

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol: Experimentació i comparació de peces fabricades mitjançant les variants SPIF i TPIF

Document: Memòria i annexos

Alumne: Martí Puig Sanchez

Director/tutor: Maria Luisa Garcia-Romeu i Isabel Bagudanch

Departament: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Enginyeria de Processos de Fabricació

Convocatòria (mes/any): Juny 2015

ÍNDIX

MEMÒRIA	3
1 INTRODUCCIÓ	4
1.1 Antecedents	4
1.1.1 ISF.....	4
1.1.2 ISF en polímers	8
1.2 Objecte	10
1.3 Abast.....	11
1.4 Especificacions.....	12
2 METODOLOGIA I EXPERIMENTACIÓ	15
2.1 Geometria.....	15
2.2 Material.....	16
2.2.1 Policarbonat (PC).....	18
2.2.2 Policlorur de Vinil (PVC)	18
2.3 Fabricació del motlle	19
2.4 Muntatge experimental.....	21
2.4.1 Màquina.....	21
2.4.2 Eina.....	24
2.4.3 Lubricació.....	25
2.4.4 Muntatge	26
2.5 Disseny d'experiments (DOE).....	27
2.6 Adquisició de dades.....	29
2.6.1 Mesura de forces	29
2.6.2 Mesura de profunditat.....	30
2.6.3 Mesura de temperatura	30
2.6.4 Mesura de la rugositat.....	31
2.6.5 Mesura dels perfils.....	32
3 RESULTATS I DISCUSSIÓ.....	33
3.1 Força.....	34
3.1.1 TPIF	36
3.1.2 Comparació PC amb PVC en TPIF	36
3.1.3 Comparació SPIF amb TPIF	37
3.2 Alçada màxima	38
3.2.1 TPIF	40
3.2.2 Comparació PC amb PVC en TPIF	40
3.2.3 Comparació SPIF amb TPIF	40
3.3 Rugositat.....	41
3.3.1 TPIF	43

3.3.2	Comparació PC amb PVC en TPIF	43
3.3.3	Comparació SPIF amb TPIF	44
3.4	<i>Geometria obtinguda</i>	45
3.4.1	PC.....	45
3.4.2	PVC.....	47
3.5	<i>Torsió</i>	49
4	CONCLUSIONS	50
5	RELACIÓ DE DOCUMENTS.....	54
6	BIBLIOGRAFIA.....	55
ANNEXOS		57
A	PLÀNOLS.....	58
B	DIAGRAMES DE FORCES.....	60
B.1.	PC	60
B.2.	PVC.....	68

MEMÒRIA

1 INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

1.1.1 ISF

En l'àmbit industrial, existeixen tres processos principals de deformació de xapa, que són: el doblegat, el tall i l'embotició. El tall consisteix en separar material mitjançant una cisalla o un punxó, i el doblegat, com el seu nom indica, el que fa és aplicant una força focalitzada en una zona de la xapa, plegar-la de tal manera que a partir d'una làmina s'obtingui una forma de "V" per exemple. L'embotició, en canvi és usada per a obtenir formes finals més acurades, ja que produeix una deformació més severa de la xapa. Aquest és un procés molt utilitzat en la indústria, que permet obtenir una gran varietat de productes, com poden ser olles, peces per a l'automoció, etc. El motiu del seu èxit, rau en el fet que un cop fabricat el motlle i el punxó necessaris en el procés permet obtenir el producte amb una certa rapidesa. L'inconvenient que té per això, és que, com s'ha comentat, és necessària la fabricació de punxó i motlle. Això fa que per a sèries llargues de peces, aquest cost quedi amortitzat, però per a sèries petites o fins i tot peces úniques no surt a compte. Aquí és on entra en joc la deformació incremental de xapa (Incremental Sheet Forming, ISF, en anglès).

Aquest procés és bastant senzill d'explicar: consisteix en una deformació local sobre la xapa, que està subjecta en un Centre de Control Numèric (CNC). Aquesta deformació és realitzada per un punxó, que va al lloc on normalment hi ha la fresa. El punxó té punta semiesfèrica, i en el procés s'utilitza lubricant per tal de reduir la fricció i els efectes negatius d'aquesta sobre la xapa. Existeixen diferents tipus de punxó (semiesfèric, de punta de bola etc.) i un mateix punxó pot ser utilitzat per a fabricar diferents peces, la única cosa que canviarà serà el programa del CNC per tal d'efectuar trajectòries del punxó diferents i així obtenir diverses peces. És per això que l'ISF és una tecnologia ideal per a la fabricació de lots reduïts de peces, o de peces úniques fins i tot.

La deformació esmentada anteriorment, produïda pel punxó, es realitza quan aquest segueix una trajectòria programada en un pla. Un cop realitzada aquesta primera trajectòria, l'eina baixa una profunditat determinada que dependrà de diferents paràmetres com poden ser el tipus d'eina, el material de la xapa, el gruix i la rugositat d'aquesta, etc. Un cop l'eina ha baixat aquesta profunditat, realitzarà una nova trajectòria en el nou pla, que és paral·lel a l'anterior. La successió d'aquestes trajectòries, ens permet obtenir la forma final de la peça. Aquest procés queda definit gràficament a la Figura 1.1:

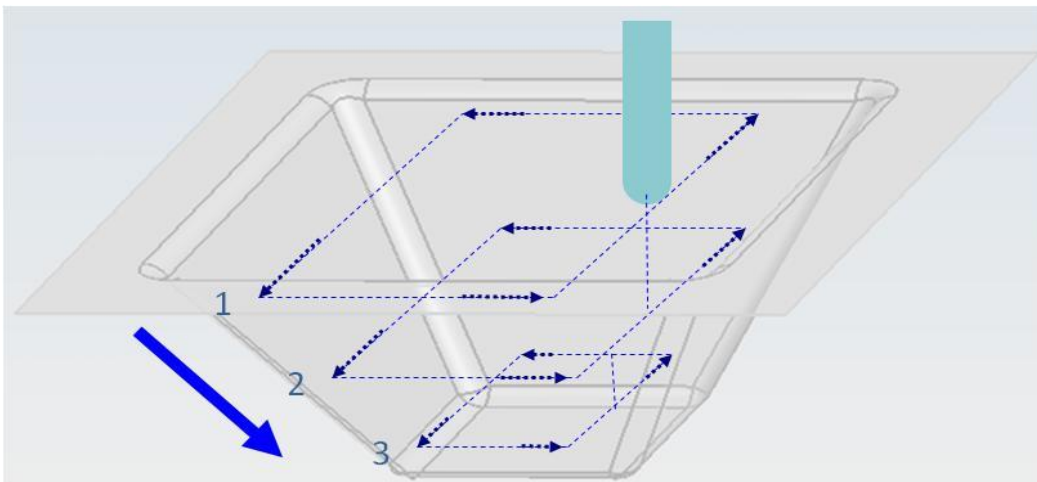


Figura 1.1 Esquema de funcionament de la tecnologia.

Dins de l'ISF hi ha diverses variants, d'entre les quals en destaquen i se'n descriuran dues, que són les més importants.

1.1.1.1 Single Point Incremental Forming (SPIF)

Igual que en la següent variant, la xapa és subjectada per pressió en els seus extrems, i l'eina segueix la trajectòria programada prèviament per tal d'obtenir la geometria desitjada.

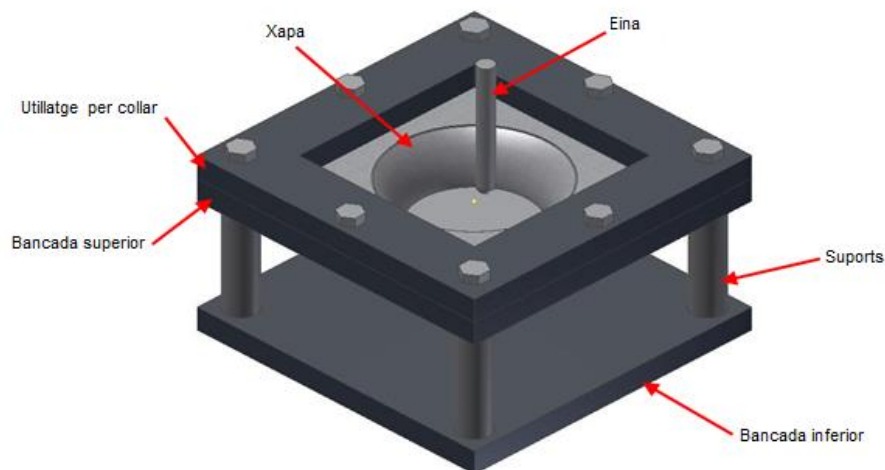


Figura 1.2 Esquema funcionament SPIF (Extret de Bagudanch et al., 2014)

Els principals avantatges del SPIF són:

- Execució de la peça directament des de l'arxiu CAD.
- No existeix matriu ni positiva ni negativa.
- Els canvis en el disseny són executats fàcil i ràpidament.
- Utilització d'una màquina CNC convencional fàcilment adaptable al procés de deformació de la xapa.
- Les dimensions de la peça només depenen de les dimensions de l'utilatge, de la taula de la màquina, etc.
- Acabat superficial acceptable.

Els principals desavantatges són:

- Limitat a petits lots de producció.
- Més temps de procés comparat amb mètodes més convencionals.
- Efecte Springback (recuperació elàstica), que pot ser minimitzat amb la utilització d'algoritmes correctors de la trajectòria de l'eina.

1.1.1.2 Two Point Incremental Forming (TPIF)

En aquesta segona variant, hi intervé un nou element: la matriu. Així doncs, es tenen dos punts on hi ha aplicada la força: el primer punt és el contacte entre l'eina i la xapa (igual que en el cas de SPIF), i el segon punt, és on hi ha el contacte entre la xapa i la matriu.

La matriu pot ser total o parcial, i el procés pot ser negatiu, quan l'eina recorre la part interior de la geometria desitjada, i positiu, quan recorre la part exterior. Aquest segon cas sol ser més complicat d'executar, ja que s'ha de sincronitzar el moviment vertical de l'eina (quan baixa un cop finalitzada una trajectòria per fer la següent) i el moviment vertical del sistema de subjecció en la mateixa direcció i sentit que el de l'eina.

S'ha de tenir en compte que la matriu pot ser fabricada amb una gran varietat de materials, normalment els més utilitzats poden ser fusta o resines polimèriques, degut al seu baix cost i facilitat de mecanització. El fet de que els motlles puguin ser fabricats amb aquests materials, és perquè no han de suportar forces gaire elevades, al contrari que en l'embotició.

Els principals avantatges de la tècnica TPIF són:

- Millor acabat dimensional en comparació amb la tècnica SPIF (Attanasio et al., 2008).
- Facilitat i rapidesa per fabricar el motlle en comparació amb l'embotició.

Els inconvenients són:

- Variant més llarga i costosa que la variant SPIF degut a la necessària fabricació de la matriu.
- Muntatge experimental més complex.

A continuació, en la Figura 1.3 es pot veure, esquemàticament, la diferència entre els diferents tipus de TPIF i SPIF.

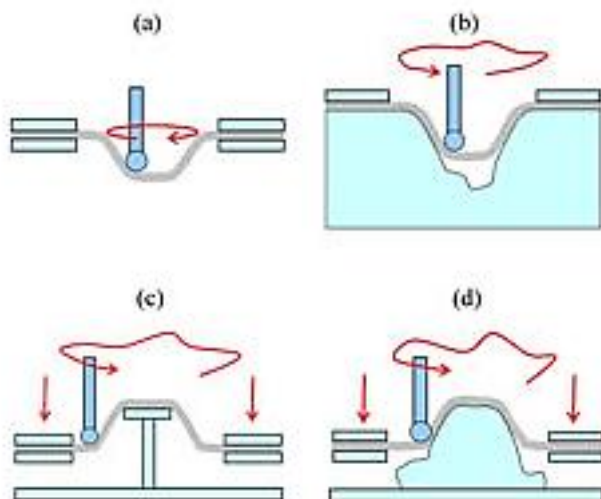


Figura 1.3 Esquema funcionament de les diferents tècniques d'ISF: a)SPIF, b)TPIF matriu negativa, c)TPIF matriu positiva parcial i d)TPIF matriu positiva total

1.1.2 ISF en polímers

El primer treball de recerca on es va demostrar la viabilitat en la utilització de materials plàstics, per a la producció de peces amb ISF va ser realitzat per Franzen et al. (2008). El treball va centrar-se en l'avaluació del procés en la utilització del PVC (Policlorur de Vinil) en aplicacions utilitzant la variant de SPIF. Tant els límits de formabilitat com la precisió van ser caracteritzats i avaluats, mitjançant la variació de diferents paràmetres del procés (gruix de la xapa i diàmetre de l'eina). Per a realitzar aquest estudi va utilitzar-se una geometria de con truncat.

En un altre treball, Le et al. (2008), es van publicar els resultats d'un conjunt preliminar d'experiments mitjançant SPIF en PP (Polipropilè). Els experiments consistien en un conjunt de 2^{4-1} , amb tres rèpliques de cada experiment. Els factors analitzats eren el pas incremental, mida de l'eina, velocitat d'avanç i velocitat de rotació. La resposta analitzada va ser l'angle de paret màxim que s'assolia en un con truncat amb angle de paret variable. Es va estudiar la influència dels paràmetres de procés i la seva interacció.

El treball de Martins et al. (2009) es va basar també en l'avaluació de l'aplicabilitat de diferents materials polímers en el procés SPIF. Va estudiar cinc

polímers: POM, HDPE, PA, PVC i PC. Per a cada un es va obtenir un FFLDs (Fracture Forming Limit Diagrams). En aquest cas l'espessor de xapa era 2 i 3 mm. Es van avaluar modes de falla, tensió a la ruptura, formabilitat, precisió de la peça final i variació del color durant la deformació en fred. Mitjançant tota aquesta informació es va obtenir un mecanisme de selecció de materials polimèrics basats en la ductilitat, recuperació elàstica, variació del color i cost.

Altres estudis més actuals poden ser per exemple el realitzat per Silva et al. (2010), on es va identificar un marc teòric per a les condicions de falla d'un dels modes prèviament identificats, que permeten estudiar quantitativament i qualitativa la influència dels paràmetres de procés. El cas es va basar en l'estudi i anàlisi en experiments en SPIF utilitzant xapes de PVC.

Un treball posterior, Marques et al. (2012), va ampliar el model analític descrit prèviament per Silva et al. (2010), per tal de ser capaç de modelar el segon i el tercer mode de falla per mitjà d'una anàlisi de membrana. En aquest cas l'experimentació es va dur a terme mitjançant els materials: PET, PA, PVC i PC.

Un altre exemple d'estudi realitzat sobre materials polímers, més concretament sobre PVC, és el que va estar realitzat en el GREP, va estudiar-se l'aplicabilitat de diferents models de comportament en ISF sobre PVC (Bagudanch et al., 2015).

1.2 Objecte

L'objecte d'aquest projecte consisteix en comparar les variants SPIF i TPIF de la tècnica de deformació de xapa ISF per als polímers Policarbonat (PC) i Policlorur de vinil (PVC). Així doncs es complementarà l'experimentació en ISF sobre polímers que ja hi ha feta, en aquest cas sobre xapes de PC i PVC utilitzant la tècnica TPIF. Es realitzaran els mateixos experiments amb la tècnica TPIF que s'han fet amb anterioritat utilitzant la tècnica SPIF per tal de poder-ne comparar els resultats.

L'interès del projecte rau en el fet de ser el primer estudi que es fa de l'ISF en la variant TPIF sobre materials polimèrics. Fins al moment, tots els estudis s'han centrat en el SPIF, i els pocs que hi ha sobre el TPIF estan realitzats en materials metàl·lics.

1.3 Abast

Per tal d'estudiar les variants esmentades anteriorment, l'anàlisi del projecte inclou:

- Disseny del motlle utilitzant el programari SolidWorks.
- Definició de les trajectòries per SPIF i TPIF utilitzant el CAM PTC Creo.
- Fabricació del motlle.
- Realització d'un disseny d'experiments a realitzar (DOE) per a la validació de la tecnologia.
- Mesura de forces i de l'alçada màxima assolida durant el conformat.
- Mesura dels perfils de les peces i rugositats i anàlisi de resultats obtinguts mitjançant les anàlisis estadístiques ANOVA.
- Obtenció i anàlisi dels resultats per poder fer la comparació de les dues variants: SPIF i TPIF.

1.4 Especificacions

A continuació es descriuen les diferents especificacions de què consta el projecte. Estan dividides en diferents categories i qualificades com a especificacions Requerides (R) o especificacions Desitjades (D).

A més, s'han dividit en dues taules. En la primera, la Taula 1.1, hi consten les especificacions referents a la fabricació i obtenció del motlle i en la Taula 1.2 hi consten les especificacions referents a l'estudi i comparació del TPIF.

Taula 1.1 Especificacions referents al disseny i fabricació del motlle.

Nom	R/D	Descripció
Objectiu	R	Construcció d'un motlle per ser collat al centre de mecanitzat de control numèric i poder realitzar experiments amb la tecnologia <i>Incremental Sheet Forming</i> , més concretament la variant TPIF.
Funció	R	Recopilar informació sobre geometries utilitzades per fer els experiments de TPIF.
	R	Dissenyar un motlle que permeti subjectar la xapa de manera que s'impossibiliti el moviment d'aquesta durant l'execució del procés i alhora collar aquest a la taula dinamomètrica Kistler.
	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	Taula dinamomètrica Kistler 9257B.
	R	Software de disseny mecànic, SolidWorks.
	R	Software CAM, CREO Parametric.
Dimensions	R	Dimensions màximes de l'utilatge 250x250x150 mm per tal que les xapes de material siguin reduïdes i permeti estalvi de costos.
	R	La mida final del motlle ha de ser més gran al de la geometria descrita en l'apartat 1 per tal d'allotjar la xapa amb les mides finals corresponents. Concretament varia l'amplada de la piràmide de 105 a 109mm.

Material	R	Bloc d'alumini per a la fabricació del motlle.
	R	Cargols i femelles per a les unions.
	D	Utilitzar la màxima quantitat de peces disponibles al taller.
Eines	R	Freses vàries.
	R	Broques.
	R	Testejar les diferents opcions dels programes CAM per aconseguir una correcta generació de la trajectòria.
	D	Adaptar un programa per generar trajectòries.
Terminis	R	Finalització juny de 2015.
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.

Taula 1.2 Especificacions referents a l'estudi i comparació de la tecnologia TPIF.

