que es pot utilitzar en un gran ventall de productes amb geometries diferents, amb la qual cosa el cost derivat de la fabricació de l'eina és molt reduït i la tecnologia de ISF és viable per a la fabricació de sèries de producció baixes.

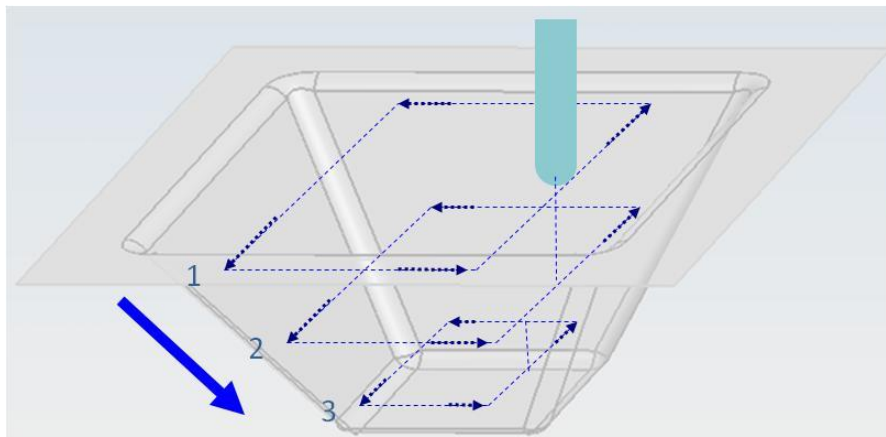


Figura 1.1. Principi de funcionament del procés de ISF.

La tecnologia de conformat incremental de xapa molt sovint es compara amb un procés conegut com a *spinning* que s'utilitza per a la fabricació de parts rotacionals de baixa i mitja tirada, com per exemple productes relacionats amb els estris culinaris. A continuació es mostra una breu comparació d'aquestes dues tecnologies (Emmens et al., 2010).

Taula 1.1. Comparació dels processos de deformació de xapa coneguts com Spinning i ISF.

	Spinning	ISF
Contorn de la xapa	Es mou cap a dins	Està fixat pel suport
Gruix de la xapa	Es manté més o menys constant	Es redueix determinat per les característiques del procés
Forma determinada per:	Moviment d'un rodet o mandrí	Moviment d'un punxó
Necessitat de matriu	Sí (actua com a sistema de subjecció)	No
Possibilitat de produir peces asimètriques	Molt limitada	Sí

El primer treball d'investigació que parla de la tecnologia de ISF data del 1978 per part de Manson, investigador de la Universitat de Nottingham (Emmens et al., 2010).

Tot i que fa més de tres dècades d'aquest treball, no és fins aproximadament l'any 2004 (veure Figura 1.2) que investigadors de diferents universitats d'arreu del món s'han interessat realment en aquesta tecnologia, coincidint amb el fet que en els darrers anys s'ha notat un canvi de tendència en alguns sectors de la indústria manufacturera, ja que cada vegada és més freqüent la producció a partir de lots reduïts (fins i tot d'única unitat) per tal d'aconseguir productes altament personalitzats, adaptats als requeriments dels clients.

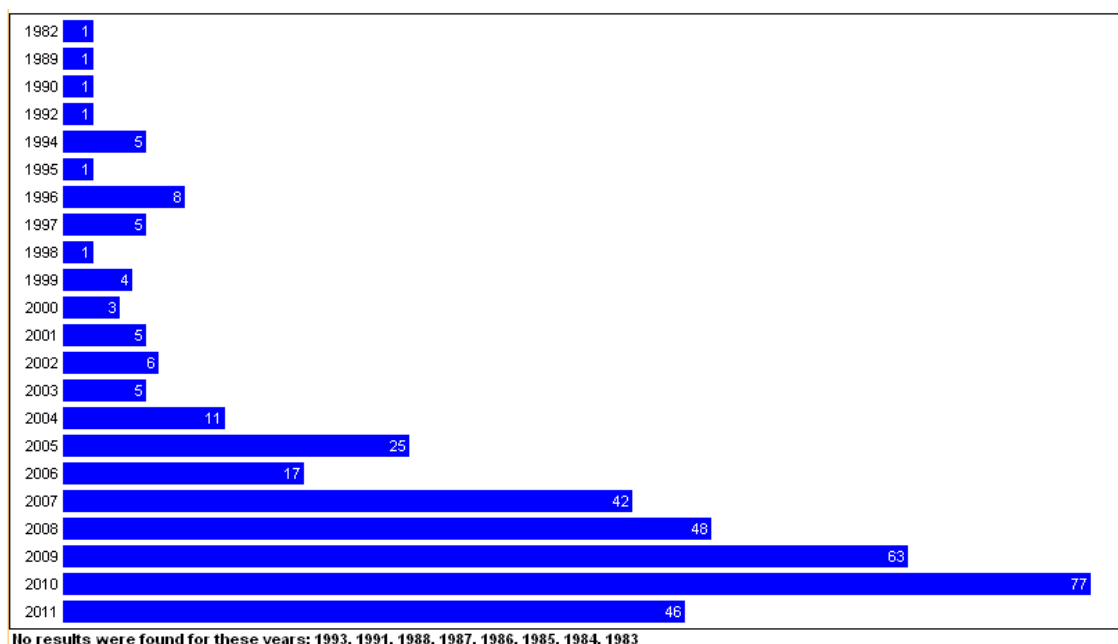


Figura 1.2. Evolució del nombre d'articles publicats en revistes indexades des de l'any en què apareix el primer article, el 1982, fins a juny de 2011 (informació extreta de la base de dades de Scopus).

Hi ha diverses variants del procés de conformat incremental de xapa, essent les més importants les conegudes com *Single Point Incremental Forming* (SPIF) i *Two Point Incremental Forming* (TPIF). La principal diferència entre aquestes dues variants és que en la primera la xapa es deforma a l'aire mentre que en la segona s'utilitza una matriu total o parcial per a aconseguir millors precisions dimensionals. La matriu es pot

construir a partir de materials fàcilment mecanitzables i de baix cost, com per exemple, fusta o resines polimèriques. Per tant, el cost que suposa l'ús d'una matriu no és comparable amb les matrius utilitzades en processos convencionals com l'embotició.

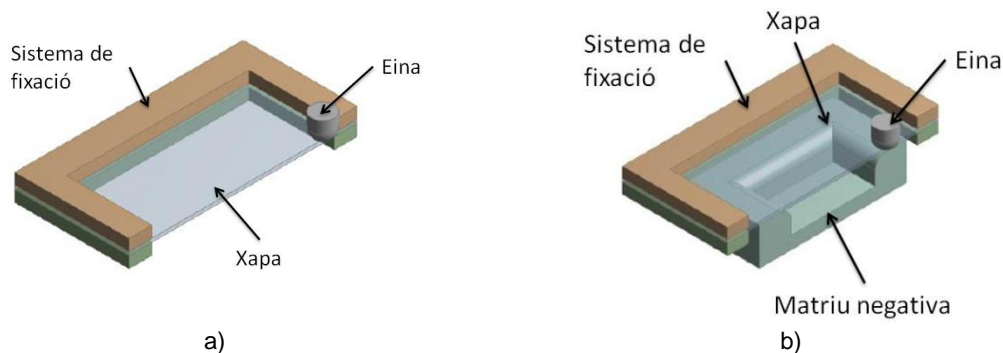


Figura 1.3. a) SPIF. b) TPIF amb matriu negativa.

Generalment, aquest procés es duu a terme en un centre de mecanitzat de control numèric. S'ha de fer una adaptació de la màquina per poder realitzar el conformat incremental de xapa, ja que originàriament aquesta està dissenyada per a processos d'arrencada de ferritja. L'adaptació sol consistir en el disseny i construcció d'un utilatge per fixar la xapa i unes eines de conformat i en la modificació del software CAM per a generar la trajectòria de l'eina.

Tradicionalment les xapes utilitzades en el procés de conformat incremental de xapa eren metàl·liques. És per aquest motiu que en algunes ocasions s'anomena la tecnologia com *Incremental Sheet Metal Forming* (ISMF). Aquesta nomenclatura ha quedat obsoleta, ja que en els darrers anys s'han publicat estudis en què es demostra que es possible conformar xapes de materials polimèrics i fins i tot composts mitjançant la tecnologia de ISF (Jackson et al., 2008; Silva et al., 2010).

A l'Annex A Estat de l'art es pot veure un resum de les principals contribucions a la tecnologia realitzades en els últims anys relacionades amb les variants del procés, ús de nous materials, descripció dels paràmetres de procés o tipus de màquines utilitzades, entre altres.

Veient l'interessant potencial de la tecnologia ISF, el Grup de Recerca en Enginyeria del Producte, Procés i Producció (GREP) de la Universitat de Girona ha decidit promoure una línia d'investigació relacionada amb aquest tema. En les primeres etapes es desitja fer una recerca bàsica, combinant diferents geometries, materials i estratègies de conformat amb la finalitat de contribuir en el coneixement del procés. Per fer-ho primer és imprescindible tenir la maquinària necessària. Recentment el GREP disposa a les seves instal·lacions d'un centre de mecanitzat de 3 eixos amb control numèric Kondia HS1000 que no està preparat per dur a terme l'experimentació amb ISF.

1.2 Objecte

L'objecte d'aquest projecte és adaptar el centre de mecanitzat Kondia HS1000 per tal de poder dur a terme recerca bàsica de la tecnologia de conformat incremental de xapa (ISF). El disseny dels diferents elements necessaris per a l'adaptació s'ha de finalitzar abans del juny del 2011.

Després de l'adaptació s'ha de validar que el funcionament del centre de mecanitzat és correcte a partir de realitzar algunes proves experimentals. A més, aquestes proves experimentals han de contribuir a l'estudi de la influència d'alguns paràmetres d'entrada en els resultats finals. Es preveu que aquesta segona etapa tingui una durada de dos mesos.

1.3 Abast

Per tal de dur a terme els objectius del projecte es realitzaran una sèrie de tasques:

- Revisió de l'estat de l'art.
- Disseny d'un utilatge de conformat que permeti subjectar la xapa per realitzar els experiments.
- Adaptació del software CAM (*Computer Aided Manufacturing*) dissenyat per a processos de mecanització al procés de ISF.
- Realització d'un disseny d'experiments (DOE) per tal de validar el funcionament de la tecnologia.
- Mesurar forces de conformat, límits de formabilitat i precisions dimensionals per identificar relacions amb els paràmetres d'entrada a partir d'un anàlisi estadístic (ANOVA).
- Obtenció de models analítics per a predir els valors de sortida.

A part d'aquestes tasques també es realitzarà una valoració econòmica del cost de fabricació de l'utilatge i de les altres despeses involucrades amb aquest projecte de final de carrera (material, eines, hores d'investigació, etc.).

1.4 Especificacions

En aquest apartat es descriuen les especificacions del projecte, dividides segons categories i qualificades com a especificacions Requerides (R) o Desitjades (D).

S'han realitzat dues taules per definir les especificacions tenint en compte els dos objectius clarament diferenciats que s'han presentat a l'apartat 1.2. La primera fa referència al disseny i construcció de l'utilatge i la segona a la recerca bàsica que es vol dur a terme un cop s'ha posat a punt la maquinària necessària.

Taula 1.2. Especificacions referents al disseny i construcció de l'utilatge.

Nom	R/D	Descripció
Objectiu	R	Adaptar un centre de mecanitzat de control numèric per tal de realitzar experiments amb la tecnologia <i>Incremental Sheet Forming</i>
Funció	R	Recopilar informació sobre dissenys utilitzats en diferents centres de recerca.
	R	Dissenyar un utilatge que permeti subjectar la xapa de manera que s'impossibiliti el moviment d'aquesta durant l'execució del procés.
	R	Disseny de l'eina (punxó) necessari per a deformar el material.
	R	Adaptació al procés de ISF del software CAM per a processos de mecanitzat.
	R	Assegurar la correcta integració entre la part hardware i software.
Recursos	R	Centre de mecanitzat Kondia HS1000.
	R	Centre de mecanitzat Deckel Maho 64V linear (per a la fabricació de l'utilatge).
	R	Trepanadora.
	R	Torn de control numèric Okuma LB-15.
	R	Taula dinamomètrica Kistler 9257B.
	R	Software de disseny mecànic, Inventor
	R	Software CAM, GoElan v5
Dimensions	R	Dimensions màximes de l'utilatge 250x250x150 mm per tal que les xapes de material siguin reduïdes i permeti estalvi de costos.
	R	Es disposa d'un porta eines al qual s'hi poden acoblar eines en un rang entre 1 i 13 mm.
Material	R	Xapes i tubs d'acer per a la fabricació de l'utilatge.
	R	Barres d'acer d'eina per a la fabricació de l'eina.
	R	Cargols i femelles per a les unions.
	D	Utilitzar la màxima quantitat de peces disponibles al taller.
Eines	R	Freses varies.
	R	Broques.
Metodologia	R	Proposar diferents dissenys i optar pel que permeti un millor equilibri entre costos i temps de construcció.
	R	Testejar les diferents opcions dels programes CAM per aconseguir una correcta generació de la trajectòria.
	D	Desenvolupar un nou programa per generar trajectòries.
Terminis	R	Finalització juny de 2011.
Muntatge	R	S'ha de poder desmuntar de la taula de treball amb facilitat per si el centre de mecanitzat s'ha de destinar a altres usos.
	R	Ha de permetre l'acoblament amb la taula dinamomètrica Kistler.
	D	Que sigui lleuger.
Costos	R	Minimitzar el cost de l'utilatge.
Altres	R	Considerar la compatibilitat amb altres tecnologies que es duran a terme a la Kondia HS1000.

Taula 1.3. Especificacions referents a la recerca bàsica de ISF.

Nom	R/D	Descripció
Objectiu	R	Validar l'adaptació del centre de mecanitzat de control numèric a partir de realitzar una bateria d'experiments.
Funció	R	Conèixer en detall la tecnologia a partir de l'estat de l'art. Identificar línies de recerca i paràmetres de procés més utilitzats.
	R	Realitzar una sèrie d'experiments per a la recerca bàsica (geometries senzilles i materials habituals).
	D	Determinar si centres de mecanitzat convencionals poden ser útils per a la fabricació amb la tecnologia ISF.
	D	Trobar un model per predir la força màxima del procés de conformat.
Recursos	R	Centre de mecanitzat a utilitzar Kondia HS1000.
	R	Màquina de coordenades Mitutoyo Crysta Apex 544.
	R	Taula dinamomètrica Kistler 9257B.
	R	Software de disseny mecànic, Inventor
	R	Software CAM, GoElan v5
	D	Software de simulació per elements finits, LS-DYNA
	R	Lubricant
Dimensions	R	Dimensions màximes de les xapes han de ser de 200x200x1 mm per tal que les xapes de material siguin reduïdes, permeti estalvi de costos i no se sobrepassi el valor màxim admissible de força axial (2000 N).
	R	Geometries de diàmetre superior a 20 mm per evitar col·lisions amb el sistema de subjecció de l'eina.
Material	R	Xapes d'alumini AA1050-H24 d'espessor 0.5 i 0.8 mm.
	D	Xapes d'acer inoxidable AISI304 d'espessor 0.5 i 0.8 mm.
	D	Xapes de PVC de 1 mm.
Eines	R	Punxó semiesfèric, varis materials i diàmetre 10 mm.
Metodologia	R	Realització d'un Disseny d'Experiments reduït (DOE).
	R	Avaluació de la influència dels paràmetres d'entrada en els resultats finals mitjançant un anàlisi estadístic (ANOVA).
	D	Caracterització de les xapes a partir de la realització d'assajos a tracció d'algunes provetes.
	D	Realització de simulacions per elements finits del procés de ISF i comparar amb els resultats experimentals.
Terminis	R	Finalització, agost de 2011.
Experimentació	R	Experimentar amb diferents materials, geometries i espessors per validar el correcte funcionament del procés.
	R	Mesurar forces de conformat i formabilitat de les peces obtingudes.
Costos	R	Minimitzar el cost del material utilitzat.

2 Descripció de la solució

2.1 Conceptes previs

Abans de procedir al disseny del sistema de fixació de les xapes i de les eines de conformat, és necessari fer una recerca bibliogràfica per identificar els elements principals requerits en el muntatge experimental per dur a terme la tecnologia de ISF.

Amb la revisió d'articles ha estat possible identificar una sèrie d'elements que freqüentment es repeteixen en els diferents dissenys, tot i que algunes vegades les configuracions no coincideixen. A continuació es defineixen els principals elements que haurà de tenir el disseny escollit en aquest projecte:

- Plataforma inferior (*bottom plate*). Aquesta plataforma anirà collada a la taula de treball de la màquina o bé a un sistema de mesura de forces.
- Suports (coneguts com a *support* o *rig*). Han de permetre que hi hagi un cert espai sota la xapa perquè aquesta es pugui formar lliurement. A més, també és important que es pugui tenir una bona visió de la part inferior de la xapa per detectar possibles ruptures o fins i tot adaptar-hi un sistema òptic de mesura. Els suports s'han d'unir entre la plataforma inferior i la superior.
- Plataforma superior (*top plate*). En alguns dissenys aquesta plataforma no s'utilitza, sinó que es passa directament al *backing plate*. La plataforma superior permet que s'hi acoblin diferents tipus de *backing plate* i s'ha d'unir amb els suports i amb la plataforma de fixació. És l'element que proporciona la major rigidesa al sistema.
- Placa de suport (*backing plate*). Aquesta placa té una forma bastant propera a la que tindrà la xapa en la primera capa. La principal funció que té és evitar el doblegat de la xapa en les primeres passades i definir de manera més acurada les cantonades, ja que redueix la llibertat de moviment de la xapa en l'espai lliure.
- Plataforma de fixació (*clamping plate* o *blankholder*). Aquesta plataforma assegura que no hi haurà moviment de la xapa perquè comprimeix els extrems. S'ha de fixar a la plataforma superior o, en el cas que no s'utilitzi aquest element, a la placa de suport. La xapa es col·loca entre la placa de suport i la plataforma de fixació

Per tal d'il·lustrar millor la disposició i forma d'aquests elements s'han afegit algunes imatges extretes de la literatura on es poden veure diferents configuracions d'utilitzatges (veure Figura 2.1).

Pel que fa al tipus d'eina, generalment es pot parlar de tres tipus: la plana (molt poc utilitzada), la de punta de bola (la bola té rotació lliure de manera que la fricció és la mínima possible) i la semiesfèrica, essent aquesta última la més comú.

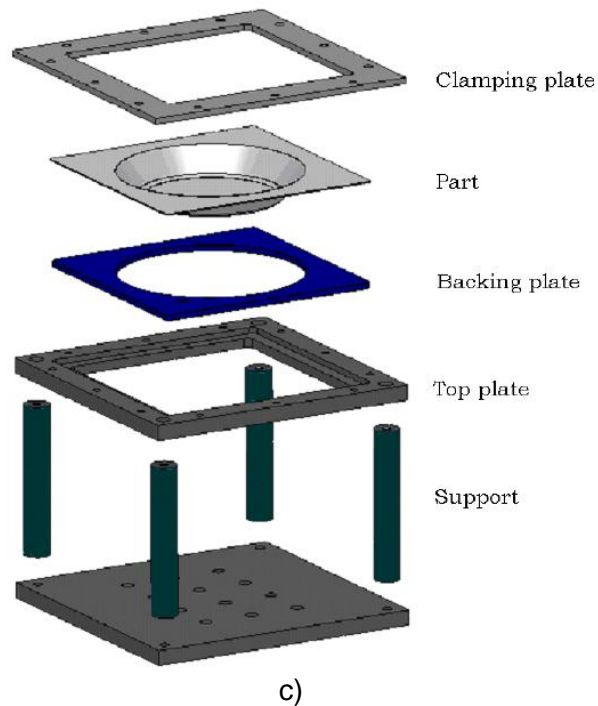
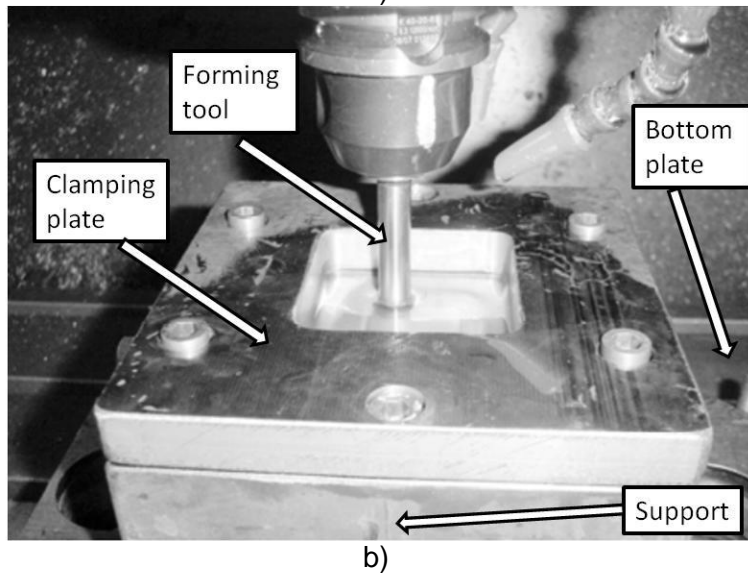
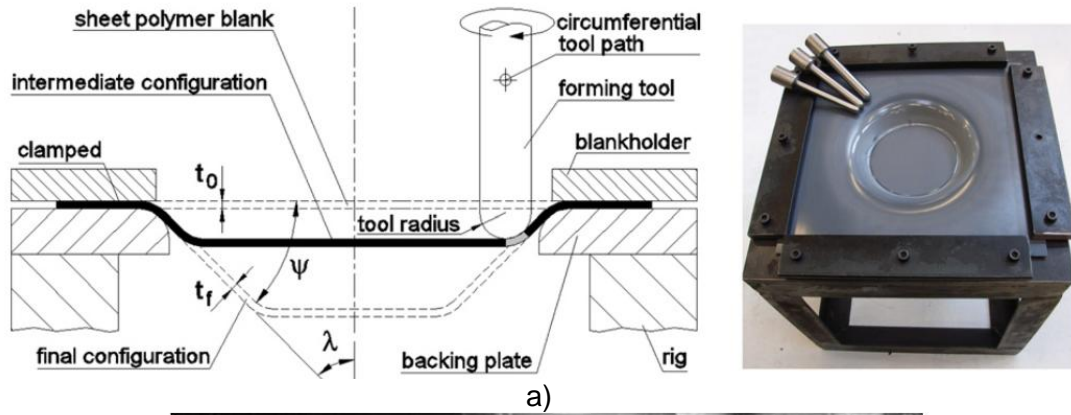


Figura 2.1. Exemples de dissenys utilitzats en la literatura. a) (Silva et al., 2010). b) (Oleksik et al., 2010b). c) (Henrad, 2008).

2.2 Disseny final

La configuració final del disseny realitzat per adaptar el centre de mecanitzat Kondia HS1000 per tal que s'hi pugui desenvolupar la tecnologia ISF és el que es mostra a la Figura 2.2 (incloent l'utilatge per subjectar la xapa, la pròpia xapa i l'eina).

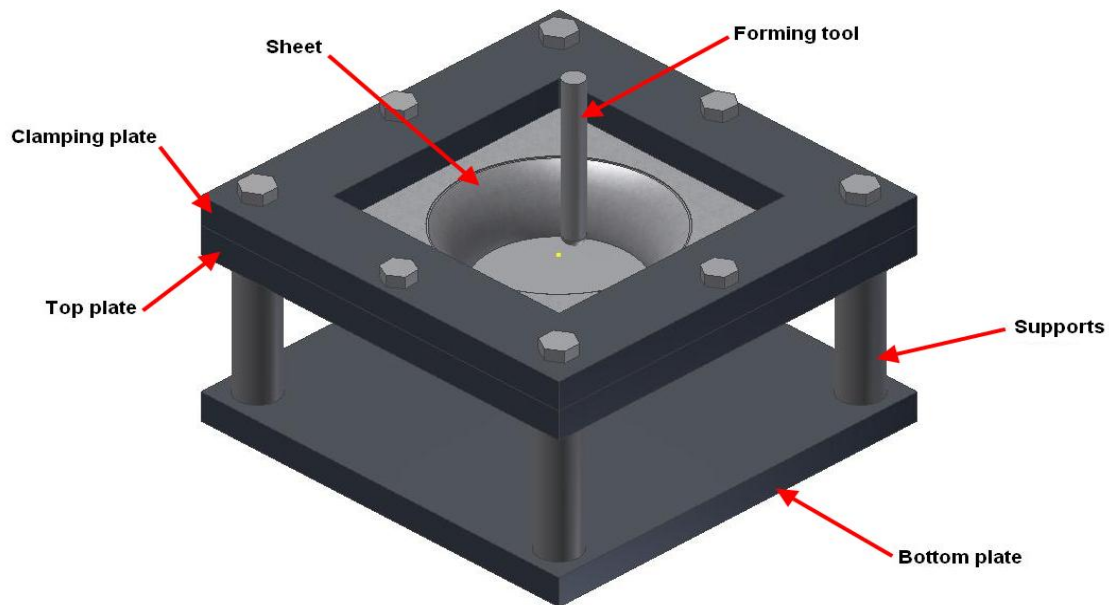


Figura 2.2. Disseny final de l'utilatge per a adaptar el centre de mecanitzat.

En els propers subapartats es presenten amb més detall les característiques constructives del disseny.

Segons el disseny que s'ha fet les dimensions de les xapes a utilitzar són de 150x150 mm, unes dimensions relativament reduïdes que proporcionen una sèrie d'avantatges:

- Temps reduïts de procés, tant a nivell físic com virtual (en les simulacions d'elements finits).
- Major aprofitament de les xapes i estalvi de material.
- Garanteix que les forces axials de conformat seran reduïdes, amb la qual cosa no hi ha risc de danyar la màquina.
- S'ha pogut reciclar part de components anteriorment construïts i que han quedat obsolets, fet que ha comportat un estalvi econòmic important.

Un cop aprovat el disseny s'ha procedit a la construcció de l'utilatge. Tot el procés de construcció s'ha dut a terme a les instal·lacions del GREP. El resultat es mostra a la Figura 2.3.

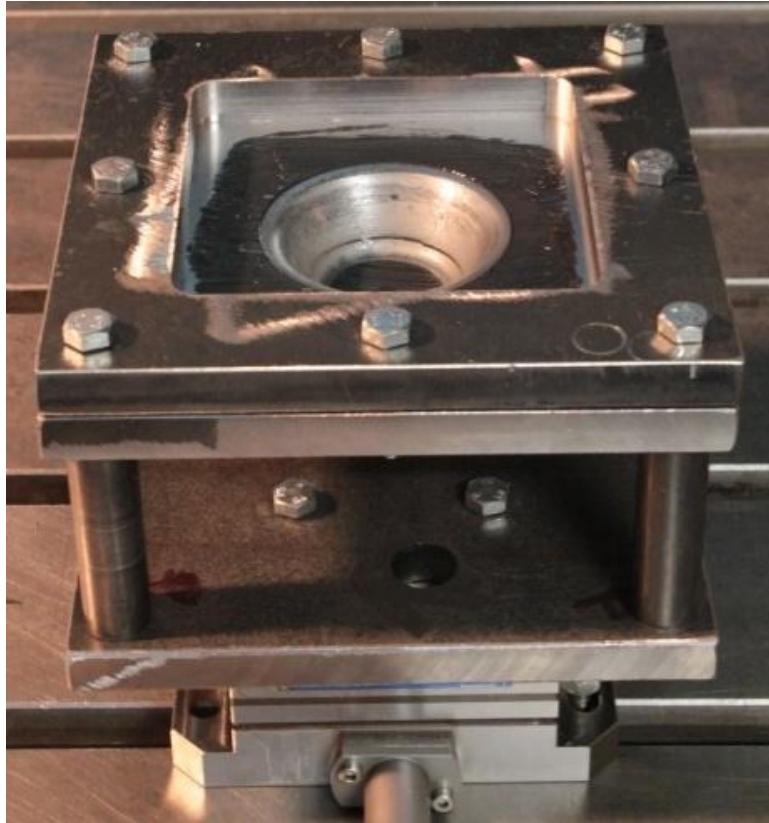


Figura 2.3. Imatge de l'utilatge per subjectar la xapa construït i fixat a la taula dinamomètrica per mesurar les forces.

2.2.1 Descripció de l'utilatge per a subjectar la xapa

L'utilatge es compon dels següents elements principals, tots ells fabricats amb acer F-1110.

2.2.1.1 Plataforma inferior (Bottom plate).

Les seves dimensions són de 190x190x15 mm. Té 4 forats roscats M8 situats a 15 mm dels extrems per a poder-los unir amb els suports. A més, a la part central també té 4 forats per tal de poder realitzar les unions amb la taula dinamomètrica Kistler (veure plànol n°2).

2.2.1.2 Quatre suports (Supports).

La longitud dels suports és de 70 mm amb un diàmetre exterior de 20 mm. Els dos extrems dels suports tenen un forat intern de diàmetre 8 mm per tal de poder-los unir amb els diferents elements (veure plànol n°5).

2.2.1.3 Plataforma superior (Top plate).

Les dimensions són 190x190x15 mm, amb una àrea interior lliure de 120x120 mm. A la part superior s'hi ha practicat un rebaix de 0.5 mm que s'utilitza per a la col·locació de les xapes. No hi ha placa de suport perquè l'àrea lliure és suficientment ajustada tenint en compte les geometries que s'han previst conformar. Té 4 forats passants de diàmetre 8 mm situats a 15 mm dels extrems per poder-los unir amb els

suports. A més, hi ha 4 forats roscats M8 a la part central situats a 10 mm de l'aresta exterior per fer la unió amb la plataforma de fixació (veure plànol n°3).

2.2.1.4 *Plataforma de fixació (Clamping plate).*

Les dimensions són 190x190x15 mm, amb una àrea interior lliure de 120x120 mm. Té 4 forats passants de diàmetre 8 mm situats a 15 mm dels extrems per poder-los unir amb els suports. A més, hi ha 4 forats passants de diàmetre 8 mm a la part central situats a 10 mm de l'aresta exterior per fer la fixació amb la plataforma de fixació (veure plànol n°4).

2.2.2 **Descripció de l'eina de conformat**

S'ha dissenyat una eina semiesfèrica, les dimensions més rellevants de la qual són diàmetre 10 mm i longitud 85 mm. S'hi ha practicat un rebaix per tal de poder-la fixar a un portaeines tipus *Weldon* (veure plànol n°6). La forma de l'eina es pot apreciar a la Figura 2.4.



Figura 2.4. Disseny de l'eina de conformat.

S'han fabricat 3 eines diferents amb els materials següents (veure Figura 2.5):

- Rodó calibrat de diàmetre 10 mm, acer tipus F-1, és un acer de base no aliat per a ús general. És apte per a conformar materials tous tipus aliatges d'alumini.
- Rodó calibrat de diàmetre 10 mm, acer tipus F-1 amb un tractament de cementació a 1 mm de profunditat i duresa superficial entre 680 i 750 HV. Apte per a conformar aliatges d'alumini i acers inoxidable.
- Vanadis 23. És un acer pulvimetal·lúrgic d'alt rendiment per a treball en fred. Apte per a conformar aliatges d'alumini i acers inoxidable.



Figura 2.5. D'esquerra a dreta: eina acer F-1 sense tractar, eina d'acer F-1 tractada i eina de Vanadis 23.

2.2.3 Muntatge

Per tal de muntar els diferents elements de l'utilatge s'han utilitzat unions cargolades.

La fixació de la taula dinamomètrica amb la taula de treball s'ha realitzat a partir d'uns elements tipus T, que s'han col·locat entre les ranures de la taula de treball, i mitjançant uns cargols s'han unit a la taula dinamomètrica.

En el cas de la unió *plataforma inferior-taula dinamomètrica* s'han fet servir cargols M8 de longitud 40 mm.

Per a la unió *plataforma inferior-suport* s'ha emprat cargols Allen amb cap cilíndric DIN 912 de longitud 40 mm, diàmetre del cap 13 mm i altura del cap 8 mm.

Per a la unió *suport-plataforma superior-plataforma de fixació* s'han utilitzat cargols mètrics M8 amb una longitud de 55 mm.

La unió *plataforma superior-plataforma de fixació* també s'ha realitzat amb cargols M8 però amb una longitud de 40 mm.

Finalment, l'eina s'ha muntat al capçal mitjançant amb un portaeines tipus *Weldon* de diàmetre 10 mm.

A la Figura 2.6 es mostra una vista general de la màquina amb l'utilatge muntat sobre la taula dinamomètrica Kistler.

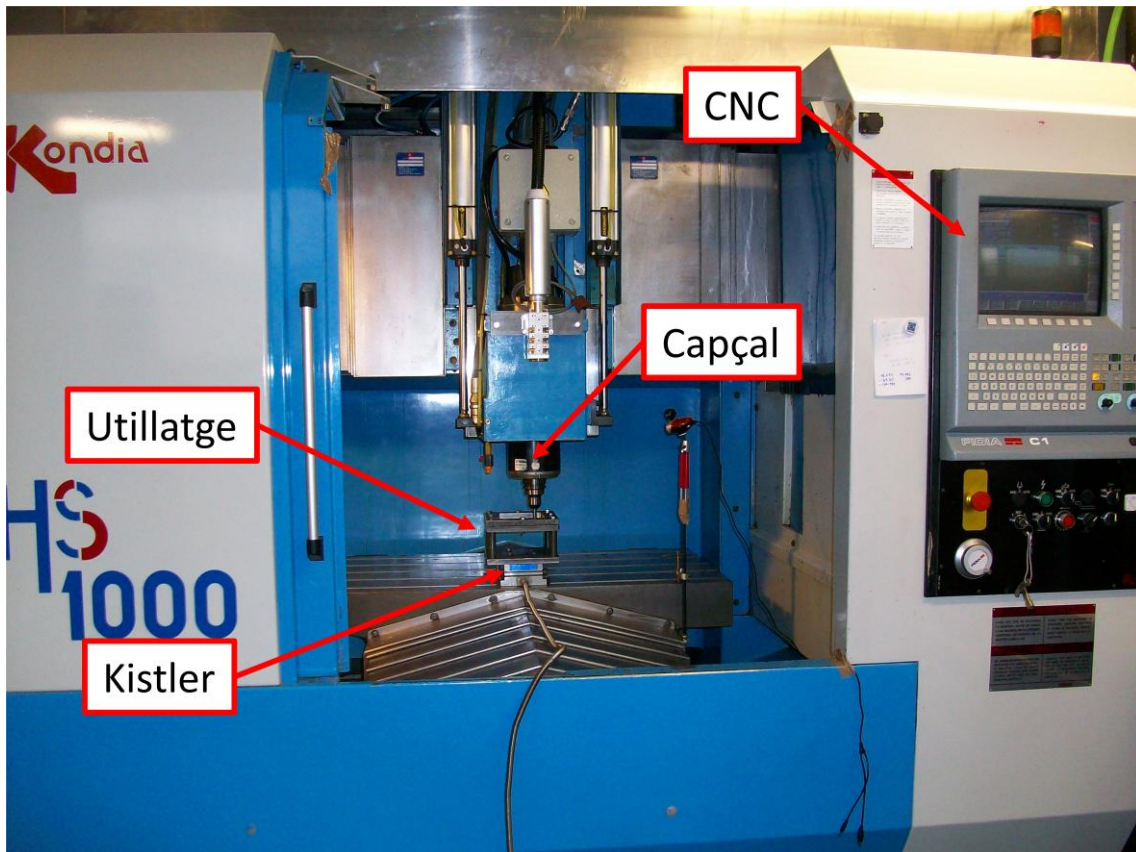


Figura 2.6. Vista general de la màquina Kondia HS1000 amb l'utiltatge muntat.

3 Generació de la trajectòria de l'eina

3.1 Conceptes previs

Per tal de definir la trajectòria de l'eina es poden distingir dos tipus de moviments i per a cada tipus de moviment hi ha diferents estratègies. A continuació es detallen algunes de les més rellevants.

- **Moviment vertical o pas incremental.** Aquest és el paràmetre que determina la profunditat de baixada de l'eina en les diferents capes. Es pot fer bàsicament seguint tres estratègies:
 - o *Profunditat de baixada (Δz) constant:* l'eina es mou axialment amb un valor constant (Figura 3.1a). L'acabat superficial no sol ser massa bo en parets amb una inclinació molt baixa, ja que la separació és molt elevada. En anglès es denomina *constant depth step*.
 - o *Altura de cresta (Δh) constant:* en aquest cas el valor entre les diferents capes depèn de la inclinació de la paret (Figura 3.1b), obtenint millors acabats en superfícies pràcticament planes en comparació al cas anterior degut a que la separació entre successives passades és inferior. En anglès s'anomena *constant scallop height*.
 - o *Increment angular ($\Delta\theta$) constant:* l'increment angular entre dues passades successives s'ha de mantenir constant (Figura 3.1c). El principal inconvenient és que per inclinacions molt elevades de la paret l'acabat superficial que s'obté no és molt bo.

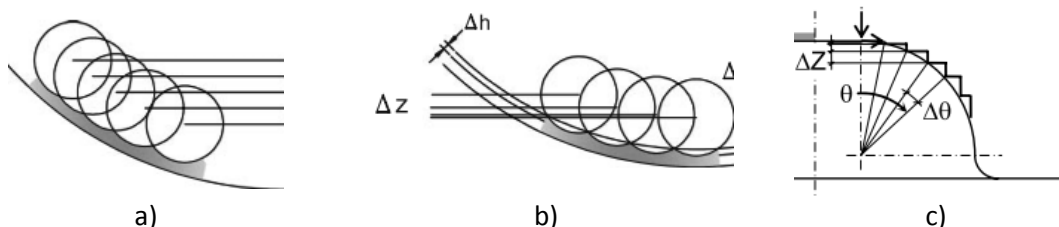


Figura 3.1. a) Profunditat de baixada constant. b) Altura de cresta constant. c) Increment angular constant.

- **Moviment en XY.**
 - o *Un sentit:* moure l'eina en el mateix pla sempre en un sentit, ja sigui horari o antihorari. Té el problema que la peça queda torsionada. Es segueix el contorn de la peça de manera discreta.
 - o *Alternant dos sentits:* en aquest cas es van succeint els sentits horari o antihorari en els diferents plans de treball, de manera que no hi ha problemes de torsió ja que el gir de la peça queda compensat. Es segueix el contorn de la peça de manera discreta.
 - o *Espiral:* bàsicament s'utilitza quan es vol millorar l'acabat superficial ja que es segueix el contorn de la peça de manera contínua, no com en els dos casos anteriors, en què es produeix una marca en el punt on baixa l'eina (Figura 3.2). També té el problema de la torsió de la peça ja que el sentit d'avanç de l'eina és sempre el mateix.

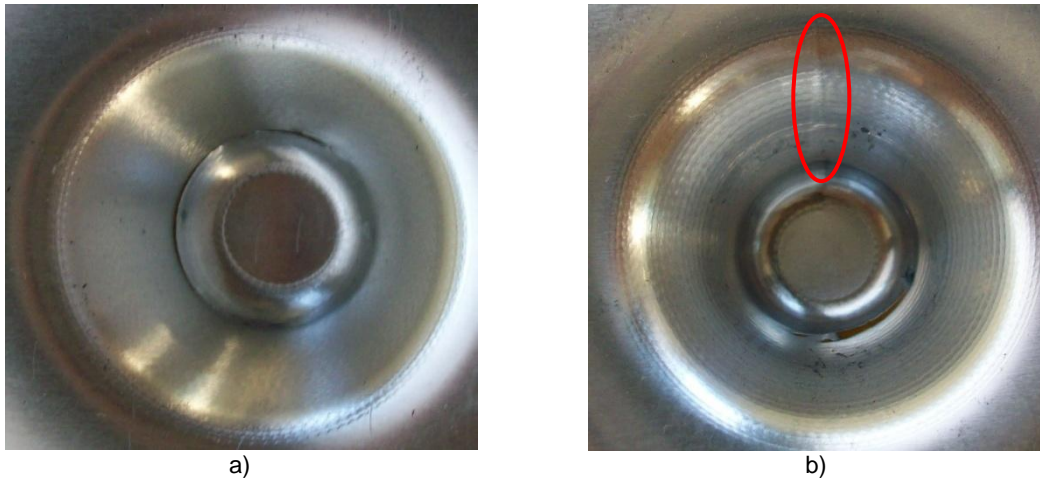


Figura 3.2. a) Trajectòria amb espiral, no hi ha marca degut a la baixada de l'eina. b) Trajectòria amb un únic sentit, hi ha marca en el punt on baixa l'eina.