Nom	R/D	Descripció
Objectiu	R	Experimentació en TPIF i posterior anàlisi i comparació amb SPIF.
Funció	R	Realitzar una sèrie d'experiments amb els mateixos paràmetres que experiments anteriors amb SPIF.
	R	Realitzar la comparativa entre les dues variants de ISF realitzant els experiments de TPIF i comparant-los amb resultats de SPIF obtinguts en altres treballs.
	D	Trobar un model per predir la força màxima del procés de conformat.
	D	Aplicació a un cas real: pròtesi cranial.
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, Solid Works.
	R	Software CAM, CREO Parametric.
	R	Lubricant.
Dimensions	R	Dimensions màximes de les xapes han de ser de 200x200x1,5 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 (5000 N).
	R	Geometries de diàmetre superior a 20 mm per evitar col·lisions amb el sistema de subjecció de l'eina.
Material	R	Xapes de PVC de 1,5 mm.
	R	Xapes de PC de 1,5 mm.
Eines	R	Punxó semiesfèric, varis materials i diàmetre 10 mm i 6mm.
Metodologia	R	Realització d'un Disseny d'Experiments reduït (DOE).
	R	Avaluació de la influència dels paràmetres d'entrada en els resultats finals mitjançant una anàlisi estadística (ANOVA).
	R	Comparativa dels resultats obtinguts del TPIF amb el SPIF.
Terminis	R	Finalització, juny de 2015.
Experimentació	R	Experimentar variant els paràmetres per tal d'obtenir els resultats destinats a la comparativa dels processos.
	R	Mesurar forces de conformat i formabilitat de les peces obtingudes.
Costos	R	Minimitzar el cost del material utilitzat.

2 METODOLOGIA I EXPERIMENTACIÓ

2.1 Geometria

Als inicis de l'experimentació sobre aquesta tecnologia s'han utilitzat geometries simples amb un angle de paret constant per tal d'avaluar els límits de formabilitat del material. Aquestes geometries han estat piràmides truncades (Ambrogio et al., 2004) i cons truncats (Fratini et al., 2004). Els experiments aconseguen determinar el límit de formabilitat per tal de comparar-lo amb el comportament del mateix material en l'embotició. Per tal de determinar aquest límit, al fer servir geometries de paret constant, se n'havien de crear moltes, en les que l'angle anés variant, per tal d'arribar al límit del material, on a partir de cert angle trenqui sempre.

Actualment les geometries que s'utilitzen són més complexes, per tal d'evitar realitzar un nombre tan elevat d'experiments. Les geometries actuals doncs, deriven de cons o piràmides truncades, en les que se'ls dona a les parets un angle variable, amb radi de generatriu, etc. D'aquesta manera s'obtenen les mateixes dades que amb geometries anteriors, amb l'avantatge de poder reduir el nombre d'experiments.

Així doncs, la geometria utilitzada en aquest projecte és una piràmide truncada, amb generatriu circular, per la qual cosa l'angle de la paret varia a mesura que s'augmenta la profunditat. El motiu d'aquesta elecció, no és cap altre del fet de voler comparar els resultats dels futurs experiments, amb els resultats ja obtinguts en altres projectes que han utilitzat aquesta geometria. Així doncs, la piràmide utilitzada és com la de la Figura 2.1 i les mesures són: amplada de la piràmide és de 105 mm, amb un angle de paret inicial de 45° i el radi de generatriu està fixat a 80 mm. L'angle final és de 80° per tal de poder analitzar els límits de formabilitat depenent de les condicions de procés definides en l'apartat 2.5 Disseny d'experiments (DOE).

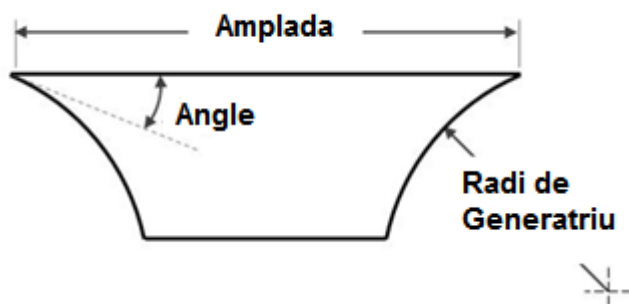


Figura 2.1 Esquema de la piràmide truncada usada en els experiments

2.2 Material

Els polímers amorfs consisteixen en molècules llargues unides de manera covalent que es distribueixen a l'atzar. A més cada molècula pot canviar la seva posició espacial mitjançant la rotació sobre els enllaços covalents que formen la columna vertebral de la cadena, la seva posició de major equilibri és una espiral formada a l'atzar. Se suposa que les cadenes ocupen les seves configuracions més probables en l'estat no deformat, però deformacions en les xarxes els obliga a assumir configuracions menys probables que depenen de la forma externa del material, però no de la temperatura amb la corresponent reducció del seu valor d'entropia.

Al 1943, James i Guth consideraven aquestes cadenes, com a cadenes perfectament flexibles. La velocitat a la que una cadena pot canviar la seva conformació depèn de la temperatura i la força. A altes temperatures els canvis en la cadena són ràpids i les cadenes es poden moure lliurement, tenint un comportament similar al de la goma. En canvi a baixes temperatures (per sota de la temperatura de transició vítria), la mobilitat d'aquestes queda reduïda ja que es converteix en vidre, tot i que la mobilitat de les cadenes encara és possible.

Per entendre millor els mecanismes de resposta dels materials polimèrics s'utilitza una prova uniaxial simple com el de la Figura 2.2. S'observa que a valors baixos de deformació, la mobilitat de la cadena és insignificant. Si la càrrega aplicada augmenta, la mobilitat de les cadenes també augmenta. S'ha de destacar que hi ha dos fenòmens durant els processos de càrrega, que són el reblaniment i l'enduriment per deformació.

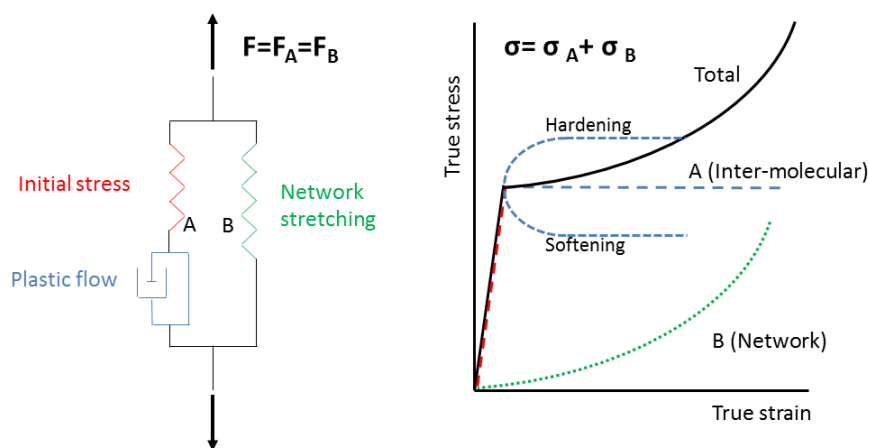


Figura 2.2 Esquema dels mecanismes de resposta dels materials polimèrics

La magnitud de les tensions respecte la força, no només depèn de la velocitat de deformació, sinó també de la temperatura aplicada. És important saber que quan la taxa de mobilitat de la cadena aconseguix el mateix valor que la velocitat de deformació experimental aplicada en una prova uniaxial senzilla, les molècules flueixen de manera constant.

És evident que els materials polimèrics tenen un comportament dràsticament diferent als metalls, ja que aquests són xarxes cristal·lines d'àtoms ben ordenats, en canvi les molècules en els materials polimèrics es componen d'àtoms de carboni units per una cadena llarga que s'assembla a la col·locació de trossos de fil enredats.

En els experiments s'ha optat per dos tipus materials polimèrics que són el Policarbonat (PC) i el Policlorur de Vinil (PVC).

2.2.1 Policarbonat (PC)

El PC pertany al grup dels termoplàstics, és fàcil de treballar i termoformar, motiu pel qual és àmpliament usat en la indústria moderna. En la Figura 2.3 es pot veure la seva estructura interna mentre que en la Taula 2.1 s'hi especifiquen detalladament les seves principals propietats.

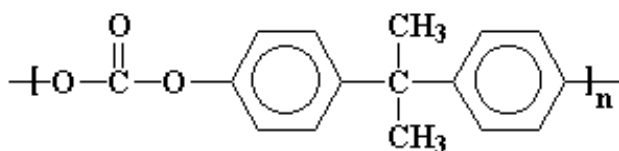


Figura 2.3 Esquema molecular del PC

Taula 2.1 Propietats del PC

Propietats PC	
Composició	$[C_3H_6(C_6H_4)_2CO_4]_n$
Mòdul elasticitat	2500 MPa
Resistència a la tensió	65 MPa
Elongació	110%
Temperatura de transició vítria	150°C
Temperatura de fusió	230°C

2.2.2 Policlorur de Vinil (PVC)

Pel que fa al PVC, es caracteritza per ser dúctil i tenaç; presenta estabilitat dimensional i resistència ambiental, a més de ser bon aïllant tèrmic i elèctric. Aquest producte resulta de la polimerització del monòmer clorur de vinil, i el seu aspecte sol ser de color blanc. És un material que comença a reblanir al voltant dels 80°C, i que s'acaba descomponent als 140°C.

També cal destacar, que en la indústria existeixen dues variants d'aquest material: la rígida, i la flexible. En els futurs experiments, s'usarà la variant rígida. La seva estructura molecular és com la mostrada en la Figura 2.4 i les seves principals característiques són les que figuren a la Taula 2.2.

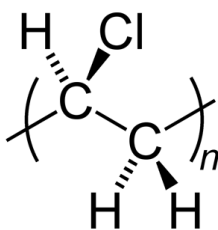


Figura 2.4 Esquema molecular del PVC

Taula 2.2 Propietats del PVC

Propietats PVC	
Composició	$(C_2H_3Cl)_n$
Mòdul elasticitat	2800 MPa
Resistència a la tensió	40 MPa
Elongació	2%
Temperatura de transició vítria	81°C
Temperatura de fusió	212°C

2.3 Fabricació del motlle

Per tal de fabricar el motlle amb la forma negativa de la piràmide exposada anteriorment, s'ha creat la geometria amb el programa SolidWorks. Un cop obtingut el model en 3D del que ha de ser el motlle a fresar, s'importa la geometria al programa PTC Creo. A partir de la geometria que s'ha entrat al programa, aquest permet crear el fitxer amb el codi que llegeix la màquina. Aquest fitxer conté tota la informació pel que fa a trajectòries de l'eina, velocitats d'avanç, de rotació, canvis d'eina, etc.

Cal destacar que la passada final, un cop fetes les corresponents passades de planejat, desbast etc. es va fer amb un fresolí de punta rodona, de diàmetre 6mm amb una velocitat de gir de 3000 rpm, una velocitat d'avanç de 500mm/min i amb una profunditat de passada màxima de 0,2 mm. Pel que fa a les passades de desbast i planejat es van fer amb un fresolí planer de 20 i 16mm de diàmetre respectivament a una velocitat de gir de 3000rpm i un avanç de 300mm/min. La profunditat de passada màxima es va fixar als 0,5mm.

La màquina utilitzada en aquest procés ha estat un centre de control numèric Deckel maho 64Vlinear (Figura 2.5) instal·lat en el taller de l'edifici P2 de l'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Girona.



Figura 2.5 Centre de mecanitzat Deckel maho 64Vlinear.

El material usat en el motlle piramidal, ha estat alumini, ja que es pot considerar un material tou a l'hora de ser mecanitzat.

Durant la fabricació del motlle, es van realitzar una sèrie de 8 forats a cada cara, com es pot veure en la Figura 2.6, resultant un total de 16 forats roscats a M8. Els forats mostrats en la imatge, serveixen per collar la xapa al motlle durant l'execució dels experiments, mentre que els altres 8 forats (idèntics als de la Figura 2.6 però a la cara de sota) serveixen per collar el motlle al centre de mecanitzat a través de la taula dinamomètrica: El motlle es colla a la taula dinamomètrica, mentre que aquesta és collada al centre de mecanitzat.

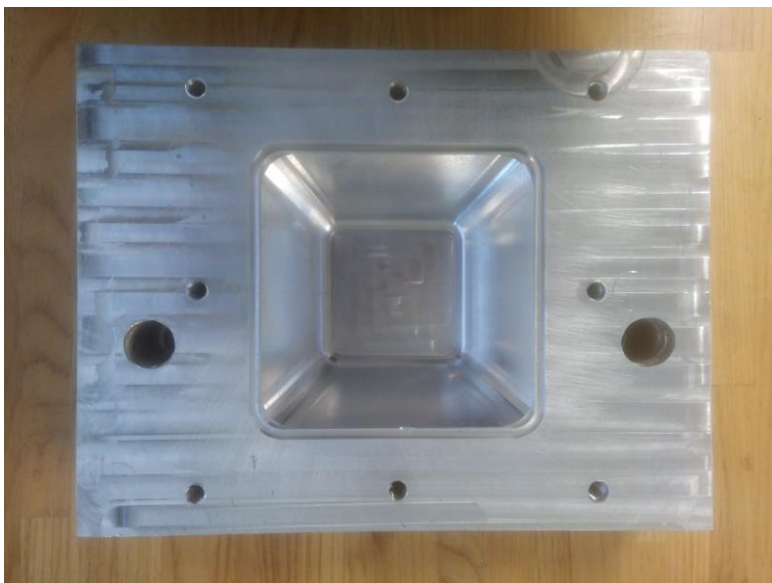


Figura 2.6 Motlle negatiu d'alumini amb la forma de la piràmide

Cal esmentar, que la geometria negativa de la piràmide al motlle és sensiblement superior a la geometria que es vol obtenir de l'experiment, ja que el motlle ha d'allotjar la xapa de gruix 1,5mm. La geometria detallada d'aquest es pot veure a l'annex A PLÀNOLS.

2.4 Muntatge experimental

2.4.1 Màquina

La màquina utilitzada per tal de dur a terme els experiments de TPIF, és un Centre de Control Numèric (CNC), Kondia® HS1000. A la taula de treball del CNC s'hi ha collat una taula dinamomètrica Kistler® 9257B que servirà per tal de poder mesurar les forces que pateix la xapa durant el moment de la deformació. Aquestes forces són capturades i processades gràcies a la targeta d'adquisició de dades DaqBoard® 505 i el software DaqView 9.0.0.



Figura 2.7 Centre de mecanitzat utilitzat per dur a terme els experiments de TPIF

A l'hora de definir les trajectòries que realitza la màquina per a la obtenció de la peça, s'ha tingut en compte que hi ha dos tipus de trajectòries, amb diferents estratègies cada una.

1) Trajectòries verticals

- a. Pas incremental (Δz) constant.
- b. Altura de cresta (Δh) constant.
- c. Increment angular ($\Delta\theta$) constant.

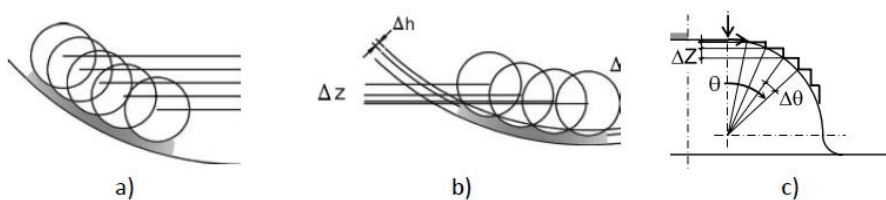


Figura 2.8 a) Pas incremental constant b) Altura de cresta constant c) Increment angular constant

2) Trajectòries XY

- d. Sentit únic
- e. Alternant els sentits
- f. Espiral

En el cas d'aquest projecte s'ha optat per una trajectòria vertical de pas constant (*depth step*), però en aquest cas s'ha forçat que hi hagi dos tipus de pas incremental un de 0,2 mm i l'altre de 0,5 mm.

Pel que fa al gir de l'eina, s'alterna, a excepció dels casos que gira lliurement, una passada amb gir horari amb una altra passada amb gir antihorari. Per altra banda pel que fa al moviment en el pla XY, s'ha optat, per una alternança en el moviment d'avanç de l'eina: l'eina realitzarà una passada en sentit horari i la següent en sentit antihorari i així consecutivament durant tot l'experiment. D'aquesta manera s'evita que aparegui el fenomen de torsió en l'experiment, cosa que podria provocar deformacions que alterarien els resultats obtinguts.

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

2.4.2 Eina

Com ja s'ha comentat anteriorment, en totes les tècniques de deformació per ISF, s'utilitza un punxó de punta semiesfèrica. En aquest cas, per a la realització dels diferents experiments s'utilitzaran dues eines de radis diferents: una amb radi de 6 mm i l'altre amb radi de 10 mm. Les dues eines estan fabricades amb material Vanadis 23. En la Figura 2.10 es pot observar l'eina de diàmetre menor, en la Figura 2.9 es pot observar en canvi l'eina amb el diàmetre més gran col·locada en el portaeines.

El Vanadis 23, és un acer pulvimetal·lúrgic d'alt rendiment per a treball en fred, apte per a conformació tant de materials metàl·lics com en aquest cas de materials polimèrics com el policarbonat i el policlorur de vinil. Les eines aniran fixades mitjançant un portaeines tipus *Weldon* tal i com es pot observar en la Figura 2.9 on s'observa el capçal amb una de les eines que s'utilitzaran durant el procés, concretament l'eina de diàmetre 10 mm.



Figura 2.9 Portaeines Weldon amb l'eina de Ø10 col·locada



Figura 2.10 Eina de Ø6mm

2.4.3 Lubricació

En aquest tipus de procés la lubricació és vital per tal de reduir la fricció entre eina i peça, ja que si aquesta fos molt elevada produiria una gran quantitat de calor que acabaria empitjorant l'acabat superficial de la peça final i/o podria arribar a fondre el material.

La màquina amb la que s'està treballant, ja disposa d'un sistema de lubricació, però en el cas d'aquest projecte, s'ha optat per una opció més manual. És a dir, es realitza l'aportació de lubricant manualment, just abans d'iniciar el procés. No s'utilitza el sistema de lubricació de la màquina ja que el centre de mecanitzat s'ha convertit en una màquina híbrida, en la qual també s'hi duen a terme processos de sinterització de pols metàl·lica i de tall amb làser. Degut a la presència del làser és important assegurar que la zona de treball sigui el més neta possible, és per això que el lubricant s'aplica de manera manual a sobre la superfície de la xapa, utilitzant així la quantitat justa de lubricant per tal de reduir la fricció entre l'eina i la xapa i per aconseguir un bon acabat superficial.

L'elecció del tipus de lubricant, dependrà del material sobre el que es treballi, material de l'eina, etc. En aquest cas s'està treballant sobre PC i PVC amb gruixos de 1,5mm tal i com s'ha descrit en apartats anteriors. En projectes anteriors s'ha utilitzat majoritàriament una emulsió d'aigua i sabó i en altres treballs realitzats com per exemple els de Bagudanch (2011) o Lupiañez (2012), en aquests casos per a la fabricació amb xapes d'acer inoxidable, es va arribar a la conclusió que el lubricant més adient era un lubricant líquid tipus Houghton TD-52 ideal per a processos de deformació en fred. També en el PFG de Gil (2013) es van fer diferents assajos en els que es provava l'efectivitat del sistema de lubricació comparant-ne 3: una emulsió d'aigua i sabó, grassa i el lubricant Houghton essent aquest últim el que va donar millor resultat en un material polímer (PVC).

L'aplicació d'aquest lubricant serà de forma manual de manera que quedi una certa quantitat de lubricant sobre la xapa en la que es treballi, quedant la superfície de treball coberta per una capa del mateix, tal i com es pot observar a la Figura 2.11.

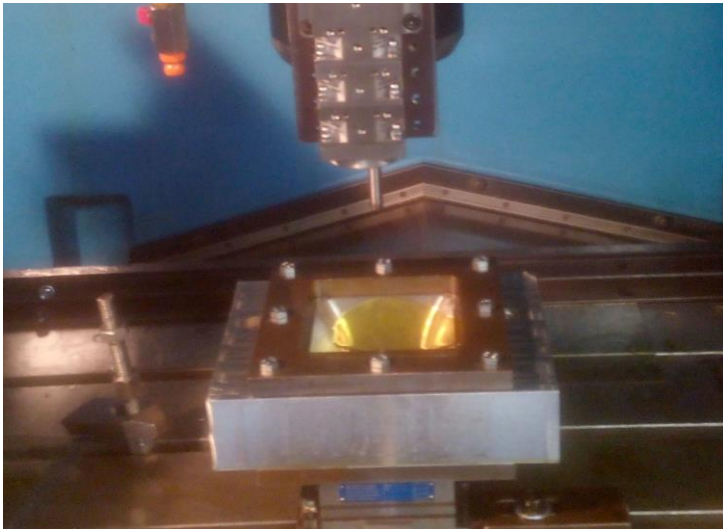


Figura 2.11 Muntatge experimental amb el lubricant aplicat a la xapa

2.4.4 Muntatge

Com s'ha comentat en l'apartat Fabricació del motlle, el motlle consta de 8 forats a la cara inferior i 8 forats més a la cara superior. Els 8 forats de la cara inferior són utilitzats per tal de collar el motlle a la taula dinamomètrica Kistler® 9257B. Així ja es té el motlle fixat a la taula de treball de la màquina a través de la taula dinamomètrica.

A la cara superior del motlle, els 8 forats són utilitzats per collar part de l'utilatge fet servir en experiments previs (Bagudanch, 2011 i posteriors). Així doncs, amb part d'aquest utilatge (un marc amb els 8 forats per collar la xapa al motlle), només cal introduir la xapa per tenir el muntatge a punt per a cada experiment.

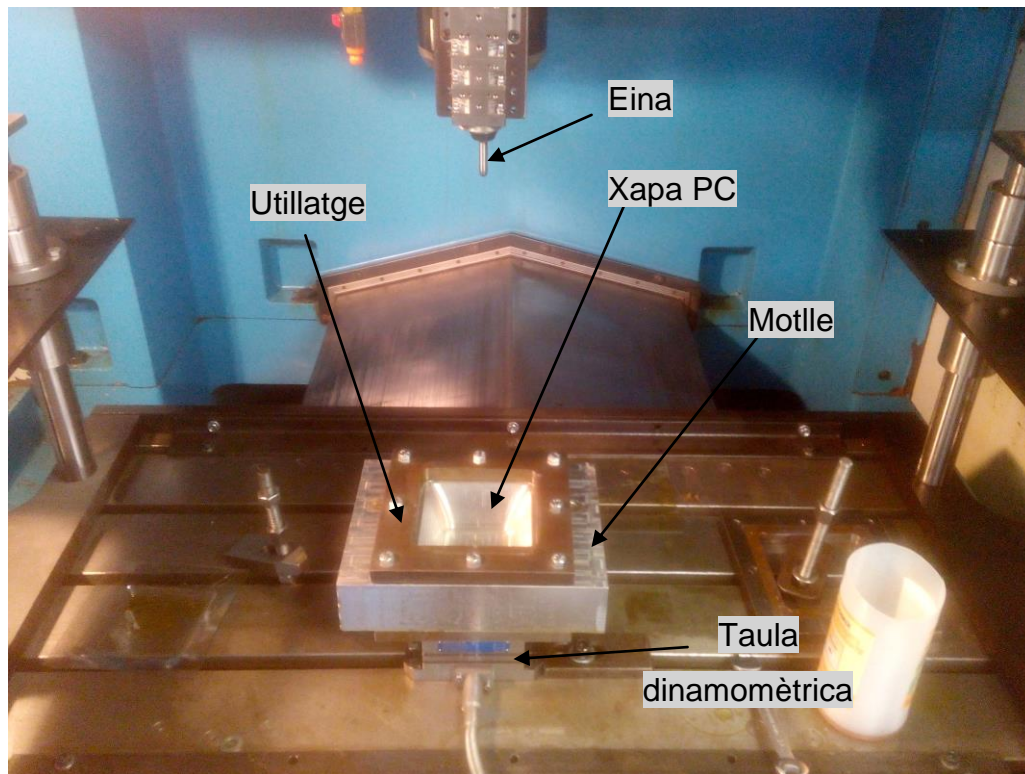


Figura 2.12 Taula de treball en el moment previ a un experiment

2.5 Disseny d'experiments (DOE)

Com que l'objectiu d'aquest projecte és el de poder comparar la tecnologia TPIF amb la SPIF, s'han hagut de fer els mateixos experiments que en projectes anteriors. Així doncs, els experiments de TPIF que es duran a terme en aquest projecte, han de ser iguals que els que s'han fet en projectes anteriors amb la tècnica SPIF. Per dissenyar aquest experiments es va efectuar l'elecció de dos nivells de paràmetres, un nivell alt i un nivell baix. Amb la combinació d'aquests dos nivells es va fer un disseny d'experiments on cada experiment tingués una combinació diferent entre tots els nivells i així es podria determinar la influència que té cada paràmetre en el resultat final. Els valors dels dos nivells escollits per fer el disseny dels experiments es poden veure a la Taula 2.3.

Taula 2.3 Visualització dels dos nivells de paràmetres

Factor	Nivell baix	Nivell alt
Pas incremental (mm)	0,2	0,5
Diàmetre de l'eina (mm)	6	10
Velocitat d'avanç (mm/min)	1500	3000
Velocitat de rotació (rpm)	Lliure*	2000

*Lliure significa que l'eina rotarà lliurement depenent de la fricció entre l'eina i la xapa.

Un cop definits els nivells s'ha efectuat un disseny exponencial reduït 2^{4-1} amb 16 experiments i s'ha utilitzat el programa Minitab perquè, a través de les dades dels dos nivells introduïdes, generés el DOE a realitzar, obtenint així els experiments mostrats a la Taula 2.4.

Taula 2.4 Disseny d'experiments (DOE)

Experiment	Material	Pas incremental (mm)	Diàmetre eina (mm)	Avanç (mm/min)	Vel. Rotació (rpm)
1	PC	0,2	6	3000	Lliure*
2		0,2	6	1500	2000
3		0,5	6	3000	2000
4		0,5	6	1500	Lliure*
5		0,5	10	1500	2000
6		0,2	10	1500	Lliure*
7		0,2	10	3000	2000
8		0,5	10	3000	Lliure*
9	PVC	0,2	6	3000	Lliure*
10		0,2	6	1500	2000
11		0,5	6	3000	2000
12		0,5	6	1500	Lliure*
13		0,5	10	1500	2000
14		0,2	10	1500	Lliure*
15		0,2	10	3000	2000
16		0,5	10	3000	Lliure*

Durant l'execució de cadascun dels experiments s'han fet les mesures de forces necessàries per poder fer el procés de conformat, el rang de temperatures que s'assoleixen en els experiments i l'alçada màxima assolida. Així, a partir d'aquests resultats es podrà procedir a l'anàlisi i comparació.

2.6 Adquisició de dades

2.6.1 Mesura de forces

Al aplicar deformació a la xapa, el centre de mecanitzat Kondia sotmet la xapa a forces, principalment en l'eix vertical, a través de l'eina connectada al portaeines de la màquina.

Per mesurar aquestes forces necessàries per a la deformació es disposa d'una taula dinamomètrica Kistler® 9257B muntada sobre la taula de treball del centre de mecanitzat. A sobre d'aquesta taula dinamomètrica, com s'ha comentat en l'apartat 2.4.4 Muntatge, s'hi colla el motlle que transmetrà directament les forces aplicades sobre la xapa a la taula dinamomètrica. Aquestes forces són enregistrades per una targeta d'adquisició de dades DaqBoard 505 i processades pel software Daqview 9.0.0. En cop enregistrades, les dades obtingudes són tractades amb el programa informàtic Matlab, que permet representar totes les forces en una gràfica.

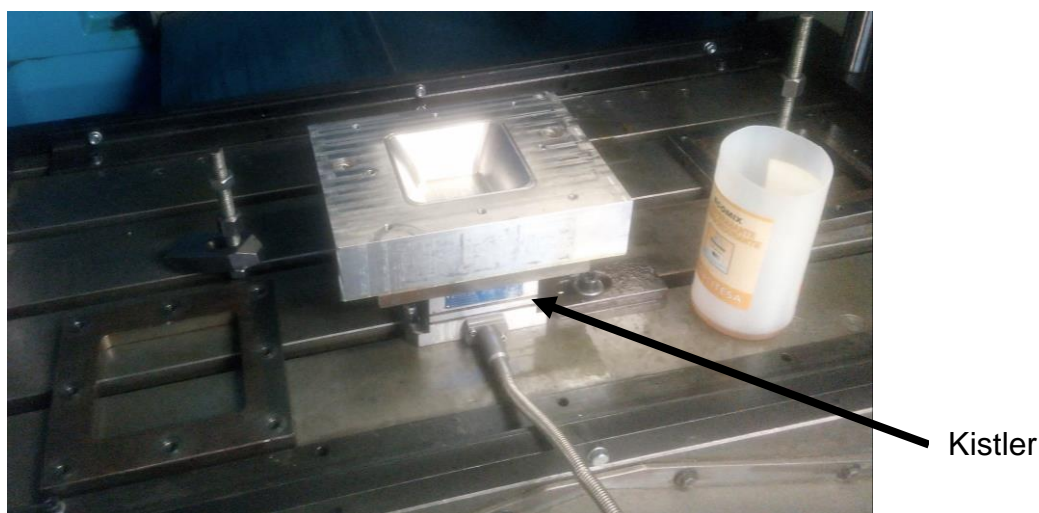


Figura 2.13 Muntatge del motlle sota la taula dinamomètrica

2.6.2 Mesura de profunditat

Per a la mesura de profunditat no cal cap aparell extern al centre de mecanitzat CNC, ja que a la pròpia pantalla del CNC apareix la posició de l'eina en coordenades relatives a la peça. Aquesta posició mostrada a la pantalla va variant a mesura que l'eina de la màquina es mou, així que quan l'experiment trenca tan sols cal fer una lectura del valor z.

2.6.3 Mesura de temperatura

En tots els processos d'ISF, quan l'eina deforma el material per contacte genera fricció, que a la vegada produeix un augment en la temperatura de l'eina i també de la xapa.

Tot i que en el present projecte no es mostren ni s'estudien els resultats de la temperatura en cada experiment, s'ha considerat oportú fer-ne una lectura ja que pot ser útil per a futurs projectes.

Per mesurar aquesta temperatura s'ha optat per utilitzar una càmera termogràfica, la qual enregistra imatges amb la distribució de temperatures sobre la superfície de la xapa, localitzant i quantificant en cada instantània el seu valor màxim. El model de càmera utilitzada és el model IRBIS ImageIR 33000 Infratec. Les imatges enregistrades per aquesta, es processen amb el software IRBIS 3.0.



Figura 2.14 Càmera termogràfica

2.6.4 Mesura de la rugositat

Com més endavant es veurà, resulta molt útil tenir valors mitjans de rugositat de cada experiment per tal de poder avaluar la qualitat de les proves i poder comparar els diferents materials i tecnologies. Per realitzar aquestes mesures s'ha utilitzat un rugosímetre de la marca Mitutoyo model Surfest SV-2000. Les dades obtingudes es tracten amb el software Surfpack-Sv Version 1.300.

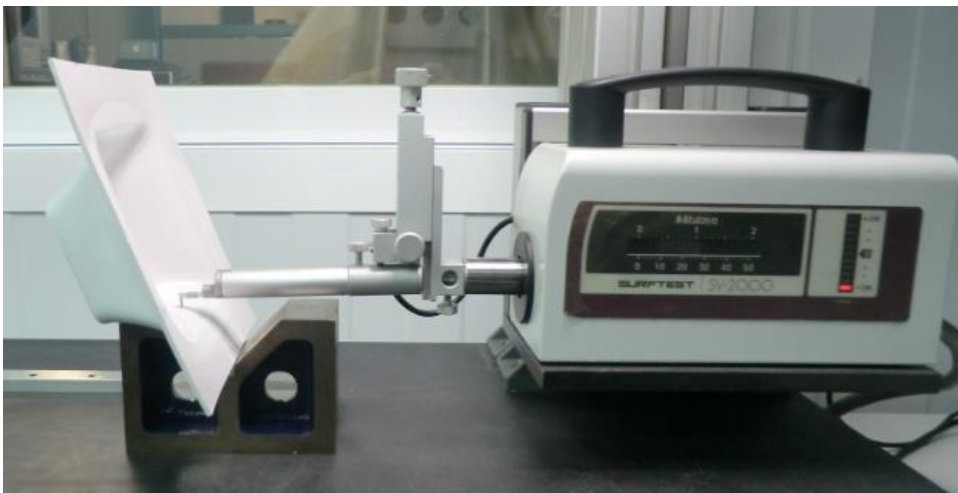


Figura 2.15 Rugosímetre en el moment de lectura d'una xapa de PVC

2.6.5 Mesura dels perfils

Per poder fer una comparació acurada de forma i dimensions del resultat final, és indispensable disposar d'una màquina de lectura de perfil. Amb les lectures d'aquesta màquina, com més endavant, en l'apartat 3.4 Geometria obtinguda, es veurà, podem analitzar les diferències i millores que s'obtenen amb TPIF respecte SPIF. També permet veure la recuperació elàstica del material, l'alçada màxima assolida per l'experiment etc. La màquina utilitzada per fer aquestes lectures ha estat la Màquina de mesura de coordenades Mitutoyo Crysta Apex 544.

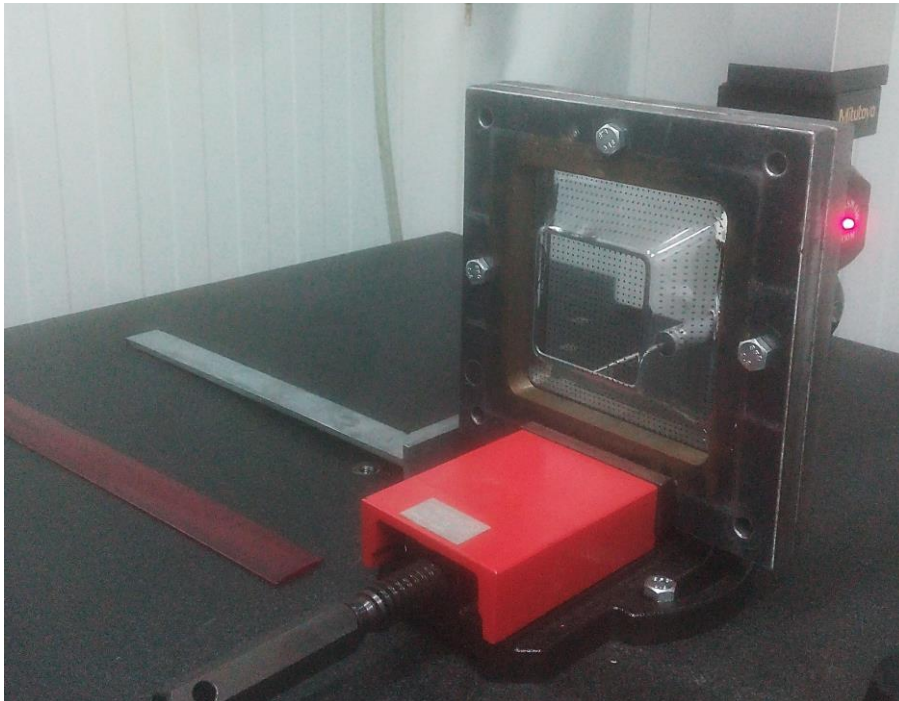


Figura 2.16 Màquina de mesura de coordenades durant la mesura d'un experiment de PC

3 RESULTATS I DISCUSSIÓ

Cal recordar que el gruix de les mostres és de 1,5mm en tots els casos. A continuació a la Taula 3.1 es mostren els resultats dels experiments de TPIF, aportats en aquest projecte, i els resultats d'experiments de SPIF extrets de projectes anteriors (Lleget, 2014).