Fent una revisió bibliogràfica s'ha pogut identificar que hi ha una sèrie de treballs d'investigació que revelen la influència que les trajectòries de l'eina tenen en les forces de conformat, precisió i rugositat superficial. S'ha analitzat la influència del pas incremental (considerant profunditat de baixada constant i l'altura de cresta constant) en TPIF (Attanasio et al., 2006). En aquest treball es va demostrar que per valors molt petits d'altura de cresta constant, la precisió aconseguida era molt millor, malgrat el temps de procés s'incrementés de manera considerable.

En un altre treball relacionat amb SPIF, es va programar el moviment de l'eina per tal d'aconseguir una deformació major durant el procés, de manera que quan la xapa es treu del suport i apareix l'efecte de la recuperació elàstica, la deformació excessiva es veu compensada i la peça formada té una precisió acceptable (Ambrogio et al., 2004).

Més recentment, l'efecte de diferents trajectòries de l'eina sobre les forces de conformat, el temps de procés i la rugositat superficial es va analitzar de manera experimental (Rauch et al., 2009). En aquest treball es va implementar i validar un CAM intel·ligent que permetia adaptar la trajectòria de l'eina en temps real amb un control *on-line* del procés.

3.2 Adaptació del CAM per a processos de mecanitzat

És bastant habitual recórrer als software CAM essencialment pensats per a ser utilitzats en processos d'arrencada de ferritja per a generar les trajectòries dels processos de conformat incremental de xapa. Aquest fet es deu bàsicament a que moltes vegades les màquines utilitzades són centres de mecanitzat de control numèric i, per tant, la programació del moviment s'ha de fer de manera molt similar i utilitzant el mateix tipus de comandes.

Malgrat tot, s'han d'analitzar les diferents estratègies que el programa porta predefinides i avaluar si poden ser vàlides pel procés de ISF. A més, s'hauria d'avaluar si és possible modificar alguns dels paràmetres de procés descrits a l'apartat 3.1.

El CAM de què es disposa és el GOelan v5. La pantalla principal del programa es mostra a la Figura 3.3. Els mòduls necessaris són els de *Interfaces* i *Fresado*.



Figura 3.3. Pantalla principal del GOelan v5.

Per tal de generar la trajectòria de l'eina, cal importar la geometria desitjada en format STEP. La importació de la geometria es fa a través de l'opció *Interfaces*. Una gran avantatge de la importació d'arxius realitzats amb un software CAD és que es pot generar la trajectòria de dissenys molt complexes. El resultat de la importació es mostra a la Figura 3.4.

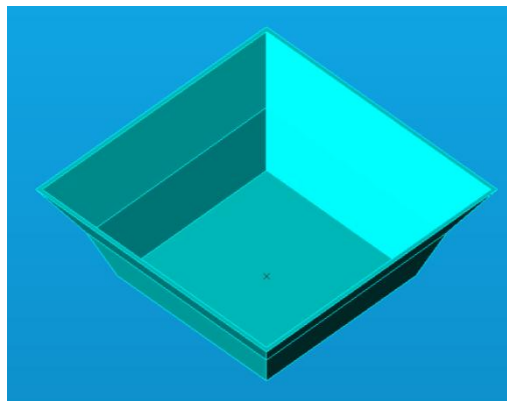


Figura 3.4. Importació de la geometria al GOelan.

Un cop la geometria ha estat importada correctament es pot passar al mòdul de *Fresado* per tal de programar la trajectòria.

Primerament cal definir el tipus d'eina a utilitzar. El programa inclou diferents tipologies de fresa, essent la que més s'aproxima a la emprada en ISF la tipus semiesfèrica (Figura 3.5). És possible modificar els principals paràmetres de l'eina (diàmetre, conicitat, longitud...) així com també afegir diferents tipus de portaeines que poden ajudar a tenir una simulació més propera a la situació real.

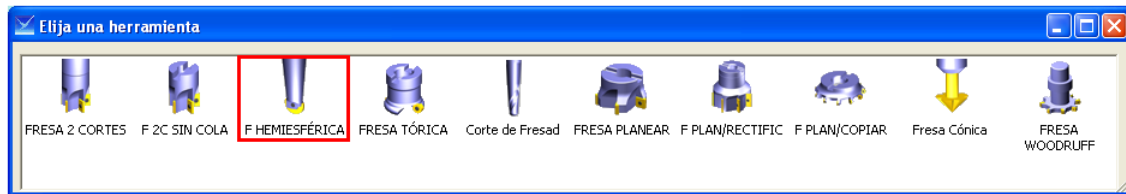


Figura 3.5. Selecció del tipus d'eina.

L'últim pas a realitzar abans de calcular el cicle és definir el tipus d'estratègia a seguir. El CAM inclou diferents tipus de cicles de mecanitzat, tal i com es mostra a la Figura 3.6.

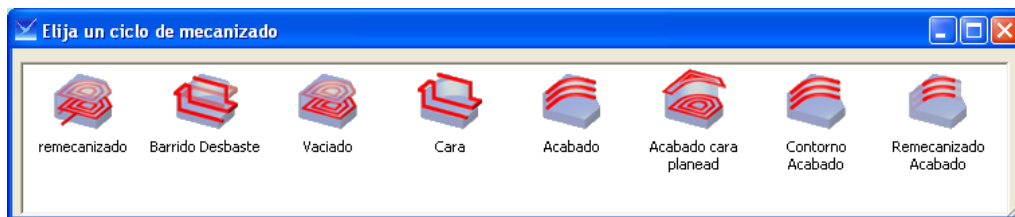


Figura 3.6. Tipus de cicles de mecanitzat del GOelan.

Després de fer diferents proves el cicle seleccionat pel procés de ISF és l'anomenat *Acabado*, en el qual l'eina segueix el contorn interior de la geometria en diverses passes a diferents nivells segons el pas incremental desitjat.

A la Figura 3.7 es mostra una de les pestanyes de configuració del cicle seleccionat. S'han remarcat els paràmetres que permeten variar el sentit de gir i el pas incremental. No es permet realitzar moviments XY alternant sentits de gir o en espiral. Pel que fa al pas incremental en principi l'única estratègia que no es pot seguir és la de mantenir l'increment angular constant.

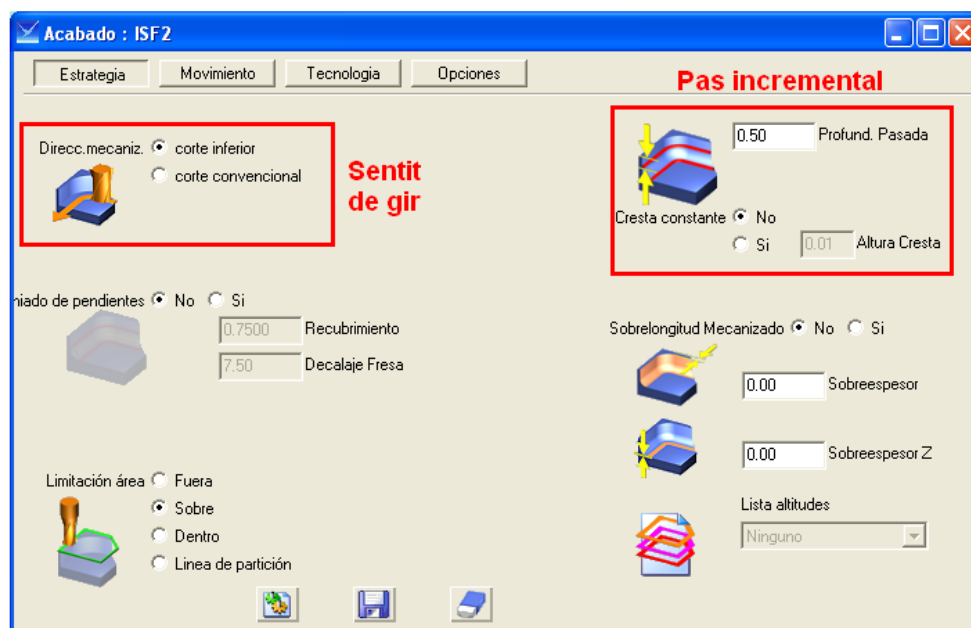


Figura 3.7. Definició del sentit de gir i pas incremental en el cicle tipus Acabado.

També és possible modificar alguns dels paràmetres de procés més importants en el conformat incremental de xapa (Figura 3.8). Aquests són la velocitat de rotació de l'eina i la velocitat d'avanç.

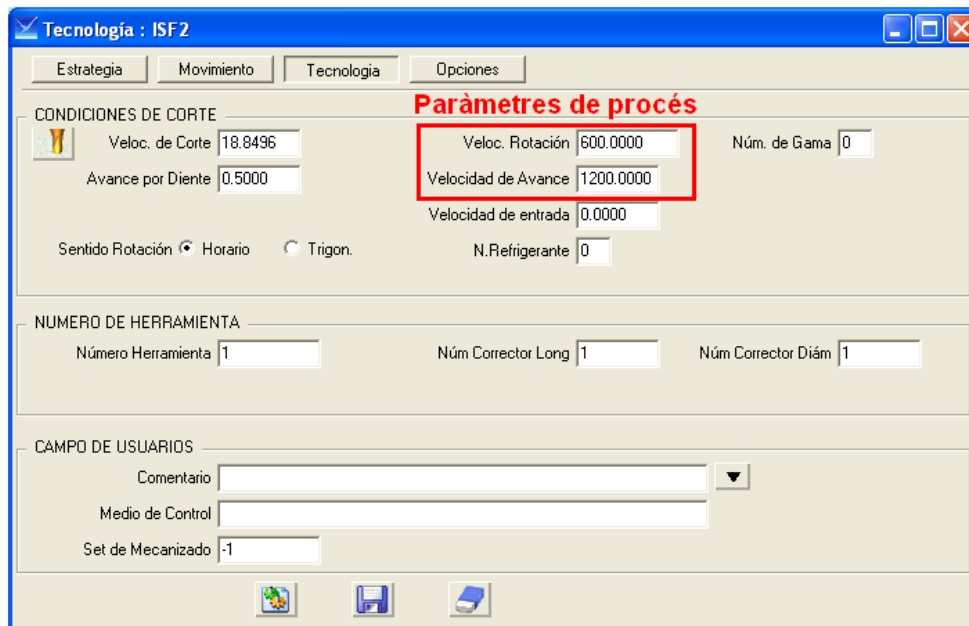


Figura 3.8. Definició dels paràmetres de procés en el cicle Acabado.

Un cop seleccionats els principals paràmetres és possible calcular la trajectòria. El programa permet fer una simulació del procés. Un dels inconvenients de la simulació és que el software està pensat per processos de mecanització, amb la qual cosa entén que es parteix d'un bloc massís de material al qual se li va arrencant la ferritja i aleshores detecta col·lisions entre l'eina i el material quan en realitat aquesta interacció no existeix. A la Figura 3.9 es poden observar les línies corresponents a la trajectòria de l'eina.

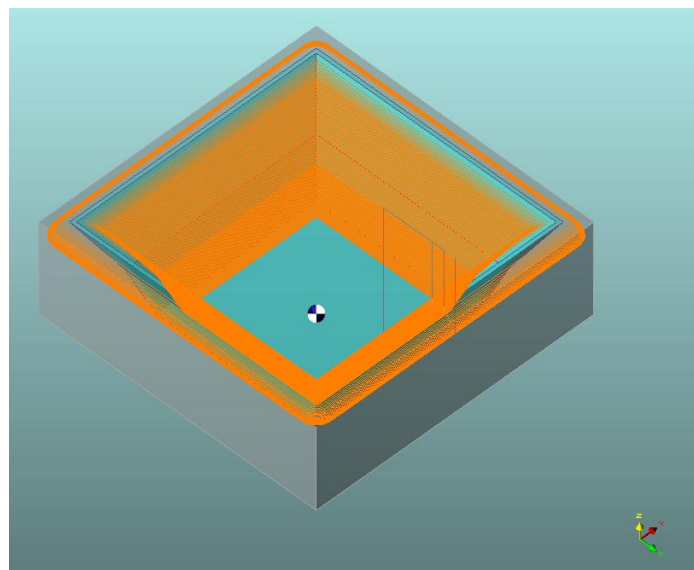


Figura 3.9. Trajectòria de l'eina.

Per tal de generar el codi G de la trajectòria i poder-lo enviar a la màquina, s'ha de seleccionar el tipus de control numèric. En aquest cas s'ha de seleccionar el Fidia perquè és el que controla la màquina Kondia HS1000.

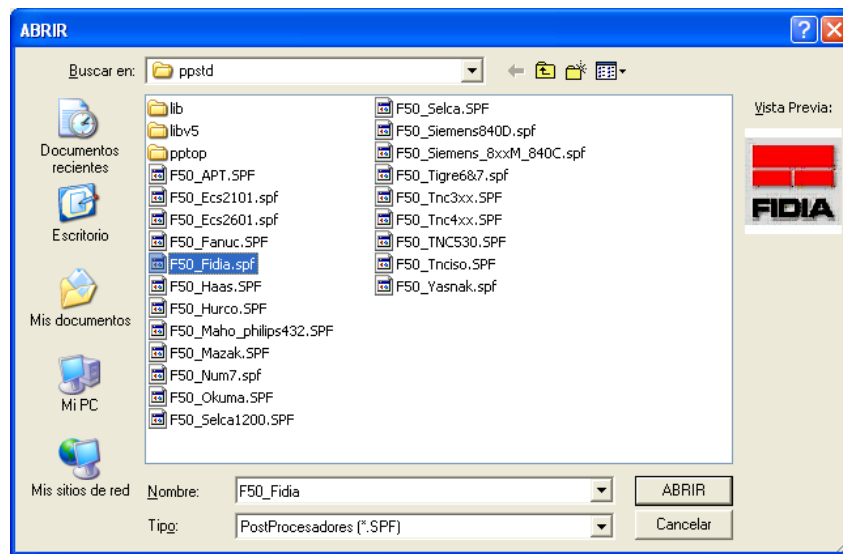


Figura 3.10. Selecció del tipus de control numèric.

A la Figura 3.11 es pot veure un fragment de l'arxiu que genera el software amb el codi G i que pot ser enviat a la màquina.

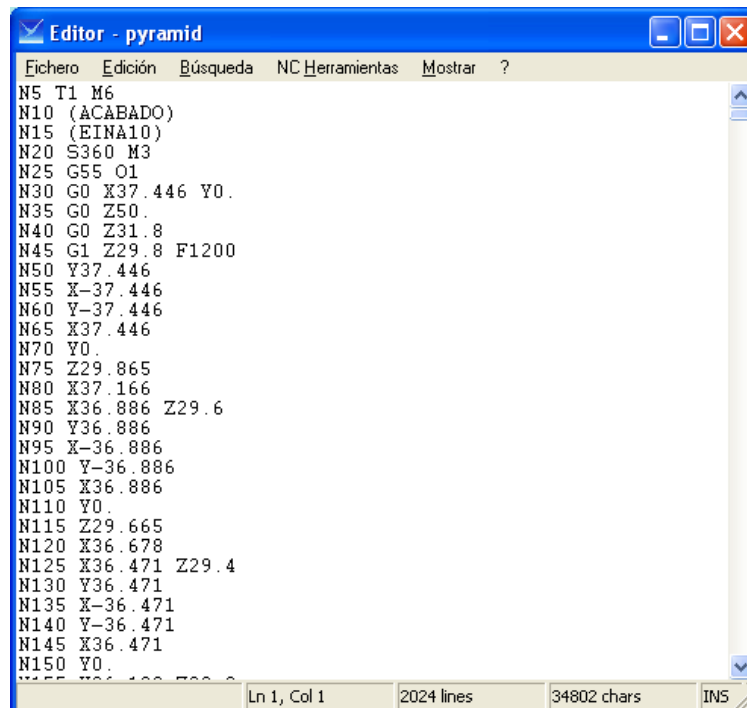


Figura 3.11. Part de l'arxiu generat amb el codi G.

3.3 Programació d'una rutina pròpia per a la generació de les trajectòries

Una alternativa a utilitzar un software CAM comercial podria ser programar una rutina pròpia per a generar les trajectòries. Això és només aconsellable quan es tracta de geometries molt simples, definides per molt pocs paràmetres. Aquestes geometries s'utilitzen en recerca bàsica, en què tot sovint s'experimenta amb geometries d'angle de paret constant o *Uniform Wall Angle* (UWA) o geometries amb una variació de l'angle de paret definida per un radi de generatriu *Variable Wall Angle* (VWA).



Figura 3.12. a) Piràmide truncada amb angle de paret constant. b) Con truncat amb angle de paret variable definit per un radi de generatriu.

Quan l'objectiu de la recerca bàsica és determinar la influència que tenen els paràmetres geomètrics (angle, diàmetre...), degut a la combinació d'aquests, s'obté una gran quantitat de geometries diferents. Si es volgués utilitzar el GOelan s'haurien de tenir els arxius CAD de totes aquestes geometries. Per tal de reduir el temps en les etapes d'obtenció del CAD, importació al software CAM i generació de la trajectòria, s'ha programat una rutina amb Python que permet obtenir la trajectòria de l'eina considerant una profunditat de baixada constant a partir de la introducció de les següents variables:

- Paràmetres geomètrics
 - o Angle (°)
 - o Radi de generatriu (mm). Si el valor és igual a 0, la geometria tindrà un angle de paret constant
 - o Diàmetre exterior (mm)
 - o Si és un con (definit per 0 en el programa) o una piràmide (definit per 1 en el programa)
- Paràmetres de procés
 - o Profunditat de baixada (mm)
 - o Radi de l'eina (mm)
 - o Velocitat d'avanç (mm/min)
 - o Velocitat de rotació (rpm)
 - o Sentit de rotació únic (-1) o alternat (1)

A la Figura 3.13 hi ha un fragment del programa realitzat on es poden veure les variables necessàries a definir per tal de generar les trajectòries. El programa complet es pot consultar a l'Annex C.

```
import math
filenam1 = 'pathxyz.dat'
filenam2 = 'pathxyz.tap'
filenam3 = 'angles.txt'
filenam4 = 'xsection2.txt'

f=open(filenam1,'w')
f2=open(filenam2,'w')
f3=open(filenam3,'w')
f4=open(filenam4,'w')
#print(filename,file=f2)
```

#enter geometrical parameters

Paràmetres geomètrics

```
Angulo=50.0
Radio_gen=0.0 #0 for UWA and >0 for VWA
Diam_mayor=110.0
pira=1 #pyramidal =1, conical =0
```

#enter process parameters

Paràmetres de procés

```
delz=0.5 #delta z
trad=5.0 #radius of hemispherical tool
wfed=2000 #working feed (mm/min)
spis=1000 #spindle speed (rev/min)
srot=1 #sentido de rotacion, -1= constante, 1 = alternado
```

```
thetd1=Angulo #initial forming angle
thetr1=thetd1*math.pi/180
thetd2=80.0 #final forming angle
thetr2=thetd2*math.pi/180
rad1=Diam_mayor/2 #long radius
```

Figura 3.13. Fragment del programa realitzat amb Phyton per a la generació de trajectòries de geometries bàsiques (UWA i VWA).

L'avantatge d'aquest programa respecte a l'ús del GOelan és que no cal dibuixar cada una de les diferents geometries i a més permet alternar el sentit de rotació. L'inconvenient principal és que no es pot utilitzar per a geometries amb un grau de complexitat més elevat.

Aquest programa s'executa a partir de comandes amb DOS indicant el nom que ha de tenir l'arxiu a generar que contindrà el codi G. Aleshores s'obté un arxiu similar al de la Figura 3.14.

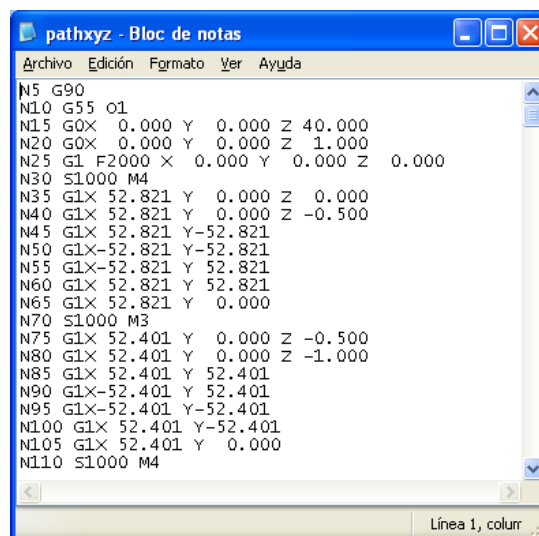


Figura 3.14. Fragment del fitxer en codi G generat per la rutina programada amb Phyton.

4 Validació

Un cop s'ha dissenyat i construït l'utilatge per a subjectar la xapa, s'ha fabricat el punxó semiesfèric i es disposa d'un programa per a generar les trajectòries de l'eina, el que es tracta és de validar que el sistema funcioni correctament a partir de la realització d'uns assajos experimentals.

Es faran unes proves preliminars que s'utilitzaran bàsicament per a decidir alguns aspectes de les estratègies de conformat (relacionats principalment amb la trajectòria de l'eina), tipus de lubricació i per a comprovar si realment l'utilatge dissenyat permet mantenir la xapa fermament subjectada.

Aleshores es realitzaran una sèrie d'assajos que s'aprofitaran per contribuir al coneixement del procés i per identificar possibles efectes que els paràmetres d'entrada poden tenir sobre els resultats finals. Per tant, és necessària una correcta planificació de les proves experimentals mitjançant un Disseny d'Experiments (DOE) i també és important identificar algunes de les línies d'investigació que actualment hi ha actives per saber quins paràmetres d'entrada es poden variar i què és interessant mesurar en els productes finals.

4.1 Proves preliminars

En aquest apartat es descriuen les proves preliminars realitzades un cop ja s'ha muntat tot el sistema i que han servit per acabar de posar a punt la implementació de la tecnologia ISF en el centre de mecanitzat de CNC (Control Numèric Computaritzat).

4.1.1 Velocitat de rotació

En alguns estudis s'ha demostrat que la velocitat de rotació (*spindle speed*) té una certa influència en l'acabat superficial del producte obtingut (Jeswiet et al., 2005). Si l'eina està parada, la rugositat superficial té un valor molt elevat. Per tal de reduir aquest valor la millor opció és fer que l'eina giri lliurement, de manera que la fricció entre l'eina i la xapa es redueix dràsticament.

S'han fet unes proves per tal de comprovar si és possible que l'eina giri lliurement en el centre de mecanitzat Kondia HS1000. Els resultats han estat que perquè la màquina pugui treballar, és a dir, que es pugui moure, l'eina necessàriament ha d'estar girant a una determinada velocitat.

Després de diferents proves en buit a varies velocitats, s'ha vist que la mínima velocitat a la que es recomana que giri l'eina és de 1000 rpm, ja que a una velocitat inferior no s'observa un bon funcionament (vibracions, soroll...). Aquest fet és degut a les característiques de la màquina, que està dissenyada per a *High Speed Machining*, per tant, no acostuma a treballar a tant baixes revolucions.

Aleshores, fent una revisió de l'estat de l'art per saber quin és el rang més habitual de velocitats de rotació s'ha pogut determinar que aquest rang oscil·la entre 0 i 4000 rpm, essent un dels valors més habituals 1000 rpm.

Per tant, s'ha fixat el valor de 1000 rpm de velocitat de rotació com el valor de treball en els assajos experimentals que es realitzaran segons el DOE.

4.1.2 Velocitat d'avanç

Pel que fa a la velocitat d'avanç (*feed rate*) interessa que sigui el més elevada possible per tal de disminuir el temps d'operació i d'aquesta manera fer que el procés pugui ser més competitiu.

Amb la revisió bibliogràfica s'ha comprovat que un dels rangs més habituals de velocitat d'avanç és entre 400 i 3000 mm/min.

S'han fet proves experimentals amb xapes d'un aliatge d'alumini (AA1050-H24) per a formar una piràmide amb angle de paret de 40°, velocitat de rotació de 1000 rpm i dues velocitats d'avanç: 1000 i 2000 mm/min.

Amb la velocitat d'avanç més alta el temps d'operació es redueix notablement però el principal inconvenient és que és més difícil detectar quan la xapa es trenca, podent passar desapercebut en alguns casos.

Així que finalment s'ha optat per treballar a una velocitat de 1000 mm/min, assumint l'increment de temps que comporta però guanyant en la facilitat de detecció del moment de fallada de la xapa.

4.1.3 Influència del lubricant

La lubricació és un factor important a tenir en compte per a realitzar experiments amb ISF, ja que ajuda a reduir la fricció i la calor que es genera. Si no s'utilitza lubricant el resultat que s'obté és pèssim, tal i com es pot apreciar a la Figura 4.1.



Figura 4.1. Exemple del resultat de deformar xapa d'alumini sense lubricant.

Per tant, queda demostrat que és necessari utilitzar algun mecanisme de lubricació. El centre de mecanitzat disposa d'un sistema de lubricació d'oli en continu sobre la zona de treball.

Cal tenir en compte que aquesta màquina serà híbrida, és a dir, no només s'utilitzarà per a processos de mecanització o de conformat incremental sinó que també s'hi ha adaptat un làser per tal de poder experimentar amb la tecnologia de *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS). Aleshores, el fet d'utilitzar el làser implica que l'interior de la màquina ha d'estar completament net, tant d'olis lubricants com de restes de material. Així que s'ha descartat l'opció d'aprofitar el sistema de lubricació de la màquina per tal d'evitar problemes en el moment que sigui necessari realitzar proves de sinterització làser.

Un cop decidit que el sistema de lubricació serà manual i que s'aportarà el lubricant només abans d'iniciar el procés, cal decidir el tipus de lubricant a utilitzar.

S'ha realitzat una primera prova amb l'aliatge d'alumini 1050-H24 i una grassa de base bituminosa comercial. L'acabat superficial resultant, tal i com es pot apreciar a la Figura 4.2, és acceptable. A més, no hi ha hagut un augment notable de la temperatura en la regió propera a la zona de contacte entre l'eina i la xapa. Amb la qual cosa, s'arriba a la conclusió que la utilització de la grassa bituminosa quan es deformin xapes d'alumini és correcta.



Figura 4.2. Exemple del resultat acceptable al deformar xapa d'alumini utilitzant grassa bituminosa.

Posteriorment s'ha provat la mateixa grassa en un acer inoxidable AISI304. En aquest cas degut a la major fricció entre l'eina i la xapa, l'augment de temperatura a la zona de contacte ha estat molt important, assolint valors pròxims als 90°C. Degut a aquest augment de temperatura la grassa bituminosa s'ha degradat i només ha pogut proporcionar bones condicions de lubricació en les primeres passades. Cap al final del procés la grassa ha perdut les seves propietats, provocant un desgast excessiu de l'eina i un acabat superficial de la xapa molt pobre (veure Figura 4.3). Per tant, cal descartar la grassa com a possible lubricant en el cas de treballar amb acer inoxidable.

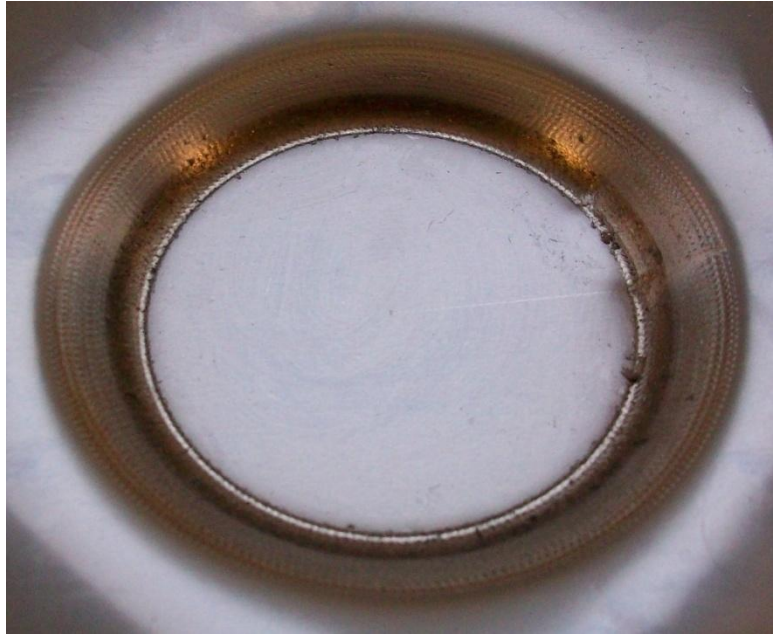


Figura 4.3. Exemple d'una mala elecció del lubricant (grassa bituminosa) en el cas de deformar acer inoxidable.

S'ha fet una segona prova amb l'acer inoxidable, en aquest cas s'ha utilitzat un lubricant líquid tipus Houghton TD-52, especialment recomanat per a processos de conformació de xapa. En aquest cas, el lubricant no s'ha degradat i l'acabat superficial obtingut ha estat correcte (Figura 4.4).



Figura 4.4. Exemple d'un acabat acceptable utilitzant oli lubricant amb l'acer inoxidable.

En resum, per a les xapes d'alumini AA1050-H24 s'utilitzarà grassa bituminosa (més econòmica que no el lubricant líquid) i per l'acer inoxidable AISI304 el lubricant líquid recomanat per processos de conformació de xapa.

4.1.4 Influència de la trajectòria de l'eina

A l'apartat 3 s'han detallat dues metodologies diferents per a generar la trajectòria. La primera consisteix en utilitzar un software CAM comercial (GOelan) pensat per a processos de mecanització i adaptar-lo al procés de ISF i la segona en programar una rutina que permeti generar la trajectòria de geometries bàsiques.

S'han realitzat algunes proves amb els diferents programes i tipus d'estratègies que permeten. Un tipus de pas incremental que pot ésser interessant d'estudiar i que només es pot obtenir amb el GOelan és l'altura de cresta constant. Per tant, unes proves preliminars han consistit en generar, per a la mateixa geometria (piràmide biangular), una trajectòria tenint en compte una profunditat de baixada constant i una altra utilitzant l'altura de cresta constant. El moviment que realitza l'eina es pot veure a la Figura 4.5 (Bagudanch et al., 2011a).

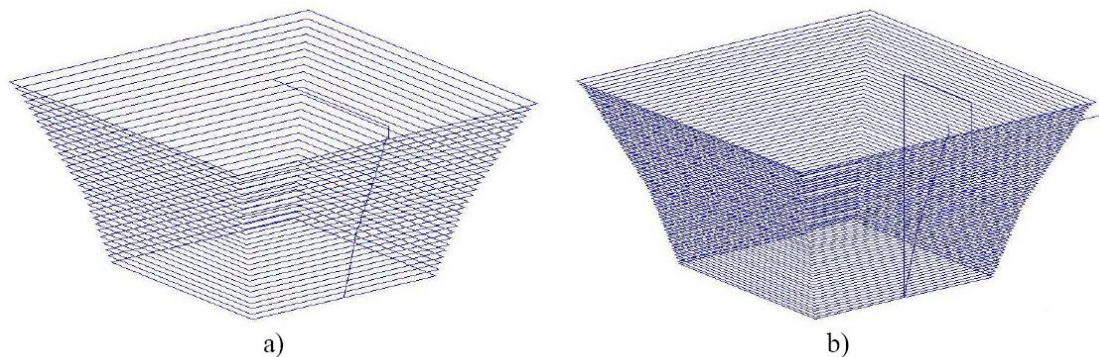


Figura 4.5. a) Trajectòria de l'eina amb profunditat de baixada constant. b) Trajectòria de l'eina amb altura de cresta constant.

La única diferència apreciable entre les diferents trajectòries generades, és que en el cas de la Figura 4.5b la profunditat de baixada és més petita que en el cas de la Figura 4.5a però constant en tota la geometria, malgrat en el segon tram, que té més inclinació, hauria de ser més petit. Això significa que el CAM comercial té algun error intern que no permet generar correctament la trajectòria amb altura de cresta constant, ja que el resultat hauria de ser similar al que es mostra a la Figura 4.6, on sí que s'observa una diferència de profunditat de baixada en els dos trams.

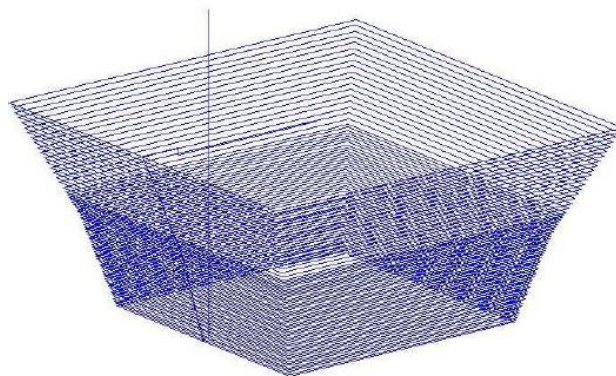


Figura 4.6. Exemple del tipus de trajectòria que s'hauria de generar considerant altura de cresta constant.

També s'han fet unes proves preliminars per tal de veure l'efecte de generar la trajectòria amb un únic sentit de gir en el pla XY o bé alternant en cada passada el sentit.

Si es programa en un únic sentit de gir, la peça final formada està clarament torsionada (Figura 4.7), mentre que si s'alternen els sentits en les diferents passades aquest efecte no apareix tal i com es mostra a la Figura 4.8.

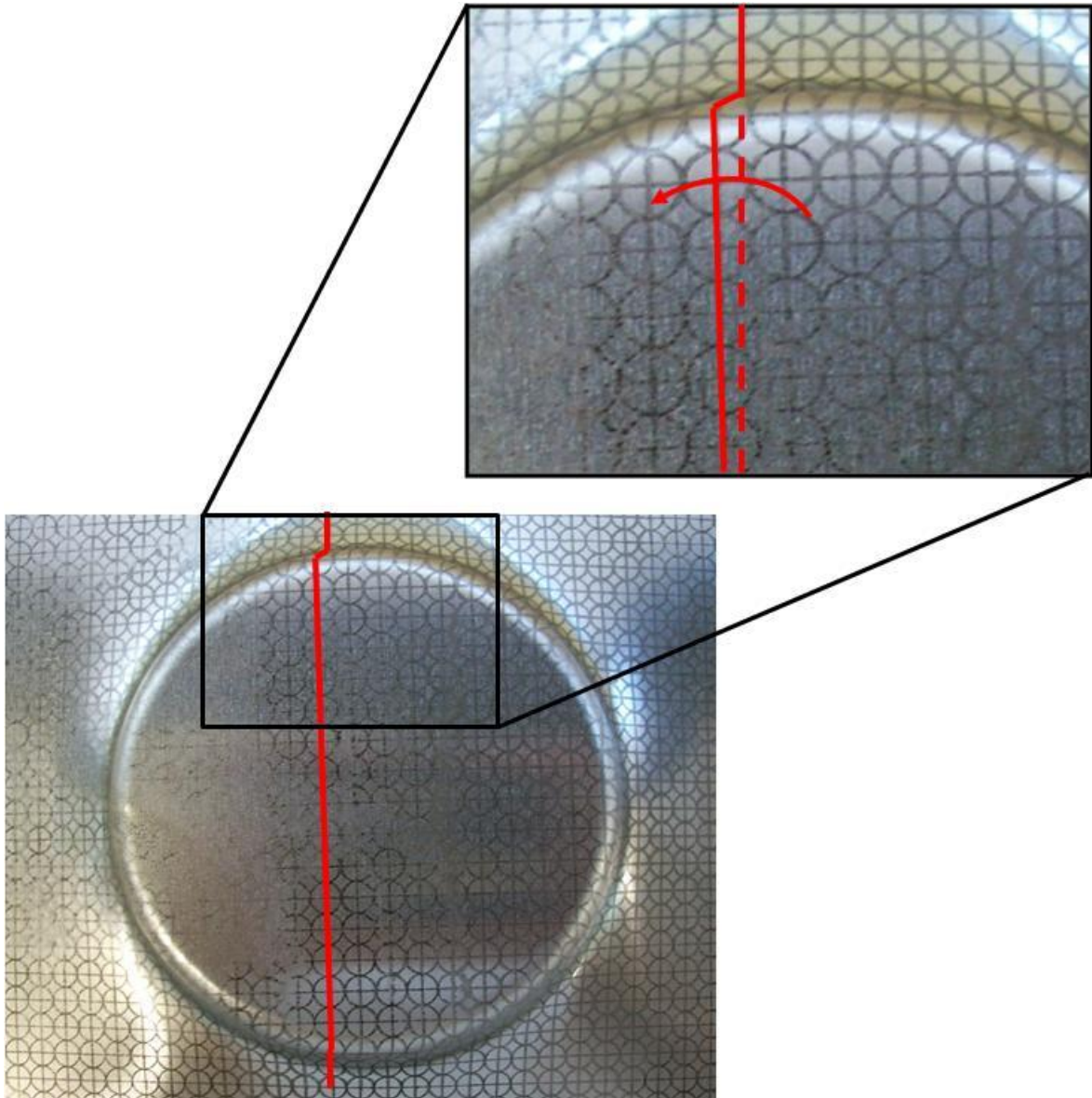


Figura 4.7. Torsió de la peça degut a moure l'eina en un únic sentit.

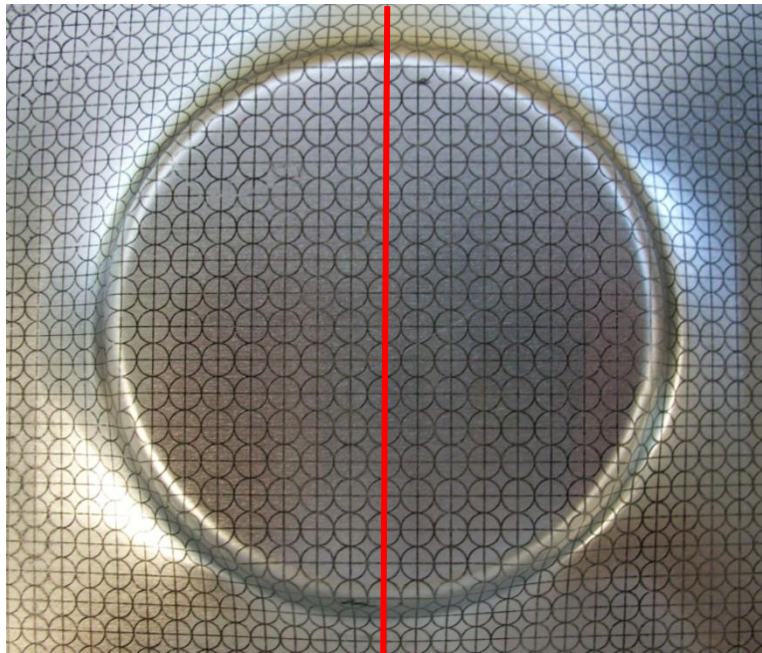


Figura 4.8. Trajectòria alternada, no apareix torsió.

Resumint, com a conseqüència dels resultats obtinguts en les proves preliminars, es descarta programar la trajectòria utilitzant una altura de cresta constant i per tant només es tindrà en compte la profunditat de baixada (Δz) constant. Pel que fa al tipus de moviment en el pla XY, el més recomanable és alternar el sentit de gir en cada passada per evitar torsions en la peça formada. Per tant, com que s'utilitzaran geometries relativament bàsiques, totes les trajectòries es generaran utilitzant la rutina programada amb Phyton.

4.2 Geometria

Un cop fetes les proves preliminars amb geometries molt simples (amb angle de paret constant) s'ha de decidir quin tipus de geometria s'utilitzarà en el DOE. Per tal de facilitar l'elecció s'han consultat treballs previs publicats en revistes indexades per tal de veure quines són les tendències actuals.

Els primers treballs d'investigació es centraven principalment en geometries molt simples, com per exemple piràmides truncades (Ambrogio et al., 2004) o cons truncats (Fratini et al., 2004), que bàsicament s'utilitzaven per tal de determinar la influència dels paràmetres de procés (diàmetre de l'eina, pas incremental, propietats del material etc.) en la precisió dimensional o la formabilitat. Més endavant es van utilitzar novament els cons truncats per tal de desenvolupar un model que permetés predir la força en l'estat estable del procés (Aerens et al., 2010). Amb la qual cosa es pot concloure que aquest tipus de geometries, conegudes com a *Uniform Wall Angle* (UWA) (Pérez-Santiago et al., 2011b), han estat extensament estudiades.

Recentment, s'ha pogut identificar una transició cap a geometries més complexes que les enumerades anteriorment. Es podrien classificar com de complexitat intermèdia, ja que encara estan lluny de satisfer les necessitats industrials

però sí que tenen gran interès a nivell acadèmic. A la Figura 4.9 es mostra un recull d'algunes d'aquestes geometries (con biangular, con amb radi de generatriu, piràmide no simètrica amb diferents angles de paret i as d'espases) que s'han utilitzat bàsicament per investigar aspectes relacionats amb la formabilitat, precisió i deformacions.

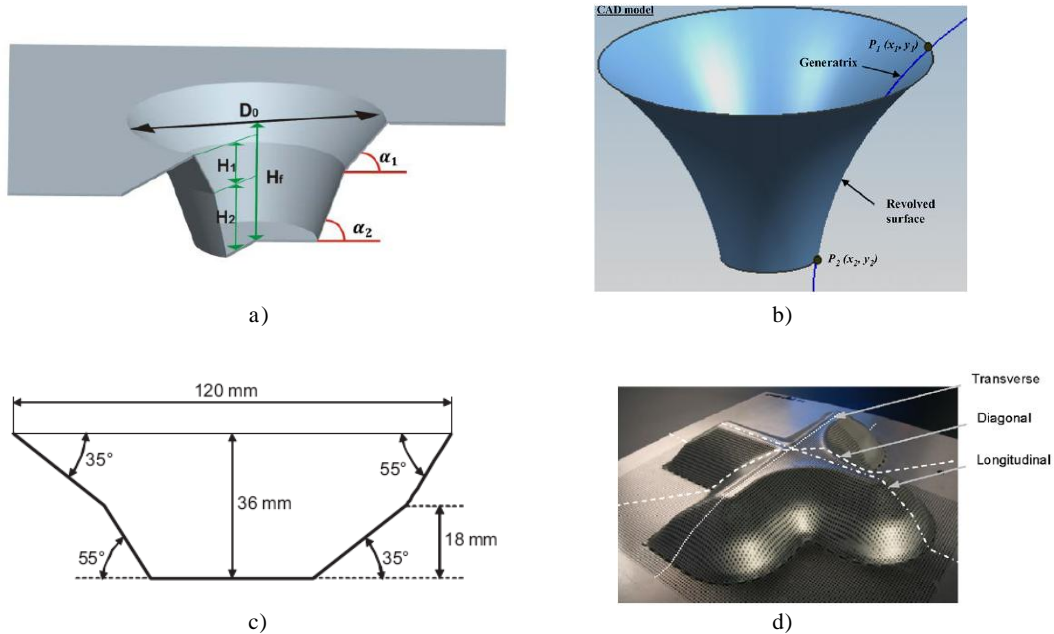


Figura 4.9. a) Con truncat biangular (Ambrogio et al., 2008b). b) Con amb generatriu circular (Hussain et al., 2007). c) Piràmide doblegada (Bambach et al., 2008). d) As d'espases (Allwood et al., 2010).

Per tant, s'ha escollit una geometria d'angle de paret variable, que en anglès es coneix com *Variable Wall Angle* (VWA) (Pérez-Santiago et al., 2011a). Aquesta geometria es pot definir a partir dels paràmetres següents:

- Diàmetre (D)
- Angle (A)
- Radi de generatriu (RG)

Una representació esquemàtica de la geometria es pot veure a la Figura 4.10.

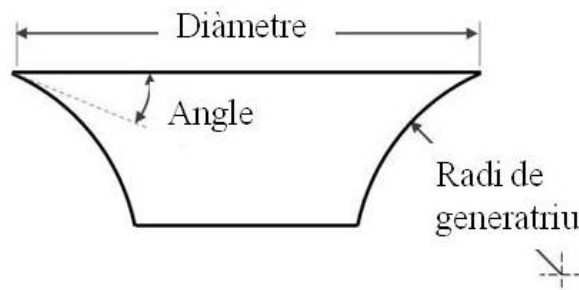


Figura 4.10. Esquema de la geometria utilitzada en el projecte.

4.3 Característiques de les xapes

4.3.1 Elecció del material

A l'apartat A.3 es pot trobar una taula amb un resum dels materials utilitzats en l'experimentació de ISF en diferents articles d'investigació. Els materials més àmpliament utilitzats són aliatges d'alumini (veure Taula A.1). La principal raó és que són relativament fàcils de conformar ja que no requereixen forces molt elevades i a més són assequibles, essent una bona elecció de cares a les primeres proves amb la tecnologia ISF.

Per tant, per a validar la correcta adaptació del centre de mecanitzat a la tecnologia ISF s'ha decidit adquirir xapes d'alumini tipus AA1050 amb tractament tèrmic H24. Les dimensions inicials de 2000x1000 mm però s'han tallat en xapes de 150x150 mm per a poder ser fixades en l'utilatge dissenyat. També s'han tallat una sèrie de provetes per a realitzar assajos a tracció. Els espessors escollits són de 0.5 i 0.8 mm. El principal motiu d'utilitzar gruixos tant baixos és per assegurar que no s'assoliran nivells elevats de forces axials.

Gràcies a la recerca bibliogràfica s'ha pogut detectar que hi ha un creixent interès en l'ús de materials polimèrics, acer inoxidable, aliatges de titani i aliatges de magnesi. Els dos últims necessiten algun sistema d'aportació de calor per a poder ser conformats, per tant, es descarta el seu ús en aquest projecte. En canvi, sí que es creu interessant utilitzar xapes d'acer inoxidable ja que té aplicació en diferents sectors, com ara el biomèdic. Per tant, s'ha decidit adquirir xapa d'acer inoxidable AISI304, amb un gruix de 0.5 mm i de dimensions inicials 2000x1000 mm (que es tallarà en xapes més petites de 150x150 mm i provetes per a fer assajos a tracció). En aquest cas no s'ha considerat el gruix de 0.8 mm perquè les forces de conformat arribarien a un valor elevat, molt proper al límit màxim tolerat.

4.3.2 Assaig a tracció

Per tal de caracteritzar els materials adquirits es durà a terme un assaig a tracció. Les dimensions de les provetes utilitzades es poden veure a la Figura 4.11.

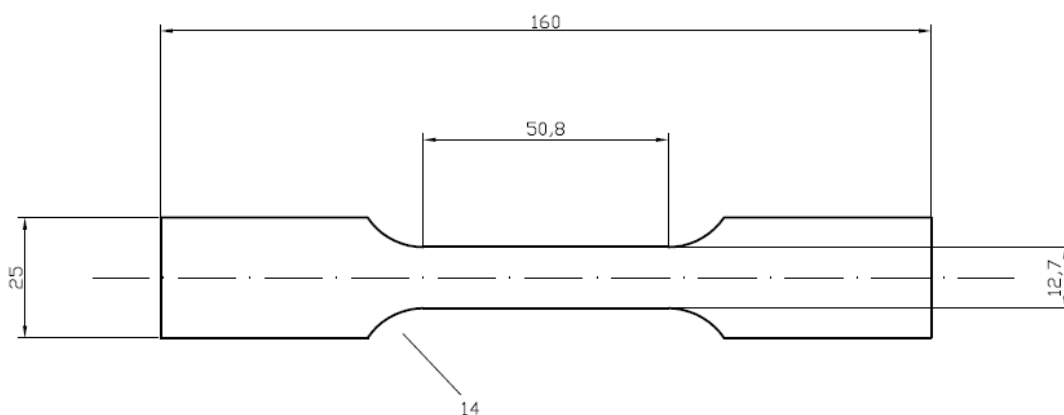


Figura 4.11. Dimensions de les provetes utilitzades en l'assaig a tracció.

S'han assajat 6 provetes de cada material per a cada gruix de xapa i a més s'ha tingut en compte la direcció de laminació de la xapa (3 provetes en direcció paral·lela -RD- i 3 en direcció perpendicular -TD-) per tal d'analitzar els efectes de l'anisotropia.

L'objectiu de l'assaig és obtenir les corbes esforç-deformació (σ - ϵ) reals per a cada material i a partir d'aquí ajustar la zona plàstica a la llei d'enduriment o de Swift (Eq. 4.1) i obtenir els paràmetres K, n i ϵ_0 .

$$\sigma = K \cdot (\epsilon_0 + \epsilon)^n \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Es desitja poder obtenir el model del material segons la llei d'enduriment perquè en molts treballs previs (veure Taula A.2) s'ha utilitzat per a simular el procés amb elements finits.

4.4 Disseny d'experiments (DOE)

Es duran a terme dos dissenys d'experiments diferents. Els dos són de 4 factors amb 2 nivells. La diferència és que en el primer un dels factors és el gruix mentre que en el segon és el material.

Resumint breument el que s'ha comentat en els apartats previs d'aquesta secció, es presenta una taula que indica els paràmetres que es mantenen constants durant l'experimentació i també els nivells dels factors que varien, que seran la base per a definir els dos DOE.

Taula 4.1. Paràmetres que es mantenen constants durant l'experimentació.

Paràmetre	Valor
Diàmetre de l'eina	10 mm
Tipus de trajectòria	Alternant sentit horari i antihorari
Pas incremental	$\Delta z = 0.5$ mm
Velocitat d'avanç	1000 mm/min
Velocitat de rotació	1000 rpm
Lubricant	Grassa (alumini) o oli (acer inoxidable)

Taula 4.2. Nivells dels paràmetres que varien en el primer DOE.

Paràmetre	Nivells
D - Diàmetre (mm)	75 / 100
A - Angle (°)	40 / 60
RG - Radi de generatriu (mm)	47.5 / 100
T - Gruix (mm)	0.5 / 0.8

Taula 4.3. Nivells dels paràmetres que varien en el segon DOE.

Paràmetre	Nivells
D - Diàmetre (mm)	75 / 100
A - Angle (°)	40 / 60
RG - Radi de generatriu (mm)	47.5 / 100
M - Material	AA1050-H24 / AISI304

Tenint en compte els 4 factors, s'ha realitzat un DOE reduït de manera que es faran 8 assajos per a cada un dels dos dissenys d'experiments realitzats.

Número de corridas	Número de factores													
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4	completo 2	III 1												
8		completo 4	IV 4	III 2	III 2	III 1								
16			completo 8	V 8	IV 8	IV 8	IV 8	III 4	III 4	III 4	III 4	III 2	III 2	III 1
32				completo 16	VI 16	IV 8	IV 8	IV 8	IV 8	IV 8	IV 8	IV 8	IV 8	IV 8
64					completo 32	VII 16	V 16	IV 16	IV 16	IV 16	IV 16	IV 16	IV 16	IV 16
128						completo 64	VIII 32	VI 16	V 16	V 16	IV 16	IV 16	IV 16	IV 16

Figura 4.12. Resum dels dissenys d'experiments amb dos nivells.

La realització del DOE s'ha fet amb el programa Minitab i s'ha tingut en compte que l'ordre dels assajos sigui aleatori. Les característiques dels assajos a realitzar en cada un dels DOE es mostra a la Taula 4.4 i la Taula 4.5.

Taula 4.4. Assajos a realitzar pel DOE 1.

Test ID	A (°)	RG (mm)	D (mm)	T (mm)
1.1	40	100	100	0.5
1.2	40	47.5	100	0.8
1.3	60	100	75	0.5
1.4	60	47.5	75	0.8
1.5	60	100	100	0.8
1.6	40	47.5	75	0.5
1.7	60	47.5	100	0.5
1.8	40	100	75	0.8

Taula 4.5. Assajos a realitzar pel DOE 2.

Test ID	A (°)	RG (mm)	D (mm)	M
2.1	60	47.5	75	AISI304
2.2	40	100	75	AISI304
2.3	60	100	100	AISI304
2.4	60	100	75	AA1050-H24
2.5	60	47.5	100	AA1050-H24
2.6	40	100	100	AA1050-H24
2.7	40	47.5	100	AISI304
2.8	40	47.5	75	AA1050-H24

4.5 Mesures i adquisició de dades

4.5.1 Forces

Les forces de conformat es mesuraran al llarg de tota l'operació amb una taula dinamomètrica Kistler 9257B. Està muntada a la taula de treball i a sobre hi ha cargolat l'utilitatge dissenyat. Les dades de força s'adquireixen a una freqüència de 10 Hz (10 mostres/segon) amb una tarja d'adquisició DaqBoard 505 i el software DaqView 9.0.0. Aleshores aquestes dades es passen al Matlab per tal d'aplicar un filtre de mitjana mòbil de 5 punts i s'obindrà el valor màxim.

La taula dinamomètrica Kistler permet mesurar les forces en l'eix X, Y i Z així com els moments. L'únic que es reportarà en l'apartat de resultats són les forces en direcció Z ja que són les més destacables.

Actualment existeixen alguns models analítics que permeten predir les forces de conformat, el més important dels quals és el desenvolupat per Aerens (Aerens et al., 2010). Aquest model (Eq. 4.2) és una equació empírica basada en l'experimentació per a diferents materials i geometries amb angle de paret constant que permet calcular la força de conformat en l'estat estable (Fz_s).

$$Fz_s = 0.0716 \cdot R_m \cdot t_0^{1.57} \cdot d_t^{0.41} \cdot \Delta h^{0.09} \cdot \alpha \cdot \cos \alpha \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Els termes de l'equació fan referència a:

- *Propietats del material.* Resistència a tracció del material, R_m (MPa).
- *Paràmetres geomètrics.* Angle inicial de la geometria, α ($^\circ$), i gruix inicial de la xapa, t_0 (mm).
- *Paràmetres de procés.* Diàmetre de l'eina, d_t (mm), i valor de l'altura de cresta, Δh (mm).

La relació entre la profunditat de baixada (Δz) i l'altura de cresta (Δh) també està definida per Aerens (Aerens et al., 2010) i l'expressió és la de l'equació (Eq. 4.3).

$$\Delta z = 2 \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{\Delta h \cdot d_t} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Les forces màximes obtingudes experimentalment (F_{max}) es compararan amb els valors calculats a partir del model analític (Eq. 4.2) amb la finalitat de comprovar si la predicció del model és acurada en el cas de deformar geometries amb angle de paret variable. Es calcularà l'error com es mostra a l'equació (Eq. 4.4).

$$\text{error} = \frac{Fz_s - F_{max}}{F_{max}} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 4.4})$$

4.5.2 Límits de formabilitat

Per tal de tenir una idea dels límits de formabilitat que s'assoliran en els experiments una de les opcions es basa en construir corbes límit de conformat (FLC). S'han realitzat algunes proves però s'ha descartat utilitzar aquest indicador ja que degut a les deformacions tant elevades que tenen lloc durant el procés, el marcatge de

les xapes desapareix, impossibilitant la correcta lectura de les mesures que es necessiten per a obtenir aquest tipus de corbes.

Un dels possibles indicadors a escollir per determinar els límits de formabilitat podria ser l'altura màxima assolida en el moment del trencament de la xapa (Z_{max}). Aquest valor s'obté a partir del que marqui el control numèric.

Hi ha una relació numèrica entre l'angle màxim assolit al final del procés i la Z_{max} (Bagudanch et al., 2011b) tal i com es mostra a l'equació (Eq. 4.5), on RG és el radi de generatriu (mm) i α l'angle inicial ($^{\circ}$).

$$\alpha_{max} = \cos^{-1}\left(\cos \alpha - \frac{Z_{max}}{RG}\right) \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Per tant, a partir del valor de Z_{max} és possible també determinar el màxim valor d'angle aconseguit en el moment de la ruptura. Aquest paràmetre és interessant perquè s'ha utilitzat en nombroses ocasions en treballs d'investigació previs per a quantificar la formabilitat del material.

A la Figura 4.13 es poden veure il·lustrats els valors de Z_{max} i α_{max} .

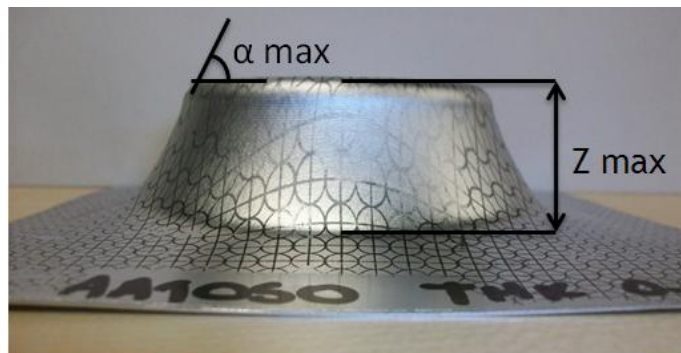


Figura 4.13. Representació dels valors de Z_{max} i α_{max} .

Degut a la combinació dels diferents paràmetres geomètrics, per a cada assaig l'alçada final que teòricament s'hauria d'aconseguir pot variar. És per aquest motiu que per poder comparar els resultats de límits de formabilitat (LF) dels diferents experiments s'utilitzarà la relació de l'equació (Eq. 4.6).

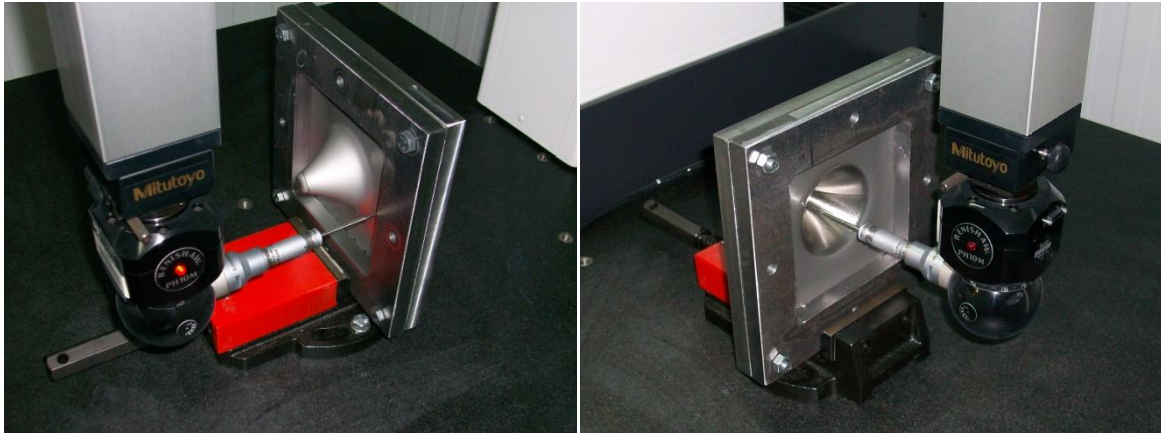
$$LF = \frac{Z_{max}}{Z_{teòrica}} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

Aquesta relació tindrà un valor inferior o igual a 1. Quan més propera sigui a 1 significarà que el límit de formabilitat és major.

4.5.3 Precisió

Per a conèixer la precisió obtinguda en els diferents experiments es mesurarà el perfil en l'eix vertical i horitzontal per les cares interior i exterior de les peces amb una màquina de mesura per coordenades (MMC) Mitutoyo Crysta Apex 544. Els perfils obtinguts es compararan amb els teòrics per a determinar les desviacions geomètriques.

Un cop la peça ha estat formada i netejada de restes de lubricant, es col·locarà entre la placa superior i la placa de fixació de l'utilatge. Aquest muntatge es disposarà en posició vertical i se subjectarà amb una mordassa unida a la taula de la màquina de coordenades.



a) b)
Figura 4.14. a) Mesura del perfil exterior. b) Mesura del perfil interior.

4.6 Simulació per elements finits

En paral·lel als experiments físics i a l'exploració analítica per a intentar desenvolupar equacions que permetin predir certes respostes del procés, la modelització amb elements finits (FEM) s'ha estat utilitzant com a una font fiable per obtenir informació del procés de ISF. Fins al 2005, la majoria dels resultats obtinguts en les simulacions es basaven en perfils, distribució de gruixos i deformacions. Actualment també s'està treballant en la predicció de forces.

En aquest projecte s'utilitzarà la tècnica FEM com una eina més per a validar el correcte desenvolupament de la tecnologia. Els models desenvolupats tenen les següents característiques:

- S'ha utilitzat el software explícit LS-DYNA en un ordinador amb sistema operatiu Windows 7 amb 4 CPU.
- No s'han aplicat simplificacions per simetria perquè es preveu utilitzar els mateixos models per analitzar la recuperació elàstica (que no és objecte d'aquest projecte).
- Per tal de reduir el temps de càlcul s'ha utilitzat escalatge de masses i velocitat.
- La superfície intermèdia de la xapa s'ha descrit a partir d'una malla regular amb elements tipus *shell* amb 5 punts d'integració al llarg de l'espessor.
- Les dimensions dels elements són de 1.5x1.5 mm.
- Les superfícies externes de l'eina s'han mallat amb elements *shell* considerant material rígid definit amb les propietats de l'acer.
- Les xapes s'han modelitzat amb un model constitutiu elasto-plàstic.
- El règim elàstic s'ha definit a partir del mòdul de Young i el coeficient de Poisson mentre que el règim plàstic s'ha modelitzat amb el criteri de fluència de Von Mises i la llei d'enduriment de Swift.

- El desplaçament dels nodes que defineixen el perímetre de la xapa està bloquejat.
- La trajectòria de l'eina i el temps virtual de procés s'ha introduït al model mitjançant la rutina programa en Python que permet generar les corbes de velocitat necessàries per a la simulació.
- També s'ha aplicat un filtratge de mitjana mòbil de 5 punts als resultats de la simulació per tal d'obtenir resultats més consistents en la comparació dels valors experimentals i els simulats.

5 Resultats

5.1 Assaig a tracció

En aquest apartat es recullen els resultats més rellevants que s'han obtingut en les proves de tracció.

Tal i com ja s'ha comentat en l'apartat 4.3.2 s'han assajat 6 provetes de cada material i per a cada gruix de xapa. La selecció de les provetes s'ha fet tenint en compte la direcció de laminació de la xapa (3 provetes en direcció paral·lela -RD- i 3 en direcció perpendicular -TD-).

La màquina amb què s'ha fet l'assaig proporciona valors de força i desplaçament, amb la qual cosa cal convertir aquests valors en esforç i deformació reals. Un cop s'obté aquesta corba és possible ajustar els paràmetres de la llei d'enduriment mostrada a l'equació (Eq. 4.1) per a la zona plàstica, ja que són necessaris per a poder realitzar les simulacions per elements finits. Aquest ajustament s'ha fet a partir del programa que es detalla a l'annex D.

Per als dos materials utilitzats (alumini i acer inoxidable) es proporcionen els valors de K , ϵ_0 i n obtinguts per a cada una de les provetes assajades, obtenint al final uns valors mitjans que són els que s'han implementat en el model d'elements finits.

Taula 5.1. Resultats corresponents a l'ajustament dels paràmetres de la llei d'enduriment per a l'aliatge d'alumini AA1050-H24.

Gruix	Direcció	Codi proveta	K (Mpa)	ϵ_0	n
0.5 mm		AA1050-RD-0.5-1	122	4.12E-14	0.03658
		AA1050-RD-0.5-2	122	1.80E-10	0.03742
		AA1050-RD-0.5-3	122	4.19E-14	0.03299
	⊥	AA1050-TD-0.5-1	122	2.27E-14	0.02535
		AA1050-TD-0.5-2	122	2.22E-14	0.02355
		AA1050-TD-0.5-3	122	2.22E-14	0.02457
0.8 mm		AA1050-RD-0.8-1	122	2.22E-14	0.02863
		AA1050-RD-0.8-2	*	*	*
		AA1050-RD-0.8-3	122	2.22E-14	0.02493
	⊥	AA1050-TD-0.8-1	122	2.23E-14	0.02173
		AA1050-TD-0.8-2	122	2.22E-14	0.02532
		AA1050-TD-0.8-3	122	4.21E-10	0.02149
Mitjana			122	5.46E-11	0.0275

* L'assaig no s'ha pogut realitzar correctament.

Taula 5.2. Resultats corresponents a l'ajustament dels paràmetres de la llei d'enduriment per a l'acer inoxidable AISI304.

Gruix	Direcció	Codi proveta	K (Mpa)	ϵ_0	n
0.5 mm		AISI304-RD-0.5-1	1545	2.59E-02	0.5128
		AISI304-RD-0.5-2	1523	2.28E-02	0.4936
		AISI304-RD-0.5-3	1491	2.19E-02	0.4870
	⊥	AISI304-TD-0.5-1	1501	3.82E-02	0.5437
		AISI304-TD-0.5-2	1499	3.87E-02	0.5442
		AISI304-TD-0.5-3	*	*	*
0.8 mm		AISI304-RD-0.8-1	1600	6.39E-02	0.6318
		AISI304-RD-0.8-2	1600	5.40E-02	0.5963
		AISI304-RD-0.8-3	1591	6.43E-02	0.6309
	⊥	AISI304-TD-0.8-1	1597	9.14E-02	0.6949
		AISI304-TD-0.8-2	1586	9.88E-02	0.7182
		AISI304-TD-0.8-3	1600	8.48E-02	0.6762
Mitjana			1557.545	0.0550	0.5936

* L'assaig no s'ha pogut realitzar correctament.

5.2 Forces

Les forces de conformat s'han adquirit durant tot el procés. Aquestes dades s'han processat amb el Matlab per tal de filtrar-les mitjançant un mètode de mitjana mòbil i aleshores s'ha obtingut el valor màxim, anomenat Fmax. Si no es filtressin les dades el valor Fmax seria molt més elevat del que realment es considera en l'estat estable, degut a l'important soroll que hi ha (Figura 5.1). En canvi, amb les dades filtrades els pics superiors es redueixen considerablement i són del mateix ordre de valor que en l'estat estable (veure Figura 5.2).

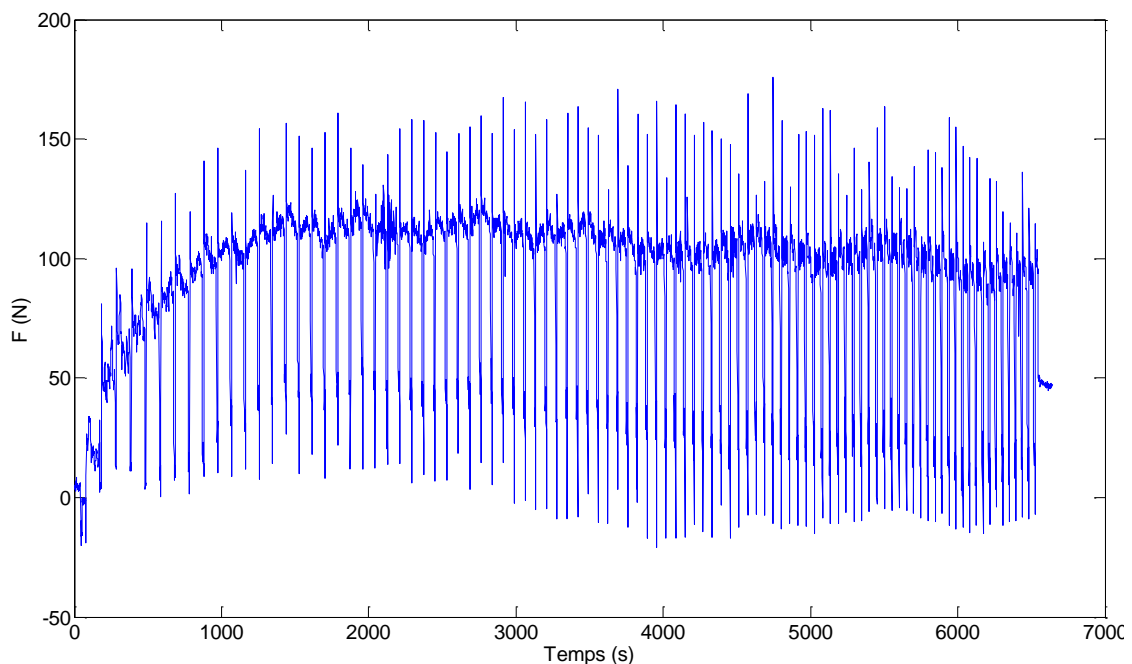


Figura 5.1. Exemple de l'evolució de les forces mesurades sense filtrar.

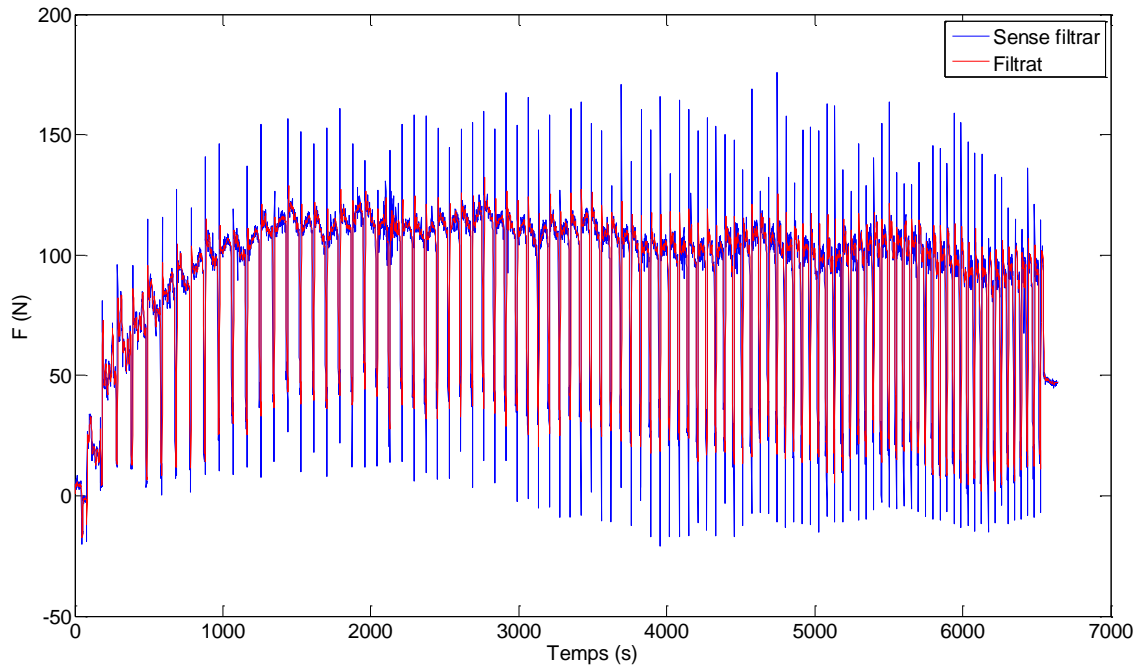


Figura 5.2. Exemple de l'evolució de les forces mesurades sense filtrar i filtrades.

A la Taula 5.3 (DOE 1) i a la Taula 5.4 (DOE 2) es detalla aquest valor màxim, així com també el valor de força calculat aplicant l'equació (Eq. 4.2). L'última columna correspon a l'error entre els dos valors (Eq. 4.4). Un error positiu significa que el valor calculat és superior al mesurat.

Taula 5.3. Valors obtinguts de força màxima pel DOE 1.

Test ID	A (°)	RG (mm)	D (mm)	T (mm)	Fmax (N)	Fz _s (N)	Error (%)
1.1	40	100	100	0.5	132.137	156.303	18.289
1.2	40	47.5	100	0.8	305.687	326.916	6.945
1.3	60	100	75	0.5	138.886	145.035	4.427
1.4	60	47.5	75	0.8	293.248	303.348	3.444
1.5	60	100	100	0.8	294.237	303.348	3.096
1.6	40	47.5	75	0.5	146.645	156.303	6.586
1.7	60	47.5	100	0.5	151.499	145.035	-4.267
1.8	40	100	75	0.8	314.098	326.916	4.081

Taula 5.4. Valors obtinguts de força màxima pel DOE 2.

Test ID	A (°)	RG (mm)	D (mm)	M	Fmax (N)	Fz _s (N)	Error (%)
2.1	60	47.5	75	AISI304	1036.200	797.691	-23.018
2.2	40	100	75	AISI304	995.938	859.668	-13.683
2.3	60	100	100	AISI304	1018.000	797.691	-21.641
2.4	60	100	75	AA1050-H24	138.886	145.035	4.427
2.5	60	47.5	100	AA1050-H24	151.499	145.035	-4.267
2.6	40	100	100	AA1050-H24	132.137	156.303	18.289
2.7	40	47.5	100	AISI304	1022.500	859.668	-15.925
2.8	40	47.5	75	AA1050-H24	146.645	156.303	6.586

5.3 Límits de formabilitat

A la Taula 5.5 (DOE 1) i a la Taula 5.6 (DOE 2) es recull l'alçada màxima assolida en cada un dels experiments, l'alçada teòrica que s'hauria d'haver aconseguit sense ruptura de la xapa, la relació LF (Límit de Formabilitat) calculada a partir de l'expressió (Eq. 4.6) i l'angle màxim calculat segons l'equació (Eq. 4.5).

Taula 5.5. Valors obtinguts d'alçada màxima, límit de formabilitat i angle màxim pel DOE 1.

Test ID	A (°)	RG (mm)	D (mm)	T (mm)	Zmax (mm)	Zteòrica (mm)	LF	α max (°)
1.1	40	100	100	0.5	49.5	59.0	0.8390	74.27
1.2	40	47.5	100	0.8	28.5	29.0	0.9828	79.80
1.3	60	100	75	0.5	15.0	32.5	0.4615	69.51
1.4	60	47.5	75	0.8	15.5	15.5	1.0000	80.00
1.5	60	100	100	0.8	19.0	32.5	0.5846	71.94
1.6	40	47.5	75	0.5	24.0	29.0	0.8276	74.88
1.7	60	47.5	100	0.5	12.5	15.5	0.8065	76.30
1.8	40	100	75	0.8	51.0	59.0	0.8644	75.16

Taula 5.6. Valors obtinguts d'alçada màxima, límit de formabilitat i angle màxim pel DOE 2.

Test ID	A (°)	RG (mm)	D (mm)	M	Zmax (mm)	Zteòrica (mm)	LF	α max (°)
2.1	60	47.5	75	AISI304	13.5	15.5	0.8710	77.54
2.2	40	100	75	AISI304	45.5	59.0	0.7712	71.88
2.3	60	100	100	AISI304	14.0	32.5	0.4309	68.90
2.4	60	100	75	AA1050-H24	15.0	32.5	0.4615	69.51
2.5	60	47.5	100	AA1050-H24	12.5	15.5	0.8065	76.30
2.6	40	100	100	AA1050-H24	49.5	59.0	0.8390	74.27
2.7	40	47.5	100	AISI304	24.0	29.0	0.8276	74.88
2.8	40	47.5	75	AA1050-H24	24.0	29.0	0.8276	74.88

5.4 Precisió

En aquest apartat es mostraran de manera gràfica els resultats obtinguts amb la mesura de la precisió dimensional utilitzant una màquina de mesura de coordenades. Els perfils que es representen a les gràfiques es divideixen segons si les mesures s'han fet en l'eix horitzontal o vertical i segueixen els següents criteris de colors:

- Blau: perfil exterior mesurat.
- Vermell: perfil interior mesurat.
- Blanc: perfil teòric.

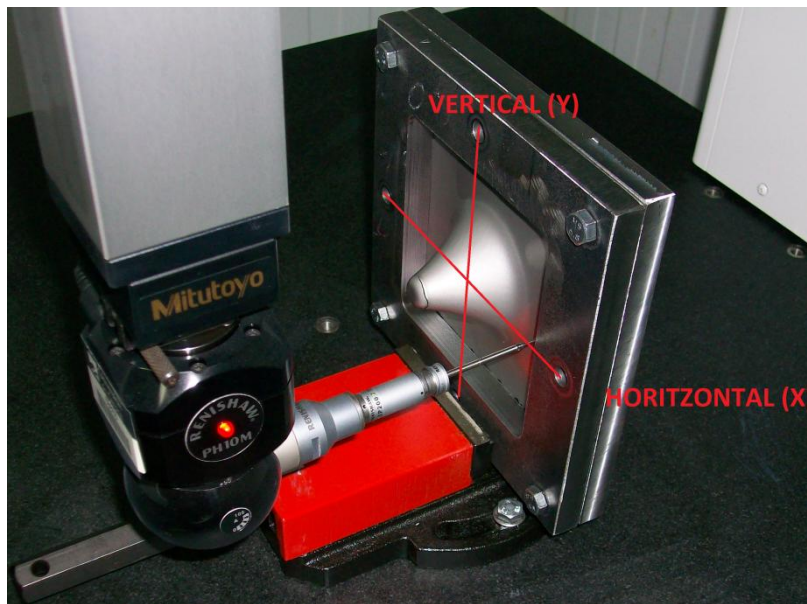


Figura 5.3. Representació dels eixos de mesura.

Totes les gràfiques s'acompanyen amb una imatge al fons de la peça real, de manera que és possible apreciar el punt de ruptura i entendre així el motiu d'algunes de les desviacions.

A més, es marcaran les zones en què es considera que la peça s'ha doblegat enlloc de deformar-se segons els mecanismes propis del procés. Aquestes zones es troben als extrems de les gràfiques ja que aquest fenomen es dona principalment en les primeres passades de l'eina.

Allà on sigui convenient s'identificaran les zones que han sofert una recuperació elàstica (*springback*) més important i que fan que la desviació dimensional sigui molt més elevada.

Es mostrarà el punt on la desviació és màxima sense tenir en compte les zones on hi ha doblegat i/o recuperació elàstica, per tal de tenir una idea de les desviacions que s'obtenen quan el procés es dona de forma correcta i no hi ha altres factors que intervenen.