Taula 3.1 Resultats dels experiments TPIF i SPIF

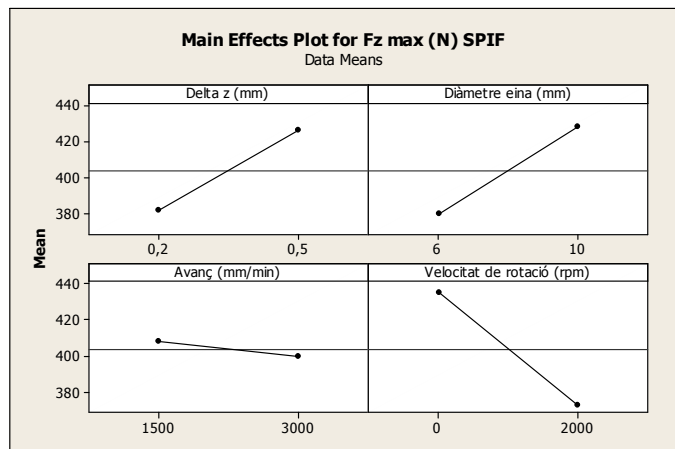
Experiment	Força màx. (N) TPIF	Z màx. (mm) TPIF	Ra (µm) TPIF	Força màx. (N) SPIF	Z màx. (mm) SPIF	Ra (µm) SPIF
1	316,63	30,40	0,126	311,48	26,93	0,073
2	336,75	34,40	2,468	397,55	31,07	0,193
3	369,80	32,50	1,182	400,26	35,50	0,135
4	359,06	29,00	0,268	409,03	31,83	0,107
5	387,97	32,50	1,677	350,71	30,17	0,721
6	431,23	27,20	0,242	474,93	30,80	0,136
7	373,03	34,40	1,319	341,95	30,80	0,623
8	530,45	32,50	0,214	545,46	36,33	0,222
9	292,66	42,80	0,616	288,27	36,00	0,377
10	275,57	43,00	0,594	323,79	35,41	0,359
11	280,89	43,00	0,778	248,50	39,02	0,443
12	318,44	42,50	0,479	313,86	35,24	0,422
13	340,02	43,00	0,497	317,29	39,97	1,611
14	411,07	42,20	0,626	395,79	34,17	0,352
15	347,49	43,00	0,528	303,06	42,35	0,374
16	408,38	43,00	0,426	342,03	42,75	0,408

A partir d'aquestes dades, es pot realitzar una anàlisi i comparació acurada de les dues variants d'ISF.

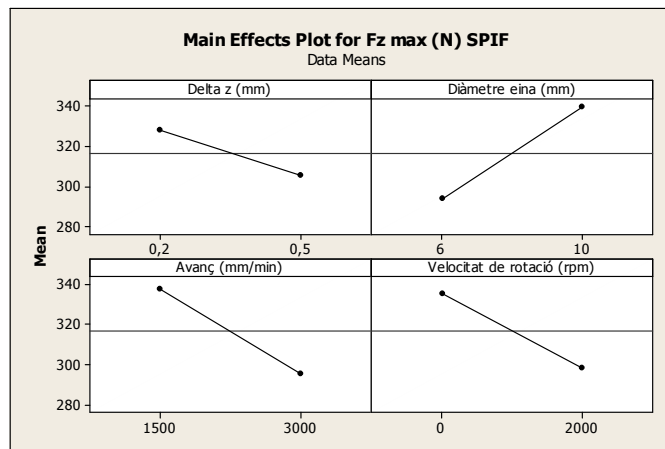
Així doncs per tal de comparar les dues tecnologies, s'ha procedit a l'anàlisi amb gràfics ANOVA de cadascuna d'elles. A continuació es mostra com afecten diversos paràmetres a un mateix experiment realitzat dues vegades: una amb SPIF i l'altra amb TPIF.

3.1 Força

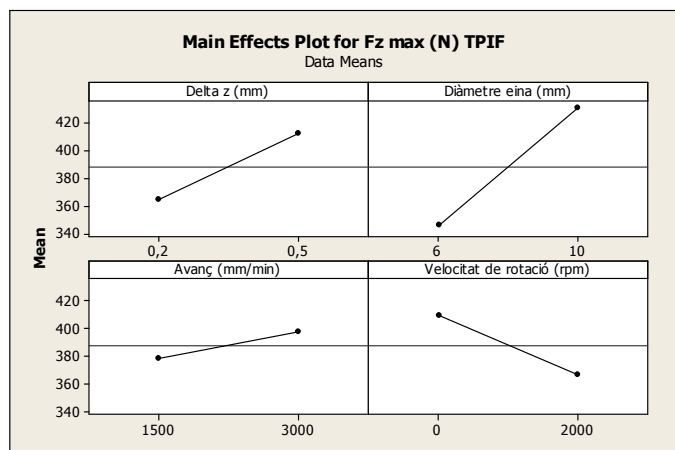
Els gràfics mostrats a continuació ensenyen com la variació d'un paràmetre afecta a la força: si la línia mostrada té un pendent positiu, significa que l'increment d'aquest paràmetre també suposa un increment en la força empleada per a la deformació. En canvi, si el pendent és negatiu, significa que un increment en aquest paràmetre suposarà una disminució en la força.



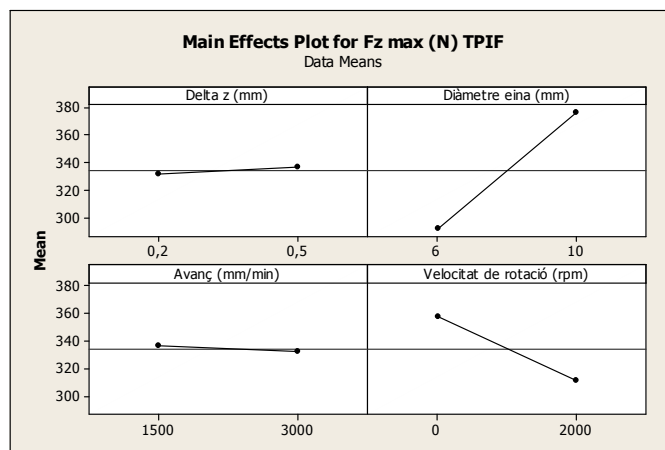
a) PC



b) PVC



c) PC



d) PVC

Figura 3.1 Anàlisi estadística de la força en funció de les tècniques i els materials: a)SPIF i PC, b)SPIF i PVC, c)TPIF i PC i d)TPIF i PVC

3.1.1 TPIF

A la Figura 3.1 c) i d) es pot observar com afecten els diferents paràmetres a la tecnologia TPIF. El paràmetre que més influeix en el procés és el diàmetre de l'eina, ja que quan major és aquest, més gran és la força necessària per deformar el material. Això s'explica pel fet que quan el diàmetre de l'eina és major, aquesta té una superfície de contacte amb la xapa més gran, i per tant deforma més material. Això es tradueix en un augment de la força. L'altre paràmetre més significatiu és la velocitat de rotació de l'eina. A més velocitat de rotació, menor força ja que la fricció generada per la rotació provoca un increment més gran en la temperatura. Així doncs, aquesta temperatura s'acosta més a la temperatura de transició vítria, en la que deformar el material és més fàcil ja que aquest presenta una millor plasticitat. Els altres 2 paràmetres, profunditat de passada i avanç són molt menys significatius pel que fa a la força necessària per a la deformació.

3.1.2 Comparació PC amb PVC en TPIF

Com s'ha comentat anteriorment, el paràmetre més significatiu és el diàmetre de l'eina, i afecta de la mateixa manera i d'igual forma als 2 materials. En el cas de la velocitat de rotació, també afecta d'igual forma tant al PC com al PVC. En canvi la profunditat de passada i l'avanç mostren comportaments diferents depenent del material. La profunditat de passada és un factor que pren certa importància en el cas del PC però en canvi és pràcticament irrellevant en el cas del PVC. Això pot ser degut a la diferència entre la temperatura de transició vítria que té cada material, que en el cas del PC és de 150°C i en el cas del PVC és de 81°C. Una profunditat de passada gran fa que es deformi més material en menys temps en comparació a una profunditat de passada menor, per tant és necessària més força. Aquest comportament és el que queda reflectit en el PC, però en el cas del PVC aquesta tendència és pràcticament imperceptible ja que al tenir una temperatura de transició vítria de gairebé la meitat que el PC, la deformació del material és molt més plàstica, i per tant aquest factor no té rellevància quan es té en compte la força. L'avanç també és un paràmetre que a mesura que augmenta també augmenta la

quantitat de material deformat en menys temps en comparació a un avanç menor, per tant també és necessària més força quan aquest paràmetre augmenta. En el cas del PC, que es deforma a una temperatura molt allunyada de la seva temperatura de transició, aquest comportament queda perfectament reflectit al gràfic, però pel cas del PVC no es pot dir el mateix, ja que el pendent s'acosta a una recta.

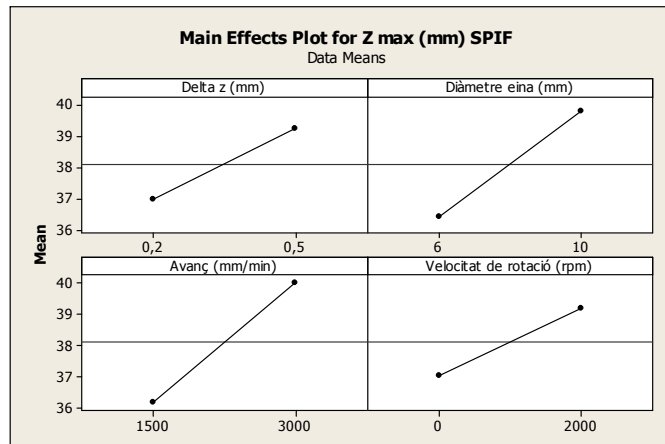
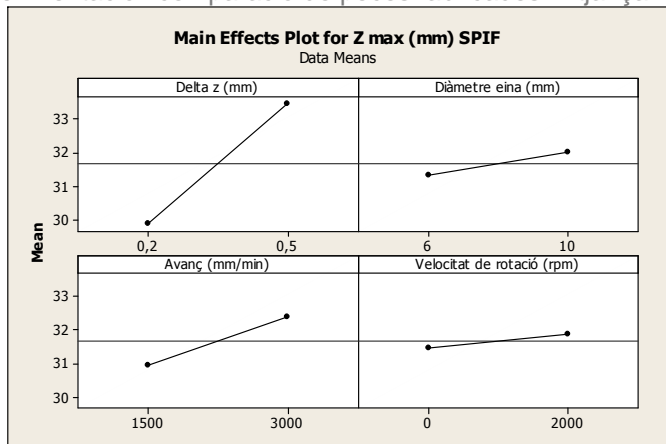
3.1.3 Comparació SPIF amb TPIF

D'entrada es veu que la força màxima mitjana és superior en el cas del PC per SPIF arribant als 403,92N, mentre que pel TPIF és de 388,12N. En canvi en el cas del PVC passa al revés, ja que en SPIF la força mitjana és de 316,57 i per TPIF és de 334,32N. En investigacions anteriors sobre l'efecte de les tecnologies SPIF i TPIF en materials metàl·lics, també es va trobar una diferència entre les forces màximes mitjanes molt insignificant, fet pel qual no es va poder extreure cap conclusió vinculant. En aquest cas la diferència en ambdós materials també és molt petita (de 15,18N pel PC i 17,75N pel PVC) i per tant tampoc es pot buscar una justificació vàlida.

Els comentaris fets anteriorment referents al diàmetre de l'eina són igualment vàlids per el cas de SPIF, ja que com es veu en la Figura 3.1 els gràfics presenten el mateix pendent que en TPIF. La velocitat de rotació de l'eina es veu com també afecta d'igual forma les dues tecnologies fent que la força necessària per la deformació disminueixi a mesura que augmenta la rotació. La profunditat de passada, tot i mostrar diferències significatives entre els 2 materials degut a la diferència en les respectives temperatures de transició vítria, fa que la força es vegi afectada d'igual forma en les dues tecnologies: En PC una major profunditat de passada representa més força aplicada en la deformació per a les dues tecnologies en canvi en el PVC és al contrari també per ambdues tecnologies. Finalment l'avanç és un factor que afecta molt poc en tots 4 casos i que en tot cas cal destacar que en PVC i SPIF un avanç major sí que representa menys força necessària per a la deformació, ja que aquest avanç provoca un augment de la temperatura de la xapa ocasionat per l'augment en la fricció.

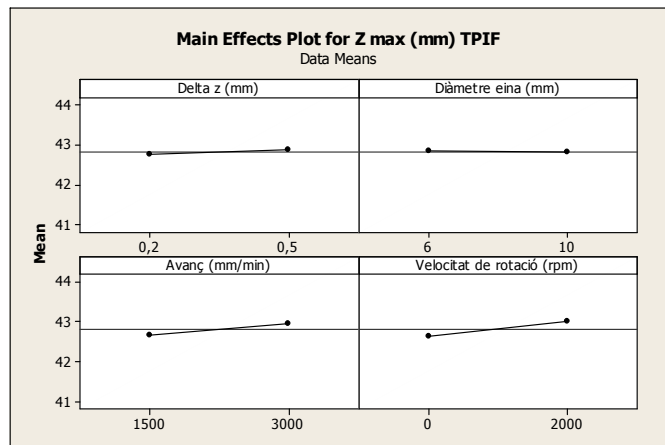
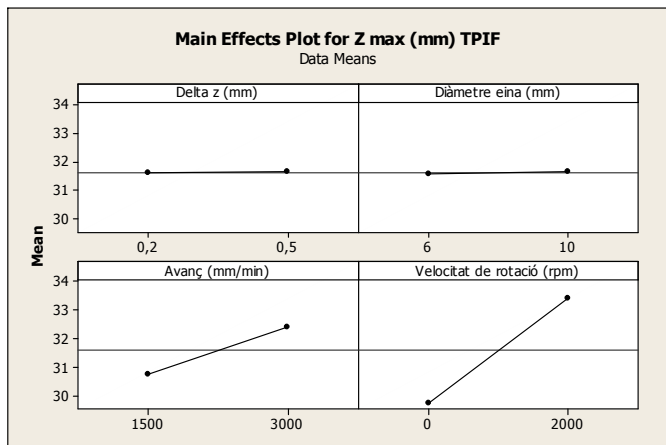
3.2 Alçada màxima

Els gràfics mostrats a continuació, a la Figura 3.2, ensenyen com la variació d'un paràmetre afecta a l'alçada final de la piràmide. Aquesta alçada màxima o profunditat a la que arriba la peça és un factor molt important, ja que determina la viabilitat de fabricar la peça sota els paràmetres concrets en els que es realitza l'experiment concret. A més, l'alçada màxima és utilitzada com a indicador de la formabilitat del material. Cal dir, que en el cas del PC tots els experiments han trencat abans d'arribar a l'alçada programada, a diferència del PVC on només han trencat 3 dels 8 experiments realitzats. Com ja s'ha explicat anteriorment per a la variació d'altres paràmetres, aquest fet es deu bàsicament a la diferència de temperatura vítria que presenten els 2 materials. És per això que el PC té tendència a deformar-se de forma més fràgil que no pas el PVC, que ho fa més plàsticament.



a) PC

b) PVC



c) PC

d) PVC

Figura 3.2 Anàlisi estadística de l'alçada màxima en funció de les tècniques i els materials: a) SPIF i PC, b) SPIF i PVC, c) TPIF i PC i d) TPIF i PVC

3.2.1 TPIF

A diferència del que passava amb la força, per tal d'aconseguir l'alçada màxima el diàmetre de l'eina és un paràmetre que no juga cap paper important. Veiem com tant en el PC com en el PVC el gràfic s'aproxima a una recta. El mateix passa amb la profunditat de passada. En canvi l'avanç sí que és significatiu. Quan major és l'avanç més alta acaba sent la piràmide. Pel que fa a la velocitat de rotació, presenta un comportament similar a l'avanç.

3.2.2 Comparació PC amb PVC en TPIF

Com s'ha comentat en l'anterior apartat, el diàmetre de l'eina i la profunditat de passada no juguen cap paper important en l'alçada final de l'experiment. En canvi l'avanç i la velocitat de rotació sí que afecten a la fondària final de l'experiment. En PC per a les dues variables l'alçada ens varia d'igual forma: a mesura que augmenta el paràmetre també augmenta l'alçada final. Això és degut a que són dos paràmetres que augmenten la fricció entre l'eina i la xapa i per tant fan que la temperatura a la que es troba el PC durant l'experiment s'acosti més a la temperatura de transició vítria. Aquest mateix comportament s'observa en les gràfiques del PVC, però com que utilitzant aquest material només han trencat 3 dels 8 experiments, les rectes tenen un pendent molt menys pronunciat, així doncs, els paràmetres són menys influents alhora d'arribar a l'alçada màxima de la piràmide. Finalment cal evidenciar que com que en el cas del PVC només han trencat 3 experiments, la mitjana de l'alçada màxima és de 42,813mm, significativament més gran que la del PC que és de 31,612mm. Així doncs es pot concloure que sota aquestes condicions el PC és més fràgil.

3.2.3 Comparació SPIF amb TPIF

La diferència més significativa que s'observa comparant les dues tecnologies és que en SPIF, a diferència del que passa en TPIF, el diàmetre de l'eina i la profunditat afecten positivament a l'alçada de la piràmide: al augmentar el seu valor, també augmenta l'alçada de l'experiment. Aquesta diferència en el cas del PVC s'explica, com s'ha comentat amb anterioritat pel

fet que la majoria dels experiments s'han executat fins al final. La resta de paràmetres, afecten d'igual forma l'experiment, i per tant es comporten igual tan en TPIF com en SPIF. Altre cop el motiu és que l'avanç i la velocitat de rotació són dos paràmetres que estan lligats amb l'augment de fricció entre la peça i la xapa. Conseqüentment també produeixen un augment de temperatura, i per tant el material acaba sent més deformable.

3.3 Rugositat

La rugositat és un altre dels paràmetres més importants perquè determinarà la qualitat superficial de la peça acabada. Les rugositats obtingudes amb els experiments presenten uns valors molt diferents depenent del material. En el cas del PC la mitjana de rugositat és de $0,937\mu\text{m}$ mentre que pel PVC és de $0,568\mu\text{m}$.

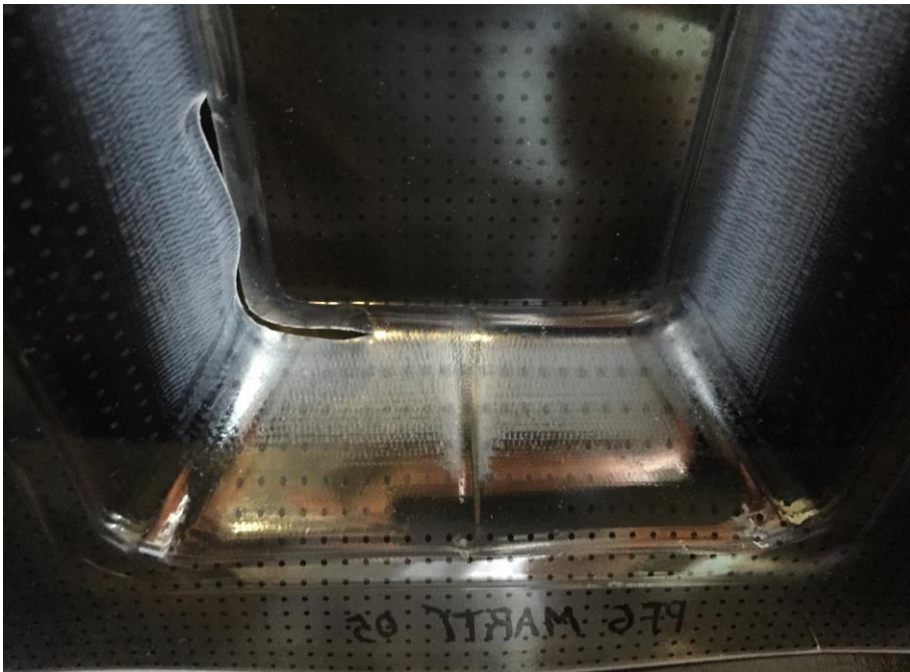
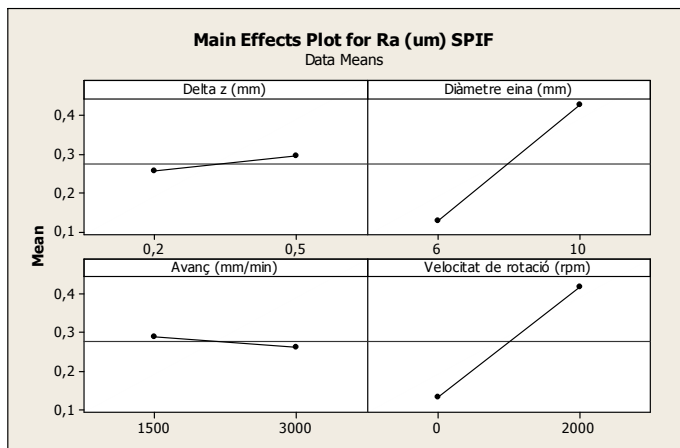
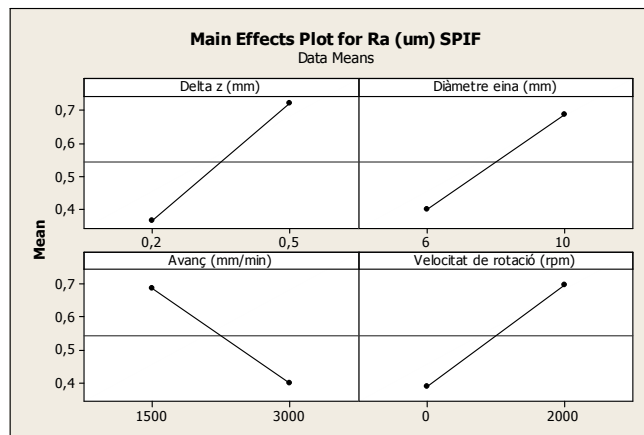


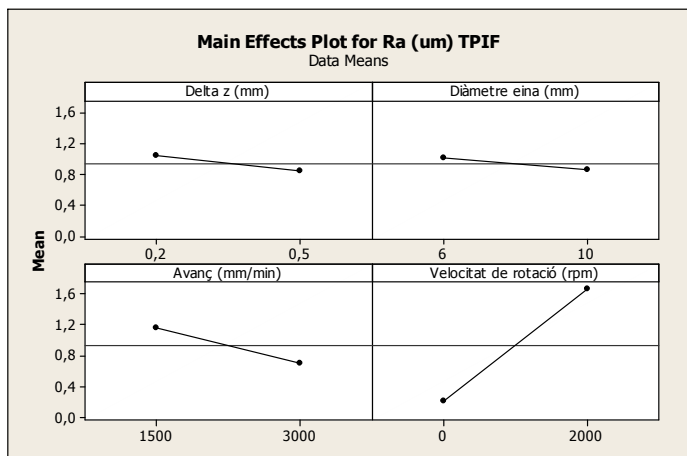
Figura 3.3 Vista interior de la piràmide 05 on s'observa la rugositat superficial



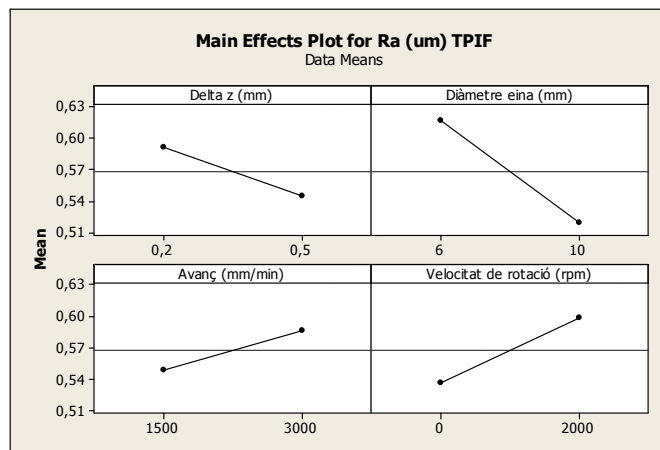
a) PC



b) PVC



c) PC



d) PVC

Figura 3.4 Anàlisi estadística de la rugositat en funció de les tècniques i els materials: a)SPIF i PC, b)SPIF i PVC, c)TPIF i PC i d)TPIF i PVC

3.3.1 TPIF

A grans trets s'observa que a excepció de l'avanç en TPIF, la resta de paràmetres afecten de la mateixa manera als 2 materials.

3.3.2 Comparació PC amb PVC en TPIF

D'entrada a la Taula 3.1 es pot observar com el PC té unes rugositats més elevades que el PVC. En el cas del PC la mitjana és de $0.937 \mu\text{m}$ mentre que pel PVC és de $0.568 \mu\text{m}$. Això és perquè el PC presenta una superfície estriada en aproximadament els últims 10mm de la meitat dels experiments, més concretament dels experiments on l'eina tenia rotació. Aquesta zona d'estriat és on s'han fet les lectures de les rugositats. Aquest fenomen pot ser degut a que quan l'eina s'apropa a les últimes passades per realitzar l'experiment el contacte eina-xapa, xapa-motlle pot fer que l'eina provoqui un arrossegament de partícules de PC fent que aquest presenti l'estriat esmentat anteriorment i mostrat a la Figura 3.3. Aquestes partícules doncs es reestructuren de forma que la rugositat és el paràmetre que en surt més mal parat. Aquestes estries per això, estan ocasionades en gran part per la velocitat de rotació, ja que només són presents en aquells experiments en què s'ha fet girar l'eina. Així doncs la velocitat de rotació també és un dels paràmetres que afecta més negativament l'acabat superficial de la piràmide: quan major és aquesta velocitat pitjor acabat superficial presenta l'experiment. El motiu és que quan l'eina gira a altes revolucions exposa el material a un desgast major degut a la l'erosió provocada per l'elevada fricció entre xapa i eina.

El diàmetre de l'eina afecta d'igual forma als dos materials, fent que quan major és aquest, més bon acabat superficial presenta l'experiment. Aquest comportament però, és molt poc marcat en el cas del PC mentre que en el PVC la recta té més pendent.

Pel que fa a l'avanç, afecta de forma contrària als 2 materials: Pel PVC un avanç major significa un pitjor acabat superficial, mentre que pel PC un avanç major significa més bon acabat superficial.

Per arribar a uns resultats concloents pel que fa als 2 últims paràmetres esmentats, caldria realitzar més experiments, més rèpliques.

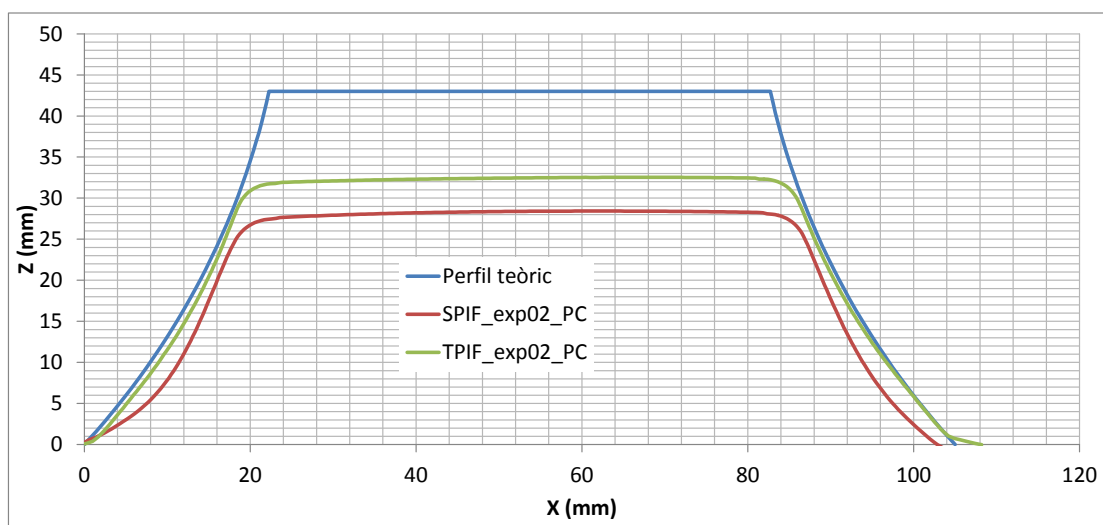
3.3.3 Comparació SPIF amb TPIF

Mirant els gràfics s'observen diferències molt significatives. Una d'elles és el fet que en SPIF un diàmetre d'eina gran produeix més rugositat a la xapa mentre que en TPIF és al revés.

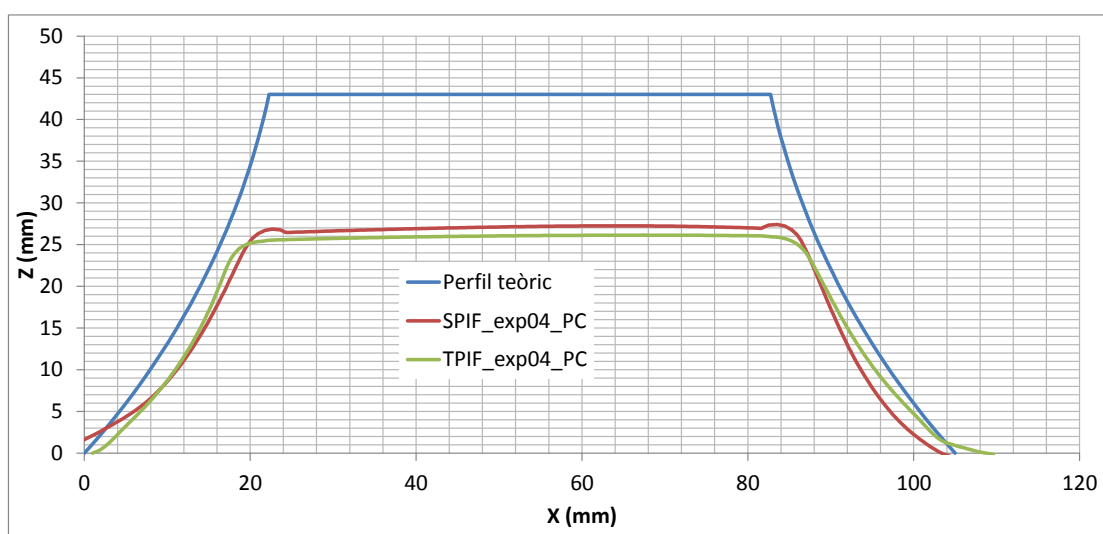
La velocitat de rotació en canvi és un paràmetre que repercuteix d'igual manera a les dues tecnologies: com més alta és aquesta velocitat pitjor acabat superficial presenta la xapa. L'explicació, com s'ha comentat anteriorment, és que l'experiment pateix un desgast major com més giri l'eina, ja que aquesta produeix una fricció que n'eleva la temperatura i degrada la xapa. Cal destacar que les mitjanes per PVC són semblants per a les dues tecnologies: 0,568 μm per TPIF i 0,543 μm per SPIF. En canvi, degut a les estries (que estan a la zona de mesura) que presenten les xapes dels experiments on l'eina ha rotat, la mitjana entre dues tecnologies en el cas del PC és molt diferent: 0,937 μm per TPIF i 0,276 μm per SPIF.

3.4 Geometria obtinguda

3.4.1 PC



a) Exp. 02, rotació de l'eina de 2000rpm



b) Exp. 04, rotació lliure

Figura 3.5 Anàlisi del perfil en funció de les variants d'ISF per a PC

La Figura 3.5 compara el perfil positiu (de la part exterior de la piràmide) dels experiments 02 i 04, que han estat realitzats en PC. Aquesta comparació permet veure les diferències entre el resultat que s'obté amb SPIF i amb TPIF per a cadascun dels experiments.

El cas de l'experiment 02 és on més bé queda reflectida la millora geomètrica que ofereix la variant TPIF respecte el SPIF. Es veu com el perfil resultant del TPIF s'acosta molt més al perfil teòric de la piràmide que el perfil obtingut amb SPIF, el qual presenta una distància de 2,7mm entre la seva paret i la paret teòrica en el punt on estan més separades. Això és degut a que en l'inici de l'experiment de SPIF el fenomen de deformació de la xapa s'aproxima més a un doblegat a l'aire que no pas a la deformació incremental de xapa. En canvi quan hi ha motlle el material presenta certa "memòria" geomètrica que evita part de la recuperació elàstica que tan es pot veure en SPIF. En l'experiment 04 es repeteix el comportament acabat d'esmentat i a més s'observa com els vèrtexs de la piràmide feta amb SPIF pateixen una mena de punxonament fruit de la deformació en l'aire. El fet que en aquest experiment els perfils obtinguts amb les dues variants d'ISF s'allunyin més del perfil teòric és perquè quan l'eina gira lliurement, aquesta produeix menys fricció i per tant també genera menys calor. Aquest augment de temperatura és el que fa que en el cas de l'experiment 02, on l'eina gira a 2000rpm, la piràmide arribi a més alçada sense trencar i hi hagi menys recuperació elàstica.

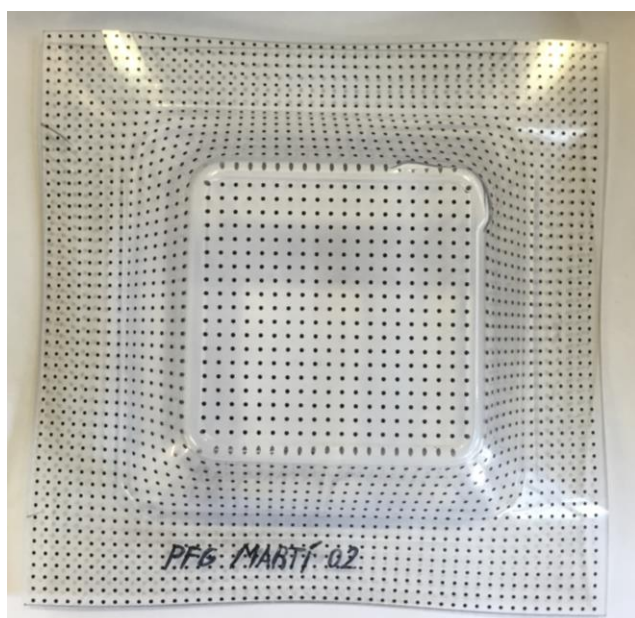
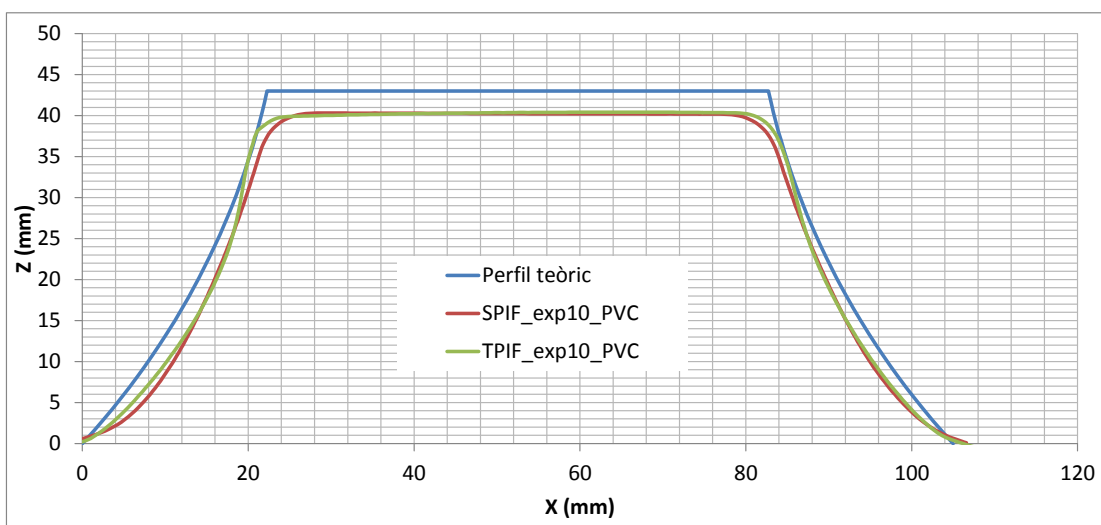
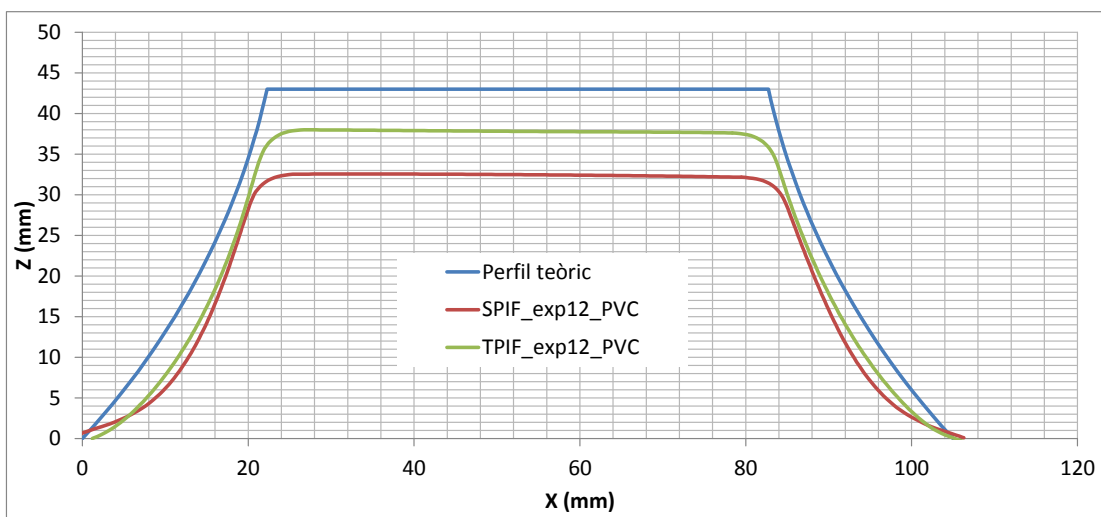


Figura 3.6 Experiment 02 vist des de dalt

3.4.2 PVC



a) Exp. 10, rotació de l'eina de 2000rpm



b) Exp. 12, rotació lliure

Figura 3.7 Anàlisi del perfil en funció de les variants d'ISF per a PVC

En PVC les diferències geomètriques entre els perfils obtinguts amb SPIF i amb TPIF no són tan exagerades com en el cas de l'experiment 02 de PC, però sí que s'observa en la Figura 3.7 que el perfil s'acosta molt més a la geometria ideal, a la geometria teòrica, en el cas de TPIF. En l'experiment 10 per exemple, es veu com la paret de la part superior de la piràmide segueix perfectament el perfil teòric. Aquest fet es deu a que l'eina produeix un aixafament de la xapa contra el motlle fent que es deformi més plàsticament

que en SPIF, i per tant fa que la xapa recordi millor la forma que se li aplica. L'arrodoniment que s'observa en els perfils resultants dels experiments es deu al fet que l'eina és rodona, i degut al seu diàmetre, que mai podrà ser 0, és impossible recrear el vèrtex del perfil teòric. Com a molt es podria reduir el radi del vèrtex utilitzant una eina de diàmetre menor a la que s'ha utilitzat. Finalment cal destacar, que igual que passava amb el PC, en PVC també es pot observar una diferència en el perfil deguda a la velocitat de rotació de l'eina: en l'experiment 10 s'observa una distància de 1,8mm entre els perfils teòrics i experimentals mentre que en l'experiment 12, la distància màxima entre els perfils és de 4mm per a SPIF i de 3,2mm per a TPIF. En aquest últim experiment també s'observa com l'alçada de la piràmide és 7mm superior en TPIF respecte l'experiment fet en SPIF.