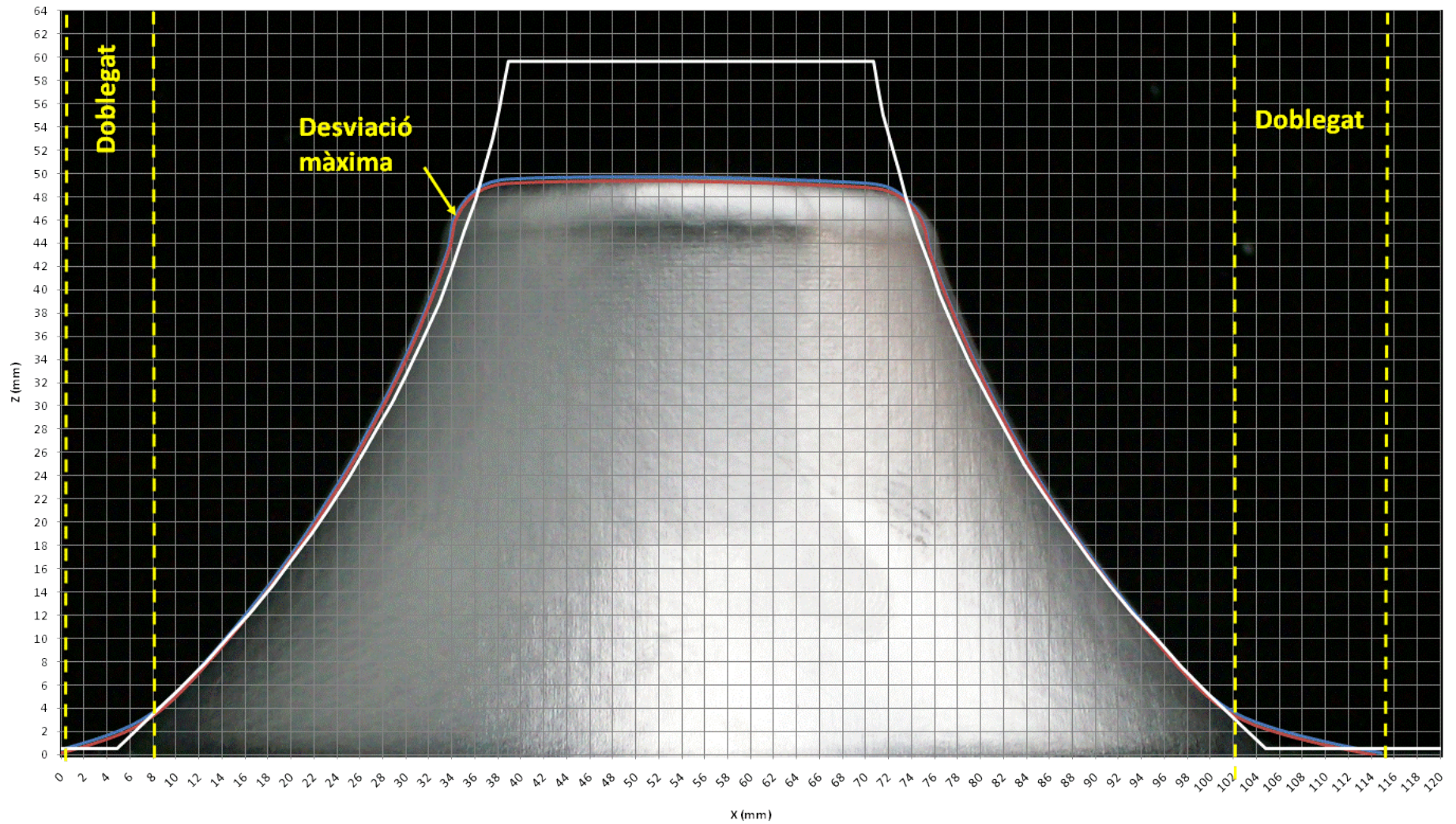


Figura 5.4. Precisió dimensional del cas 1.1 i 2.6 en l'eix horitzontal.

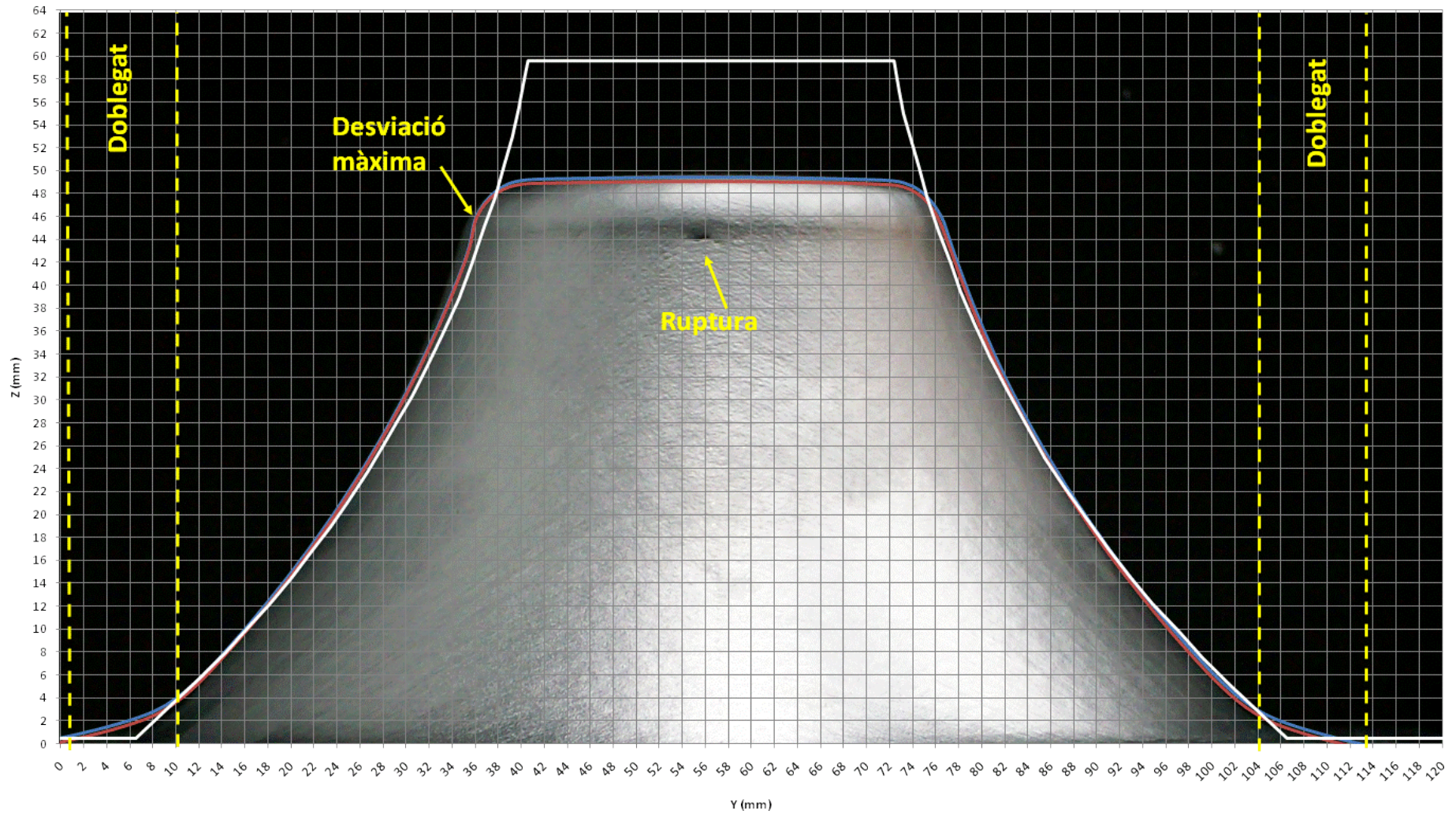


Figura 5.5. Precisió dimensional del cas 1.1 i 2.6 en l'eix vertical.

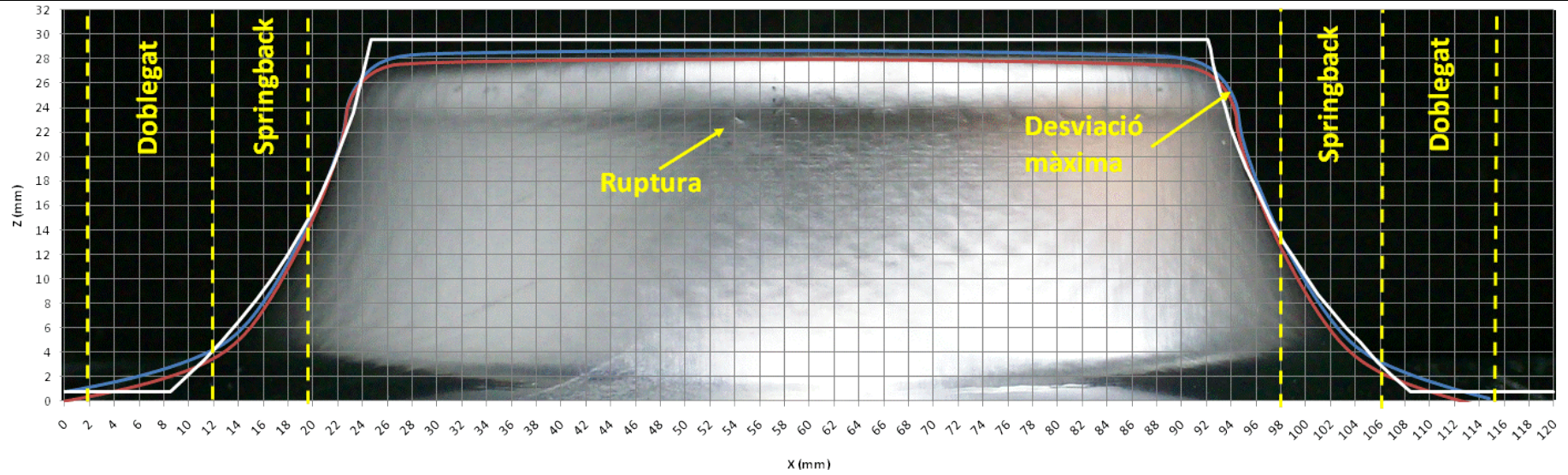


Figura 5.6. Precisió dimensional del cas 1.2 en l'eix horitzontal.

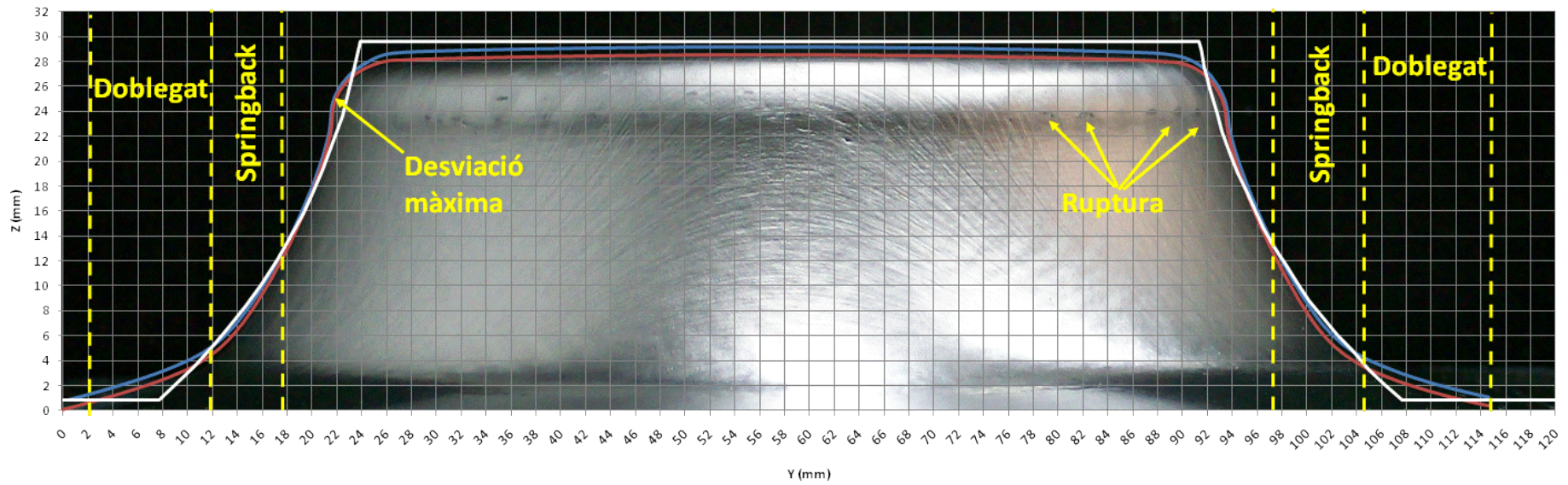


Figura 5.7. Precisió dimensional del cas 1.2 en l'eix vertical.

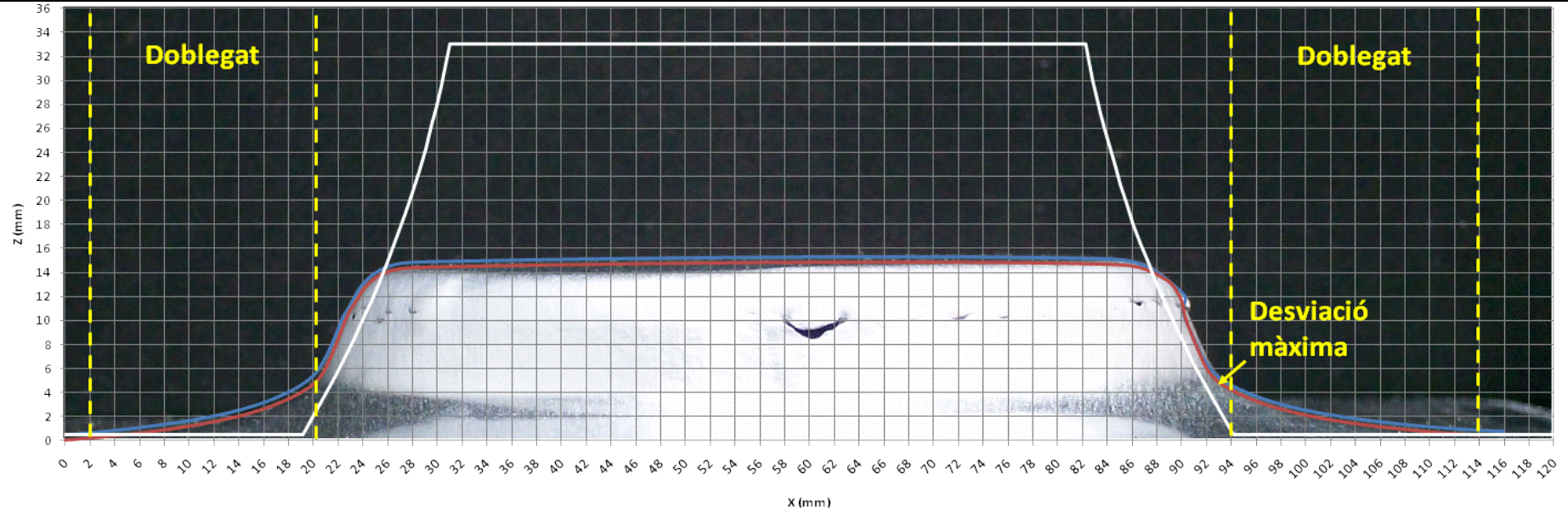


Figura 5.8. Precisió dimensional del cas 1.3 i 2.4 en l'eix horitzontal.

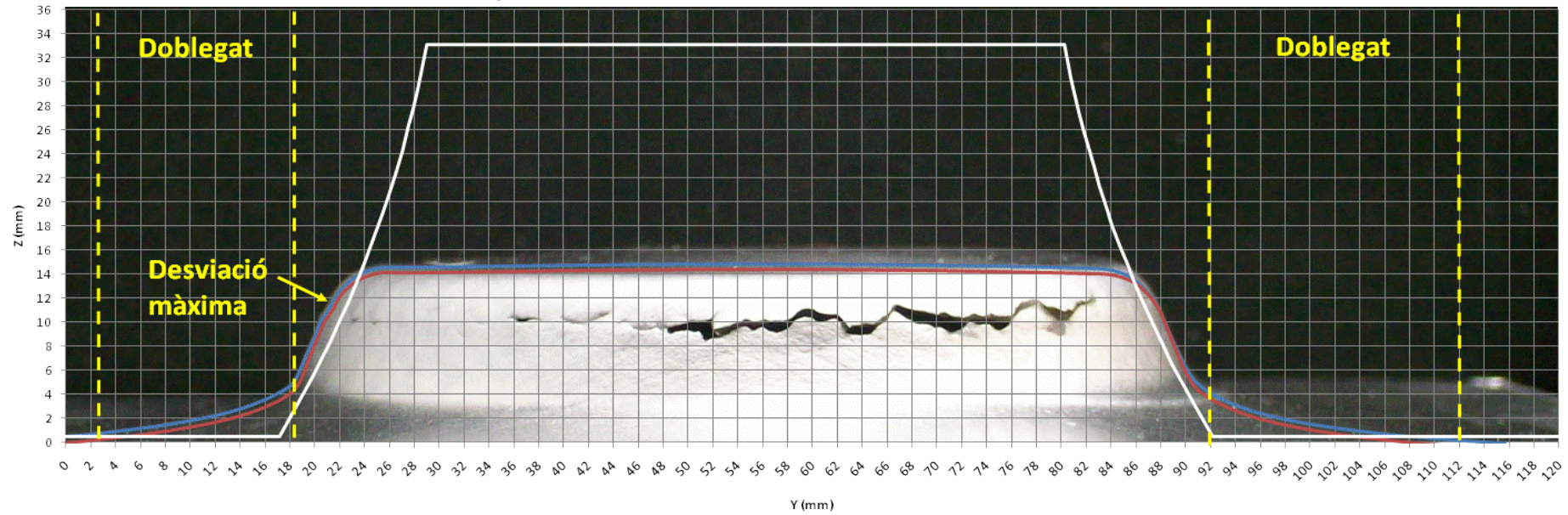


Figura 5.9. Precisió dimensional del cas 1.3 i 2.4 en l'eix vertical.

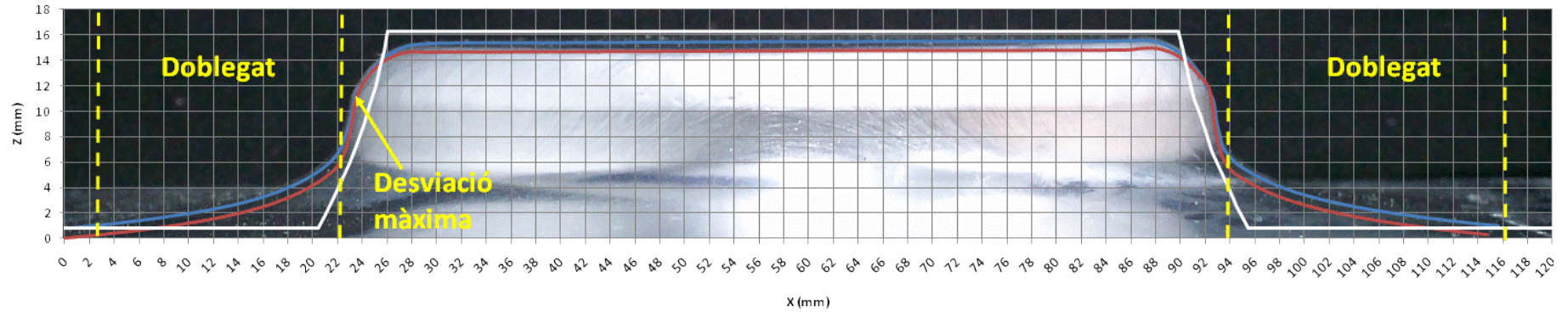


Figura 5.10. Precisió dimensional del cas 1.4 en l'eix horitzontal.

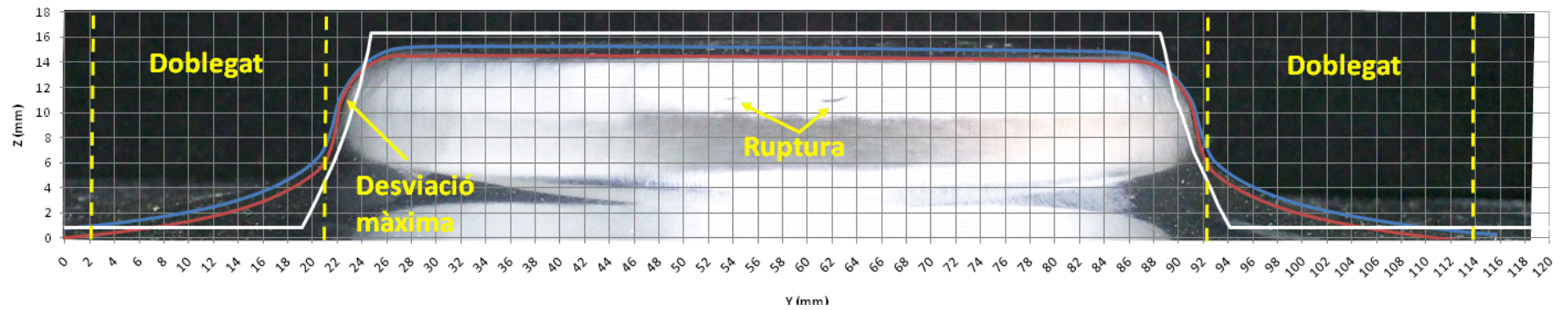


Figura 5.11. Precisió dimensional del cas 1.4 en l'eix vertical.

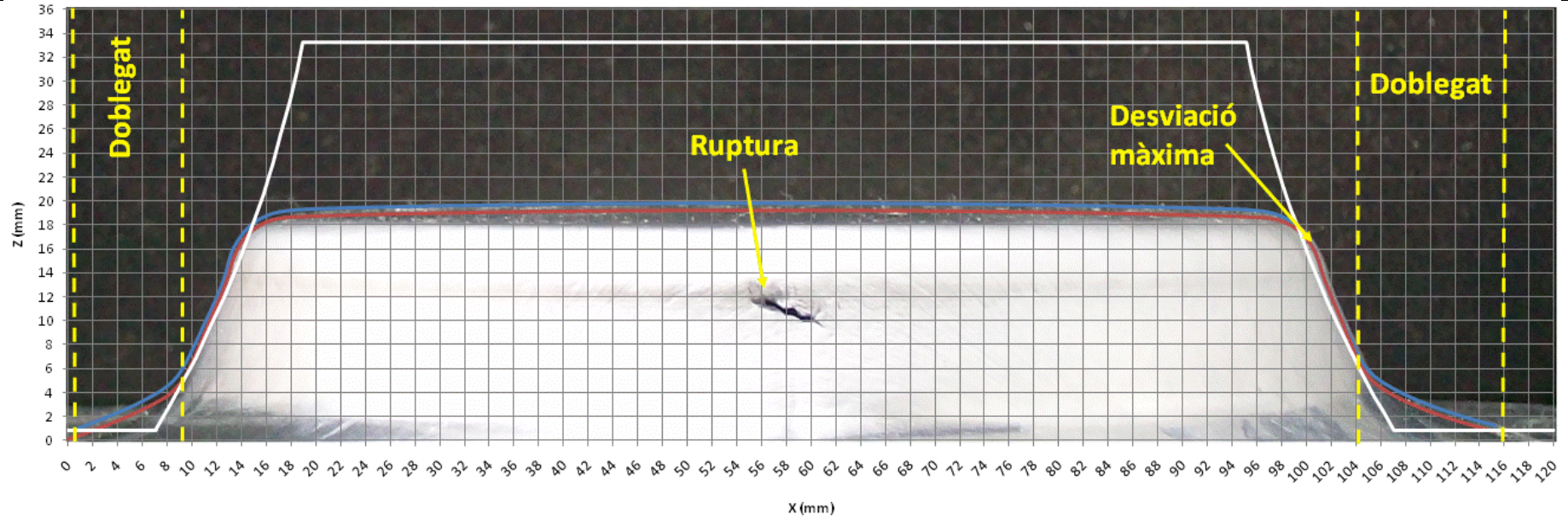


Figura 5.12. Precisió dimensional del cas 1.5 en l'eix horitzontal.

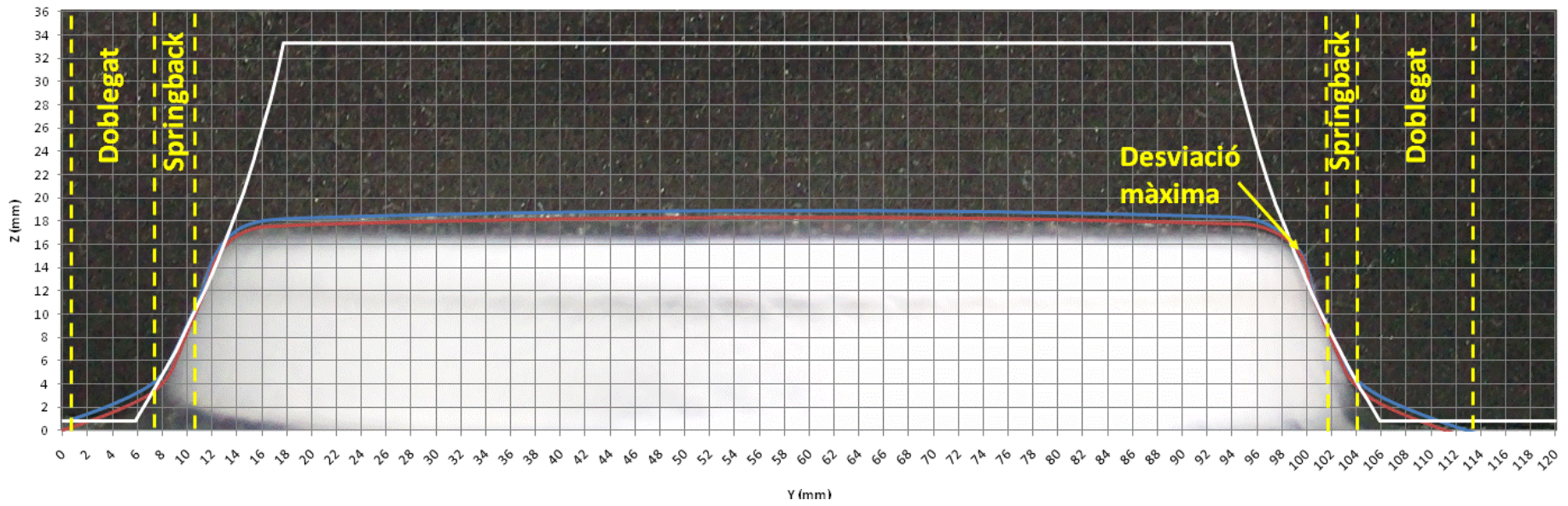


Figura 5.13. Precisió dimensional del cas 1.5 en l'eix vertical.

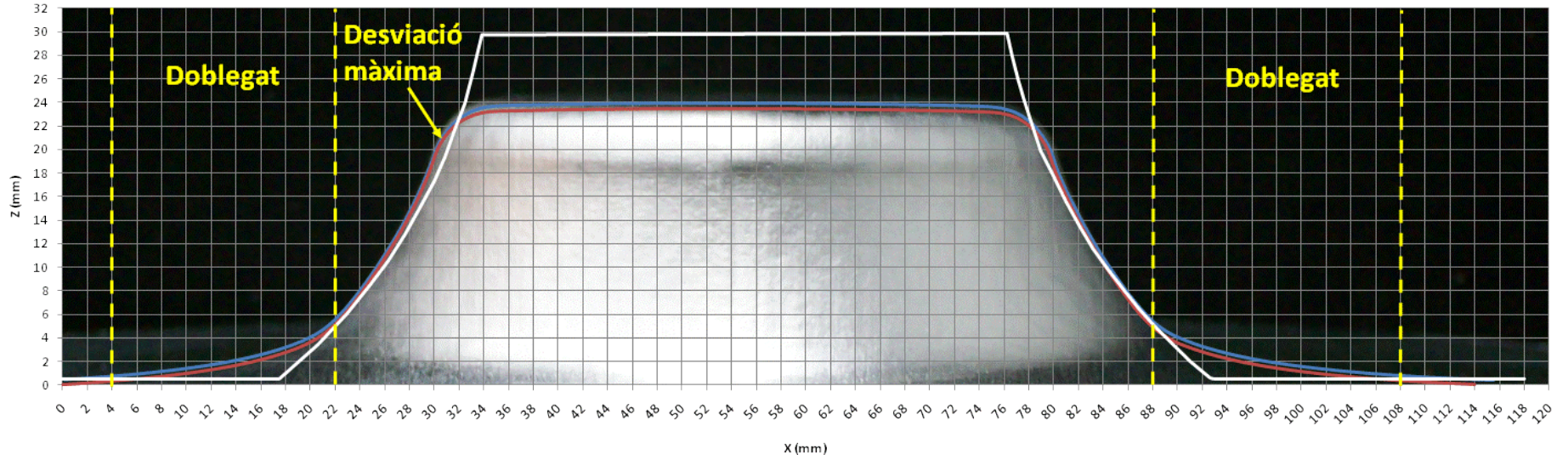


Figura 5.14. Precisió dimensional del cas 1.6 i 2.8 en l'eix horitzontal.

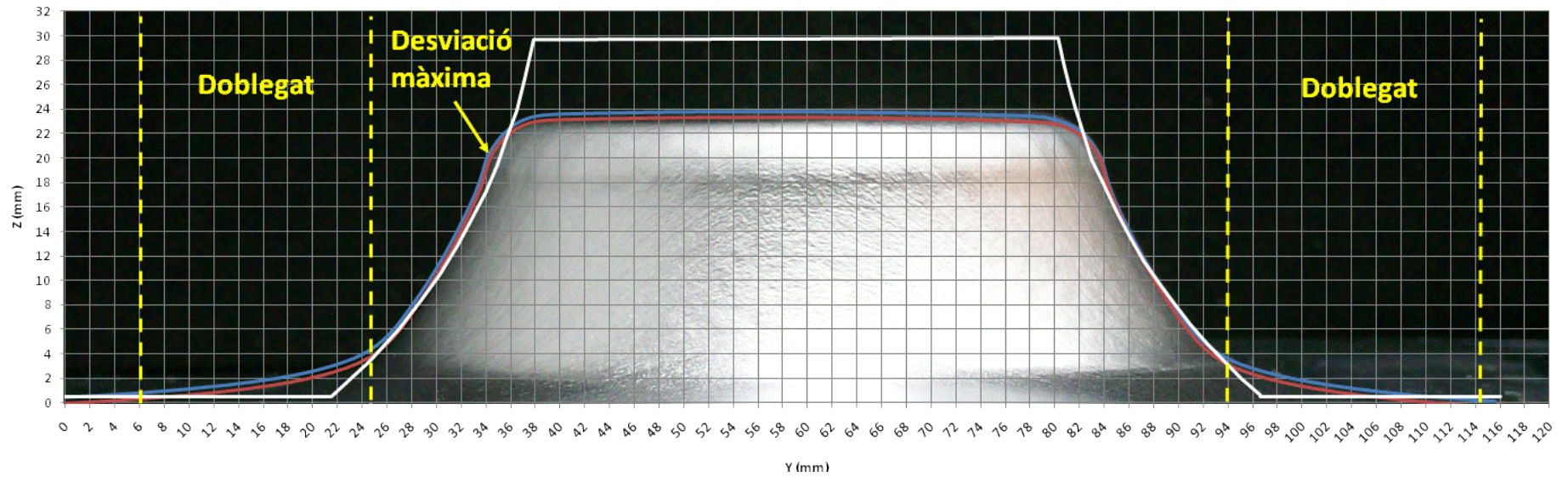


Figura 5.15. Precisió dimensional del cas 1.6 i 2.8 en l'eix vertical.

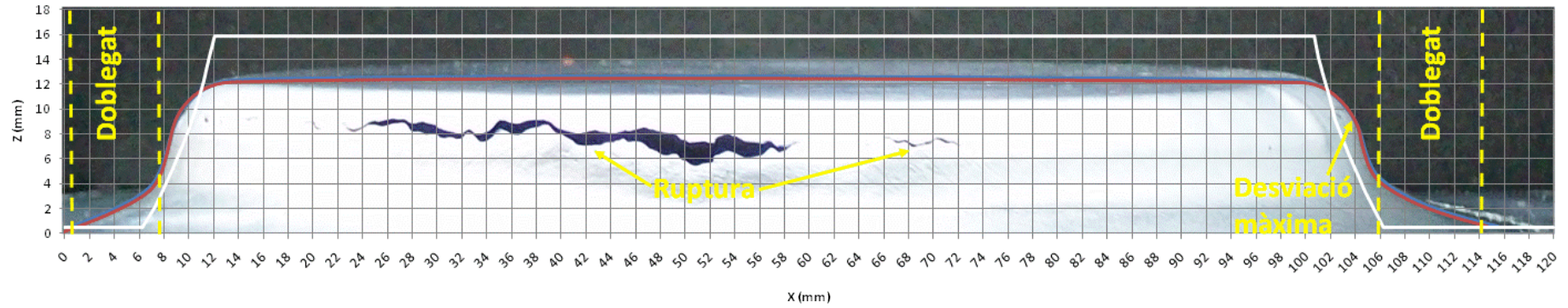


Figura 5.16. Precisió dimensional del cas 1.7 i 2.5 en l'eix horitzontal.

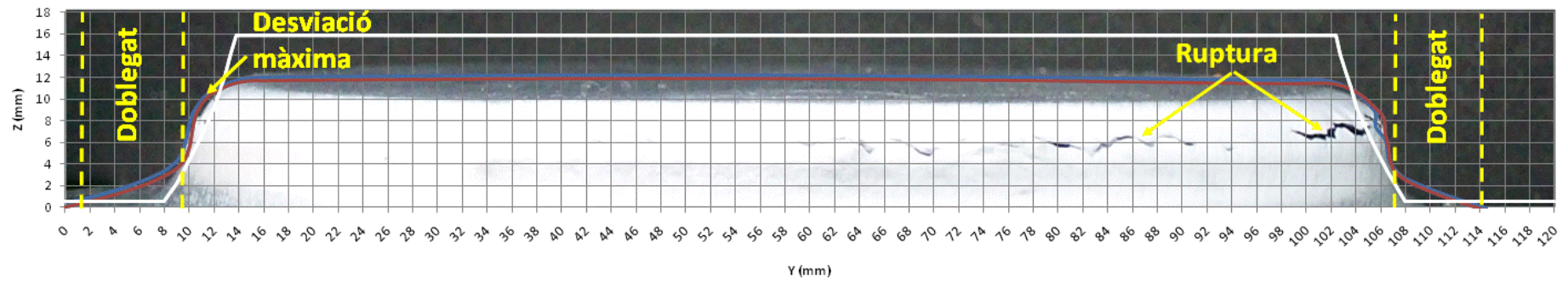


Figura 5.17. Precisió dimensional del cas 1.7 i 2.5 en l'eix vertical.

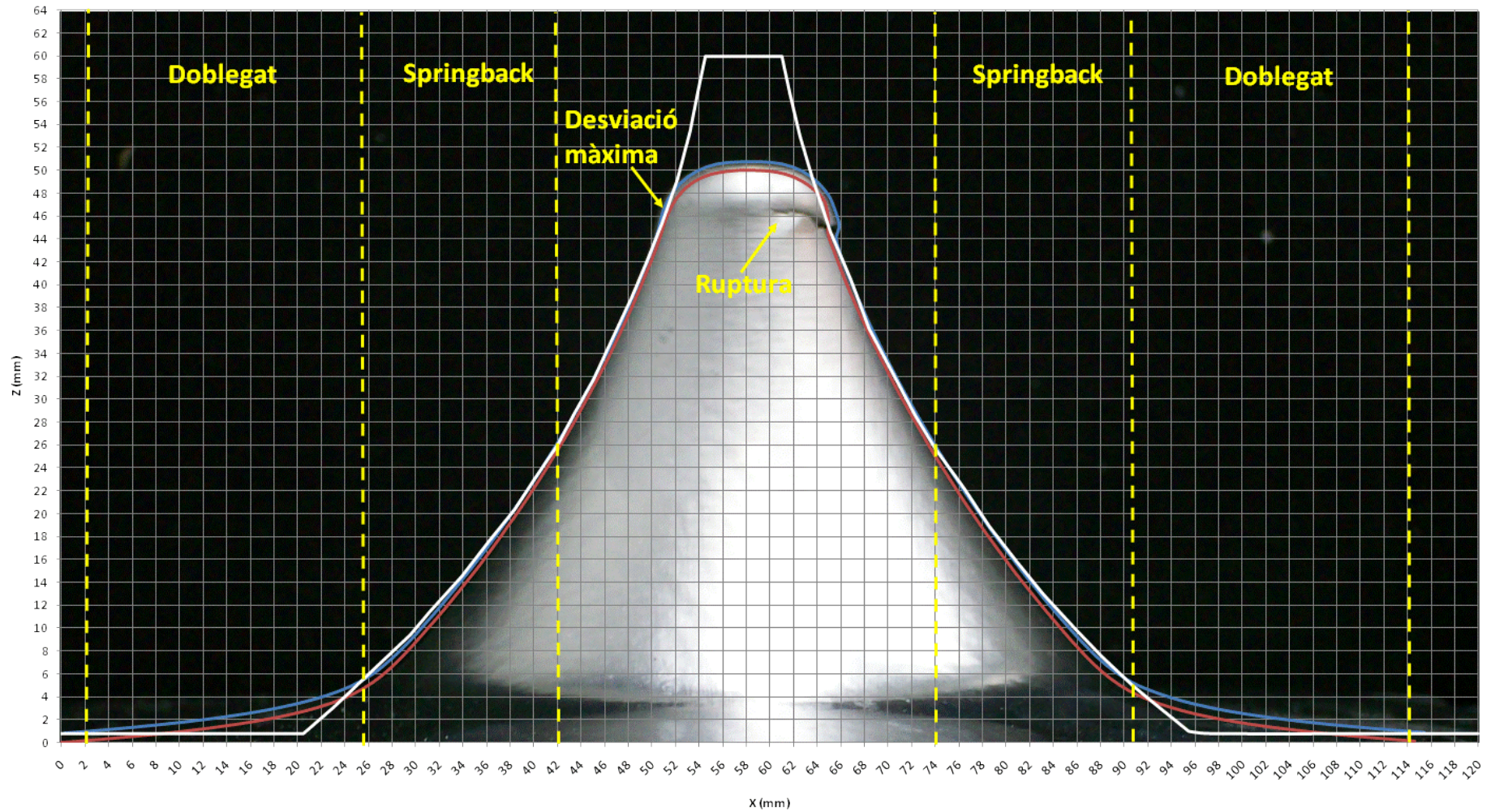


Figura 5.18. Precisió dimensional del cas 1.8 en l'eix horitzontal.

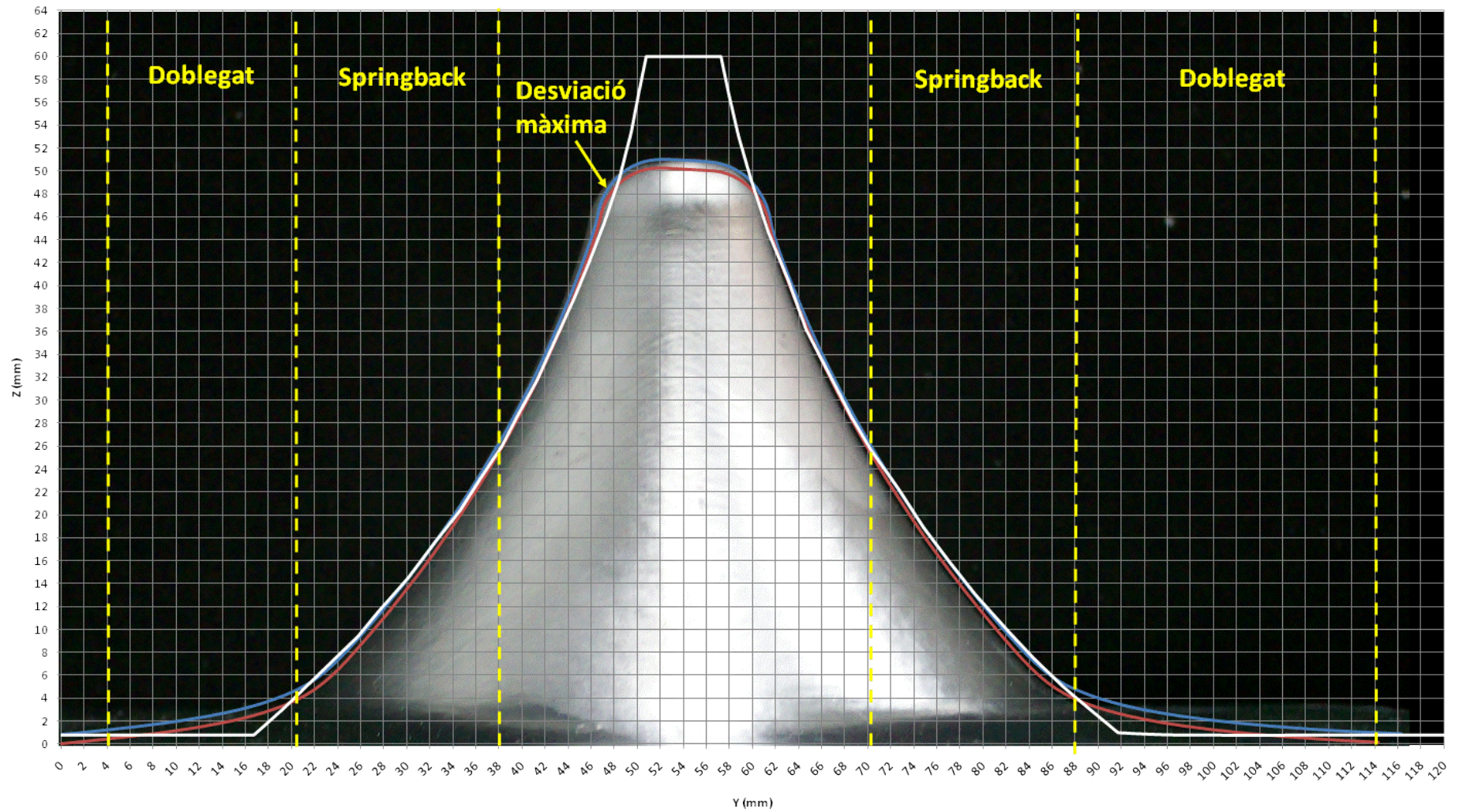


Figura 5.19. Precisió dimensional del cas 1.8 en l'eix vertical.