Finalment, comparant el PVC amb el PC a grans trets s'observa com el PVC arriba a més alçada ja que com s'ha comentat en nombroses ocasions es deforma de manera més plàstica que el PC, però per contra té més recuperació elàstica: es veu com el perfil de les parets s'allunya més del perfil teòric que no pas el PC.

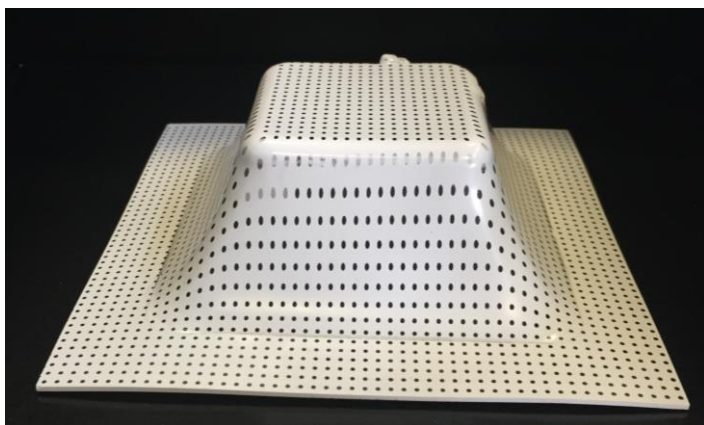


Figura 3.8 Vista lateral d'un experiment en PVC

3.5 Torsió

Tot i que no s'ha fet servir cap instrument per mesurar o quantificar aquest fenomen, es considera oportú comentar-lo, ja que gran part dels experiments en SPIF i algun en TPIF l'han patit.

Inicialment en altres projectes en què s'estudiava l'ISF per a materials metàl·lics, es va optar per alternar sentits horaris i sentits antihoraris en les passades que realitza l'eina.

Aquesta solució per això va resultar no ser suficient en SPIF per a materials polimèrics, on l'efecte de la temperatura combinada amb la gran plasticitat que aquests materials tenen quan aquesta augmenta, permet que la piràmide quedi traccionada sense cap mena d'oposició. Afegint el motlle en el cas de TPIF, s'ha aconseguit limitar aquest fenomen, ja que encara que el material es comporti de forma molt plàstica, les parets del motlle en limiten el moviment. Cal dir però, que aquestes parets no han estat suficient per alguns dels experiments de TPIF realitzats amb PVC, on la temperatura ha estat tan a prop de la seva temperatura de transició vítria, que el material "fluïa" al ritme de l'eina dins el motlle. A la Figura 3.9 es pot veure un exemple de piràmide torsionada fabricada amb la tecnologia TPIF. Pel PC en canvi, la implantació del motlle ha estat més que suficient per eliminar del tot aquest fenomen no desitjat.



Figura 3.9 Exemple d'experiment realitzat amb TPIF i que ha patit torsió

4 CONCLUSIONS

Aquest projecte s'ha centrat en l'anàlisi del procés d'Incremental Sheet Forming (ISF), més concretament de la variant Two Point Incremental Forming (TPIF) i de la comparació d'aquesta amb la variant Single Point Incremental Forming (SPIF) per els materials polimèrics, policarbonat (PC) i policlorur de vinil (PVC).

Amb la proposta de disseny d'experiments (DOE) i mitjançant una anàlisi estadística ANOVA s'ha determinat, que el factor que més influeix en la força de conformat per TPIF és el diàmetre de l'eina, igual que passa amb SPIF. Per a l'alçada màxima en canvi el factor més influent és la velocitat de rotació. Aquests factors que milloren la formabilitat del material reduint la força necessària per deformar-lo, augmentant l'alçada màxima assolida i disminuint l'efecte de recuperació elàstica, estan relacionats amb un augment de la temperatura. Per tal d'executar la deformació, l'eina està constantment en contacte amb la xapa i depenent de certs paràmetres, com per exemple la velocitat de rotació, la fricció que aquesta genera augmenta considerablement la temperatura de la xapa. A l'augmentar la temperatura de la xapa, aquesta s'aproxima a la temperatura de transició vítria, on deformar-la resulta més fàcil. És per aquest motiu, que el PVC arribava a alçades màximes més grans que el PC, perquè la seva temperatura de transició vítria, de 81°C, és molt baixa comparada amb la del PC, que és de 150°C.

Finalment s'ha vist que el paràmetre que més penalitza l'acabat superficial és altre cop la velocitat de rotació. El calor produït per aquesta degrada més el material. Queda clar doncs que la velocitat de rotació juga un paper clau en la deformació de xapa de polímers mitjançant la tècnica TPIF. Però per determinar la influència dels altres paràmetres i arribar a resultats concloents, s'haurien de fer més rèpliques en un futur treball, i així descartar valors atípics que puguin alterar els resultats.

Ha estat però, gràcies a la màquina de coordenades, que s'ha pogut constatar la millora dels resultats obtinguts amb al tècnica TPIF respecte la tècnica SPIF. En SPIF s'ha vist com en l'inici de la deformació de la xapa aquesta pateix una deformació per doblegat, fet que l'allunya de la geometria desitjada. Posant un motlle, s'evita en gran part aquest efecte. Aquest motlle

també ha resultat ser útil de cares a la disminució del fenomen de la recuperació elàstica, que tot i estar també present en el cas de TPIF, és molt menys pronunciat. Finalment, la tecnologia TPIF assegura la desaparició en gran part de la torsió de la peça, tot i que en certs experiments en PVC i degut a l'elevada temperatura, ha estat inevitable veure com la piràmide s'acabava torsionant.

A continuació, a la Taula 4.1 i a la Taula 4.2 es mostra a mode de tancament de projecte, si les especificacions plantejades inicialment a l'apartat 1.4 s'han pogut assolir o no

Taula 4.1 Especificacions referents al disseny i fabricació del motlle.

Nom	R/D	Descripció	
Objectiu	R	Construcció d'un motlle per ser collat al centre de mecanitzat de control numèric i poder realitzar experiments amb la tecnologia <i>Incremental Sheet Forming</i> , més concretament la variant TPIF.	✓
Funció	R	Recopilar informació sobre geometries utilitzades per fer els experiments de TPIF.	✓
	R	Dissenyar un motlle que permeti subjectar la xapa de manera que s'impossibiliti el moviment d'aquesta durant l'execució del procés i alhora collar aquest a la taula dinamomètrica Kistler.	✓
	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	Taula dinamomètrica Kistler 9257B.	✓
	R	Software de disseny mecànic, SolidWorks.	✓
Dimensions	R	Dimensions màximes de l'utilatge 250x250x150 mm per tal que les xapes de material siguin reduïdes i permeti estalvi de costos.	✓
	R	La mida final del motlle ha de ser més gran al de la geometria descrita en l'apartat 1 per tal d'allotjar la xapa amb les mides finals corresponents. Concretament varia l'amplada de la piràmide de 105 a 109mm.	✓

Material	R	Bloc d'alumini per a la fabricació del motlle.	✓
	R	Cargols i femelles per a les unions.	✓
	D	Utilitzar la màxima quantitat de peces disponibles al taller.	✓
Eines	R	Freses vàries.	✓
	R	Broques.	✓
	R	Testejar les diferents opcions dels programes CAM per aconseguir una correcta generació de la trajectòria.	✓
	D	Adaptar un programa per generar trajectòries.	X
Terminis	R	Finalització juny de 2015.	✓
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.	✓

Taula 4.2 Especificacions referents a l'estudi i comparació de la tecnologia TPIF.

Nom	R/D	Descripció	
Objectiu	R	Experimentació en TPIF i posterior anàlisi i comparació amb SPIF.	✓
Funció	R	Realitzar una sèrie d'experiments amb els mateixos paràmetres que experiments anteriors amb SPIF.	✓
	R	Realitzar la comparativa entre les dues variants de ISF realitzant els experiments de TPIF i comparant-los amb resultats de SPIF obtinguts en altres treballs.	✓
	D	Trobar un model per predir la força màxima del procés de conformat.	X
	D	Aplicació a un cas real: pròtesi cranial.	X
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, Solid Works.	✓
	R	Software CAM, CREO Parametric.	✓
	R	Lubricant.	✓

Dimensions	R	Dimensions màximes de les xapes han de ser de 200x200x1,5 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 (5000 N).	✓
	R	Geometries de diàmetre superior a 20 mm per evitar col·lisions amb el sistema de subjecció de l'eina.	✓
Material	R	Xapes de PVC de 1,5 mm.	✓
	R	Xapes de PC de 1,5 mm.	✓
Eines	R	Punxó semiesfèric, varis materials i diàmetre 10 mm i 6mm.	✓
Metodologia	R	Realització d'un Disseny d'Experiments reduït (DOE).	✓
	R	Avaluació de la influència dels paràmetres d'entrada en els resultats finals mitjançant una anàlisi estadística (ANOVA).	✓
	R	Comparativa dels resultats obtinguts del TPIF amb el SPIF.	✓
Terminis	R	Finalització, juny de 2015.	✓
Experimentació	R	Experimentar variant els paràmetres per tal d'obtenir els resultats destinats a la comparativa dels processos.	✓
	R	Mesurar forces de conformat i formabilitat de les peces obtingudes.	✓
Costos	R	Minimitzar el cost del material utilitzat.	✓

5 RELACIÓ DE DOCUMENTS

Aquest projecte es compon dels següents documents:

- Document 1: Memòria i annexos a la memòria.
- Document 2: Pressupost

6 BIBLIOGRAFIA

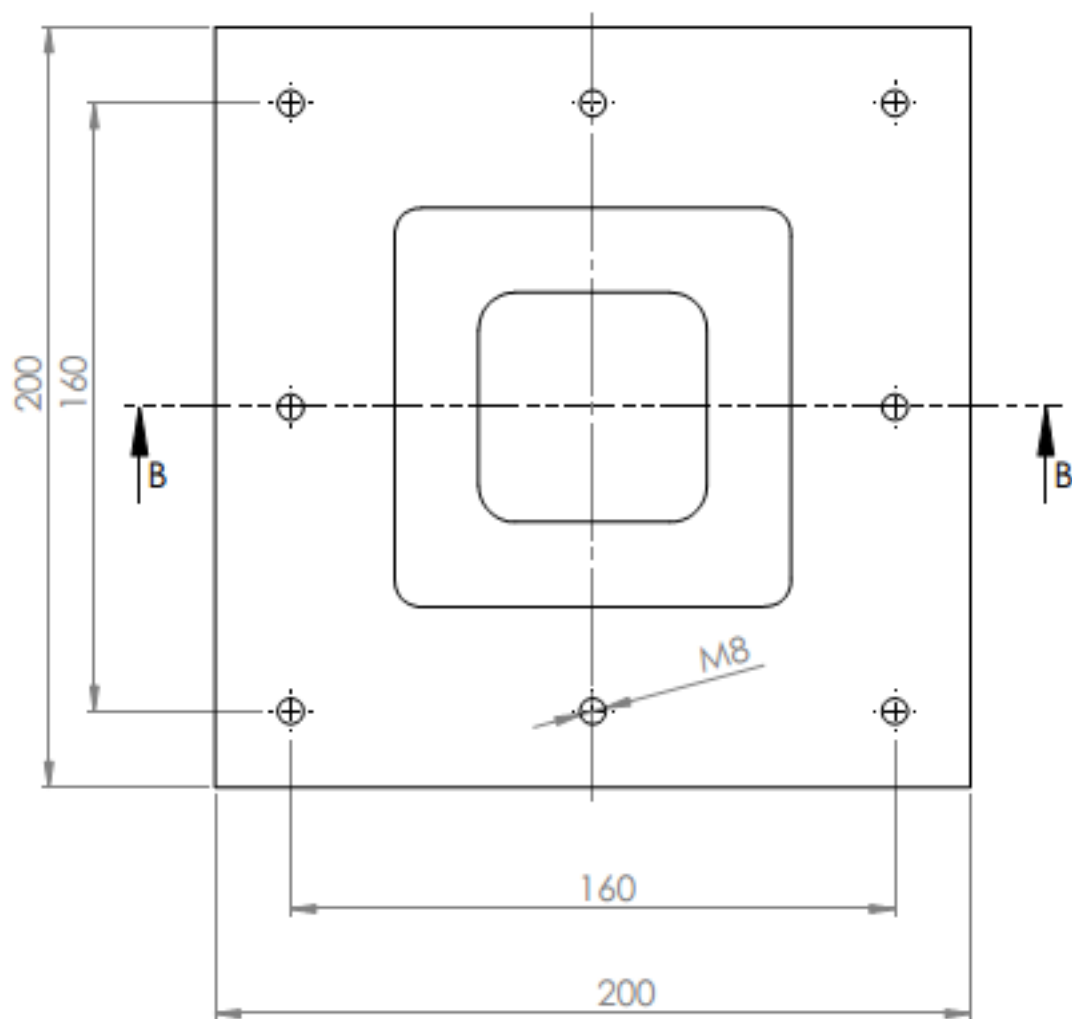
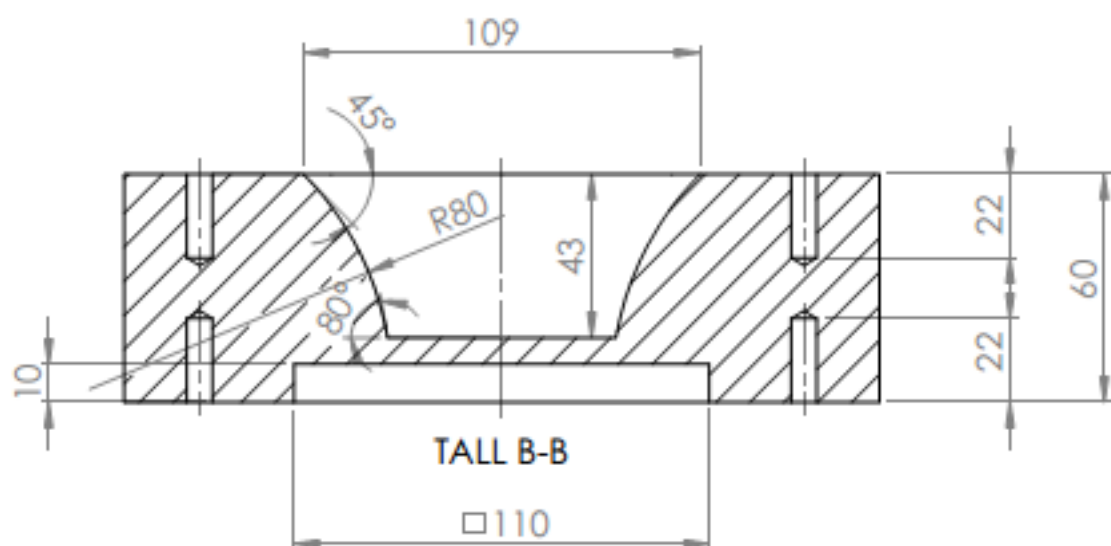
- Ambrogio G, Costantino I, Denapoli L, Filice L, Fratini L, Muzzupappa M (2004) Influence of some relevant process parameters on the dimensional accuracy in incremental forming: a numerical and experimental investigation. *Journal of Materials Processing Technology* 153-154:501-507.
- Attanasio, A., Ceretti, E., Giardini, C., Mazzoni, L. (2008). Asymmetric two points incremental forming: Improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization. *Journal of Materials Processing Technology*, 197 (1-3), pp. 59-67.
- Bagudanch, I. (2011). Disseny dels elements constitutius per adaptar un centre de mecanitzat a la tecnologia ISF. Treball final de carrera.
- Bagudanch, I., Garcia-Romeu, M.L., Centeno, G., Elías-Zúñiga, A., Ciurana, J. (2015). Forming force and temperature effects on single point incremental forming of polyvinylchloride. *Journal of materials processing technology*, 219, pp. 221-229.
- Franzen, V., Kwiatkowski, L., Martins, P.A.F. & Tekkaya, A.E. (2008), Single point incremental forming of PVC, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 1, pp. 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.
- Gil, S. (2013). Validació experimental del procés de conformat incremental de xapa utilitzant materials polímers. Projecte final de carrera.
- James, H.M., Guth, E. (1943). Theory of the elastic properties of rubber, *J. Chem. Phys.*, vol. 10, pp. 455-481.