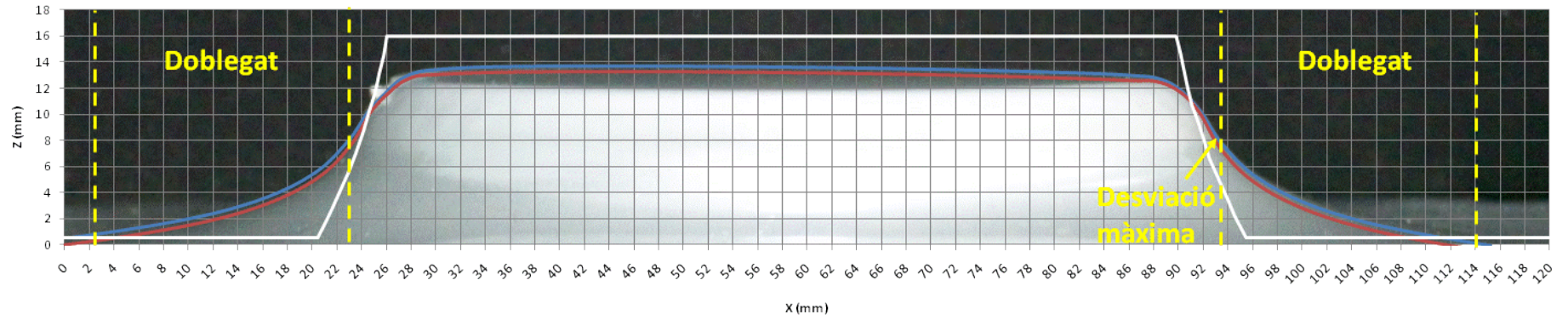


Figura 5.20. Precisió dimensional del cas 2.1 en l'eix horitzontal.

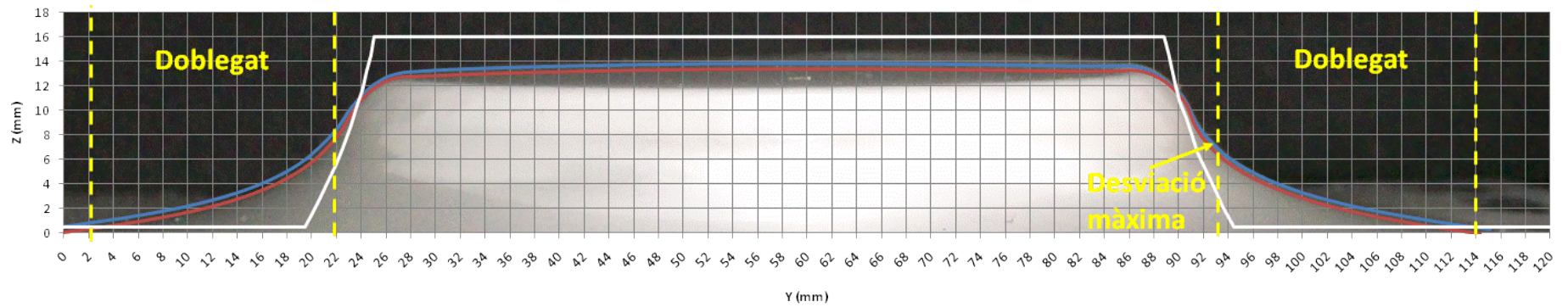


Figura 5.21. Precisió dimensional del cas 2.1 en l'eix vertical.

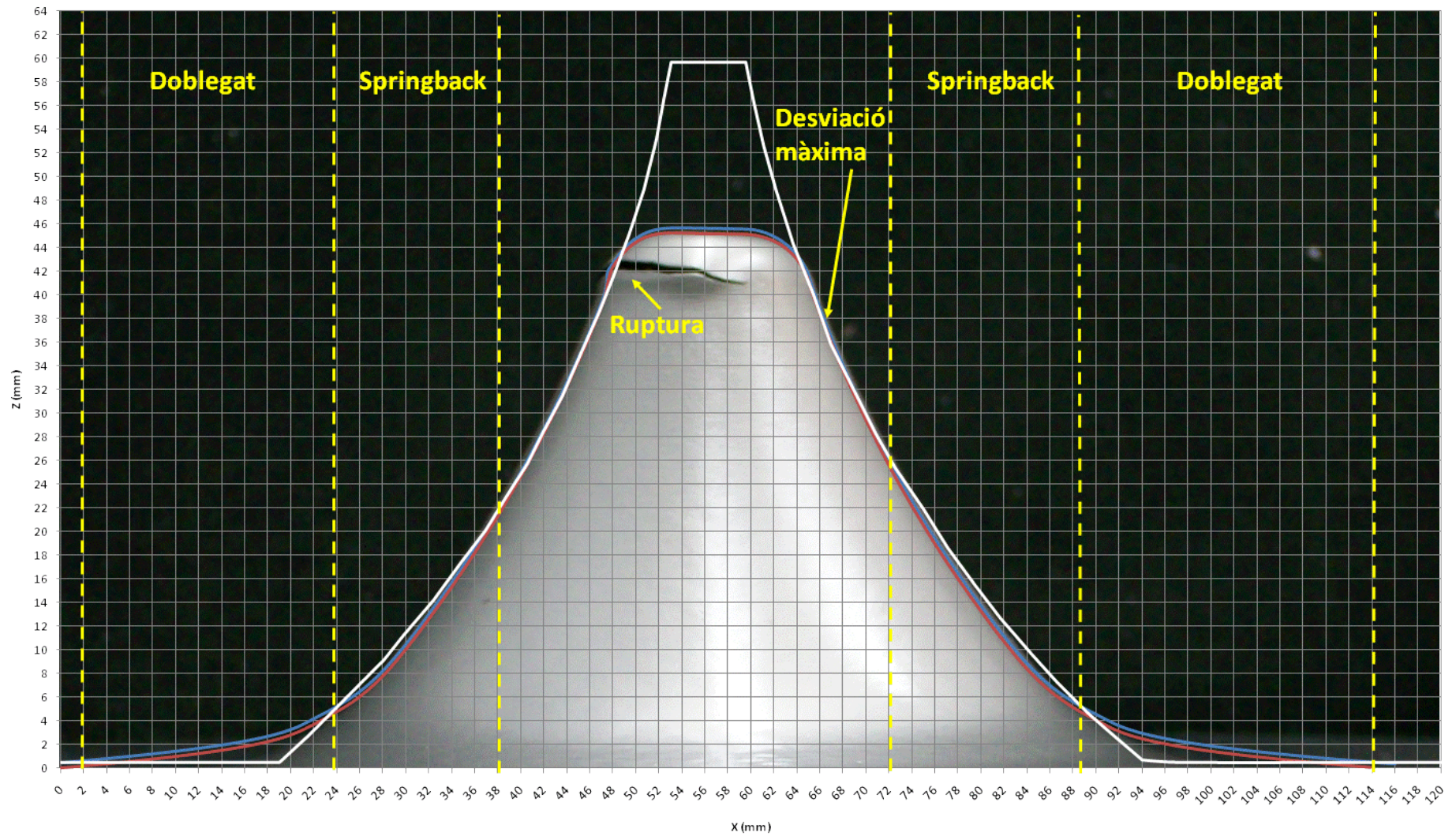


Figura 5.22. Precisió dimensional del cas 2.2 en l'eix horitzontal.

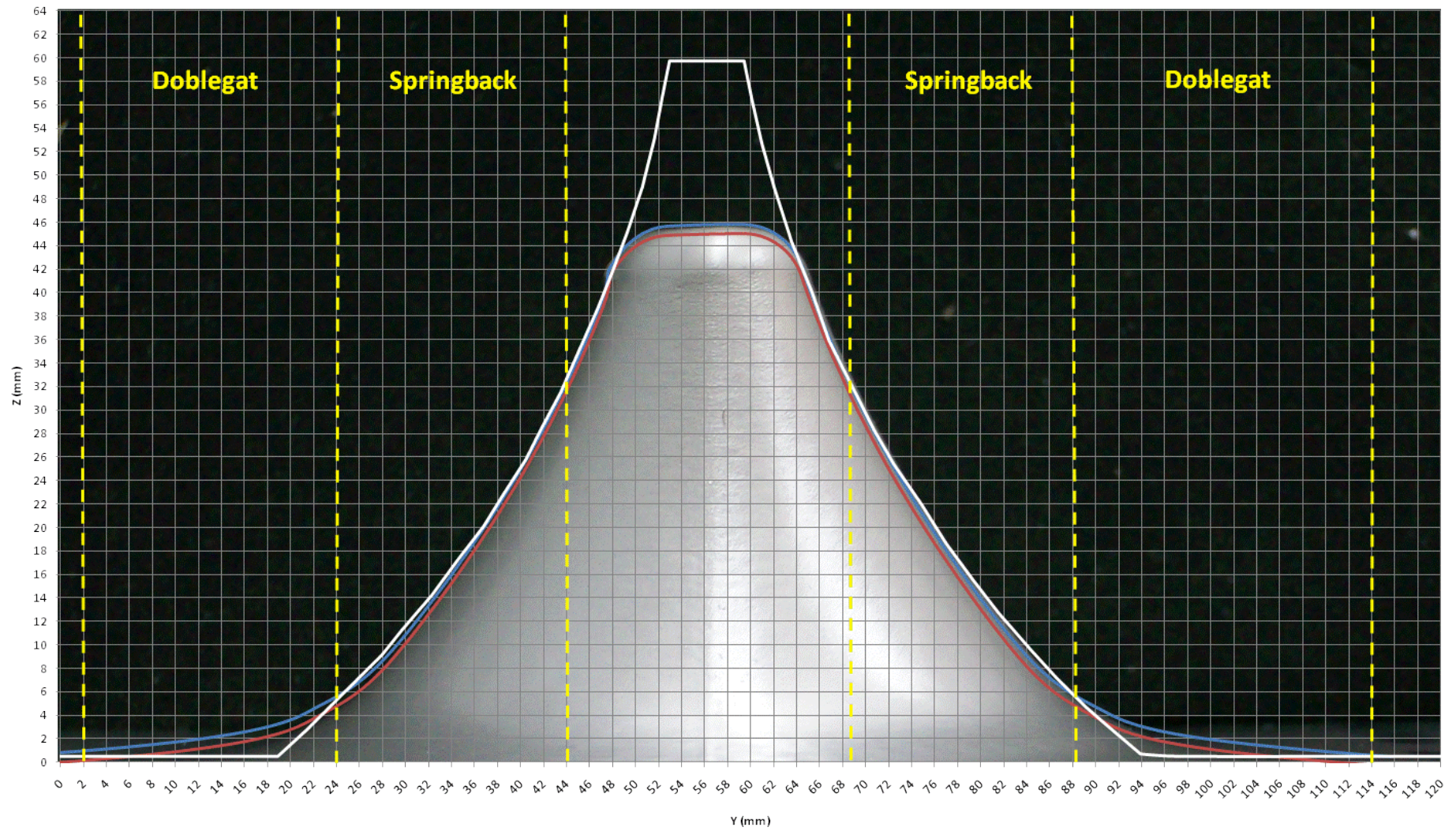


Figura 5.23. Precisió dimensional del cas 2.2 en l'eix vertical.

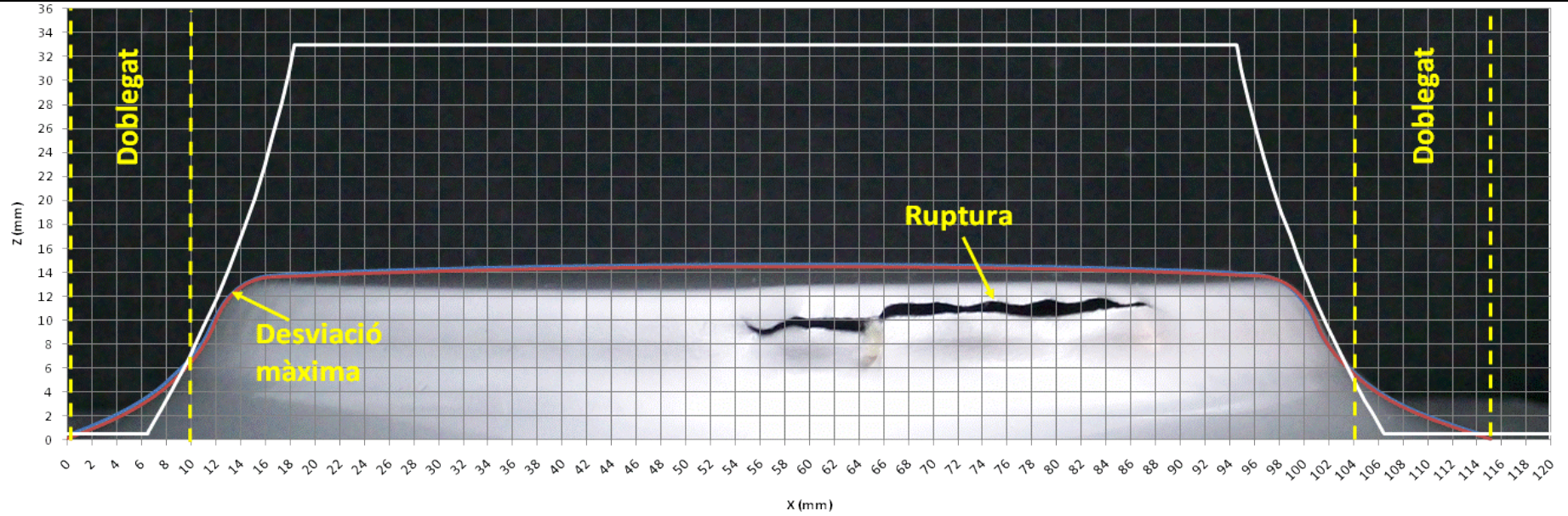


Figura 5.24. Precisió dimensional del cas 2.3 en l'eix horitzontal.

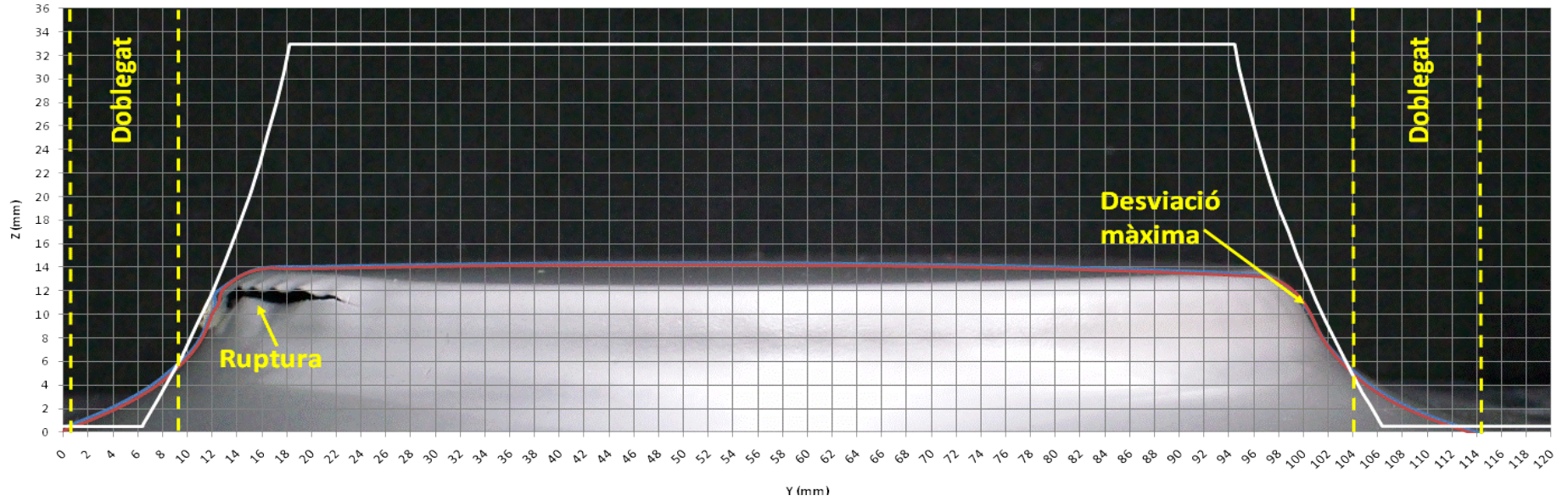


Figura 5.25. Precisió dimensional del cas 2.3 en l'eix vertical.

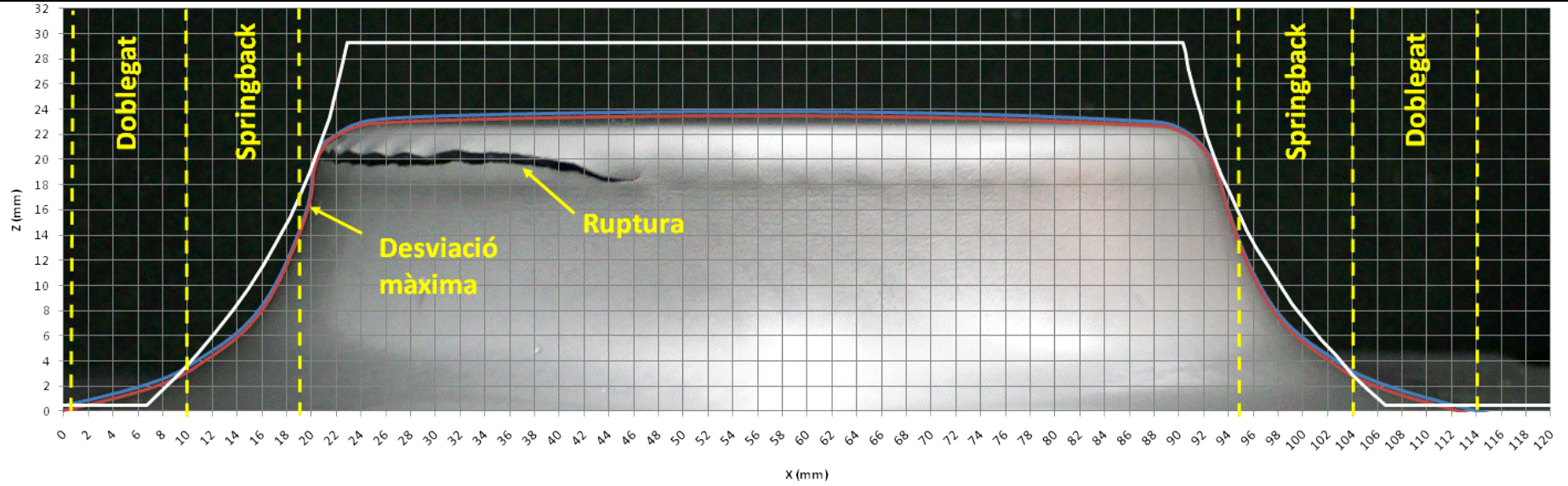


Figura 5.26. Precisió dimensional del cas 2.7 en l'eix horitzontal.

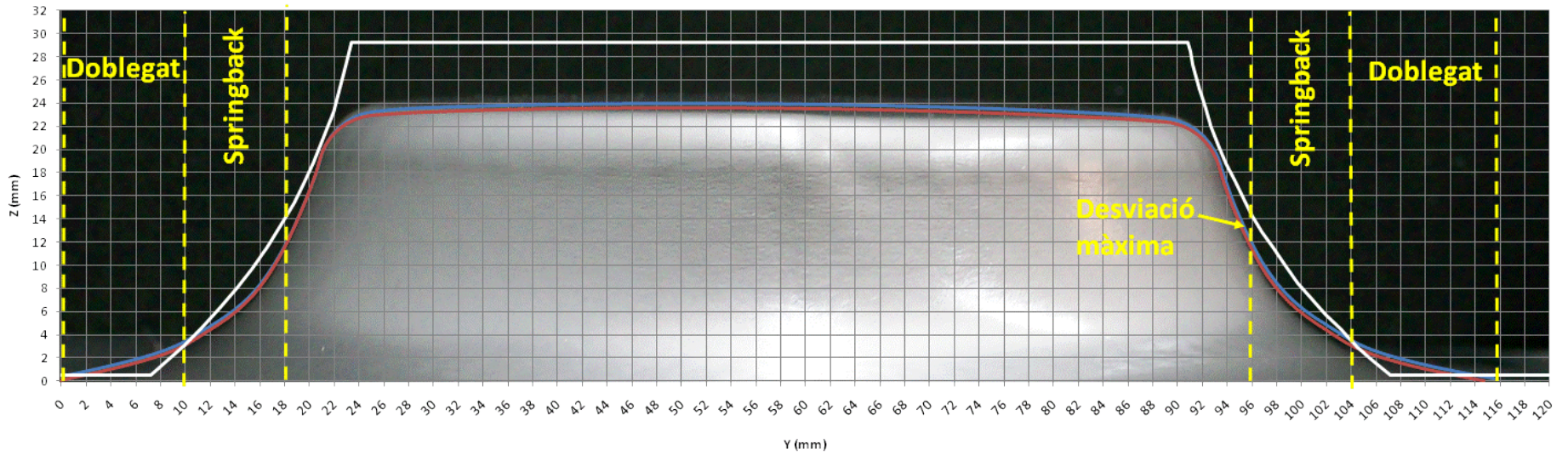


Figura 5.27. Precisió dimensional del cas 2.7 en l'eix vertical.

5.5 Simulació per elements finits

En aquest apartat es presentaran els resultats obtinguts en les simulacions realitzades amb un software d'elements finits, el LS-DYNA.

Dins el marc del present projecte, només es tindran en compte els resultats que es puguin comparar amb les mesures experimentals. Per tant, malgrat sigui possible determinar, per exemple, els esforços o les deformacions de la xapa, no s'avaluaran ja que no es disposa de dades experimentals per a contrastar. Malgrat disposar d'informació experimental sobre els límits de formabilitat, no es compararan amb els resultats de les simulacions ja que el model d'elements finits no inclou criteris de falla, amb la qual cosa no és possible predir quan apareixerà la ruptura. En resum, es podran comparar els resultats relacionats amb les forces de conformat i amb la precisió dimensional.

No s'ha pogut dur a terme les simulacions dels tots els casos plantejats en els dissenys d'experiments degut principalment a l'elevat temps computacional que comporten (entre 3 i 8 dies), motiu pel qual s'han seleccionat únicament una sèrie de casos (diferents materials o gruix) per tal de testejar el model d'elements finits desenvolupat. Els casos escollits són els anomenats 1.1, 1.2 i 2.1.

5.5.1 Forces

A la Taula 5.7 es resumeixen els resultats obtinguts de força màxima experimental (F_{max}) i força màxima obtinguda en les simulacions d'elements finits (F_{sim}). Els valors de les forces de la simulació també s'han filtrat amb el mètode de la mitjana mòbil per tal de poder realitzar una comparació més correcta amb els valors experimentals.

Taula 5.7. Valors de força màxima experimental (F_{max}) i obtinguda a partir de la simulació (F_{sim}).

Test ID	A (°)	RG (mm)	D (mm)	T (mm)	M	F_{max} (N)	F_{sim} (N)
1.1	40	100	100	0.5	AA1050-H24	132.137	141.5
1.2	40	47.5	100	0.8	AA1050-H24	305.687	291.3
2.1	60	47.5	75	0.5	AISI 304	1036.200	1202.1

A part d'obtenir els valors màxims també s'ha representat l'evolució de les forces de conformat amb l'evolució de l'angle de paret, tant pel cas experimental com en la simulació. D'aquesta manera és possible determinar si la predicció numèrica s'ajusta bé a la realitat.

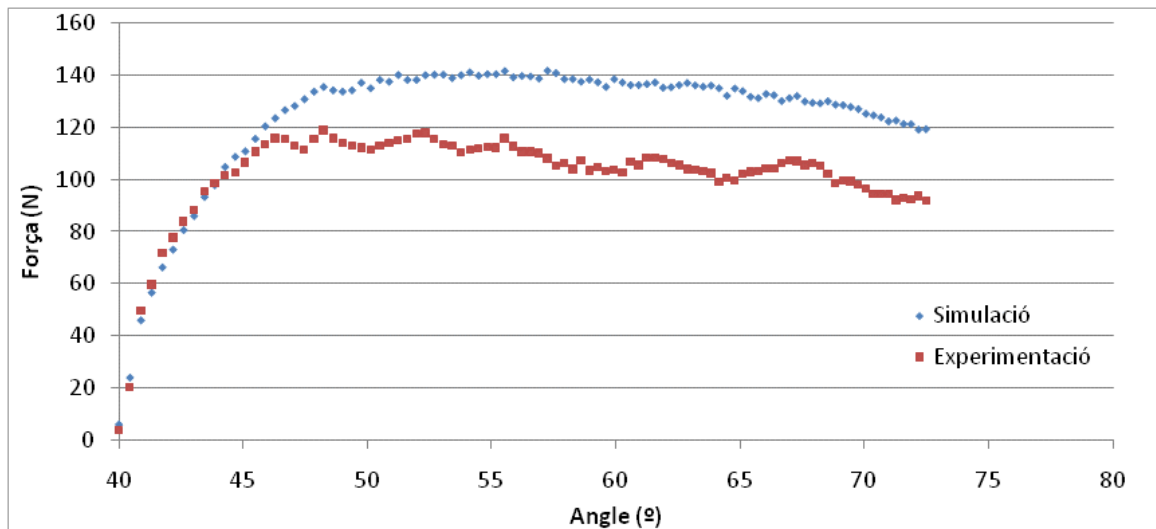


Figura 5.28. Evolució de les forces de conformat (experimentació i simulació) en funció de l'angle, cas 1.1.

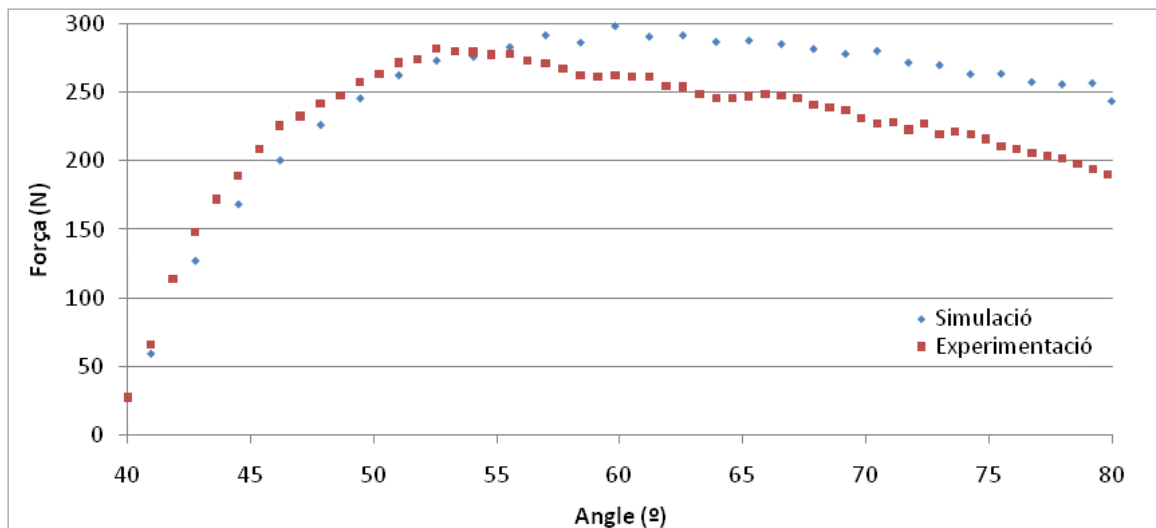


Figura 5.29. Evolució de les forces de conformat (experimentació i simulació) en funció de l'angle, cas 1.2.

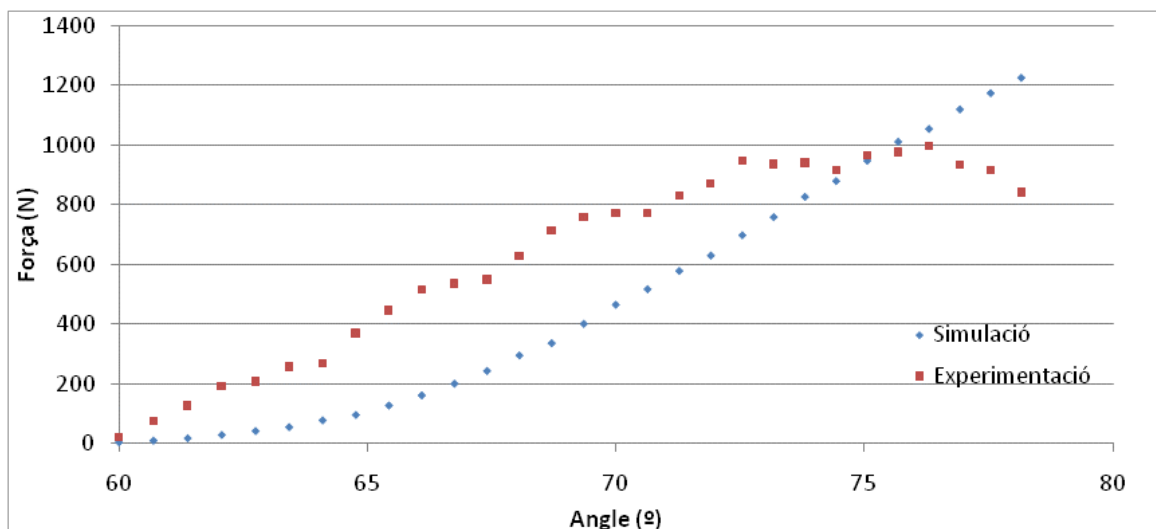


Figura 5.30. Evolució de les forces de conformat (experimentació i simulació) en funció de l'angle, cas 2.1.

5.5.2 Precisió

Per tal d'avaluar la precisió s'ha representat el perfil de la peça obtinguda en la simulació (en blau) conjuntament amb el perfil experimental (en vermell) i el teòric (en verd). A més s'adjunten unes imatges de la representació de la peça final per elements finits i de la peça real.

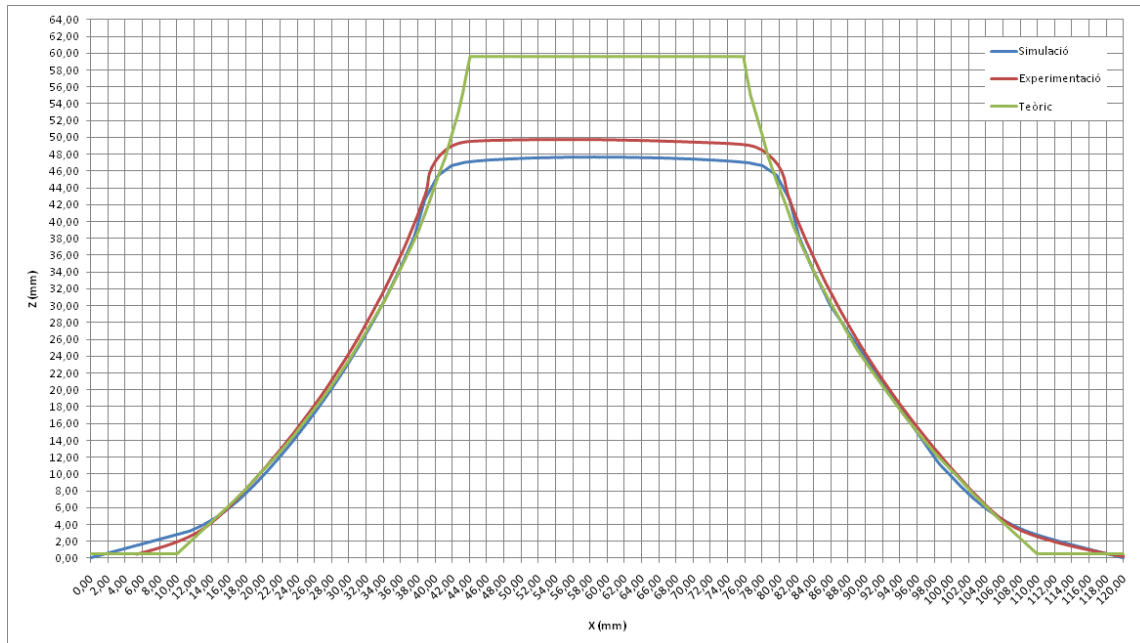


Figura 5.31. Precisió dimensional del cas 1.1.

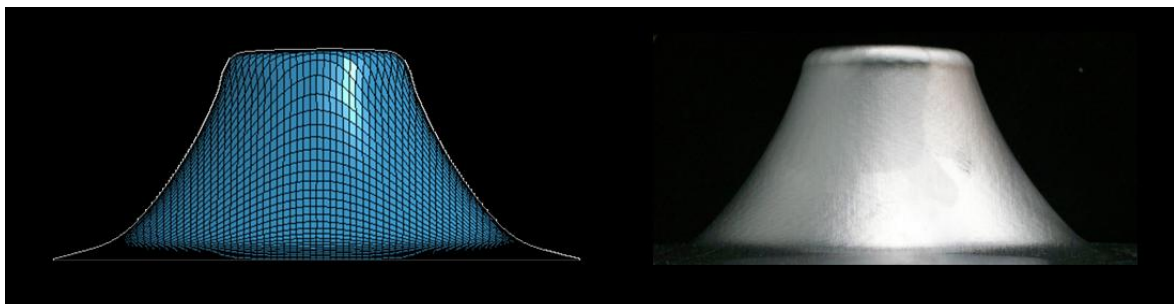


Figura 5.32. Imatge de l'estat final del cas 1.1.

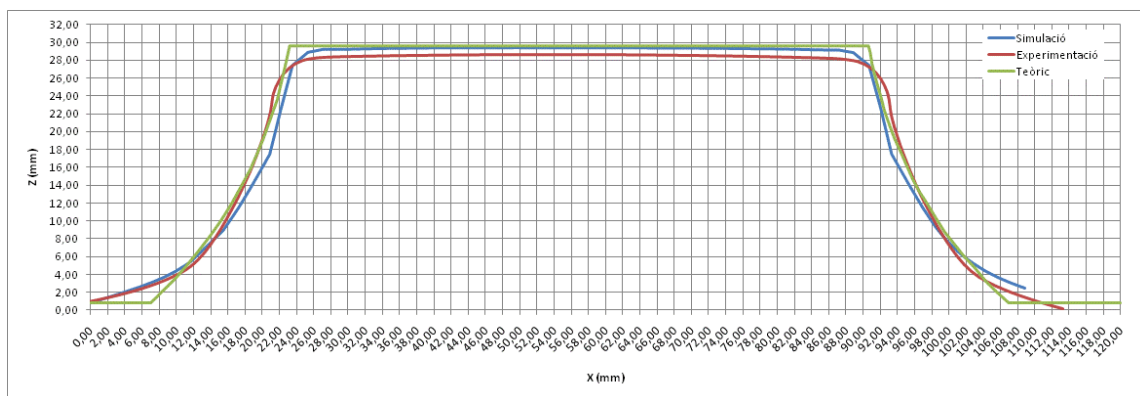


Figura 5.33. Precisió dimensional del cas 1.2.

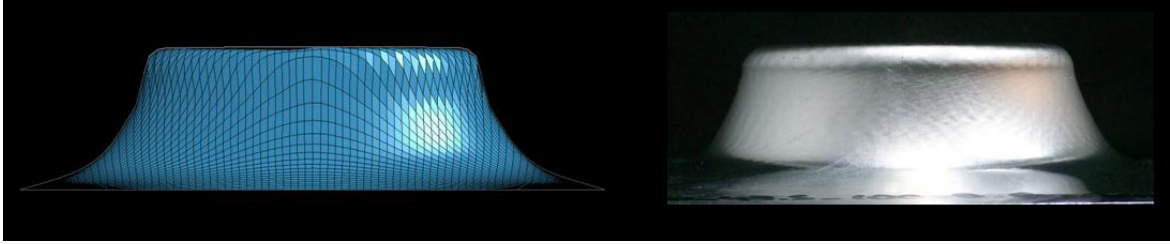


Figura 5.34. Imatge de l'estat final del cas 1.2.

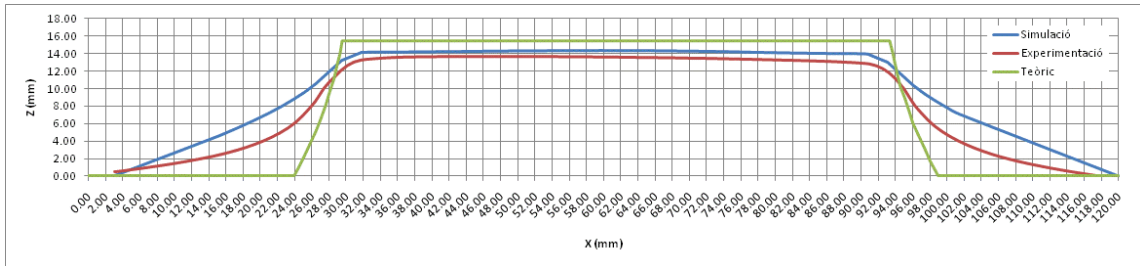


Figura 5.35. Precisió dimensional del cas 2.1.

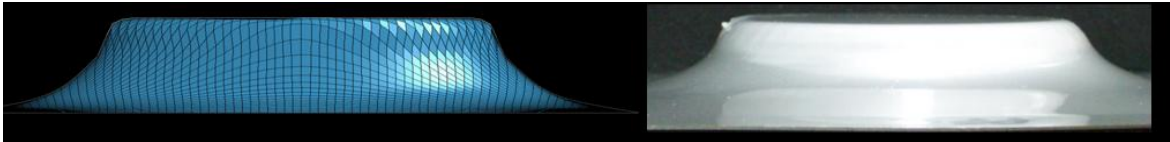


Figura 5.36. Imatge de l'estat final del cas 2.1.

6 Anàlisi i discussió dels resultats

6.1 Forces

Per tal de determinar la influència dels paràmetres d'entrada (angle, radi de generatriu, diàmetre, gruix i material) en els resultats de la força màxima s'ha dut a terme un anàlisi estadístic ANOVA amb el programa Minitab.

Primerament cal fer un test de normalitat per a comprovar que els valors de força màxima dels diferents assajos dels dos dissenys d'experiments s'ajusten a una recta.

A la Figura 6.1 es pot comprovar que en el cas del disseny d'experiments 1 els 8 punts no s'ajusten de manera adequada a una recta. A més es poden apreciar dos grups de punts diferenciats: uns al voltant dels 150 N i els altres al voltant dels 300 N. Aquests grups corresponen respectivament als gruixos de xapa de 0.5 i 0.8 mm.

En el cas del DOE 2 (Figura 6.2) també es poden diferenciar dos grups de punts que corresponen a l'alumini i a l'acer inoxidable.

Per tant, per tal d'obtenir un resultat de l'anàlisi estadístic més coherent s'ha decidit separar el tractament dels resultats en dos grups per a cada un dels DOE.

Seguint aquest procediment s'aprecia una millora considerable en l'ajust a la recta, tal i com es mostra resumit a la Taula 6.1.

El següent pas consisteix en representar gràficament l'efecte que tenen els diferents paràmetres en els valors de força. Quan més inclinada sigui la recta que es representa, significa que l'efecte és més significatiu. La línia central representa el valor mitjà dels diferents resultats. Aquestes gràfiques es troben a la Taula 6.1.

Finalment, amb l'anàlisi de la variància es pot obtenir una equació matemàtica que permeti predir el valor de la força màxima en altres experiments, sempre tenint en compte que el rang de valors dels paràmetres d'entrada ha de ser similar a l'utilitzat per a obtenir aquesta equació.

L'equació és obtinguda té els coeficients a , b , c i d que es mostren a l'expressió (Eq. 6.1). Els coeficients estan resumits a la Taula 6.1 pels diferents casos.

$$Fz_{\max} = a + b \cdot A + c \cdot RG + d \cdot D \quad (\text{Eq. 6.1})$$

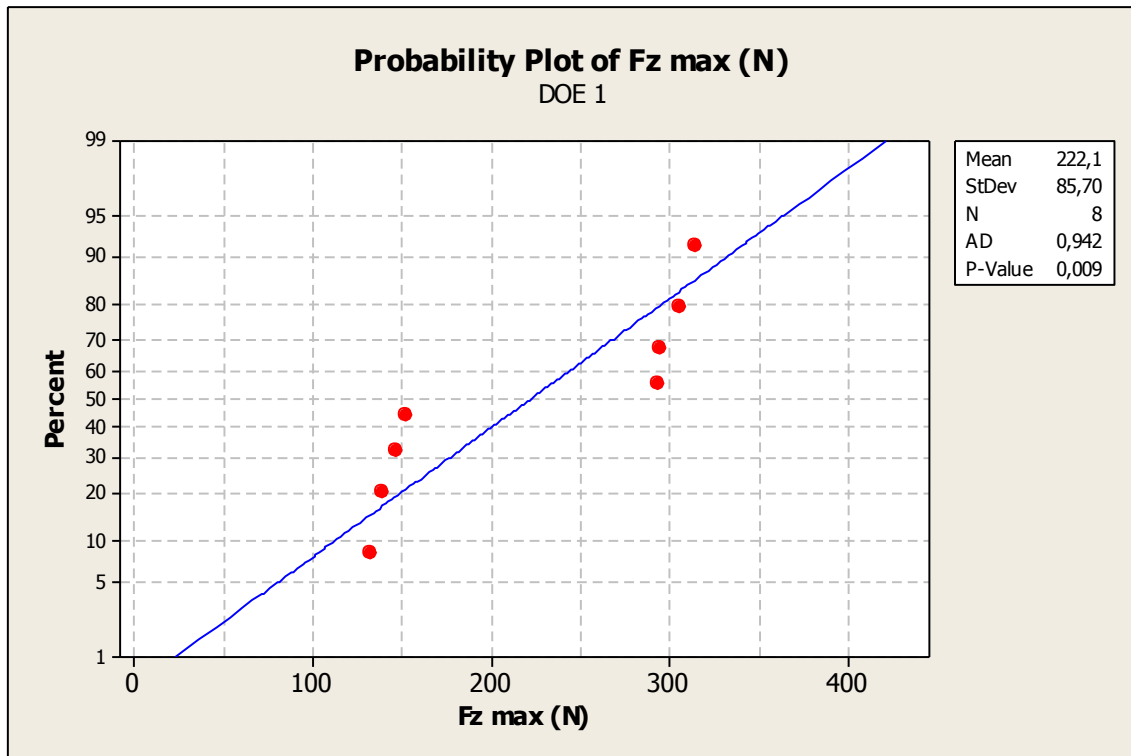


Figura 6.1. Resultat del test de normalitat pel DOE 1.

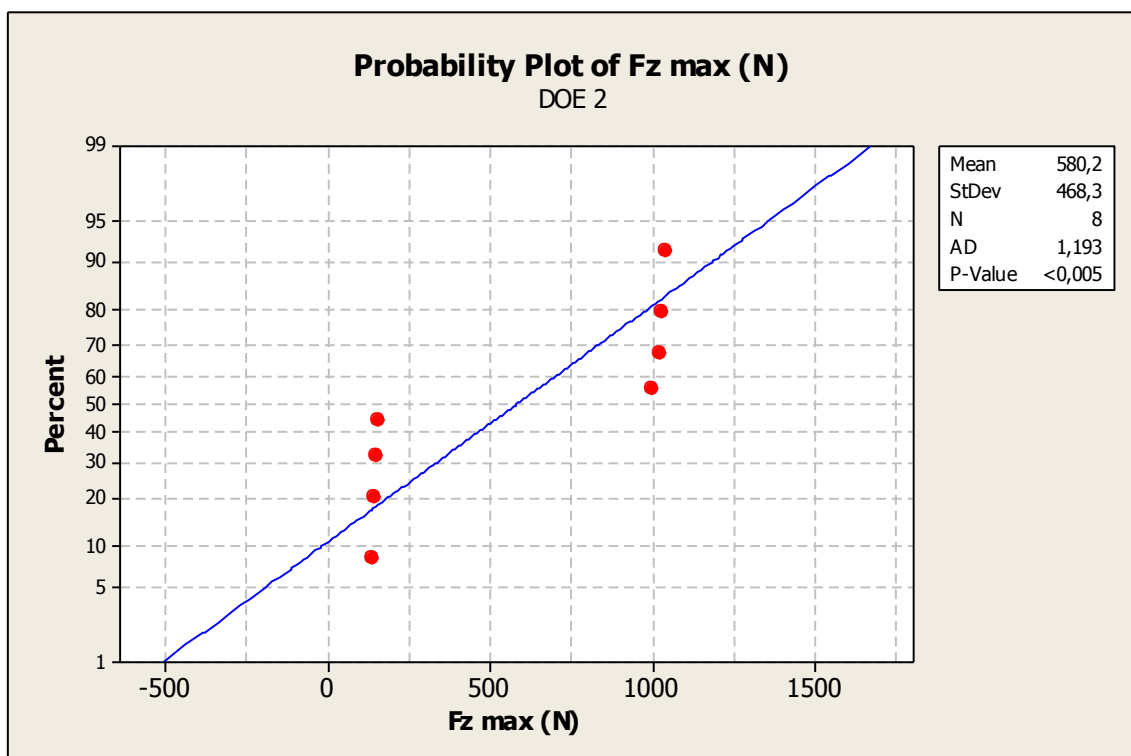
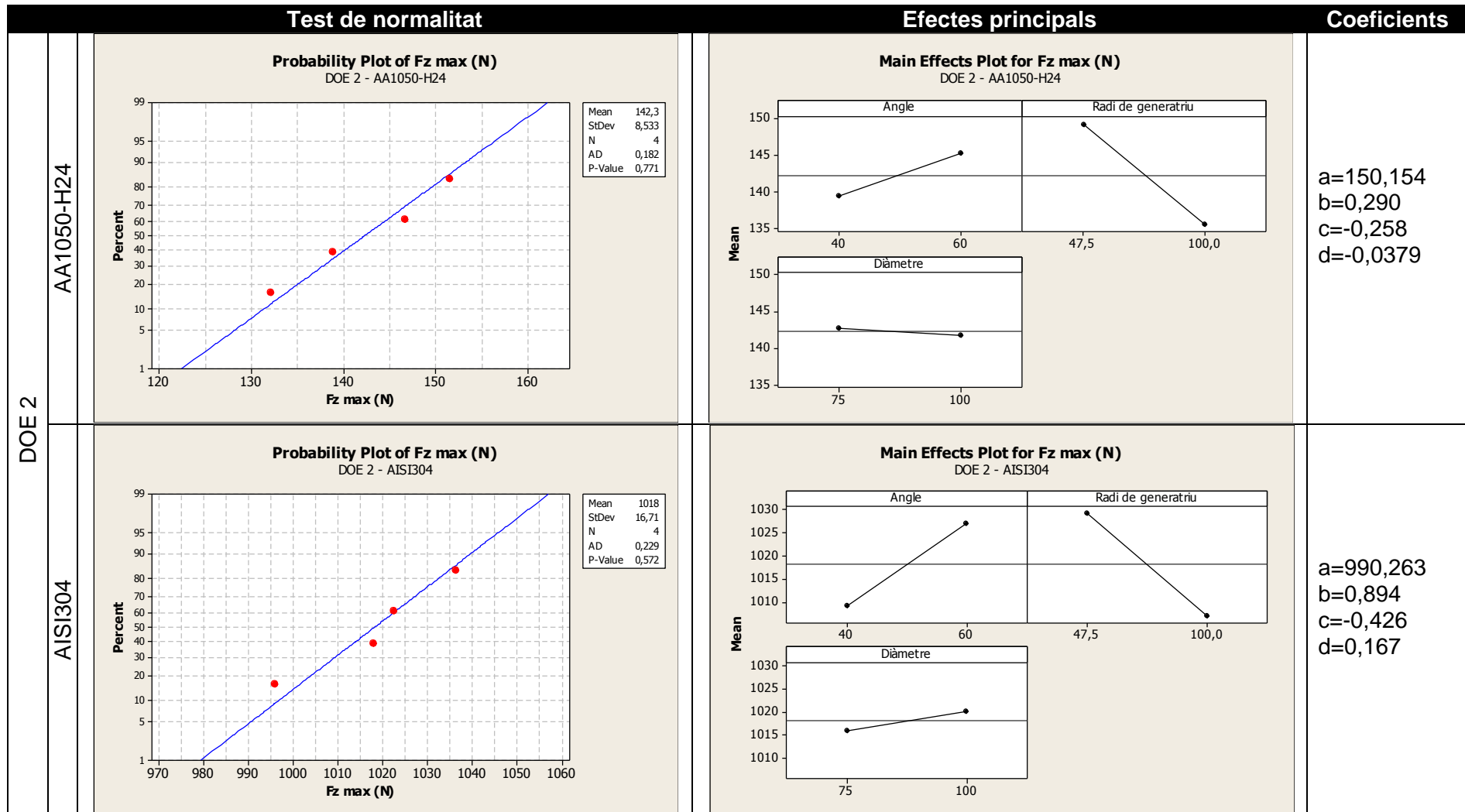


Figura 6.2. Resultat del test de normalitat pel DOE 2.

Taula 6.1. Resum del test de normalitat, efectes principals i coeficients de l'equació (Eq. 6.1).

		Test de normalitat	Efectes principals	Coeficients
DOE 1	0.5 mm	<p>Probability Plot of Fz max (N) DOE 1 - 0.5 mm</p> <p>Mean 142,3 StDev 8,533 N 4 AD 0,182 P-Value 0,771</p>	<p>Main Effects Plot for Fz max (N) DOE 1 - 0.5 mm</p>	<p>$a=150,154$ $b=0,290$ $c=-0,259$ $d=-0,0379$</p>
	0.8 mm	<p>Probability Plot of Fz max (N) DOE 1 - 0.8 mm</p> <p>Mean 301,8 StDev 9,945 N 4 AD 0,311 P-Value 0,338</p>	<p>Main Effects Plot for Fz max (N) DOE 1 - 0.8 mm</p>	<p>$a=348,579$ $b=-0,808$ $c=0,090$ $d=-0,148$</p>



En el cas del DOE 1 i gruix 0.5 mm, es pot veure clarament que el diàmetre no té un efecte significatiu en el valor màxim de la força, mentre que el radi de generatriu és el que té un efecte més important (a més radi menys força i al revés). L'angle té un efecte bastant menys important que el radi de generatriu (a més angle més força).

Pel DOE 1 i gruix de xapa de 0.8 mm, el diàmetre continua sense tenir un efecte significativament rellevant, mentre que l'angle passa a ser el que influeix més en la força màxima i amb una tendència inversa al cas anterior (a més angle menys força). El radi de generatriu té una influència intermèdia i amb una tendència oposada en comparació al cas de gruix de xapa de 0.5 mm.

En el DOE 2 el diàmetre té un efecte en el valor de la força màxima que es pot considerar menyspreable pels dos materials estudiats (aliatge d'alumini i acer inoxidable). En canvi, el radi de generatriu és el que té un efecte més important. La tendència en els dos materials és molt similar i es pot dir que a més radi de generatriu la força màxima serà menor. L'angle també presenta una tendència molt similar en els dos materials i a mesura que augmenta, la força màxima també.

L'efecte que en general han presentat l'angle i el diàmetre en la força màxima ja s'havia reportat en treballs d'investigació anteriors. De fet, el seu efecte queda reflectit en la fórmula empírica d'Aerens (Eq. 4.2), en la qual el diàmetre de la geometria no apareix en l'equació mentre que l'angle inicial sí. En canvi, en cap estudi realitzat fins al 2010 no es demostra l'efecte del radi de generatriu. Gràcies a aquesta contribució ha estat possible publicar un article d'investigació (Bagudanch et al., 2011b).

Pel que fa a l'aplicabilitat de l'equació d'Aerens a geometries d'angle de paret variable, en el DOE 1 es pot veure que l'error obtingut entre el valor calculat i el mesurat (Eq. 4.4) és relativament baix (en pràcticament tots els casos és inferior al 7% tal i com es mostra a la Taula 5.3) i positiu, cosa que significa que la fórmula prediu el valor de la força en excés, per tant, del costat de la seguretat.

En canvi, en el DOE 2 es pot observar que l'error pel cas de l'acer inoxidable és molt més gran (al voltant d'un 20%, veure Taula 5.4) i negatiu, per tant amb l'ús de la fórmula s'obté un valor inferior al mesurat a la pràctica. Aquest fet podria ser degut a les característiques pròpies del material. L'acer inoxidable a mesura que s'incrementa la deformació es va endurint i aquest efecte no es té en compte a l'equació, en què únicament es considera la resistència última a tracció i no el coeficient n de l'equació de Swift. Per tant, es podria considerar que l'equació d'Aerens es pot utilitzar per a tenir una idea del valor de força màxima que s'assolirà en geometries d'angle de paret variable, però sempre tenint en compte que hi ha el risc que amb la fórmula es calculi una força inferior a la real i que per tant pugui haver-hi perill de danyar la màquina.

Els resultats obtinguts en les simulacions són bastant satisfactoris en el cas d'utilitzar l'aliatge d'alumini ja que l'error en la predicció de la força màxima és relativament reduït. Si s'analitza la tendència de la força a mesura que augmenta l'angle (Figura 5.28 i Figura 5.29), es pot apreciar que la simulació prediu un valor en l'estat estable més alt que el real. Si bé l'ideal seria que la predicció s'ajustés al màxim a la realitat, el fet que predigui valors superiors no és perjudicial, ja que proporciona un factor de seguretat i redueix el risc de danyar la màquina quan les càrregues siguin

més elevades. En canvi, quan es tracta de la simulació realitzada amb l'acer inoxidable la predicció no és tant acurada (Figura 5.30). Aquest fet pot ser degut a que el model del material no és suficientment correcte, amb la qual cosa seria convenient realitzar algunes altres proves per tal de millorar-lo.

6.2 Límits de formabilitat

Per tal de determinar la influència dels paràmetres d'entrada (angle, radi de generatriu, diàmetre, gruix i material) en els resultats dels límits de formabilitat s'ha dut a terme un anàlisi estadístic ANOVA amb el programa Minitab.

Primerament cal fer un test de normalitat per comprovar que els valors dels límits de formabilitat (LF) dels diferents assajos dels dos dissenys d'experiments s'ajusten a una recta (veure Taula 6.2).

Com que els punts s'ajusten de manera relativament acurada a la recta, el següent pas consisteix en la representació gràfica dels efectes que tenen els 4 factors de cada DOE en el valor de LF. Quan més pendent té la recta, la influència és més forta (veure Taula 6.2).

Finalment, s'han obtingut unes equacions per a predir el valor de LF per al DOE 1 (Eq. 6.2) i el DOE 2 (Eq. 6.3) considerant els efectes principals i les interaccions. Els coeficients de cada una es troben resumits a la Taula 6.2.

$$LF = a + b \cdot A + c \cdot RG + d \cdot D + e \cdot G + f \cdot A \cdot RG + g \cdot A \cdot D + h \cdot A \cdot G \quad (\text{Eq. 6.2})$$

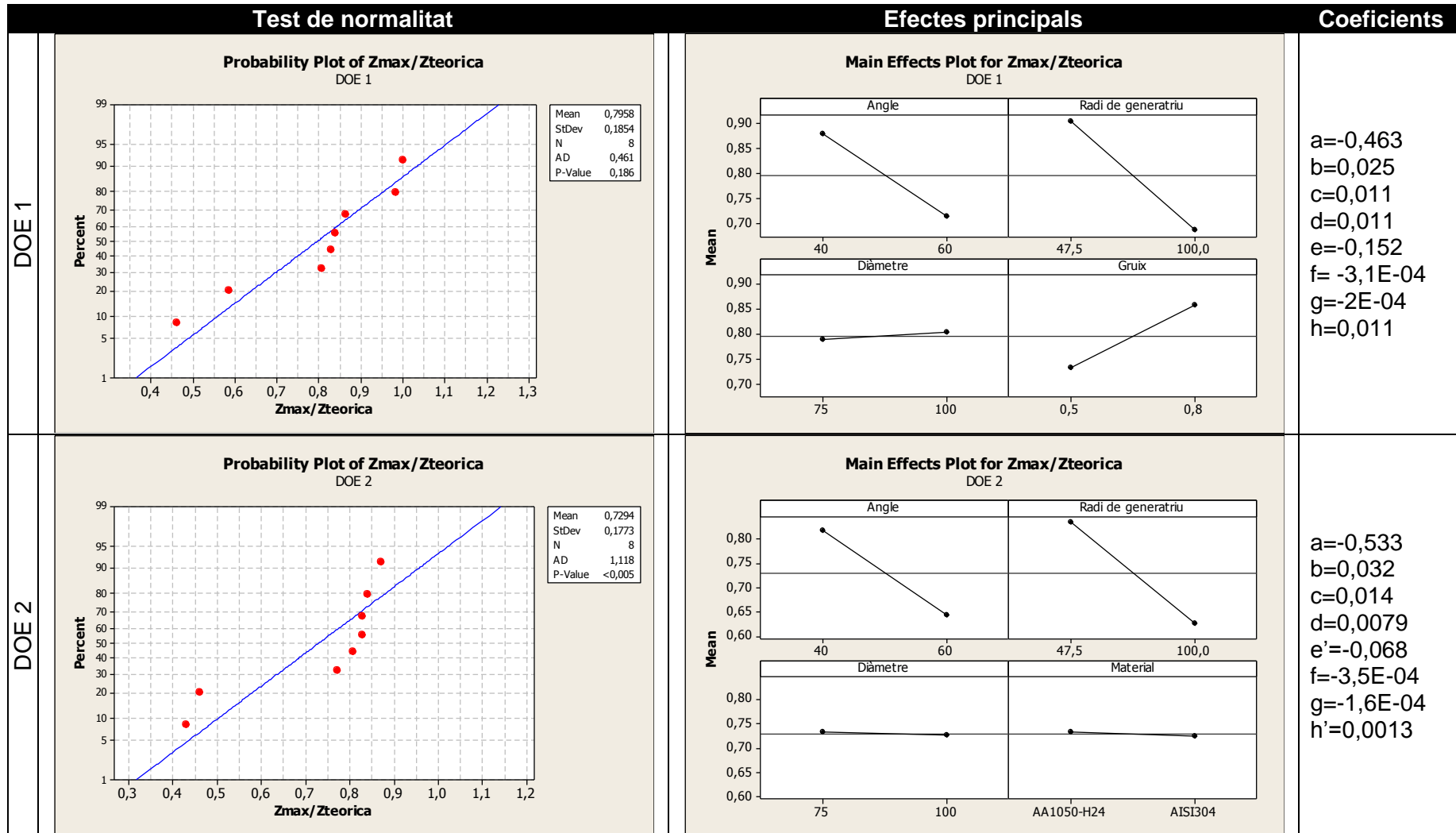
$$LF' = a + b \cdot A + c \cdot RG + d \cdot D + e' \cdot M + f \cdot A \cdot RG + g \cdot A \cdot D + h' \cdot A \cdot M \quad (\text{Eq. 6.3})$$

Els resultats mostren que el diàmetre no té cap efecte en el valor de límit de formabilitat, com també s'ha comprovat en l'anàlisi referent a la força màxima. També es pot determinar que pels dos materials estudiats no hi ha diferència significativa amb els valors de LF.

Els paràmetres que tenen una influència major són el radi de generatriu i l'angle. Quan aquests augmenten, LF disminueix. Tenint en compte que els resultats mostren que l'angle màxim que s'obté oscil·la entre 70 i 80°, és lògic que si l'angle inicial és de 60° el límit de formabilitat serà més baix que si és 40°, ja que està més proper al valor límit.

El gruix de la xapa també té una influència destacable, obtenint-se un LF superior amb l'augment del gruix. Aquest fet també és coherent ja que si la xapa és més gruixuda, té més capacitat per a aprimar-se, cosa que permet que es puguin assolir profunditats o angles de paret més elevats.

Taula 6.2. Resum del test de normalitat, efectes principals i coeficients de l'equació (Eq. 6.2) i (Eq. 6.3).



6.3 Precisió

Mesurant els perfils de les peces amb la màquina de coordenades s'ha pogut detectar la zona en què la xapa apareixia doblegada i no deformada i la zona on ha tingut lloc de manera remarcable el fenomen de la recuperació elàstica. Descartant aquestes zones s'ha determinat el punt on la desviació dimensional deguda pròpiament al procés és màxima.

En general es pot afirmar que les peces de diàmetre 100 mm tenen una zona de doblegat molt reduïda tal i com s'esperava inicialment, ja que hi ha poca zona lliure entre el punt on hi ha l'eina i el marc de l'utilatge. En canvi, en les peces de diàmetre 75 mm la zona de doblegat augmenta i es fa especialment notable quan l'alçada teòrica que s'ha d'assolir és més baixa. En aquests casos, per tal de millorar la precisió, seria necessari utilitzar un *backing plate* (placa de suport) per tal de reduir la zona lliure.

Pel que fa a la recuperació elàstica o *springback*, en les xapes d'acer inoxidable el seu efecte és més destacable que en el cas d'utilitzar aliatge d'alumini. La millor manera de reduir la recuperació elàstica i les desviacions dimensionals seria utilitzar la variant de *Two Point Incremental Forming* (TPIF) i construir un motlle de material econòmic, com podria ser la fusta.

Finalment, s'ha observat que en la major part dels experiments la desviació màxima té lloc en les últimes etapes del procés. En aquest cas també seria recomanable utilitzar una matriu per a millorar la precisió. Malgrat tot, els resultats obtinguts en aquest projecte són acceptables si es compara amb el que està reportat a la bibliografia, en què alguns casos es parla de desviacions de fins a 5 mm, mentre que aquí la desviació màxima oscil·la entre uns 0.5 i 3 mm (veure des de Figura 5.4 a Figura 5.27).

Comparant els perfils de les peces obtingudes a les simulacions amb les reals i les teòriques, s'observa que la diferència no és excessiva (especialment en el cas de l'aliatge d'alumini) i que en general la simulació s'ajusta més al perfil teòric que al real. Això és bàsicament perquè a les simulacions no s'ha tingut en compte l'efecte de la recuperació elàstica (*springback*). Pel que fa al cas de l'acer inoxidable, l'error obtingut en els perfils és major, degut bàsicament a la recuperació elàstica. El fet que l'alçada sigui major que la real és perquè el model construït a les simulacions no considera la ruptura del material, amb la qual cosa no pot conèixer quan ha de parar de calcular perquè la xapa s'ha trencat.

7 Resum del pressupost

El total del pressupost del projecte sobre el disseny dels elements constitutius per adaptar el centre de mecanitzat Kondia HS1000 a la tecnologia de conformat incremental de xapa (*Incremental Sheet Forming*) ascendeix a un total de 22789.74 € (VINT-I-DOS MIL SET-CENTS VUITANTA-NOU AMB SETANTA-QUATRE CÈNTIMS). El detall del pressupost es pot consultar al document 4 Pressupost.

Girona, 1 de setembre de 2011

Isabel Bagudanch Frigolé

8 Conclusions

En aquest apartat es resumiran les principals conclusions obtingudes en el present projecte final de carrera.

Primerament cal remarcar que s'ha dissenyat i construït un utillatge que ha permès adaptar un centre de mecanitzat de CNC Kondia HS1000 per a dur a terme el procés conegut com a *Incremental Sheet Forming* (ISF) en el Grup de Recerca en Enginyeria del Producte, Procés i Producció (GREP). En les primeres etapes d'implantació d'aquesta tecnologia en el grup es desitja dur a terme recerca bàsica, per tant, s'ha optat per a la fabricació d'un utillatge de dimensions reduïdes ja que permet un estalvi de material i de temps de procés.

A banda de l'adaptació física de la màquina també s'ha adaptat la part de software necessària per a la generació de les trajectòries de les peces per a poder ser fabricades. S'ha adaptat el software CAM de què disposa el GREP (GOelan) i que és específic per a processos de mecanització. És aconsellable utilitzar aquest programa quan les peces a fabricar amb ISF siguin complexes, sobretot quan es decideixi investigar en base a peces d'aplicació a l'àmbit industrial. A més, s'ha programat una rutina pròpia amb Python, útil únicament per a geometries bàsiques. Aquest últim programa és el que s'ha utilitzat en aquest projecte degut a la simplicitat d'ús i reducció de temps de preparació de les trajectòries.

Per tal d'assegurar que l'adaptació de la part software i hardware s'ha realitzat de manera adequada s'han dut a terme una sèrie d'experiments. Inicialment s'han fet unes proves preliminars per tal de decidir el tipus d'estratègia de conformat a seguir, el lubricant i sistema de lubricació i paràmetres de procés. A continuació s'han preparat dos dissenys d'experiments (DOE) amb 4 factors de 2 nivells cada un. La geometria seleccionada és un con truncat amb angle de paret variable.

S'ha pogut determinar que l'adaptació ha estat correcta i a més s'ha analitzat la influència dels paràmetres geomètrics (diàmetre, radi de generatriu i angle), tipus de material i gruix en els resultats finals gràcies a un anàlisi estadístic (ANOVA). Els paràmetres de sortida que han estat interès d'aquest projecte són la força màxima de conformat, el límit de formabilitat i la precisió dimensional.

El tipus de material i el gruix inicial de la xapa són els dos factors que provoquen una variació més important en la força màxima, tal i com també demostra l'equació empírica d'Aerens (Eq. 4.2) extreta de la revisió bibliogràfica. A part d'aquests dos paràmetres, els resultats obtinguts demostren que el radi de generatriu (en general, a més radi menys força) i l'angle inicial (en general, a més angle més força) de la geometria tenen una influència en el resultat de la força màxima, en canvi, el diàmetre no té cap efecte.

A més, s'ha demostrat que l'equació d'Aerens es pot aplicar no només en geometries d'angle de paret constant sinó també amb geometries d'angle de paret variable, tot i que el seu ús és recomanat únicament per tenir idea de l'ordre de magnitud de la força màxima i no per predir-ne el valor exacte.

Pel que fa al límit de formabilitat, els resultats demostren de nou que el diàmetre no té cap influència. El tipus de material tampoc no contribueix de manera significativa al valor de LF. Els paràmetres que sí tenen influència important són el radi de generatriu i l'angle (quan augmenten de valor, LF disminueix) així com el gruix inicial de la xapa (a més gruix, més LF).

A partir de l'anàlisi estadístic s'han obtingut unes equacions per a predir el valor de la força màxima i límit de formabilitat en unes condicions similars a les dels dissenys d'experiments plantejats. Malgrat haver pogut plantejar aquestes equacions no s'ha pogut comprovar la seva validesa. Faria falta realitzar experiments no inclosos en els DOE d'aquest projecte per tal de comprovar que l'error obtingut en les prediccions és suficientment baix.

Per tal d'avaluar la precisió dimensional de les peces fabricades s'ha mesurat el perfil obtingut amb una màquina de mesura de coordenades (MMC) i s'ha comparat amb el perfil teòric. D'aquesta manera ha estat possible determinar que les geometries de diàmetre 100 mm tenen una zona de doblegat molt reduïda ja que l'espai lliure entre la zona de contacte eina-xapa i el marc és inferior. En el cas de les geometries amb diàmetre de 75 mm, la zona de doblegat augmenta, sobretot quan l'alçada teòrica a assolir és més baixa. Per a millorar la precisió en aquesta zona es podria utilitzar una placa de suport o *backing plate*.

El fenomen de la recuperació elàstica o *springback* és molt més notable en les xapes d'acer inoxidable que en les d'aliatge d'alumini. Per tal de millorar la precisió i reduir la recuperació elàstica seria aconsellable utilitzar una matriu i, per tant, la variant del procés coneguda com *Two Point Incremental Forming* (TPIF). Aquesta matriu es pot construir amb materials tipus fusta o resines polimèriques, de manera que el cost és molt reduït.

És important comentar que la màxima desviació dimensional en la major part dels experiments realitzats té lloc en les últimes etapes del procés. La desviació màxima oscil·la entre el rang de valors típic que correspon al procés de SPIF. Si es desitja reduir la desviació es recomana també utilitzar la variant TPIF.

A part de l'experimentació també s'han fet algunes simulacions pel mètode d'elements finits (FEM) amb el programa LS-DYNA. No ha estat possible fer les simulacions de cada un dels casos d'aquest projecte degut principalment a l'elevat temps de càlcul que es necessita (entre 3 i 8 dies per a cada simulació).

L'error obtingut entre el valor de força màxima predit en les simulacions i el real és relativament reduït i la tendència de l'evolució de la força amb l'angle de paret és similar a la real malgrat tingui un valor més elevat. Pel que fa al perfil de les geometries també s'ajusta bastant a la realitat. Malauradament no es pot comparar el resultat experimental referent al límit de formabilitat amb les simulacions ja que el model no incorpora criteris de falla i no pot detectar el moment de ruptura de la xapa. Tot i això, és possible concloure que el model plantejat en les simulacions és satisfactori i es pot utilitzar per a predir el que succeirà en el procés.

A continuació, es mostra a la Taula 8.1 i a la Taula 8.2 si les especificacions plantejades inicialment a l'apartat 1.4 s'han assolit satisfactòriament o no.

Taula 8.1. Especificacions referents al disseny i construcció de l'utillatge.

Nom	R/D	Descripció	
Objectiu	R	Adaptar un centre de mecanitzat de control numèric per tal de realitzar experiments amb la tecnologia <i>Incremental Sheet Forming</i>	✓
Funció	R	Recopilar informació sobre dissenys utilitzats en diferents centres de recerca.	✓
	R	Dissenyar un utillatge que permeti subjectar la xapa de manera que s'impossibiliti el moviment d'aquesta durant l'execució del procés.	✓
	R	Disseny de l'eina (punxó) necessari per a deformar el material.	✓
	R	Adaptació al procés de ISF del software CAM per a processos de mecanitzat.	✓
	R	Assegurar la correcta integració entre la part hardware i software.	✓
Recursos	R	Centre de mecanitzat Kondia HS1000.	✓
	R	Centre de mecanitzat Deckel Maho 64V linear (per a la fabricació de l'utillatge).	✓
	R	Trepanadora.	✓
	R	Torn de control numèric Okuma LB-15.	✓
	R	Taula dinamomètrica Kistler 9257B.	✓
	R	Software de disseny mecànic, Inventor	✓
	R	Software CAM, GoElan v5	✓
Dimensions	R	Dimensions màximes de l'utillatge 250x250x150 mm per tal que les xapes de material siguin reduïdes i permeti estalvi de costos.	✓
	R	Es disposa d'un porta eines al qual s'hi poden acoblar eines en un rang entre 1 i 13 mm.	✓
Material	R	Xapes i tubs d'acer per a la fabricació de l'utillatge.	✓
	R	Barres d'acer d'eina per a la fabricació de l'eina.	✓
	R	Cargols i femelles per a les unions.	✓
	D	Utilitzar la màxima quantitat de peces disponibles al taller.	✓
Eines	R	Freses varies.	✓
	R	Broques.	✓
Metodologia	R	Proposar diferents dissenys i optar pel que permeti un millor equilibri entre costos i temps de construcció.	✓
	R	Testejar les diferents opcions dels programes CAM per aconseguir una correcta generació de la trajectòria.	✓
	D	Desenvolupar un nou programa per generar trajectòries.	✓
Terminis	R	Finalització juny de 2011.	✓
Muntatge	R	S'ha de poder desmuntar de la taula de treball amb facilitat per si el centre de mecanitzat s'ha de destinar a altres usos.	✓
	R	Ha de permetre l'acoblament amb la taula dinamomètrica Kistler.	✓
	D	Que sigui lleuger.	✓
Costos	R	Minimitzar el cost de l'utillatge.	✓
Altres	R	Considerar la compatibilitat amb altres tecnologies que es duran a terme a la Kondia HS1000.	✓

Taula 8.2. Especificacions referents a la recerca bàsica de ISF.

Nom	R/D	Descripció	
Objectiu	R	Validar l'adaptació del centre de mecanitzat de control numèric a partir de realitzar una bateria d'experiments.	✓
Funció	R	Conèixer en detall la tecnologia a partir de l'estat de l'art. Identificar línies de recerca i paràmetres de procés més utilitzats.	✓
	R	Realitzar una sèrie d'experiments per a la recerca bàsica (geometries senzilles i materials habituals).	✓
	D	Determinar si centres de mecanitzat convencionals poden ser útils per a la fabricació amb la tecnologia ISF.	✓
	D	Trobar un model per predir la força màxima del procés de conformat.	✓
Recursos	R	Centre de mecanitzat a utilitzar Kondia HS1000.	✓
	R	Màquina de coordenades Mitutoyo Crysta Apex 544.	✓
	R	Taula dinamomètrica Kistler 9257B.	✓
	R	Software de disseny mecànic, Inventor	✓
	R	Software CAM, GoElan v5	✓
	D	Software de simulació per elements finits, LS-DYNA	✓
	R	Lubricant	✓
Dimensions	R	Dimensions màximes de les xapes han de ser de 200x200x1 mm per tal que les xapes de material siguin reduïdes, permeti estalvi de costos i no se sobrepassi el valor màxim admissible de força axial (2000 N).	✓
	R	Geometries de diàmetre superior a 20 mm per evitar col·lisions amb el sistema de subjecció de l'eina.	✓
Material	R	Xapes d'alumini AA1050-H24 d'espessor 0.5 i 0.8 mm.	✓
	D	Xapes d'acer inoxidable AISI304 d'espessor 0.5 i 0.8 mm.	✓
	D	Xapes de PVC de 1 mm.	✗
Eines	R	Punxó semiesfèric, varis materials i diàmetre 10 mm.	✓
Metodologia	R	Realització d'un Disseny d'Experiments reduït (DOE).	✓
	R	Avaluació de la influència dels paràmetres d'entrada en els resultats finals mitjançant un anàlisi estadístic (ANOVA).	✓
	D	Caracterització de les xapes a partir de la realització d'assajos a tracció d'algunes provetes.	✓
	D	Realització de simulacions per elements finits del procés de ISF i comparar amb els resultats experimentals.	✓
Terminis	R	Finalització, agost de 2011.	✓
Experimentació	R	Experimentar amb diferents materials, geometries i espessors per validar el correcte funcionament del procés.	✓
	R	Mesurar forces de conformat i formabilitat de les peces obtingudes.	✓
Costos	R	Minimitzar el cost del material utilitzat.	✓

Com es pot comprovar, la majoria d'especificacions s'han complert i s'han aconseguit els principals objectius del projecte, amb la qual cosa, aquest s'ha finalitzat de manera satisfactòria.

Finalment, és important remarcar que gràcies a l'adaptació i a l'experimentació bàsica duta a terme en aquest projecte ha estat possible la publicació d'articles d'investigació en alguns dels principals congressos internacionals relacionats amb l'àmbit de processos de conformat de xapa, com per exemple el Shemet (*International Conference on Sheet Metal*) i ICTP (*International Conference on Technology of Plasticity*).

Girona, 1 de setembre de 2011

Isabel Bagudanch Frigolé

9 Línies futures

9.1 Camps d'aplicació

En un sector on el potencial de creixement d'utilització de la tecnologia de conformat incremental de xapa pot ser molt important és en el sector de l'automoció. Es poden tenir emmagatzemats els programes de CNC per a obtenir els diferents components, de manera que quan fes falta un recanvi es podria fer de forma molt ràpida i no hi hauria els costos associats a la producció en massa dels recanvis i al seu estucatge. També pot tenir molta importància la obtenció del programa per a fabricar el recanvi a partir de l'enginyeria inversa, és a dir, obtenir el CAD de la peça a partir de la mesura d'aquesta un cop està feta i d'aquí passar-ho a un programa CAM per tal de generar el programa de CNC necessari per a la fabricació de la peça.

En l'àmbit de l'arquitectura i de la construcció industrial també hi ha un possible potencial de creixement, ja que pot ser interessant aconseguir peces metàl·liques de geometries personalitzades. Ja s'està treballant, per exemple, en la conformació de panells sandwich prefabricats (Jackson et al., 2008).

El sector de la biotecnologia també té un interès molt important, per tant, s'haurien de pensar en aplicacions diferents a les existents (Ambrogio et al., 2005a; Oleksik et al., 2010a), provar amb diferents materials (magnesi, titani...) i comparar el resultat amb altres tecnologies. Dins aquest àmbit en el GREP ja s'ha començat a treballar i fins i tot s'ha pogut presentar un article al congrés VRAP (*International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*) en què es fabrica a escala ampliada un fórceps per a biòpsia.

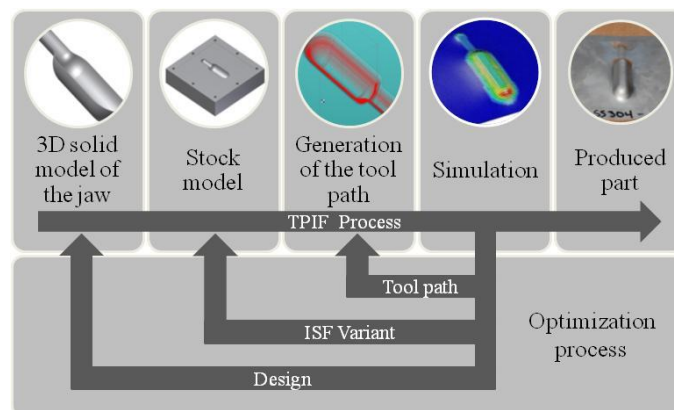


Figura 9.1. Cadena de procés per a la obtenció d'un fórceps per a biòpsia (Pérez-Santiago et al., 2011c).

9.2 Materials

Es podria provar de treballar amb materials metàl·lics poc habituals degut a que són excessivament complicats de deformar en fred i intentar trobar algun mecanisme per a millorar-ne la conformabilitat (lubricant, tipus d'eina, aportació de calor...).