- Le, V.S., Ghiotti, A. & Lucchetta, G. (2008), Preliminary Studies on Single Point Incremental Forming for Thermoplastic Materials, Proceedings of the 11th ESAFORM Conference on Material Forming.
- Lleget, A. (2014). Anàlisi energètic de deformació incremental de xapa en materials polimèrics. Projecte final de carrera.
- Lupiañez, J. (2012), Estudi medi ambiental del centre de mecanitzat Kondia HS1000 quan s'utilitza com a màquina d'ISF, Projecte final de carrera
- Marques, T.A., Silva, M.B., Martins, P.A.F. (2012). On the potential of single point incremental forming of sheet polymer parts. International Journal of Advanced Manufacturing Technologies, vol. 60, pp. 75-86.
- Martins, P.A.F., Kwiatkowski, L., Franzen, V., Tekkaya, A.E. & Kleiner, M. (2009), Single point incremental forming of polymers, CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 58, no. 1, pp. 229-232.
- 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.

ANNEXOS

A PLÀNOLS

Aquest projecte, al tractar-se d'un estudi experimental només consta d'un plànol, que és el del motlle, l'únic element que s'ha hagut de fabricar.



GEM	Dibuixat	Martí	Puig	08/06/2015	
Escala 1:2	MOTLLE PIRÀMIDE				A4

B DIAGRAMES DE FORCES

A continuació es mostren els diagrames de l'evolució de la força al llarg de cada experiment. Aquests diagrames estan agrupats per parelles on d'un mateix experiment es mostren les variants SPIF i TPIF a la mateixa pàgina.