També es podria pensar en treballar no solament materials metàl·lics sinó també amb materials plàstics. Estudis molt recents comencen a aplicar la tècnica de ISF amb el PVC (Silva et al., 2010). De fet, en el GREP ja s'han fet algunes proves

experimentals amb PVC i PC tot i que encara s'han de millorar notablement alguns paràmetres de procés per tal d'aconseguir peces d'una qualitat acceptable.



Figura 9.2. Exemple de dues peces de PVC fabricades amb la tecnologia ISF en el GREP.

9.3 Acabat/precisió de la peça final

Cada vegada és més important l'estètica i l'ergonomia de la peça final, cosa que en molts processos productius no sempre es pot aconseguir o resulta econòmicament viable. Gràcies a aquesta tecnologia pot ser possible obtenir productes amb aquests requeriments d'una manera ràpida i econòmica. Per tant, un factor important és aconseguir una millora del procés en quant a la qualitat de l'acabat final. Així, la tècnica de ISF es podrà imposar en un futur en els segments de mercat que exigeixin aquestes característiques.

Un dels problemes més importants que afecten no solament a ISF sinó a la majoria de tècniques de conformació de xapa és la recuperació elàstica que pateix la xapa un cop s'ha acabat de conformar. Ja comença a haver-hi algun treball on s'estudia com es pot evitar o si més no reduir la recuperació elàstica (Bambach et al., 2009). Es podria treballar amb aconseguir models d'elements finits que prediguin de manera adequada la recuperació elàstica i així poder optimitzar el procés sense malgastar material.

9.4 Control del procés

Actualment es realitzen controls off-line, amb la qual cosa és necessari tenir models de simulació que aconseguixin una concordança molt elevada entre els valors predits i els valors reals. Per tant, és molt important conèixer bé els mecanismes de deformació que intervenen en el procés i també obtenir una modelització adequada d'aquests. Els materials metàl·lics segueixen lleis bastant conegudes i són relativament fàcils de caracteritzar, el problema està relacionat principalment amb la simulació de materials polimèrics, ja que les seves característiques depenen fortament de la temperatura, condicions d'operació, etc.

Si es coneguessin com influeixen diferents paràmetres (tipus d'eina, trajectòria, lubricant, geometries, material...) fins i tot seria possible arribar a fer un control on-line del procés.

10 Relació de documents

Aquest projecte es compon dels següents documents:

- Document 1. Memòria i annexos a la memòria.
- Document 2. Plànols.
- Document 3. Plec de condicions.
- Document 4. Pressupost.

11 Bibliografia

- Aerens R, Eyckens P, Bael A, Duflou JR (2010) Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and FEM observations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 46:969-982.
- Allwood JM, Braun D, Music O (2010) The effect of partially cut-out blanks on geometric accuracy in incremental sheet forming. *Journal of Materials Processing Technology* 210:1501-1510.
- Ambrogio G, Costantino I, Denapoli L, Filice L, Fratini L, Muzzupappa M (2004) Influence of some relevant process parameters on the dimensional accuracy in incremental forming: a numerical and experimental investigation. *Journal of Materials Processing Technology* 153-154:501-507.
- Ambrogio G, Denapoli L, Filice L, Gagliardi F, Muzzupappa M (2005) Application of Incremental Forming process for high customised medical product manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology* 162-163:156-162.
- Ambrogio G, Filice L, Manco GL (2008) Considerations on the Incremental Forming of Deep Geometries. *International Journal of Material Forming* 1:1143-1146.
- Attanasio a, Ceretti E, Giardini C (2006) Optimization of tool path in two points incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology* 177:409-412.
- Bagudanch I, Pérez-Santiago R, García-Romeu ML (2011)(a) Tool path strategies for Single Point Incremental Forming In *Key Engineering Materials* , p. 905-912.
- Bagudanch I, Pérez-Santiago R, García-Romeu ML, Rodriguez C (2011)(b) Forming Force in SPIF of Variable Wall Angle Components: FEM Modeling and Experimental Results In *10th International Conference on Technology of Plasticity Aachen*, p. 1-6.
- Bambach M, Hirt G, Reimers W (2008) ERROR CONTROL IN EXPLICIT FINITE ELEMENT SIMULATIONS OF INCREMENTAL SHEET METAL FORMING. *Analysis* 49:715-720
- Bambach M, Taleb Araghi B, Hirt G (2009) Strategies to improve the geometric accuracy in asymmetric single point incremental forming. *Production Engineering* 3:145-156.
- Emmens WC, Sebastiani G, Boogaard a H van den (2010) The technology of Incremental Sheet Forming—A brief review of the history. *Journal of Materials Processing Technology* 210:981-997.
- Fratini L, Ambrogio G, Lorenzo R Di, Filice L, Micari F (2004) Influence of mechanical properties of the sheet material on formability in single point incremental forming. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 53:207-210.

- Hussain G, Gao L, Dar N (2007) An experimental study on some formability evaluation methods in negative incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology* 186:45-53.
- Jackson K, Allwood J, Landert M (2008) Incremental forming of sandwich panels. *Journal of Materials Processing Technology* 204:290-303.
- Jeswiet J, Micari F, Hirt G, Bramley a, Duflou J, Allwood J (2005) Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 54:88-114.
- Oleksik V, Pascu A, Deac C, Fleaca R, Roman M, Bologa O, Barlat F, Moon YH, Lee MG (2010)(a) The Influence of Geometrical Parameters on the Incremental Forming Process for Knee Implants Analyzed by Numerical Simulation. *Romania:1208-1215*.
- Oleksik V, Pascu A, Mara D, Bologa O, Racz G, Breaz R (2010)(b) Influence of Geometric Parameters on Strain and Thickness Reduction in Incremental Forming Process. *Metal Forming:8-11*
- Pérez-Santiago R, Bagudanch I, García-Romeu ML (2011)(a) Force Modeling in Single Point Incremental Forming of Variable Wall Angle Components In *Key Engineering Materials* , p. 833-840.
- Pérez-Santiago R, Bagudanch I, García-Romeu ML, Hendrichs N (2011)(b) Forming force prediction in single point incremental forming of uniform and variable wall angle components. *Journal of Materials Processing Technology:1-32*
- Pérez-Santiago R, García-Romeu ML, Bagudanch I (2011)(c) Fabrication of a Biopsy Micro-Forceps Prototype with Incremental Sheet Forming In *5th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*
- Rauch M, Hascoet J-Y, Hamann J-C, Plenel Y (2009) Tool path programming optimization for incremental sheet forming applications. *Computer-Aided Design* 41:877-885.
- Silva MB, Alves LM, Martins P a F (2010) Single point incremental forming of PVC: Experimental findings and theoretical interpretation. *European Journal of Mechanics - A/Solids* 29:557-566.

12 Glossari

12.1 Abreviacions

ANOVA: Analysis of Variance. Anàlisi estadístic que permet identificar els paràmetres o factors que tenen més influència sobre una determinada resposta.

CAD: Computer Aided Design. Software que assisteix en les etapes de disseny.

CAM: Computer Aided Manufacturing. Software que permet assistir al procés de fabricació, per exemple, generant les trajectòries de les eines.

CNC: Control Numèric Computaritzat.

DOE: Design of Experiments (disseny d'experiments).

FEM: Finite Element Method.

FLC: Forming Limit Curve.

ISF: Incremental Sheet Forming. Tecnologia de conformat incremental de xapa.

ISMF: Incremental Sheet Metal Forming. Als inicis de l'aparició de la tecnologia ISF s'utilitzava com a sinònim, actualment ha perdut rellevància ja que també s'ha experimentat amb polímers i compòsits.

MMC: Màquina de Mesura per Coordenades.

SPIF: Single Point Incremental Forming. Variant del procés de ISF que no requereix l'ús de matriu.

STEP: tipus de format d'arxiu.

TPIF: Two Point Incremental Forming. Variant del procés de ISF que utilitza una matriu total o parcial construïda amb materials de baix cost (fusta, resines...).

UWA: Uniform Wall Angle. Fa referència a geometries que tenen angle de paret constant.

VWA: Variable Wall Angle. Fa referència a geometries que tenen angle de paret variable.

12.2 Símbols

α : angle inicial de la peça a formar ($^{\circ}$).

α_{max} : angle màxim assolit en el procés de ISF ($^{\circ}$).

$\Delta\theta$: increment angular. Permet definir el pas incremental de la trajectòria de l'eina. ($^{\circ}$).

Δh : scallop height (altura de cresta). Permet definir el pas incremental de la trajectòria de l'eina. (mm).

Δz : depth step (profunditat de baixada). Permet definir el pas incremental de la trajectòria de l'eina. (mm).

ϵ : deformació real.

ϵ_0 : paràmetre de la llei d'enduriment o de Swift.

σ : tensió real (MPa).

A: angle inicial de la geometria utilitzada en aquest projecte ($^\circ$).

D: diàmetre de la geometria utilitzada en aquest projecte (mm).

d_t : diàmetre de l'eina. Equació d'Aerens. (mm).

F_{max}: força de conformat màxima mesurada experimentalment.

F_{sim}: força de conformat màxima obtinguda en la simulació per elements finits.

F_{z_s}: força de conformat en l'estat estable. Equació d'Aerens. (N).

K: paràmetre de la llei d'enduriment o de Swift (MPa).

LF: Límit de Formabilitat, relació entre la Z_{max} i Z_{teòrica}.

M: tipus de material utilitzat en aquest projecte.

n: paràmetre de la llei d'enduriment o de Swift.

RG: radi de generatriu de la geometria utilitzada en aquest projecte (mm).

R_m: resistència a tracció del material. Equació d'Aerens. (MPa).

T: gruix de la xapa utilitzada en aquest projecte (mm).

t_o: gruix inicial de la xapa. Equació d'Aerens. (mm).

Z_{max}: alçada màxima assolida (mm).

Z_{teòrica}: alçada teòrica de la geometria (mm).

ANNEXOS

A Estat de l'art

En aquest apartat es descriuran breument els principals aspectes a tenir en compte relacionats amb la tecnologia de ISF que s'han anat desenvolupant durant els últims anys: tipus de procés, materials utilitzats, camps d'aplicació, etc.

A.1 Tipus de procés

A.1.1 Single Point Incremental Forming (SPIF)

En aquest procés només hi ha un punt on la força s'aplica de manera simultània i aquest punt és en la zona de contacte entre l'eina i la xapa. No s'utilitza una matriu parcial o total, per tant, la xapa només està suportada pels extrems mitjançant un utillatge. A la Figura A.1 es pot veure una representació esquemàtica del procés.

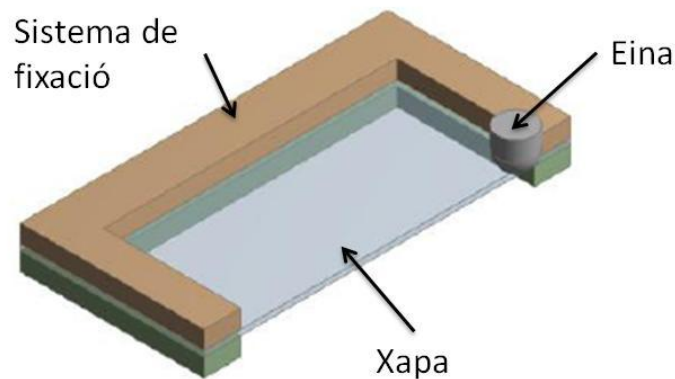


Figura A.1. Esquema del procés SPIF.

És la variant més simple i també de les més estudiades. En l'article (Jeswiet et al., 2005) es fa una extensa revisió de l'estat de l'art i es descriuen algunes de les característiques més importants de SPIF. El principal inconvenient és que al no disposar d'una matriu on es pugui recolzar la xapa la recuperació elàstica (*springback*) és molt important. Per tal de compensar aquesta desviació s'ha d'optimitzar la trajectòria de l'eina de manera que deformi més del compte. Així, després de la recuperació elàstica la xapa es trobarà al punt desitjat.

A.1.2 Two Point Incremental Forming (TPIF)

S'anomena conformat incremental de dos punts degut a que hi ha dos punts on s'aplica força de manera simultània. El primer és, com en el cas de SPIF, la zona de contacte entre l'eina i la xapa. El segon correspon a la zona on hi ha el contacte xapa-matriu. Aquesta matriu pot ser total o parcial i negativa o positiva. S'entén que és negativa quan l'eina està en contacte amb la part interior de la peça i positiva quan és al contrari (l'eina està en contacte amb la part exterior). En el cas de tenir una matriu positiva és necessita d'un sistema que permeti desplaçar axialment el sistema de

fixació i la xapa de manera sincronitzada amb l'eina. A la Figura A.2 es mostra un esquema del procés.

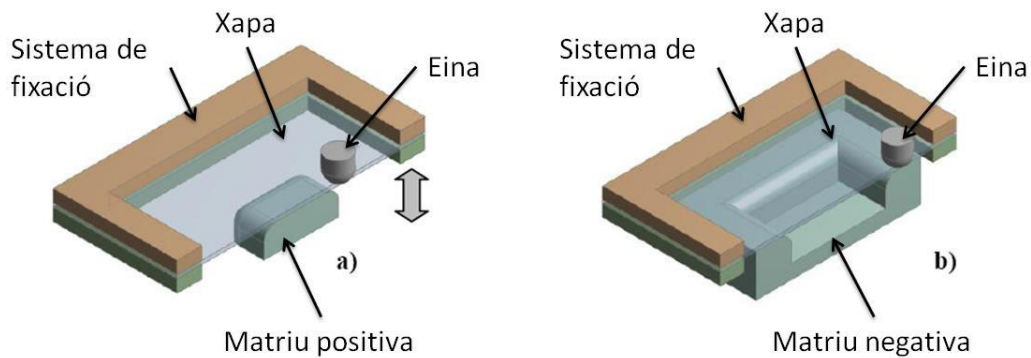


Figura A.2. Esquema del procés TPIF: a) amb matriu positiva i b) amb matriu negativa.

Aquesta variant no està tant estudiada en la literatura i els treballs que hi ha publicats demostren que les precisions dimensionals que s'obtenen són molt millors en comparació a SPIF (Fiorentino et al., 2009).

La matriu es pot construir a partir de materials molt comuns i fàcils de mecanitzar (fusta, resines, etc.) per tant, els costos associats a la fabricació del suport no suposa un inconvenient a l'hora de fabricar lots reduïts.

A.1.3 ISF en calent

Es tracta de combinar la tecnologia de ISF (ja sigui en la seva variant SPIF o TPIF) amb un sistema d'escalfament. L'avantatge que proporciona l'escalfament és que permet augmentar la formabilitat de materials que a temperatura ambient és molt complicat deformar-los. Exemples de materials poden ser aliatges de magnesi (AZ31) o aliatges de titani (Ti6Al4V).

Els sistemes d'escalfament utilitzats fins al moment en treballs d'investigació consisteixen en:

- *Rotational ISF*. Escalfament local produït a partir del fregament entre l'eina que gira a una elevada velocitat de rotació i el material (Park et al., 2009).

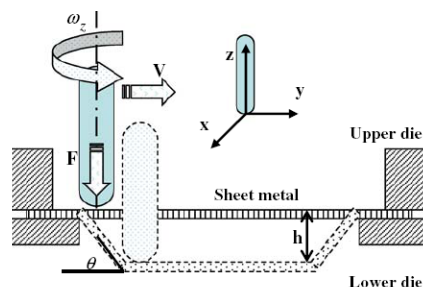


Figura A.3. Esquema de funcionament de la tecnologia Rotational Incremental Sheet Forming.

- *Sistema d'escalfament unit al dispositiu de fixació de la xapa*. Es tracta de col·locar una banda calefactors al voltant del dispositiu de fixació de la xapa, de manera que aquesta s'escalfa globalment. Entre la taula de treball

i aquest utilatge s'hi col·loca un sistema de refredament per no transmetre calor a la màquina (Ambrogio et al., 2008a).

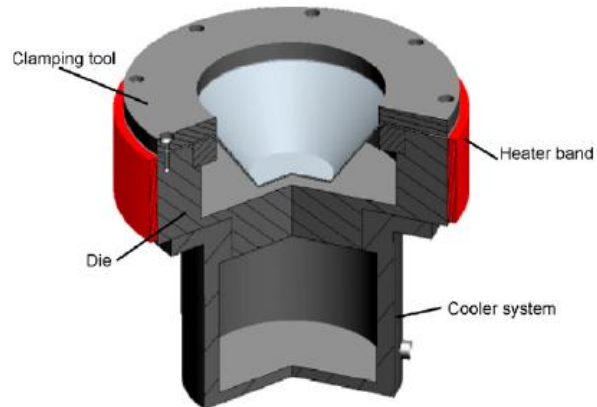


Figura A.4. Sistema d'escalfament unit al dispositiu de fixació de la xapa.

- **Cambra calefactorsa.** En aquest cas es col·loca una cambra calefactorsa que englobi tot el sistema per realitzar el procés de ISF (eina, utilatge i xapa) i proporciona un escalfament global (Zhang et al., 2009).

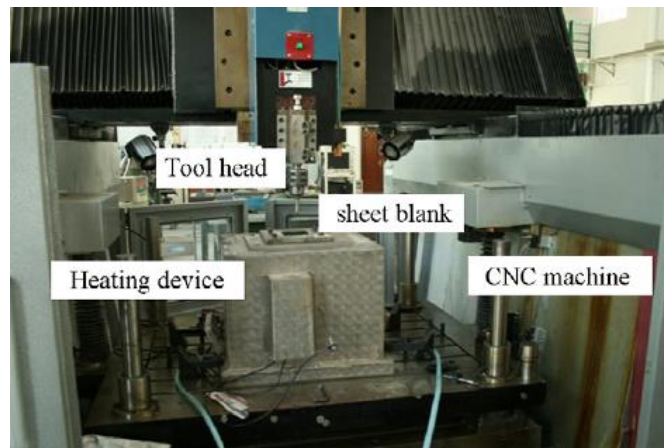


Figura A.5. Generació de calor a partir de cambra calefactorsa.

- **Generació de calor a partir de circuit elèctric.** Es forma un circuit elèctric de corrent continu entre l'eina i el material. Segons la llei de Joule, quan passa corrent pel circuit es genera calor que és la que s'aprofita per escalfar el material. La generació de calor està localitzada en la interfície eina-xapa. Per evitar que el corrent passi a la màquina es disposa d'un sistema d'aïllament amb polietilè (Fan et al., 2008).

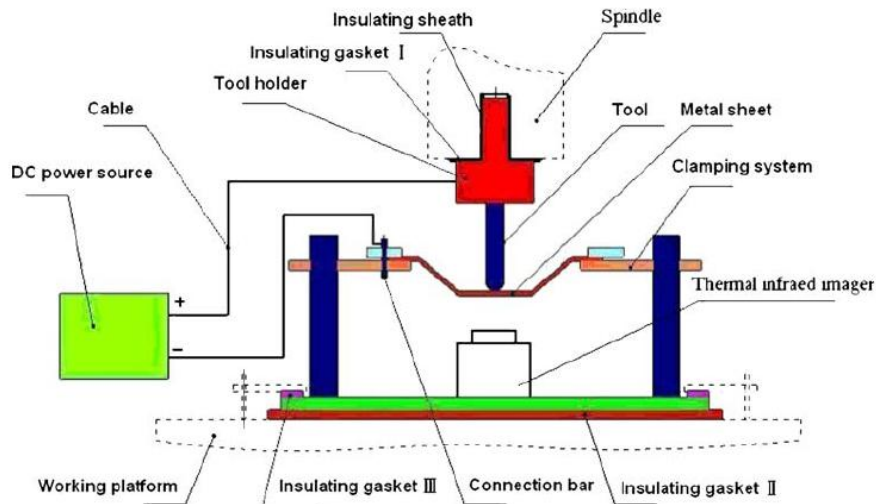


Figura A.6. Sistema d'escalfament localitzat generat a partir de circuit elèctric.

A.1.4 ISF combinat amb estirat (Stretch Forming)

Per tal de solucionar alguns dels principals inconvenients que actualment presenta la tecnologia de ISF (reducció de l'espessor de la xapa, precisió geomètrica i temps de procés), (Araghi et al., 2009) proposa combinar-ho amb Stretch Forming. A la Figura 13.7 es mostra una representació del funcionament del procés híbrid.

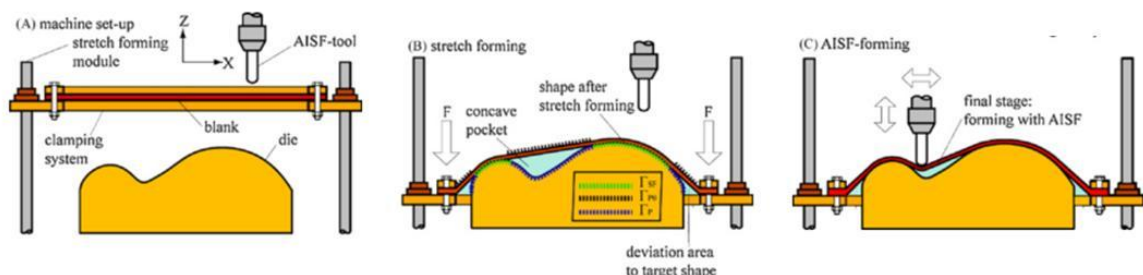


Figura 13.7. Principi de funcionament de la combinació ISF amb Stretch Forming. a) Muntatge experimental. b) Primera etapa: stretch forming. c) Segona etapa: ISF.

El procés de Stretch Forming (estirat) s'utilitza per crear una preforma en la primera etapa del procés. Només s'aconsegueix una aproximació de la geometria final. Les ranures, corrugacions o cavitats més profundes s'aconsegueixen en la segona etapa de la fabricació, és a dir, amb ISF.

A.2 Màquines

En principi qualsevol màquina de 3 eixos governada amb un control numèric es podria utilitzar per dur a terme el procés de ISF ja que permeten altes velocitats d'avanç, volum de treball gran i suficient rigidesa. A la literatura es poden trobar treballs realitzats amb les màquines que a continuació es descriuran.

A.2.1 Centres de mecanitzat CNC

És dels recursos més usuals ja que és una màquina molt freqüentment utilitzada en els tallers de fabricació. Per tant, es pot emprar la tecnologia de ISF sense necessitar una gran inversió en maquinària. Només és necessari dissenyar un utilitatge per fixar la xapa i, en cas que es vulgui fer TPIF positiu, s'ha de poder moure axialment de manera sincronitzada amb el punxó.

És degut a aquesta adaptació relativament econòmica de la màquina de control numèric que el procés de ISF pot ser interessant a nivell industrial, ja que moltes empreses disposen de fresadores CNC que poden quedar obsoletes per a processos de mecanitzat (probablement perquè no poden assolir velocitats considerades com *High Speed Machining*) però que poden tenir una vida útil més llarga si s'utilitzen pel conformat incremental de xapa. Per aquest motiu, la majoria d'articles d'investigació que es poden trobar actualment a la literatura utilitzen centres de mecanitzat.



Figura A.8. Sistema de fixació de la xapa en un centre de mecanitzat CNC (Jeswiet et al., 2005).

A.2.2 Màquines destinades únicament a ISF

En el mercat es poden trobar alguns fabricants de màquines dissenyades únicament per realitzar el conformat incremental de xapa. Un dels fabricants més rellevants és Amino.

Aquestes màquines permeten elevada velocitat d'avanç, volums de treball mitjans i estan equipades amb un sistema de subjecció de xapa amb moviment controlat, amb la qual cosa poden realitzar qualsevol de les variants més comunes del procés (SPIF, TPIF positiu o negatiu).



Figura A.9. Fotografia d'una màquina destinada a ISF de la marca AMINO (Jeswiet et al., 2005).

A.2.3 Robots industrials

La majoria d'indústries manufactureres disposen a les seves instal·lacions de robots industrials, per tant, alguns investigadors treballen per adaptar de manera viable el conformat incremental als robots. Les principals característiques és que el volum de treball pot ser molt gran, els moviments són molt ràpids, tenen baixa rigidesa i el límit màxim de forces que resisteixen és molt baix. Aquestes dues últimes característiques limiten el seu ús per a la tecnologia de ISF.

Utilitzant robots, es pot substituir la matriu parcial o total per un altre robot que actua com a eina de suport de la xapa, tal i com es pot apreciar a la

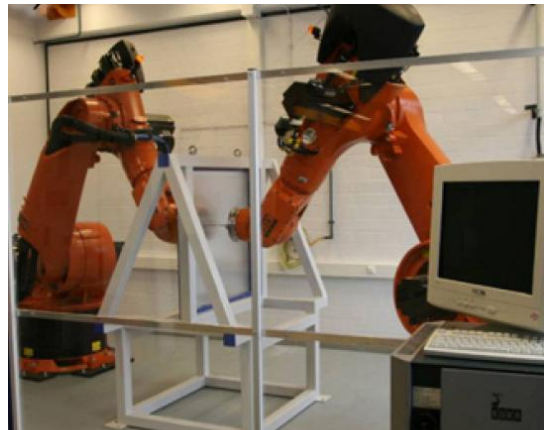


Figura A.10. Robots industrials fabricant un producte a partir de ISF (Meier et al., 2009).

A.2.4 Plataformes Stewart

Actualment només es té coneixement de l'existència d'un disseny per una màquina de conformat incremental que utilitza una plataforma Stewart. La principal avantatge és que ofereix infinits graus de llibertat, la qual cosa li atorga un gran potencial comparat per exemple amb un centre de mecanitzat de 5 eixos.



Figura A.11. Disseny d'una màquina per ISF a partir d'una plataforma Stewart (Marabuto et al., 2011).

A.3 Materials utilitzats

Des dels inicis de la investigació en aquesta tecnologia s'ha experimentat amb un gran nombre de materials. Alguns d'ells s'han utilitzat com a materials de referència per a molts autors, d'altres només s'han utilitzat en reduïdes ocasions per comprar si és viable o no per ser processat amb la tecnologia de ISF. A continuació es mostra una taula que recopila els materials utilitzats en diferents treballs d'investigació.

Taula A.1. Resum dels materials utilitzats en el procés de ISF.

Família	Material	Referències
Alumini	AA-1050-0	(Araghi et al., 2009) (Cerro et al., 2006) (Filice et al., 2002) (Ambrogio et al., 2004) (Dejardin et al., 2010) (Fratini et al., 2004)
	AA-1050-H24	(Takano et al., 2008) (Bagudanch et al., 2011b) (Pérez-Santiago et al., 2011b) (Pérez-Santiago et al., 2011c)
	AA-1050 recuit a 350°C durant 2h	(Park & Kim, 2003) (Kim, 2002) (Iseki, 2002) (Shim, 2001)
	AA-5086	(Rauch et al., 2009)
	AA-2024 (recuit)	(Hussain et al., 2008)
	AA-3003 (recuit)	(Hussain et al., 2008)
	AA-1060-H24 (enduriment per deformació)	(Hussain et al., 2008)
	AA-2024-T4 (trempat)	(Hussain et al., 2008)
	AA-7075-T0	(Durante et al., 2009)
	AA-6114-T4	(Fratini et al., 2004)
	AA-3003-0	(Ziran et al., 2009) (Aerens et al., 2010)
	AA-5754	(Aerens et al., 2010)
	Al-5182	(Duflou et al., 2007)
Bronze	No especificat	(Fratini et al., 2004)
Acer	DDQ (Deep Drawing Quality)	(Ambrogio et al., 2005b) (Fratini et al., 2004)
	HSS (High Strength Steel)	(Fratini et al., 2004)
	AISI 304	(Ceretti, 2004) (Aerens et al., 2010) (Pérez-Santiago et al., 2011c)
	DC04	(Bambach et al., 2009)
	DC01	(Aerens et al., 2010)
	65Cr2	(Aerens et al., 2010) (Duflou et al., 2007)
Coure	C101	(Jackson & Allwood, 2009)
	No especificat	(Fratini et al., 2004)
	Cu DHP	(Ceretti, 2004)
Titani	Ti-6Al-4V	(Fan et al., 2008)
	No especificat	(Tanaka et al., n.d.)

Família	Material	Referències
Magnesi	AZ31B-H24	(Park et al., 2009)
	AZ31	(Zhang et al., 2009) (Zhang et al., 2010)
	AZ31-0	(Ambrogio et al., 2008a)
Polímers	PVC	(Franzen et al., 2009) (Silva et al., 2010) (Martins et al., 2009)
	PP	(Le et al., 2008)
	POM	(Martins et al., 2009)
	PE	(Martins et al., 2009)
	PA	(Martins et al., 2009)
	PC	(Martins et al., 2009)

Cal destacar que les noves investigacions en quant a materials se centren sobretot en el magnesi, el titani i els polímers.

En els dos primers és necessari desenvolupar algun sistema d'escalfament, ja que en fred no es poden processar degut a una sèrie de problemes. En el cas del titani, per exemple, hi ha el que es coneix com a *galling* que és quan el material de xapa queda adherit a l'eina. A part d'estudiar el millor sistema d'escalfament possible, també s'ha d'investigar sobre el tipus de lubricant a utilitzar, ja que aquest ha de ser capaç de resistir unes condicions de treball més extremes.

Pel que fa als polímers és interessant poder-los processar amb la tecnologia de conformat incremental de xapa ja que té un potencial d'aplicació molt important en el sector de la medicina per tal de desenvolupar pròtesis.

A.4 Mecanismes de deformació

Degut a que el procés de conformat incremental de xapa és molt innovador, encara no es coneix amb certesa quin és el mecanisme que té lloc en el procés durant la deformació de la xapa. Són varis els autors que estan treballant en aquest sentit i a la Taula A.2 es mostra un resum de les característiques dels principals mecanismes que s'estan estudiant actualment.

Taula A.2. Resum dels mecanismes de deformació associats al procés de ISF.


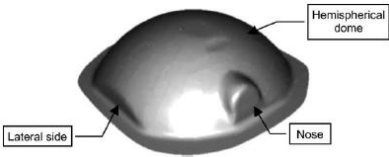

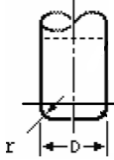
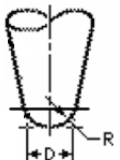


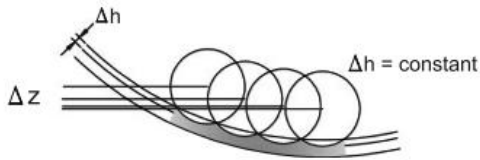
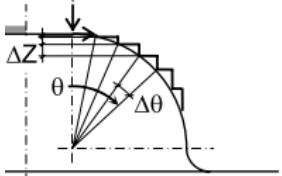
Mecanisme de deformació	Característiques	Referències
Estat pla de tensions	<ul style="list-style-type: none"> - En superfícies planes el material flueix en la direcció del moviment de l'eina ($\varphi_1, \varphi_2=0$). - En superfícies corbes el material es deforma biaxialment (φ_1, φ_2). - Es considera que la fractura i les deformacions locals són dependents només de les deformacions en el pla de la xapa (φ_1, φ_2). 	(Kopac and Kampus, 2005)

Mecanisme de deformació	Característiques	Referències
<p>Llei d'enduriment $\sigma = K \cdot \epsilon^n$ $\sigma = K \cdot (\epsilon_0 + \epsilon)^n$</p>	<ul style="list-style-type: none"> - És una forma d'expressar el comportament plàstic del metall. - Els paràmetres del material s'obtenen a partir d'assajos a tracció. - Molt utilitzada per a les simulacions per elements finits del procés de ISF. 	<p>(Iseki, 2002) (Filice et al., 2002) (Durante et al., 2009) (Fratini et al., 2004) (Dejardin et al., 2010) (Park et al., 2009) (Bagudanch et al., 2011a) (Pérez-Santiago et al., 2011a) (Bagudanch et al., 2011b) (Pérez-Santiago et al., 2011b) (Pérez-Santiago et al., 2011c)</p>
<p>Tallant</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Hi ha moviment relatiu entre punts situats a la direcció paral·lela al moviment de l'eina. - Al pla perpendicular a la direcció de l'eina hi té lloc flexió pura i estirament. - Per tal de predir l'espessor, el que predomina és el tallant. 	<p>(Jackson & Allwood, 2009) (Emmens & van den Boogaard, 2007)</p>
<p>Llei del sinus $t_1 = t_0 \cdot \sin \alpha$</p>	<ul style="list-style-type: none"> - L'ajust de la llei del sinus per a predir l'espessor de la xapa és variable en la secció de la peça formada. - Tot i que pot arribar a ser aplicable, no es pot considerar que és el mecanisme de deformació ideal en el cas de ISF. - Es pot aplicar quan no hi ha desplaçament radial d'elements de material a través de l'espessor. 	<p>(Jackson & Allwood, 2009) (Araghi et al., 2009) (Takano et al., 2008) (Ziran et al., 2009)</p>

A.5 Paràmetres i especificacions d'entrada del procés

A la Taula A.3 es resumeixen els principals paràmetres i especificacions a tenir en compte a l'hora de dur a terme el procés de ISF.

Taula A.3. Resum dels paràmetres més rellevants en el procés de ISF.

Disseny	Geometria	Simple 		Intermèdia 		Complexa 
	Material	Alumini	Magnesi	Acer		Titani
	Espessor de la xapa	Microforming (<0.1 mm)			Macroforming (0.5 – 5 mm)	
Eina	Trajectòria	Un sentit (horari o antihorari)		Alternant dos sentits		Espiral
	Tipus	Plana 		Semiesfèrica 		Punta de bola 
	Dimensions	Microforming (<1 mm)			Macroforming (5 – 20 mm)	
Procés	Pas incremental	Δz constant 		Δh constant 		$\Delta\theta$ constant 
	Velocitat d'avanç	400 – 3000 mm/min				
	Velocitat de rotació	0 – 4000 rpm				

A continuació es descriurà més detalladament alguns dels paràmetres especificats en la Taula A.3.

Pel que fa a la geometria es pot classificar segons 3 nivells de complexitat, ordenats de menor a major:

- *Simple*: són geometries bàsiques, utilitzades principalment en treballs d'investigació per tal de determinar l'efecte dels paràmetres d'entrada sobre els paràmetres de sortida. Generalment es tracta de cons o piràmides truncades amb un angle de paret constant.
- *Intermèdia*: en aquest grup s'hi engloben geometries utilitzades en investigació que no tenen ús a nivell industrial però que tenen diferents característiques geomètriques (parets d'angle variable, combinació de parts còncaues i convexes...).
- *Complexa*: dins aquest grup hi hauria els productes que tenen un ús a nivell industrial, ja siguin prototips, motlles, peces per a automoció o pròtesis. En general una mateixa peça té diferents curvatures, parets verticals, ranures...

Referent a la trajectòria de l'eina es parla de les següents estratègies:

- *Un sentit*: moure l'eina en el mateix pla sempre en un sentit, ja sigui horari o antihorari. Té el problema de que la peça queda torsionada. Es segueix el contorn de la peça de manera discreta.
- *Alternant dos sentits*: en aquest cas es van succeint els sentits horari o antihorari en els diferents plans de treball, de manera que no hi ha problemes de torsió ja que el gir de la peça queda compensat. Es segueix el contorn de la peça de manera discreta.
- *Espiral*: bàsicament s'utilitza quan es vol millorar l'acabat superficial ja que es segueix el contorn de la peça de manera contínua, no com en els dos casos anteriors, en què es produeix una marca en el punt on baixa l'eina. També té el problema de la torsió de la peça ja que el sentit d'avanç de l'eina és sempre el mateix.

Generalment es pot parlar de tres tipus d'eina diferents. La plana (molt poc utilitzada), la de punta de bola (la bola té rotació lliure de manera que la fricció és la mínima possible) i la semiesfèrica, essent aquesta última la més comú.

Finalment, un altre dels paràmetres que cal destacar degut a la influència que té en la precisió dimensional, acabat superficial, forces de conformat i temps d'operació, és el pas incremental. No té sentit parlar de pas incremental en casos en què la trajectòria de l'eina és en espiral, només en els casos en què la trajectòria ve definida per contorns discrets. Aquest és el paràmetre que determina la profunditat de baixada de l'eina en les diferents capes. Es pot fer bàsicament seguint tres estratègies:

- *Profunditat de baixada (Δz) constant*: l'eina es mou axialment amb un valor constant. L'acabat superficial no sol ser massa bo en parets amb una inclinació molt baixa, ja que la separació és molt elevada. En anglès es denomina *constant depth step*.
- *Altura de cresta (Δh) constant*: en aquest cas el valor entre les diferents capes depèn de la inclinació de la paret, obtenint millors acabats en

superfícies pràcticament planes que en el cas anterior degut a que la separació entre successives passades és inferior. En anglès s'anomena *constant scallop height*.

- *Increment angular ($\Delta\theta$) constant*: l'increment angular entre dues passades successives s'ha de mantenir constant. El principal inconvenient és que per inclinacions molt elevades de la paret l'acabat superficial que s'obté no és molt bo.

A.6 Paràmetres de sortida del procés

A.6.5 Formabilitat del material

En processos de deformació de xapa és molt habitual mesurar el que s'anomena "formabilitat" que s'entén com la capacitat que té un material per a resistir unes certes condicions de treball sense que arribi a la ruptura.

El procés de ISF està caracteritzat per tenir uns límits de formabilitat molt superiors als dels processos convencionals, com per exemple l'embotició (Jeswiet et al., 2005).

Una de les maneres de mesurar la formabilitat és a partir de les deformacions de la xapa. Alguns estudis (Park & Kim, 2003) han demostrat que les corbes FLC (*Forming Limit Curve*) per ISF, on es descriu la formabilitat del material a partir de les deformacions principals, es pot expressar com una línia recta amb pendent negatiu, mentre que en el cas dels processos convencionals de conformat de xapa la tendència és en forma de V i amb uns límits inferiors.

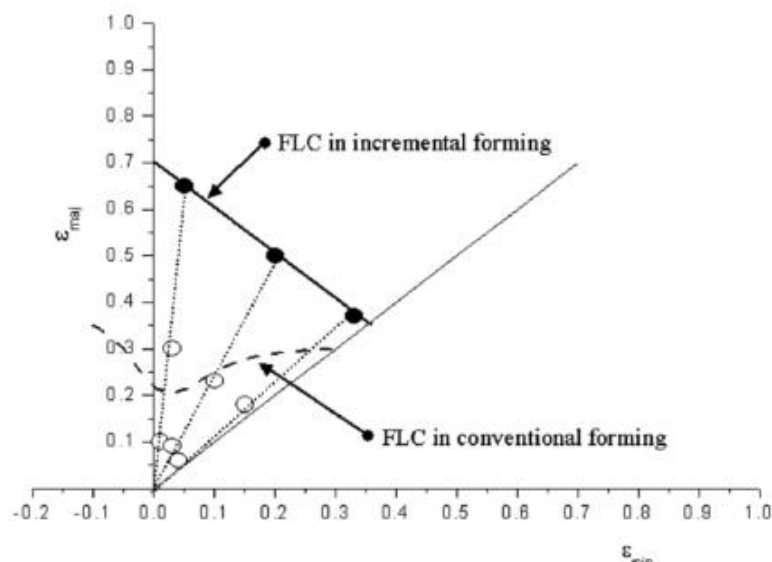


Figura A.12. Comparació de les corbes FLC pels processos tradicionals de deformació de xapa i per ISF (Park & Kim, 2003).

Un altre indicador de la formabilitat és el màxim angle de paret que es pot assolir sense arribar a la ruptura, deformant una xapa d'un cert material i espessor. Habitualment la geometria que s'utilitza per a realitzar aquest test és un con amb angle de paret constant.

A.6.6 Rugositat superficial

És important garantir que el producte final tingui un acabat superficial acceptable. En el cas de les parts obtingudes a partir de ISF, un dels principals problemes relacionats amb la rugositat superficial és el pas incremental, ja que es forma una marca bastant pronunciada en el punt on l'eina baixa.

També s'ha de tenir en compte la velocitat de rotació de l'eina. S'ha pogut demostrar que la rugositat superficial és major en el cas d'eines que no giren (Jeswiet et al., 2005). Per tal de reduir la rugositat s'ha de reduir el moviment relatiu entre l'eina i la xapa. Això es pot aconseguir fent que l'eina pugui girar lliurement en el capçal.

En el cas d'angles de paret molt elevats en alguns casos s'ha pogut observar que apareix un efecte no desitjat conegut com a "pell de taronja". Es dona principalment en superfícies lliures amb deformacions plàstiques molt importants.

A.6.7 Forces de conformat

Quan un centre de mecanitzat de control numèric s'ha d'adaptar per dur a terme processos de conformat incremental de xapa, s'ha de prestar especial atenció a les forces que es desenvolupen durant el procés.

Com a conseqüència de la naturalesa del procés hi ha una deformació plàstica molt localitzada a la zona de contacte entre l'eina i la xapa, fet que resulta en què la força predominant en el conformat incremental és en la direcció axial i que normalment no és el cas en els processos de mecanització.

Aquestes forces que es generen durant el procés també s'han de tenir molt en compte si es treballa amb robots, ja que pot afectar a la seva rigidesa i el robot es podria desviar de la trajectòria, contribuint així a una baixa precisió dimensional de la peça obtinguda.

Les forces de conformat, a part de tenir influència en els possibles riscos que es poden causar a la màquina, van lligades a l'evolució de la deformació plàstica i aquesta a la vegada està relacionada amb la integritat estructural de la peça formada (Pérez-Santiago et al., 2011a).

Una de les línies d'investigació que hi ha obertes actualment fa referència a l'obtenció de models analítics que permetin predir la màxima força de conformat per a diferents geometries, materials i paràmetres de procés (diàmetre de l'eina i profunditat de baixada).

En base a la revisió bibliogràfica s'ha pogut obtenir un diagrama causa-efecte (també conegut com d'espina de peix) per mostrar els paràmetres que tenen influència sobre la força de conformat, tal i com es pot apreciar a la Figura A.13.

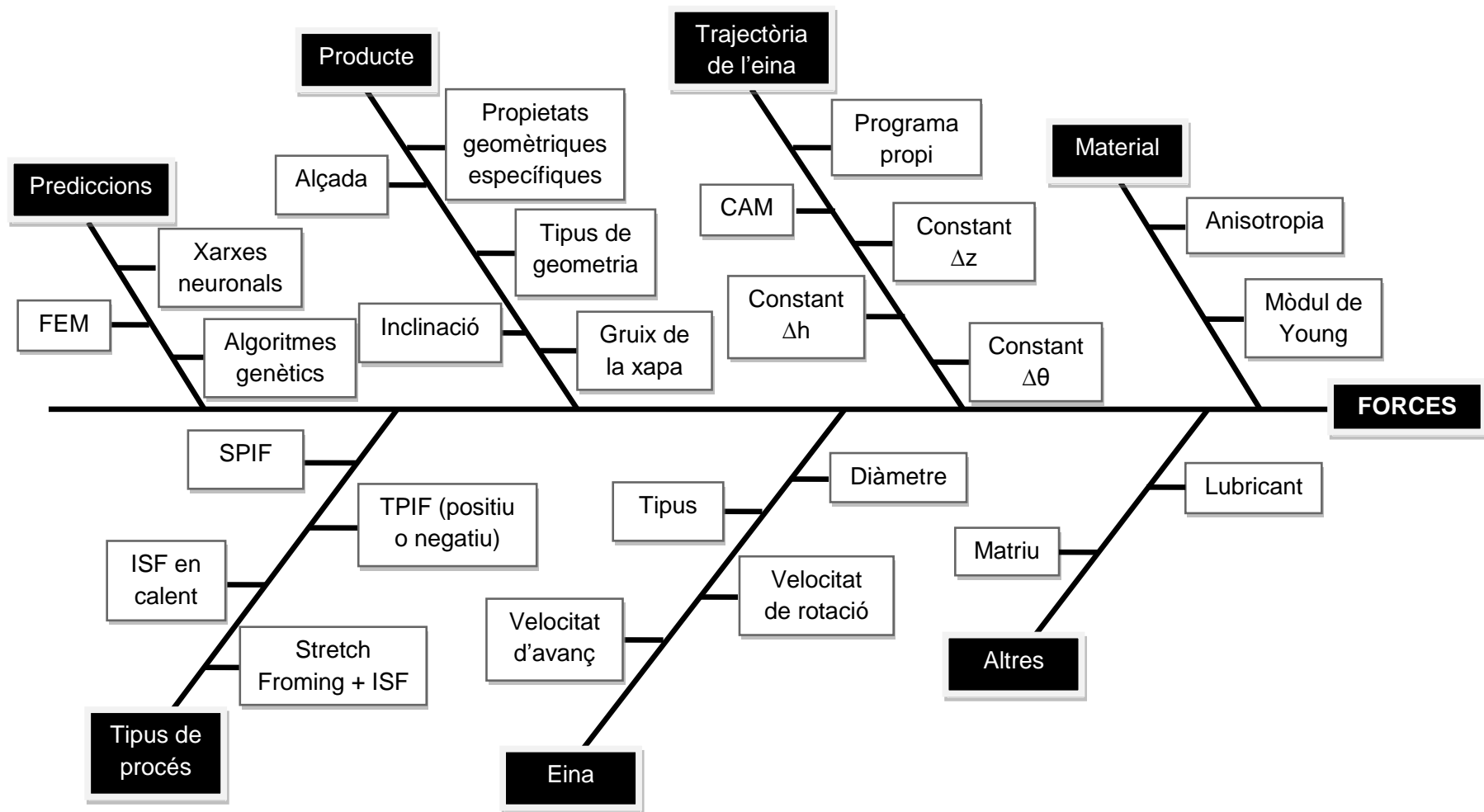


Figura A.13. Diagrama causa-efecte per analitzar les forces de conformat del procés de ISF.

A.6.8 Precisió dimensional

Un dels principals inconvenients del procés de ISF i que limita que es pugui implementar a nivell industrial més enllà de ser estudiat a nivell acadèmic és la reduïda precisió dimensional en comparació als processos tradicionals de conformació de xapa.

En el cas de la variant del procés anomenada SPIF hi ha una desviació molt important a la zona més externa de la peça. Aquesta desviació té lloc en les primeres etapes del procés, ja que enlloc de produir-se una deformació local hi ha un doblegament de la xapa. Un mètode per disminuir aquesta desviació es base en l'ús d'un plat de suport, conegut en anglès com *baking plate*. Malgrat tot, aquest suport no pot eliminar els problemes de falta de precisió en altres parts de la peça, com per exemple prop del centre. Una segona alternativa podria ser fer un reprocessat, girant la peça i fent algunes passades amb l'eina de ISF per tal de compensar el doblegat.

Existeixen altres problemes relacionats amb les propietats dels materials que sumats a la font d'error pròpia del procés contribueixen a la falta de precisió. Aquests problemes són bàsicament la recuperació elàstica o *springback* i el que es coneix com "efecte coixí" o *pillow effect*.

La recuperació elàstica és un problema generalitzat a la majoria de processos de deformació de xapa i es dona quan es remou una càrrega que ha generat deformació plàstica. Aleshores el material tendeix a recuperar-se elàsticament provocant així les desviacions dimensionals de la peça formada.

Pel que fa a l'efecte coixí s'origina en parts on l'eina no hi ha aplicat deformació plàstica i per tant la desviació és deguda a la propagació de tensions d'altres parts de la peça.

Per tal de compensar aquests dos efectes la millor alternativa és a partir de l'optimització de la trajectòria de l'eina. Aquesta optimització es sol basar en processos de prova i error fins que s'assoleixen unes toleràncies acceptables.

A.7 Cadena de procés

La cadena de procés més bàsica estaria composta per una etapa de disseny de la geometria, una etapa de generació de la trajectòria de l'eina amb l'ajuda d'un software CAM i finalment l'etapa de producció. Aquest podria ser un exemple de la cadena de procés que se segueix en la variant SPIF mostrat en la Figura A.14.



Figura A.14. Cadena de procés en la variant més simple de la tecnologia de ISF (Pérez-Santiago et al., 2011c).

En el cas de voler produir geometries més complexes, la cadena de procés també esdevé més complexa. En primer lloc pot fer falta construir una matriu parcial o total i en segon lloc poden ser necessàries una sèrie d'iteracions per tal d'optimitzar el procés. A més a més, pot ser molt útil realitzar simulacions per elements finits. Amb aquestes simulacions es pot decidir optimitzar la trajectòria de l'eina, canviar el tipus de procés (passar de SPIF a TPIF) i fins i tot es pot detectar la necessitat de realitzar algun canvi en el disseny original. Totes aquestes etapes estan reflectides a la

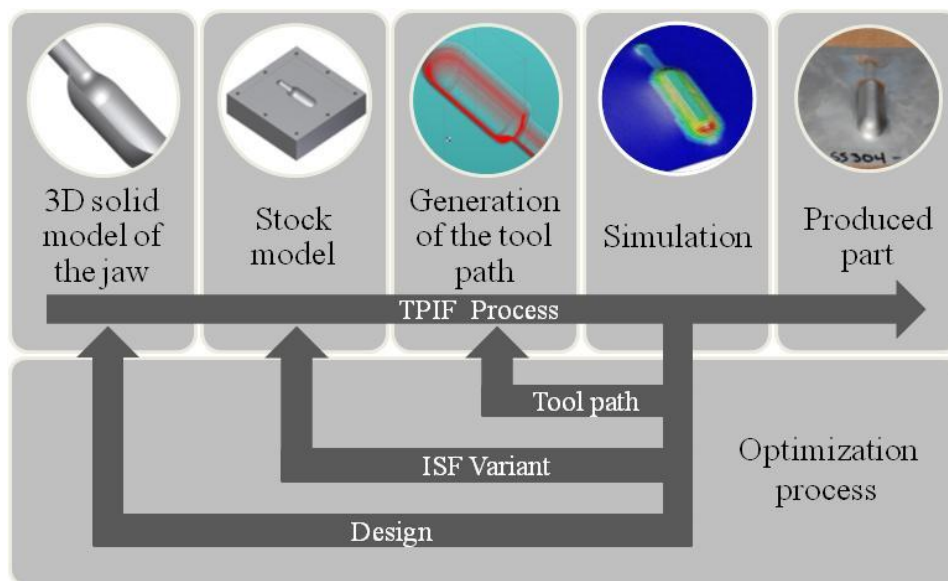

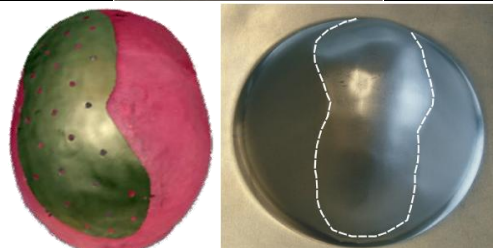
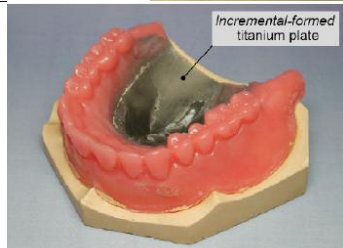

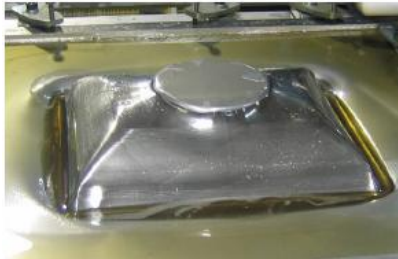



Figura A.15. Cadena de procés optimitzada (Pérez-Santiago et al., 2011c).

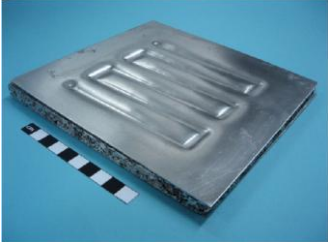
A.8 Camps d'aplicació

Tal i com ja s'ha comentat, la tecnologia de conformat incremental de xapa encara es troba en la fase de desenvolupament i no s'ha introduït de forma extensiva a la indústria. En aquest apartat el que es pretén es donar alguns exemples dels camps on es pot aplicar aquesta tecnologia a partir de casos d'estudi obtinguts d'articles d'investigació o projectes.

Taula A.4. Exemples dels camps d'aplicació de ISF.

Biotecnologia	Pròtesis de turmell (acer DDQ)		(Ambrogio et al., 2005a)
	Pròtesis de crani (AA3003-O)		Johan Verbet
	Pròtesis dental (Titani)		Tanaka
Aeronàutica	Tub de ventilació (acer DC04)		Fatronik
	Injector (AISI304)		Fatronik

Automoció	Exemple enginyeria inversa per substitució d'un component d'un cotxe (no especificat)		(Emmens, Sebastiani, & van den Boogaard, 2010)
	Parafangs		Fatronik
	Part d'escapament		Fatronik
	Tapa de culata (AA7075)		Projecte IBE-RM
Rapid prototyping	Motlle de plat de dutxa (AA1050-O)		Tesis de João Luís Padrão de Brito Câmara
	Safata picadora de carn (AISI304)		Fatronik
	Decoració (AISI304)		Fatronik

Arquitectura	Panell sandwich (Al/escuma Al/Al)		(Jackson et al., 2008)
---------------------	--	---	---------------------------

A.9 Referències

- Aerens R, Eyckens P, Bael A, Duflou JR (2010) Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and FEM observations. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 46:969-982.
- Ambrogio G, Costantino I, Denapoli L, Filice L, Fratini L, Muzzupappa M (2004) Influence of some relevant process parameters on the dimensional accuracy in incremental forming: a numerical and experimental investigation. Journal of Materials Processing Technology 153-154:501-507.
- Ambrogio G, Denapoli L, Filice L, Gagliardi F, Muzzupappa M (2005)(a) Application of Incremental Forming process for high customised medical product manufacturing. Journal of Materials Processing Technology 162-163:156-162.
- Ambrogio G, Filice L, Gagliardi F, Forming I (2005)(b) THREE-DIMENSIONAL FE SIMULATION OF SINGLE POINT INCREMENTAL FORMING: EXPERIMENTAL EVIDENCES AND PROCESS DESIGN IMPROVING. Mechanical Engineering:3-6
- Ambrogio G, Filice L, Manco G (2008) Warm incremental forming of magnesium alloy AZ31. CIRP Annals - Manufacturing Technology 57:257-260.
- Araghi BT, Manco GL, Bambach M, Hirt G (2009) Investigation into a new hybrid forming process: Incremental sheet forming combined with stretch forming. CIRP Annals - Manufacturing Technology 58:225-228.
- Bagudanch I, Pérez-Santiago R, García-Romeu ML (2011)(a) Tool path strategies for Single Point Incremental Forming In Key Engineering Materials , p. 905-912.
- Bagudanch I, Pérez-Santiago R, García-Romeu ML, Rodriguez C (2011)(b) Forming Force in SPIF of Variable Wall Angle Components: FEM Modeling and Experimental Results In 10th International Conference on Technology of Plasticity Aachen, p. 1-6.
- Bambach M, Taleb Araghi B, Hirt G (2009) Strategies to improve the geometric accuracy in asymmetric single point incremental forming. Production Engineering 3:145-156.
- Ceretti E (2004) Experimental and simulative results in sheet incremental forming on CNC machines. Journal of Materials Processing Technology 152:176-184.

- Cerro I, Maidagan E, Arana J, Rivero a, Rodriguez P (2006) Theoretical and experimental analysis of the dieless incremental sheet forming process. *Journal of Materials Processing Technology* 177:404-408.
- Dejardin S, Thibaud S, Gelin JC, Michel G (2010) Experimental investigations and numerical analysis for improving knowledge of incremental sheet forming process for sheet metal parts. *Journal of Materials Processing Technology* 210:363-369.
- Duflou J, Tunckol Y, Szekeres a, Vanherck P (2007) Experimental study on force measurements for single point incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology* 189:65-72.
- Durante M, Formisano a, Langella a, Capece Minutolo FM (2009) The influence of tool rotation on an incremental forming process. *Journal of Materials Processing Technology* 209:4621-4626.
- Emmens WC, Boogaard a H van den (2007) Strain in Shear, and Material Behaviour in Incremental Forming. *Key Engineering Materials* 344:519-526.
- Emmens WC, Sebastiani G, Boogaard a H van den (2010) The technology of Incremental Sheet Forming—A brief review of the history. *Journal of Materials Processing Technology* 210:981-997.
- Fan G, Gao L, Hussain G, Wu Z (2008) Electric hot incremental forming: A novel technique. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 48:1688-1692.
- Filice L, Fratini L, Micari F (2002) Analysis of Material Formability in Incremental Forming. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 51:199-202.
- Fiorentino A, Ceretti E, Attanasio A, Mazzone L, Giardini C (2009) Analysis of forces, accuracy and formability in positive die sheet incremental forming. *International Journal of Material Forming* 2:805-808.
- Franzen V, Kwiatkowski L, Martins P, Tekkaya a (2009) Single point incremental forming of PVC. *Journal of Materials Processing Technology* 209:462-469.
- Fratini L, Ambrogio G, Lorenzo R Di, Filice L, Micari F (2004) Influence of mechanical properties of the sheet material on formability in single point incremental forming. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 53:207-210.
- Hussain G, Hayat N, Gao L (2008) An experimental study on the effect of thinning band on the sheet formability in negative incremental forming. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 48:1170-1178.
- Iseki H (2002) Vertical wall surface forming of rectangular shell using multistage incremental forming with spherical and cylindrical rollers. *Journal of Materials Processing Technology* 130-131:675-679.
- Jackson K, Allwood J (2009) The mechanics of incremental sheet forming. *Journal of Materials Processing Technology* 209:1158-1174.

- Jackson K, Allwood J, Landert M (2008) Incremental forming of sandwich panels. *Journal of Materials Processing Technology* 204:290-303.
- Jeswiet J, Micari F, Hirt G, Bramley a, Dufflou J, Allwood J (2005) Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 54:88-114.
- Kim Y (2002) Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal. *Journal of Materials Processing Technology* 130-131:42-46.
- Kopac J, Kampus Z (2005) Incremental sheet metal forming on CNC milling machine-tool. *Journal of Materials Processing Technology* 162-163:622-628.
- Le VS, Ghiotti a, Lucchetta G (2008) Preliminary Studies on Single Point Incremental Forming for Thermoplastic Materials. *International Journal of Material Forming* 1:1179-1182.
- Marabuto SR, Afonso D, Ferreira J a F, Melo FQ, Martins M, Sousa RJA De (2011) Finding the Best Machine for SPIF Operations - a Brief Discussion. *Key Engineering Materials* 473:861-868.
- Martins P a F, Kwiatkowski L, Franzen V, Tekkaya a E, Kleiner M (2009) Single point incremental forming of polymers. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 58:229-232.
- Meier H, Buff B, Laurischkat R, Smukala V (2009) Increasing the part accuracy in dieless robot-based incremental sheet metal forming. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 58:233-238
- Park J, Kim J, Park N, Kim Y (2009) Study of Forming Limit for Rotational Incremental Sheet Forming of Magnesium Alloy Sheet. *Metallurgical and Materials Transactions A* 41:97-105.
- Park J, Kim Y (2003) Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique. *Journal of Materials Processing Technology* 140:447-453.
- Pérez-Santiago R, Bagudanch I, García-Romeu ML (2011)(a) Force Modeling in Single Point Incremental Forming of Variable Wall Angle Components In *Key Engineering Materials* , p. 833-840.
- Pérez-Santiago R, Bagudanch I, García-Romeu ML, Hendrichs N (2011)(b) Forming force prediction in single point incremental forming of uniform and variable wall angle components. *Journal of Materials Processing Technology*:1-32
- Pérez-Santiago R, García-Romeu ML, Bagudanch I (2011)(c) Fabrication of a Biopsy Micro-Forceps Prototype with Incremental Sheet Forming In 5th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping
- Rauch M, Hascoet J-Y, Hamann J-C, Plenel Y (2009) Tool path programming optimization for incremental sheet forming applications. *Computer-Aided Design* 41:877-885.

- Shim M (2001) The formability of aluminum sheet in incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology* 113:654-658.
- Silva MB, Alves LM, Martins P a F (2010) Single point incremental forming of PVC: Experimental findings and theoretical interpretation. *European Journal of Mechanics - A/Solids* 29:557-566.
- Takano H, Kitazawa K, Goto T (2008) Incremental forming of nonuniform sheet metal: Possibility of cold recycling process of sheet metal waste. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 48:477-482.
- Tanaka S, Nakamura T, Hayakawa K, Nakamura H, Motomura K, Medical T
EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION ON SPRING-BACK.
- Zhang Q, Guo H, Xiao F, Gao L, Bondarev a B, Han W (2009) Influence of anisotropy of the magnesium alloy AZ31 sheets on warm negative incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology* 209:5514-5520.
- Zhang Q, Xiao F, Guo H, Li C, Gao L, Guo X, Han W, Bondarev a B (2010) Warm negative incremental forming of magnesium alloy AZ31 Sheet: New lubricating method. *Journal of Materials Processing Technology* 210:323-329.
- Ziran X, Gao L, Hussain G, Cui Z (2009) The performance of flat end and hemispherical end tools in single-point incremental forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 46:1113-1118.

B Aparells utilitzats

B.1 Centre de mecanitzat Kondia HS1000

És el centre de mecanitzat, mostrat a la Figura B., de les instal·lacions del GREP a la Universitat de Girona. És un centre de mecanització de fusell vertical. Aquest, a part de fer rotar l'eina, té moviment horitzontal i vertical, segons l'operari mira l'aparell. Aquests són els eixos x i z, respectivament. Pel que fa a la taula, on es fixa el material a treballar, té moviment de profunditat, corresponent a l'eix y. El centre de mecanitzat es comanda mitjançant un control numèric computaritzat (CNC) de la casa *Fidia*.



Figura B.1. Centre de mecanitzat Kondia HS1000.

El centre de mecanitzat permet treballar amb velocitats de rotació fins a 24000rpm i avanços de fins a 24000mm/min en un espai de treball de 1000x600x510 mm segons els tres eixos principals. Els capçals que s'acoblen al fusell són del tipus *HSK 63 A* segons la normativa DIN 69893-A.

B.2 Taula dinamomètrica Kistler 9257B

La taula dinamomètrica s'utilitza per obtenir els valors de força i de moment als tres eixos principals. Al damunt s'hi fixa l'utilatge, que serveix per subjectar la xapa. Tot el conjunt va fixat sobre la taula del centre de mecanitzat. A la Figura B.2 es mostra el muntatge realitzat.



Figura B.2. Muntatge de la taula dinamomètrica Kistler a la taula de treball de la Kondia HS1000.

El programa informàtic *DaqView* serveix per treballar amb les dades provinents de la taula dinamomètrica. Aquestes dades es guarden en un fitxer amb extensió *.bin*, el qual es pot obrir amb el *DaqView*. El software de d'adquisició de dades permet veure l'evolució de les forces amb el temps un cop ha acabat l'adquisició, tal i com es mostra a la Figura B.3. A més, aquest software permet convertir les dades a altres formats (entre els que destaquen *.txt* o *.mat*) per poder treballar amb aquestes dades utilitzant altres programes amb més possibilitats d'anàlisi.

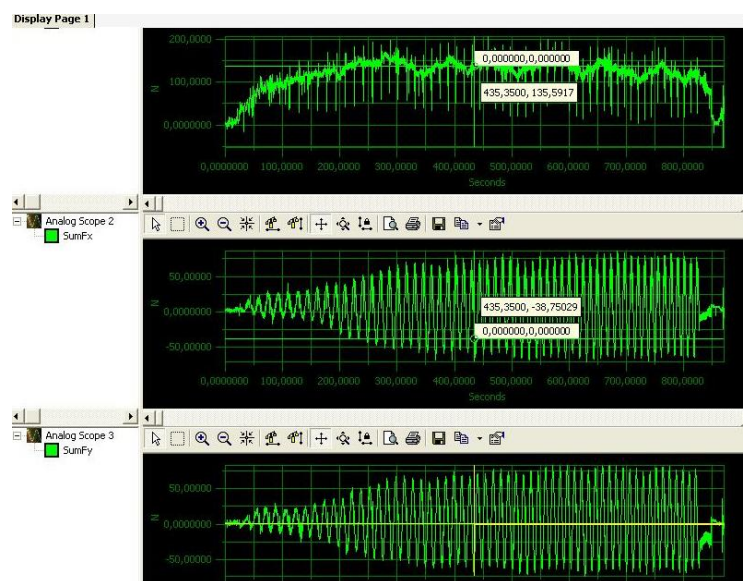


Figura B.3. Representació de l'evolució de les forces de conformat durant el procés.

B.3 Màquina de mesura de coordenades Mitutoyo Crysta Apex 544

Aquesta màquina es troba instal·lada als laboratoris del *GREP*. És el model més petit de la sèrie Crysta, amb la qual cosa els principals avantatges són el cost reduït i el mínim espai d'instal·lació requerit. Les característiques més importants són les següents:

- Disposa de compensació d'error tèrmic integrat per a la màquina de mesura i la peça en un rang de temperatures entre 16 i 26°C.
- Té una elevada velocitat de desplaçament (fins a 520 mm/s).
- És compatible amb múltiples sistemes de mesura (palpadors, òptics...).
- Funciona amb el software MCOSMOS.
- Rang de mesura: 505x405x405 mm.
- Precisió 1.7 µm.



Figura B.4. Màquina de coordenades Mitutoyo Crysta Apex 544.

C Programació d'una rutina pròpia per a la generació de les trajectòries

En aquest apartat es mostra el programa realitzat amb Python per tal de generar les trajectòries de l'eina per a geometries bàsiques (UWA i VWA).

```
# CAM.py
# Generador de puntos para formar cono/pirámide truncado generatriz circular
# Los parámetros de entrada son el numero de ciclos de la herramienta
# diámetro externo del cono en mm(corregir en futuras versiones)
# los ángulos inicial y final de formado en grados
# el paso vertical, en mm, deseado (cambiar a altura de cresta "scallop")
# Para utilizarlo, una vez configurado el "path" de python, 1)abrir
# una ventana DOS 2)teclear python CAM.py, 3) dar un nombre al archivo
# Se puede seleccionar entre rotación en un sentido o alternado

from __future__ import print_function
import os.path
import sys
import math
filenam1 = 'pathxyz.dat'
filenam2 = 'pathxyz.tap'
filenam3 = 'angles.txt'
filenam4 = 'xsection2.txt'

f=open(filenam1,'w')
f2=open(filenam2,'w')
f3=open(filenam3,'w')
f4=open(filenam4,'w')
#print(filename,file=f2)

#enter geometrical parameters
Angulo=50.0
Radio_gen=0.0          #0 for UWA and >0 for VWA
Diam_mayor=110.0
pira=1                #pyramidal =1, conical =0

#enter process parameters
delz=0.5              #delta z
trad=5.0              #radius of hemispherical tool
wfed=2000             #working feed (mm/min)
spis=1000             #spindle speed (rev/min)
srot=1                #sentido de rotación, -1= constante, 1 = alternado

thetd1=Angulo         #initial forming angle
thetr1=thetd1*math.pi/180
thetd2=80.0          #final forming angle
thetr2=thetd2*math.pi/180
```

```

rad1=Diam_mayor/2          #long radius
rad2=Radio_gen             #generatrix radius
hgth=rad2*math.cos(thetr1) #total height of cone
dela=4.0*delz              #curve arc length relative to delz (1.5 times delz)
ipdv=60                    #initial divisions for the in-plane radius (360
                             degrees base)
secz1=40.0                 #security height 1
secz2=1.0                  #security height 2
Nini=5                      #initial index

if rad2==0:
    ncyc=40
else:
    zthet2=hgth-rad2*math.cos(thetr2)
    ncyc=int(zthet2/delz)

dthd1=thetd1
#dell=delz/math.tan(dthr)   #delta x-y
coran=math.acos((trad-delz)/trad) #tool correction angle
x=y=z=dell=dlzt=0          #!Zero in the center of the plate
srot1=1
delx=x+rad1-trad*math.sin(coran)
#delx=x+rad1
print('N{0:} G90'.format(Nini),file=f2)
#Nind=Nini+5
#print('N{0:} S{1:} M3'.format(Nind,spis),file=f2)
Nind=Nini+5
print('N{0:} G55 O1'.format(Nind),file=f2)
Nind=Nind+5
print(' X Y Z angulo',file=f)
print(' Z angulo',file=f3)
print(' X Z angulo',file=f4)
print('{0:12.7F} {1:12.7F} {2:12.7F} {3:12.7F}'.format(x,y,z,dthd1),file=f)
print('N{0:} G0X{1:7.3F} Y{2:7.3F} Z{3:7.3F}'.format(Nind,x,y,secz1),file=f2)
Nind=Nind+5
print('N{0:} G0X{1:7.3F} Y{2:7.3F} Z{3:7.3F}'.format(Nind,x,y,secz2),file=f2)
Nind=Nind+5
print('N{0:} G1 F{1:} X{2:7.3F} Y{3:7.3F} Z{4:7.3F}'.format(Nind,wfed,x,y,z),file=f2)
for i in range (0,ncyc+1):
    if srot==-1:
        srot1=-1*srot
        Nind=Nind+5
        print('N{0:} S{1:} M4'.format(Nind,spis),file=f2)
    elif srot==1:
        srot1=-1*srot1
        if srot1==-1:
            Nind=Nind+5
            print('N{0:} S{1:} M4'.format(Nind,spis),file=f2)

```

```

elif srot1==1:
    Nind=Nind+5
    print('N{0:} S{1:} M3'.format(Nind,spis),file=f2)
delx=delx-dell
print('{0:12.7F} {1:12.7F} {2:12.7F} {3:12.7F}'.format(delx,y,z-i*delz,dthd1),file=f)
    #deltax
print('{0:12.7F} {1:12.7F} {2:12.7F}'.format(delx,z-i*delz,dthd1),file=f4)
Nind=Nind+5
print('N{0:} G1X{1:7.3F} Y{2:7.3F} Z{3:7.3F}'.format(Nind,delx,y,z-i*delz),file=f2)
print('{0:12.7F}      {1:12.7F}      {2:12.7F}      {3:12.7F}'.format(delx,y,z-
(i+1)*delz,dthd1),file=f)          #indentation
Nind=Nind+5
print('N{0:}      G1X{1:7.3F}      Y{2:7.3F}      Z{3:7.3F}'.format(Nind,delx,y,z-
(i+1)*delz),file=f2)
if pira==0:
    radp=math.sqrt(math.pow(delx,2)+math.pow(y,2))
    perm=2*math.pi*radp
    ipdv=int(perm/dela)
    #ipdv=5
    dthr2=2*math.pi/ipdv
        #in plane delta angle
    for j in range (1,ipdv+1):
        ipdlc=(delx)*math.cos(j*dthr2)          #in plane delta cosine
        ipdls=srot1*(delx)*math.sin(j*dthr2)    #in plane delta sine
        print('{0:12.7F} {1:12.7F} {2:12.7F} {3:12.7F}'.format(ipdlc,ipdls,z-
(i+1)*delz,dthd1),file=f)          #deltax, deltay
        Nindj=Nind+5*j
        print('N{0:}                                G1X{1:7.3F}
Y{2:7.3F}'.format(Nindj,ipdlc,ipdls),file=f2)
    else:
        #dell=delz/math.tan(athr) #delta x-y
        print('{0:12.7F} {1:12.7F} {2:12.7F} {3:12.7F}'.format(delx,delx*srot1,z-
(i+1)*delz,dthd1),file=f)
        Nindj=Nind+5
        print('N{0:} G1X{1:7.3F} Y{2:7.3F}'.format(Nindj,delx,delx*srot1),file=f2)
        print('{0:12.7F} {1:12.7F} {2:12.7F} {3:12.7F}'.format(-delx,delx*srot1,z-
(i+1)*delz,dthd1),file=f)
        Nindj=Nindj+5
        print('N{0:} G1X{1:7.3F} Y{2:7.3F}'.format(Nindj,-delx,delx*srot1),file=f2)
        print('{0:12.7F} {1:12.7F} {2:12.7F} {3:12.7F}'.format(-delx,-delx*srot1,z-
(i+1)*delz,dthd1),file=f)
        Nindj=Nindj+5
        print('N{0:} G1X{1:7.3F} Y{2:7.3F}'.format(Nindj,-delx,-delx*srot1),file=f2)
        print('{0:12.7F} {1:12.7F} {2:12.7F} {3:12.7F}'.format(delx,-delx*srot1,z-
(i+1)*delz,dthd1),file=f)
        Nindj=Nindj+5
        print('N{0:} G1X{1:7.3F} Y{2:7.3F}'.format(Nindj,delx,-delx*srot1),file=f2)

```

```
        print('{0:12.7F}   {1:12.7F}   {2:12.7F}   {3:12.7F}'.format(delx,y,z-
(i+1)*delz,dthd1),file=f)
        Nindj=Nindj+5
        print('N{0:} G1X{1:7.3F} Y{2:7.3F}'.format(Nindj,delx,y),file=f2)
        lhth=hgth+dlzt
        if rad2==0:
            dthr=thetr1
        else:
            dthr=math.acos(lhth/rad2)

        dthd1=(dthr*180)/math.pi
        print('{0:12.7F} {1:12.7F}'.format(z-i*delz,dthd1),file=f3)
        dell=(delz)/math.tan(dthr)
        dlzt=dlzt-delz
        Nind=Nindj

Nind=Nind+5
print('N{0:} G0X{1:7.3F} Y{2:7.3F} Z{3:7.3F}'.format(Nind,0,0,secz1),file=f2)
Nind=Nind+5
print('N{0:} M30'.format(Nind),file=f2)

f.close
f2.close
f3.close
f4.close
```

D Obtenció dels paràmetres de la llei d'enduriment

En aquest annex es mostrarà el programa realitzat amb Matlab per a obtenir l'ajustament dels paràmetres de la llei d'enduriment o de Swift (K , n i ϵ_0) de l'equació (Eq. 4.1) a partir de les dades obtingudes d'un assaig a tracció.

```
%% Sample dimensions
t=0.5; % Sheet thickness (mm)
w=12.7; %Sheet width (mm)

%% Load file and calculate real stress and strain
load ('C:\Documents and Settings\Administrador\Escritorio\SS304\11-0516.txt') %Search file directory
F1=X11_0516(:,1); % --> Force vector (N)
E1=X11_0516(:,5)*1e-6; % --> Engineering strain (adimensional)
format long
n=1;
n1=1;
max1=max(F1);
while F1(n)<max1 % To obtain a new F and E vector until the maximum
force is reached
    F(n1)=F1(n);
    E(n1)=E1(n);
    n=n+1;
    n1=n1+1;
end
S=F/(t*w); % Engineering stress
Er=log(1+E); % Real strain
Sr=S.*(1+E); % Real stress

%% Fit data to Swift law, Sr=K*(Er+Eo)^n
% function swift_law(Er,Sr)
%SWIFT_LAW Create plot of datasets and fits
% SWIFT_LAW(ER,SR)
% Creates a plot, similar to the plot in the main curve fitting
% window, using the data that you provide as input. You can
% apply this function to the same data you used with cftool
% or with different data. You may want to edit the function to
% customize the code and this help message.
%
% Number of datasets: 1
% Number of fits: 1

% Data from dataset "Sr vs. Er":
% X = Er:
% Y = Sr:
% Unweighted
%
% This function was automatically generated on 04-May-2011 13:54:58

% Set up figure to receive datasets and fits
f_ = clf;
figure(f_);
set(f_,'Units','Pixels','Position',[494 181 680 484]);
legh_ = []; legt_ = {}; % handles and text for legend
xlim_ = [Inf -Inf]; % limits of x axis
ax_ = axes;
set(ax_,'Units','normalized','OuterPosition',[0 0 1 1]);
```

```
set(ax_,'Box','on');
grid(ax_,'on');
axes(ax_); hold on;

% --- Plot data originally in dataset "Sr vs. Er"
Er = Er(:);
Sr = Sr(:);
h_ = line(Er,Sr,'Parent',ax_,'Color',[0.333333 0.666667 0],...
         'LineStyle','none', 'LineWidth',1,...
         'Marker','.', 'MarkerSize',12);
xlim_(1) = min(xlim_(1),min(Er));
xlim_(2) = max(xlim_(2),max(Er));
legh_(end+1) = h_;
legt_{end+1} = 'Sr vs. Er';

% Nudge axis limits beyond data limits
if all(isfinite(xlim_))
    xlim_ = xlim_ + [-1 1] * 0.01 * diff(xlim_);
    set(ax_,'XLim',xlim_)
else
    set(ax_,'XLim',[-9.274752208740785e-005, 0.0043693772758314747]);
end

% --- Create fit "Swift"

% Apply exclusion rule "plastic_zone"
% if length(Er)~=206
%     error('Exclusion rule '%s' is incompatible with
%'%s'.','plastic_zone','Er');
% end
ex_ = false(length(Er),1);
ex_([]) = 1;
ex_ = ex_ | (Er <= 1.7e-7) | (Sr <= 240); % Beginning of plastic zone
fo_ = fitoptions('method','NonlinearLeastSquares','Lower',[0 0
0],'Upper',[0.01 600 0.8]); % Modify range of Swift law parameters
ok_ = isfinite(Er) & isfinite(Sr);
if ~all(ok_)
    warning('GenerateMFile:IgnoringNansAndInfs', ...
           'Ignoring NaNs and Infs in data ');
end
st_ = [0 0 0];
set(fo_,'Startpoint',st_);
set(fo_,'Exclude',ex_(ok_));
ft_ = fitype('K*(x+Eo)^n',...
            'dependent',{'y'},'independent',{'x'},...
            'coefficients',{'Eo','K','n'});

% Fit this model using new data
if sum(~ex_(ok_))<2 %% too many points excluded
    error('Not enough data left to fit '%s' after applying exclusion
rule '%s'.','Swift','plastic_zone')
else
    cf_ = fit(Er(ok_),Sr(ok_),ft_,fo_);
end

% Or use coefficients from the original fit:
if 0
```

```
cv_ = { 4.041142116860577e-014, 129.99999999999997,  
0.046559875408373176};  
cf_ = cfit(ft_,cv_{:});  
end  
  
% Plot this fit  
h_ = plot(cf_,'fit',0.95);  
legend off; % turn off legend from plot method call  
set(h_(1),'Color',[1 0 0],...  
      'LineStyle','-','LineWidth',2,...  
      'Marker','none','MarkerSize',6);  
legh_(end+1) = h_(1);  
legt_{end+1} = 'Swift';  
  
% Done plotting data and fits. Now finish up loose ends.  
hold off;  
leginfo_ = {'Orientation','vertical','Location','NorthEast'};  
h_ = legend(ax_,legh_,legt_,leginfo_{:}); % create legend  
set(h_,'Interpreter','none');  
xlabel(ax_,''); % remove x label  
ylabel(ax_,''); % remove y label  
  
disp(cf_)
```

Agraïments

A la meva tutora, Maria Luisa García-Romeu, per la confiança que sempre ha tingut en mi i per tota la seva ajuda.

A Rogelio Pérez, ja que sense la seva col·laboració no hagués estat possible fer tants progressos durant aquest últim any.

A tots els companys i amics del GREP, per aportar el seu granet de sorra en aquest projecte però sobretot pels bons moments que hem viscut i per tots els que vindran.

A l'Esther, la Glòria i la Marta, perquè ja portem uns quants anys estudiant juntes, patint amb exàmens i treballs, però gràcies a vosaltres m'emporto molts bons records d'aquesta etapa que ja s'acaba.

A la meva família, perquè sempre m'han recolzat i gràcies a ells he pogut iniciar un nou camí.

A l'Ivan, per tot.