B.1. PC

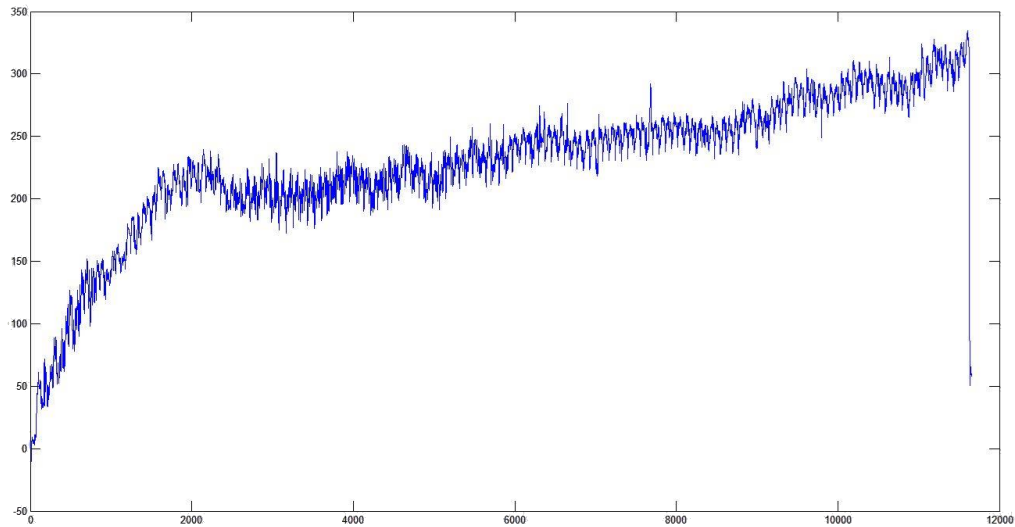


Figura B.1 Evolució de la força al llarg de l'experiment 01 SPIF

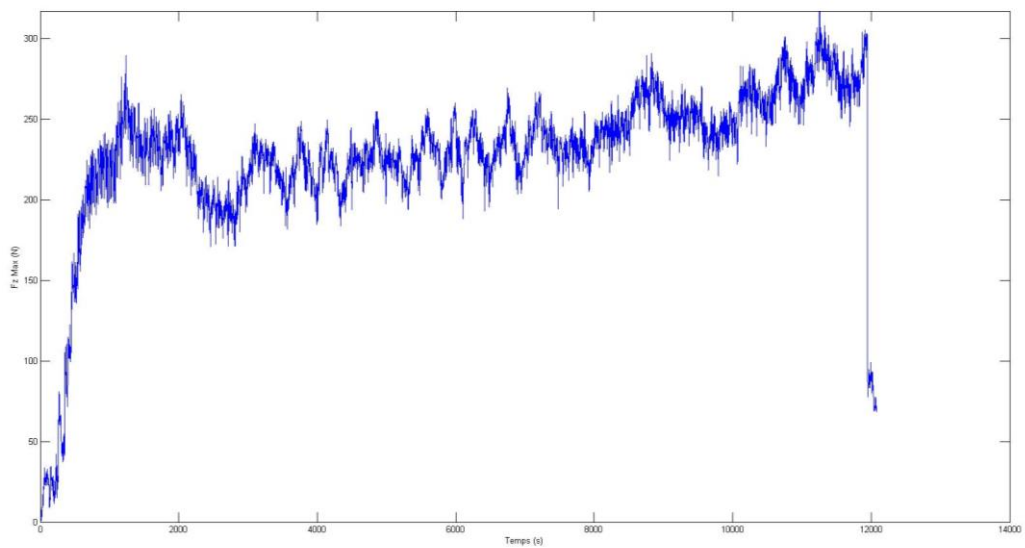


Figura B.2 Evolució de la força al llarg de l'experiment 01 TPIF

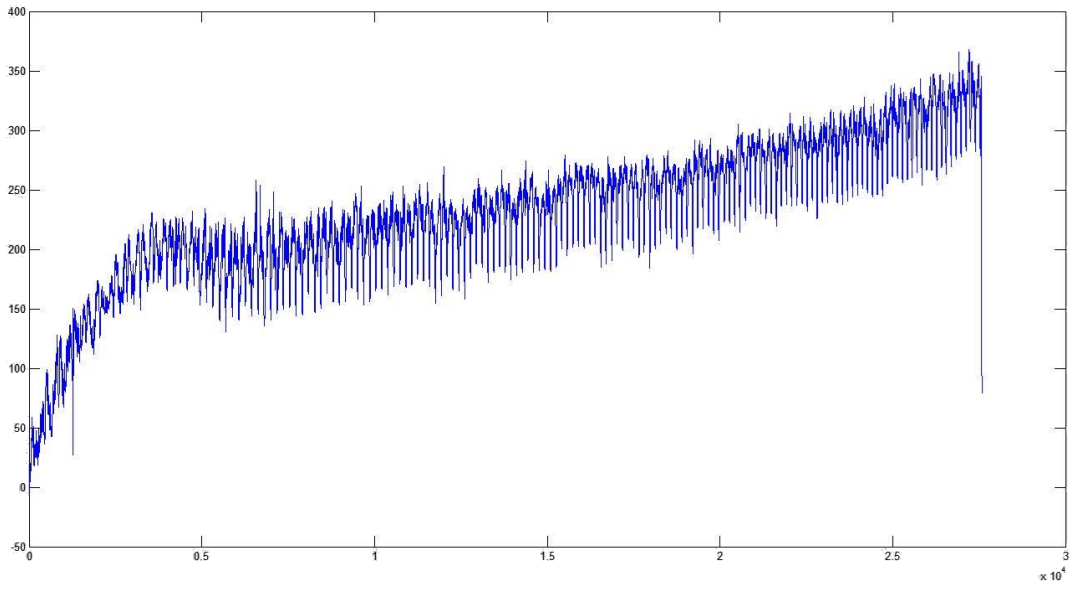


Figura B.3 Evolució de la força al llarg de l'experiment 02 SPIF

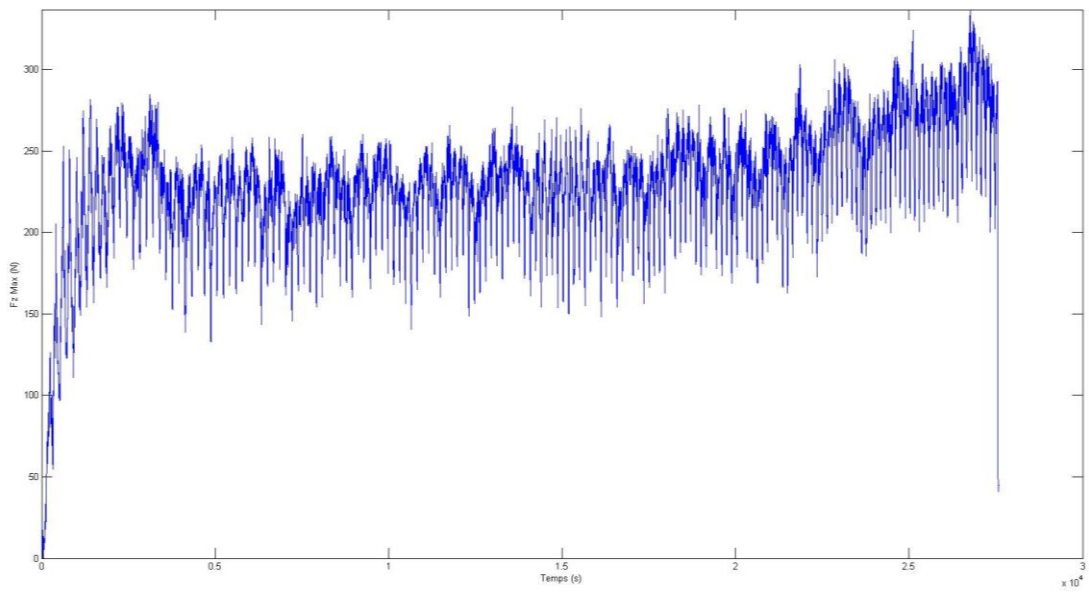


Figura B.4 Evolució de la força al llarg de l'experiment 02 TPIF

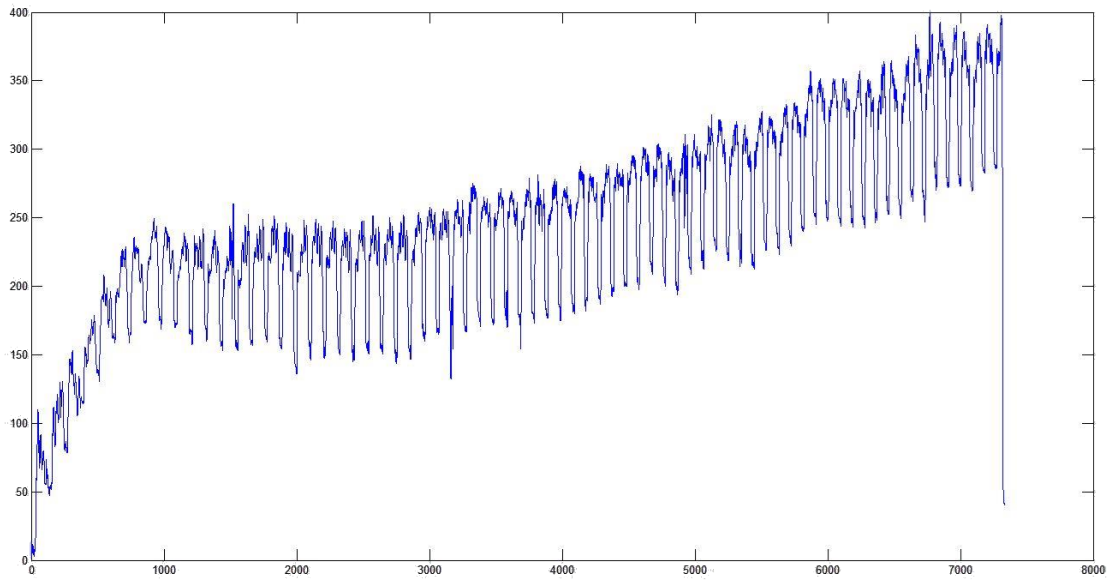


Figura B.5 Evolució de la força al llarg de l'experiment 03 SPIF

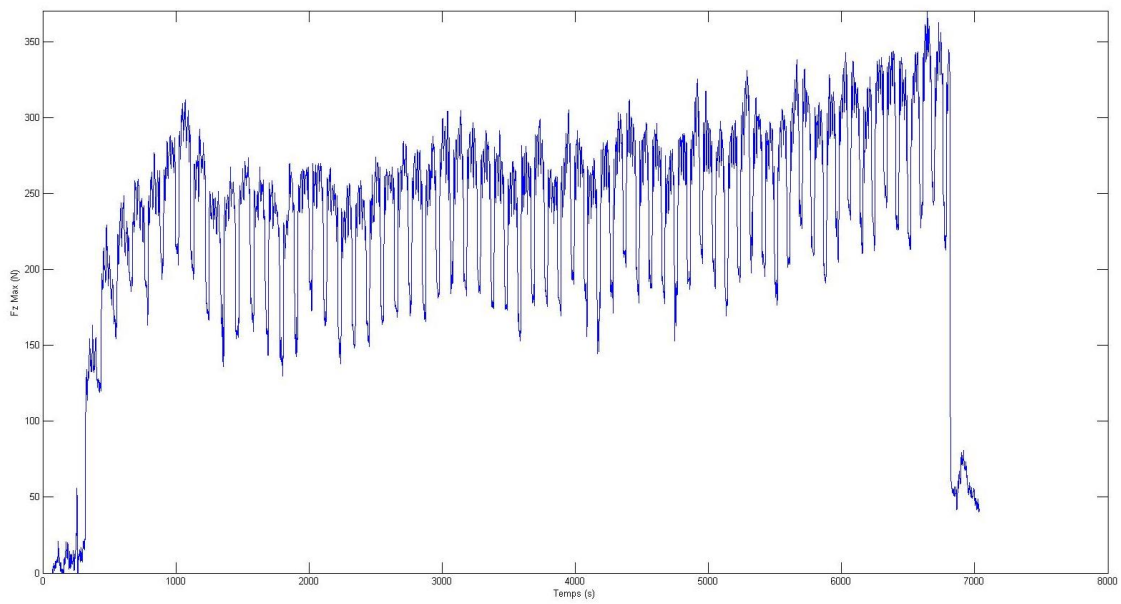


Figura B.6 Evolució de la força al llarg de l'experiment 03 TPIF

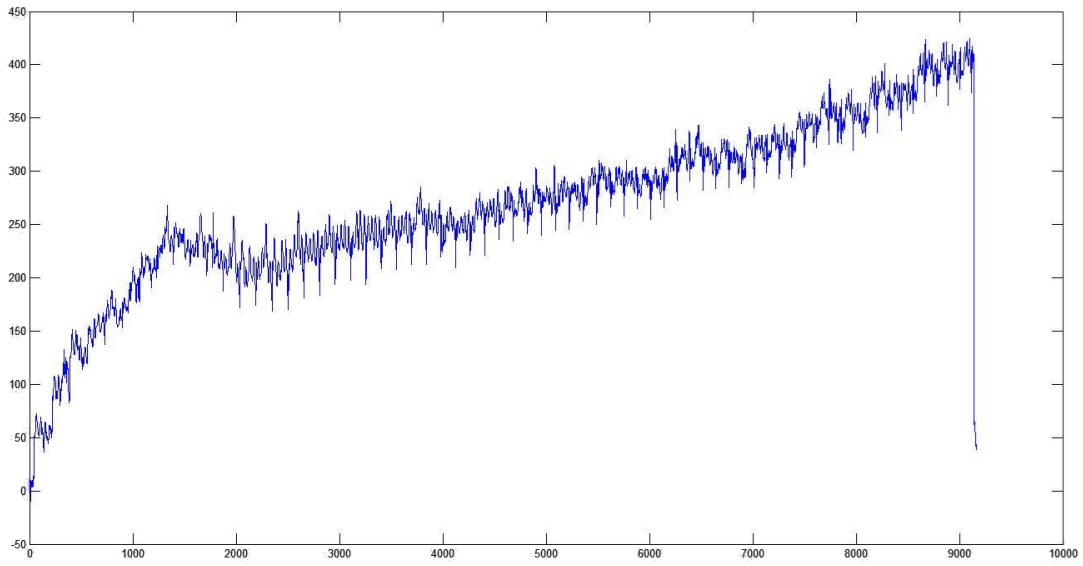


Figura B.7 Evolució de la força al llarg de l'experiment 04 SPIF

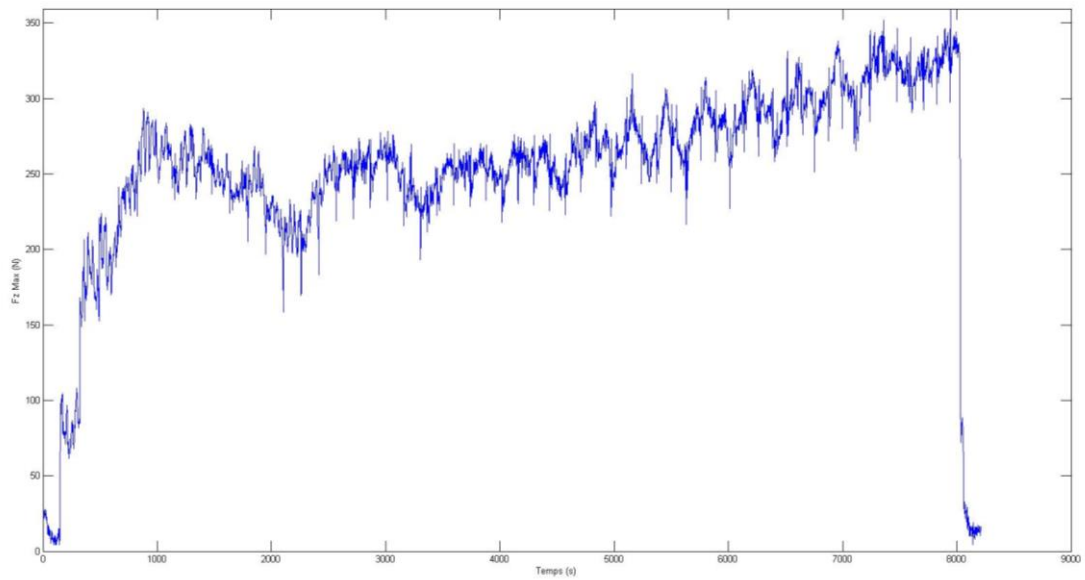


Figura B.8 Evolució de la força al llarg de l'experiment 04 TPIF

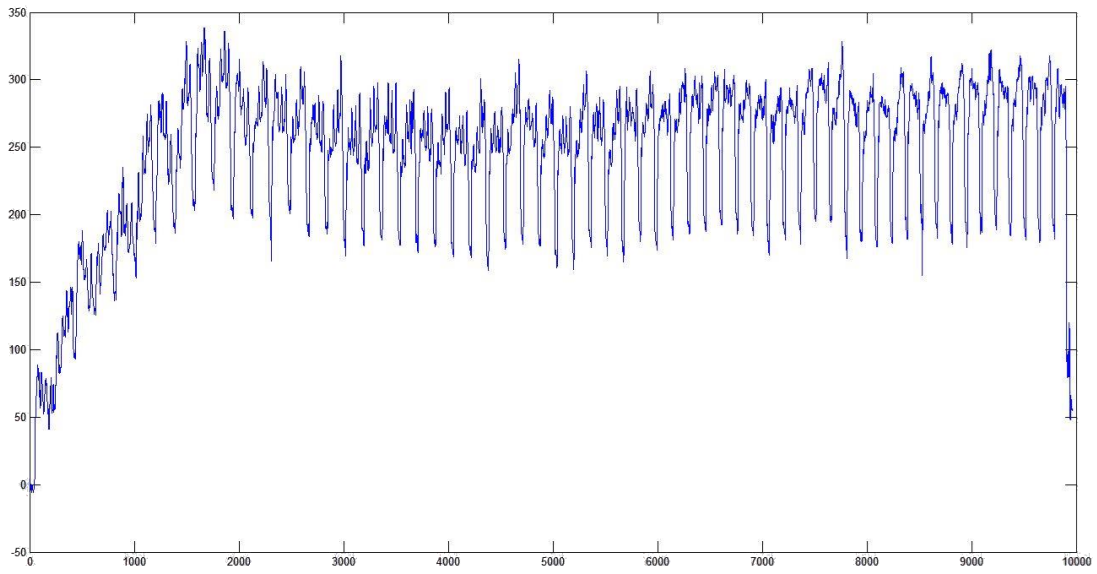


Figura B.9 Evolució de la força al llarg de l'experiment 05 SPIF

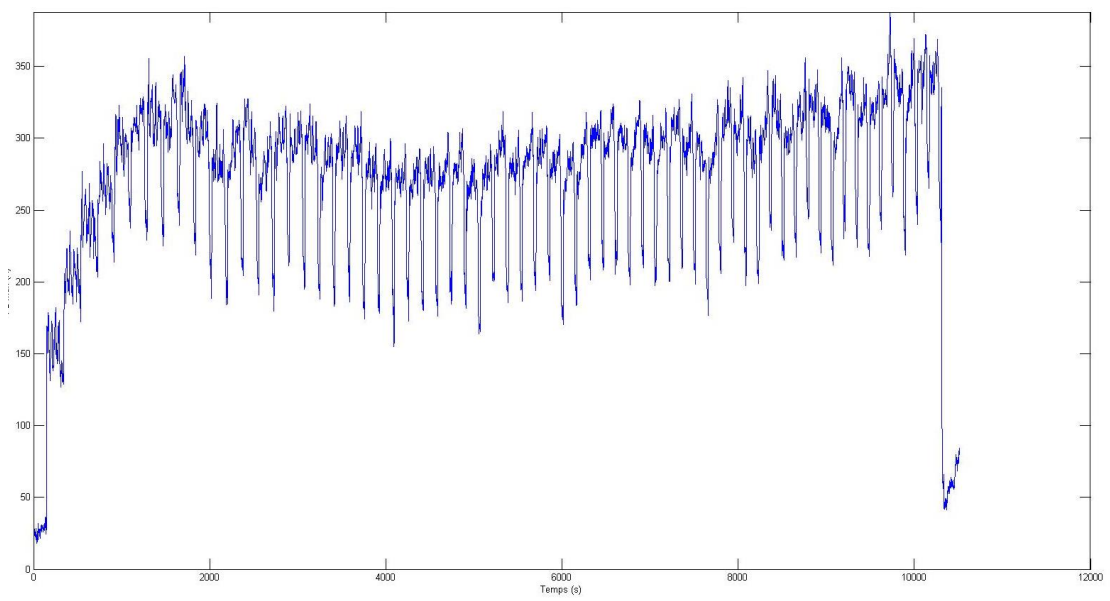


Figura B.10 Evolució de la força al llarg de l'experiment 05 TPIF

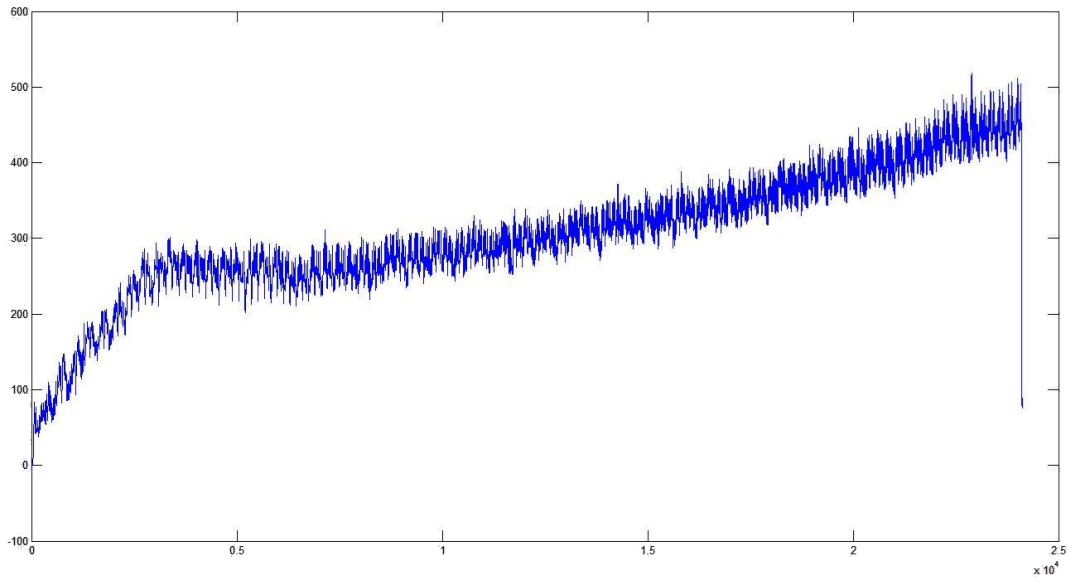


Figura B.11 Evolució de la força al llarg de l'experiment 06 SPIF

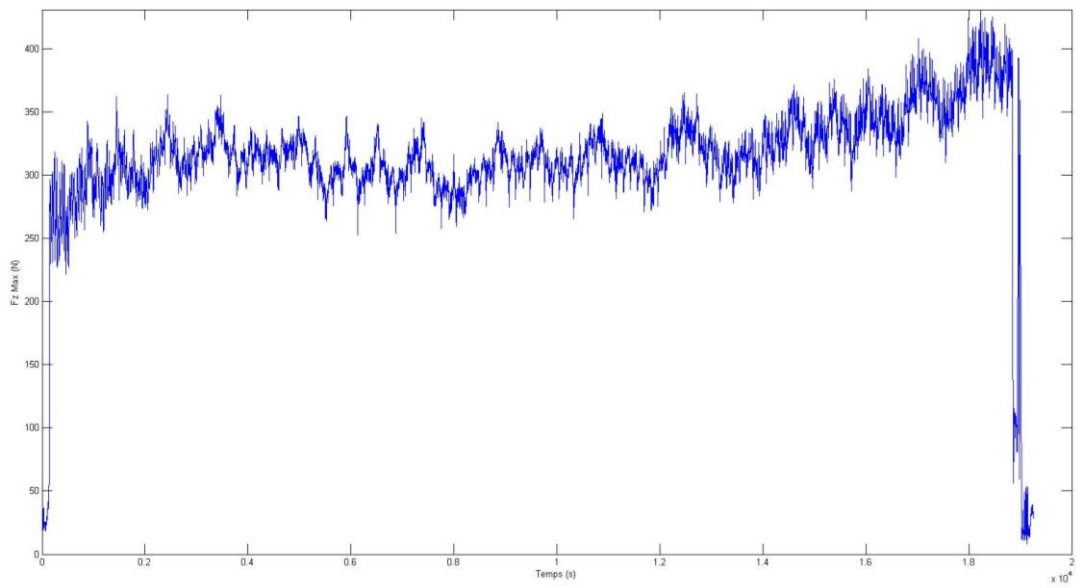


Figura B.12 Evolució de la força al llarg de l'experiment 06 TPIF

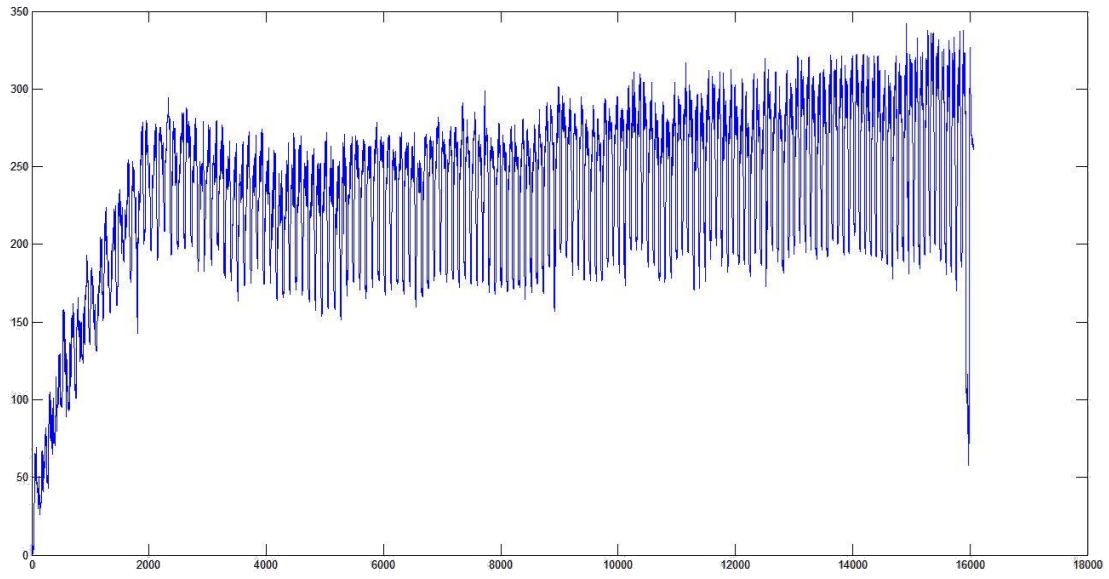


Figura B.13 Evolució de la força al llarg de l'experiment 07 SPIF

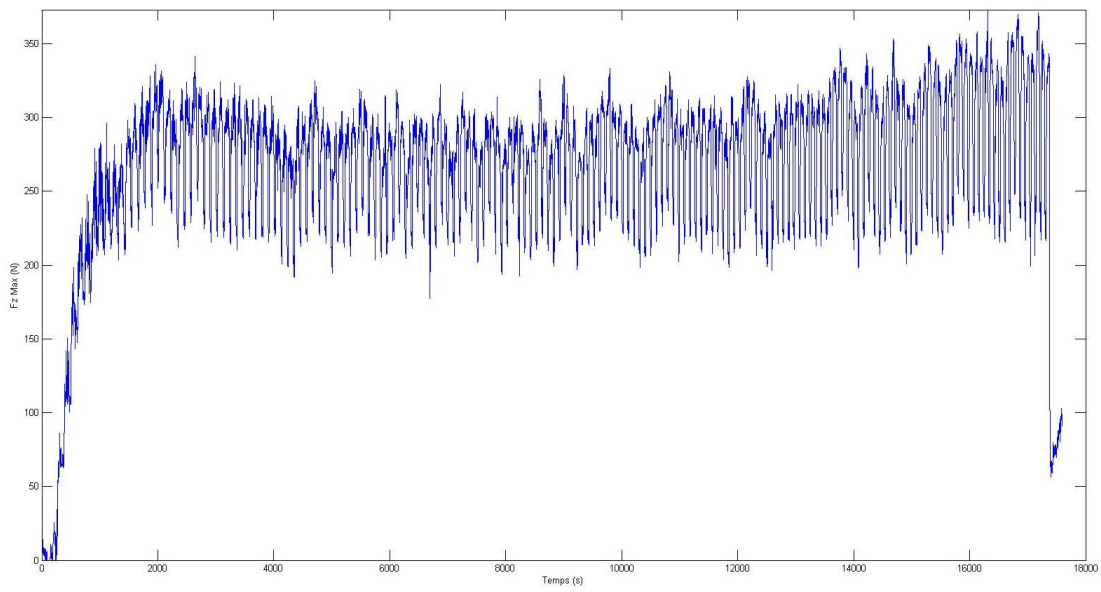


Figura B.14 Evolució de la força al llarg de l'experiment 07 TPIF

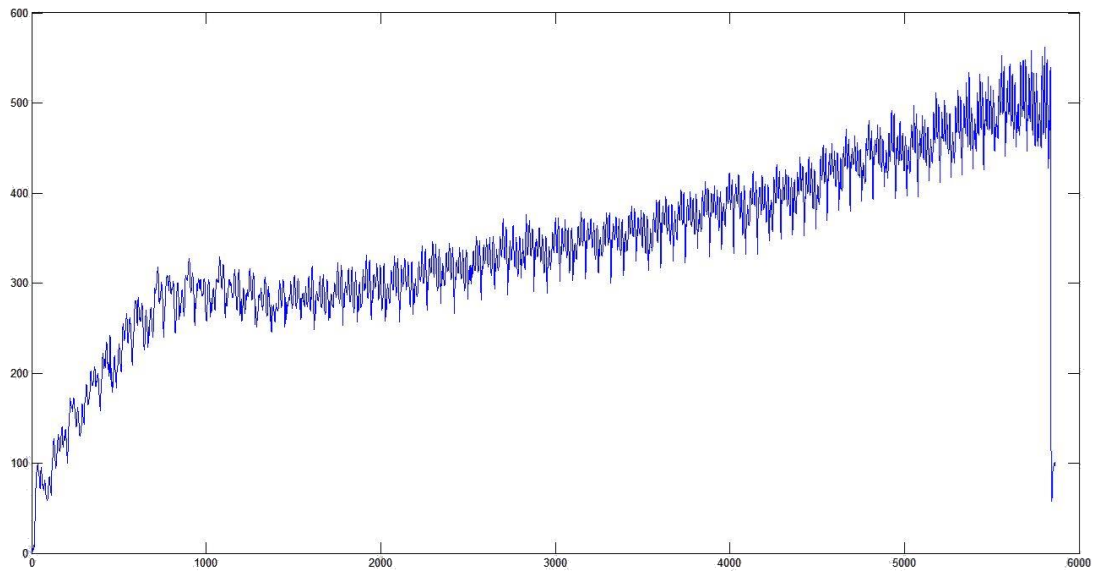


Figura B.15 Evolució de la força al llarg de l'experiment 08 SPIF

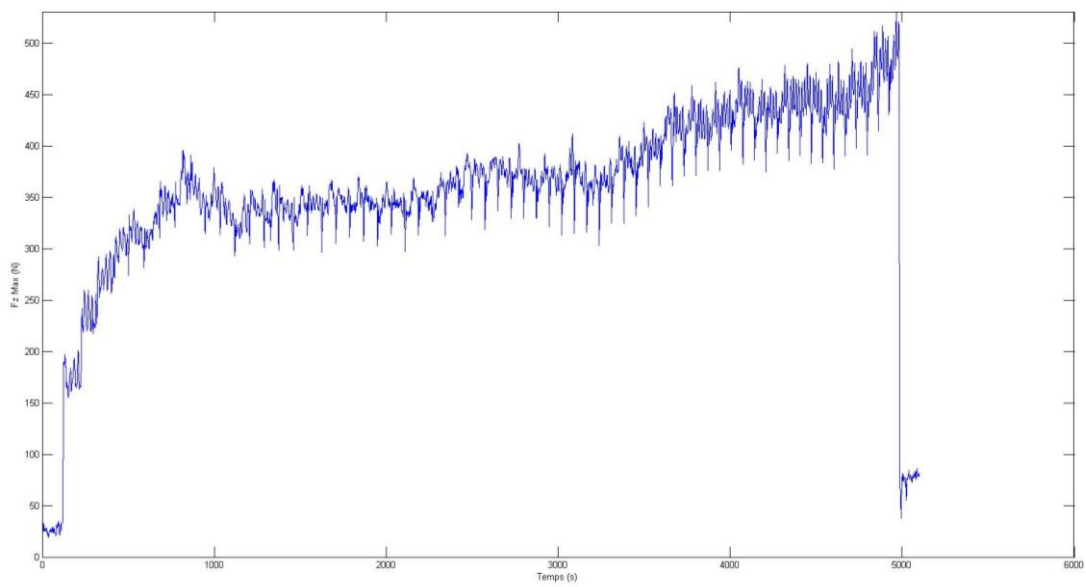


Figura B.16 Evolució de la força al llarg de l'experiment 08 TPIF

B.2. PVC

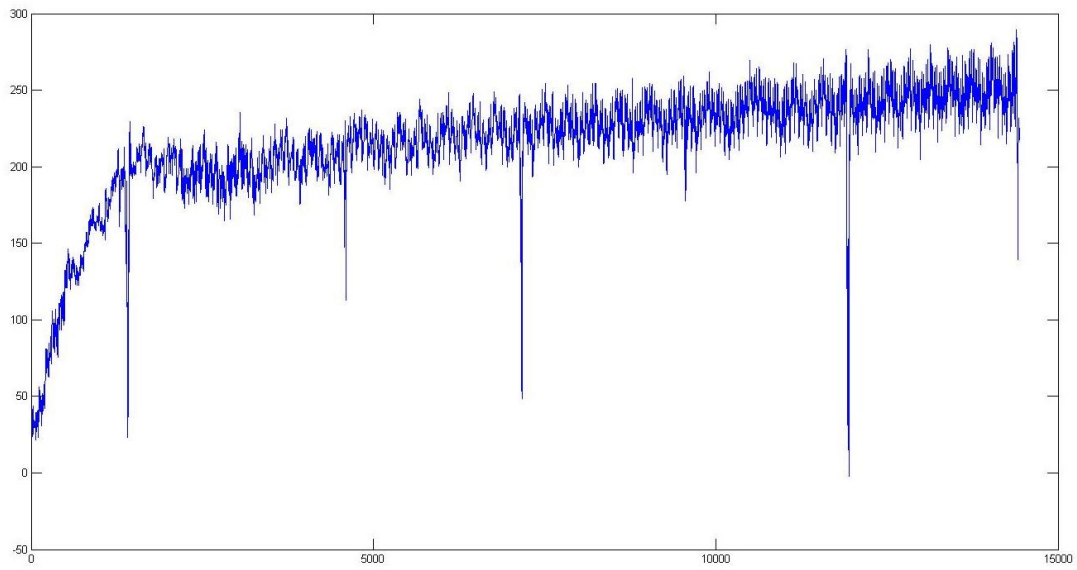


Figura B.17 Evolució de la força al llarg de l'experiment 09 SPIF

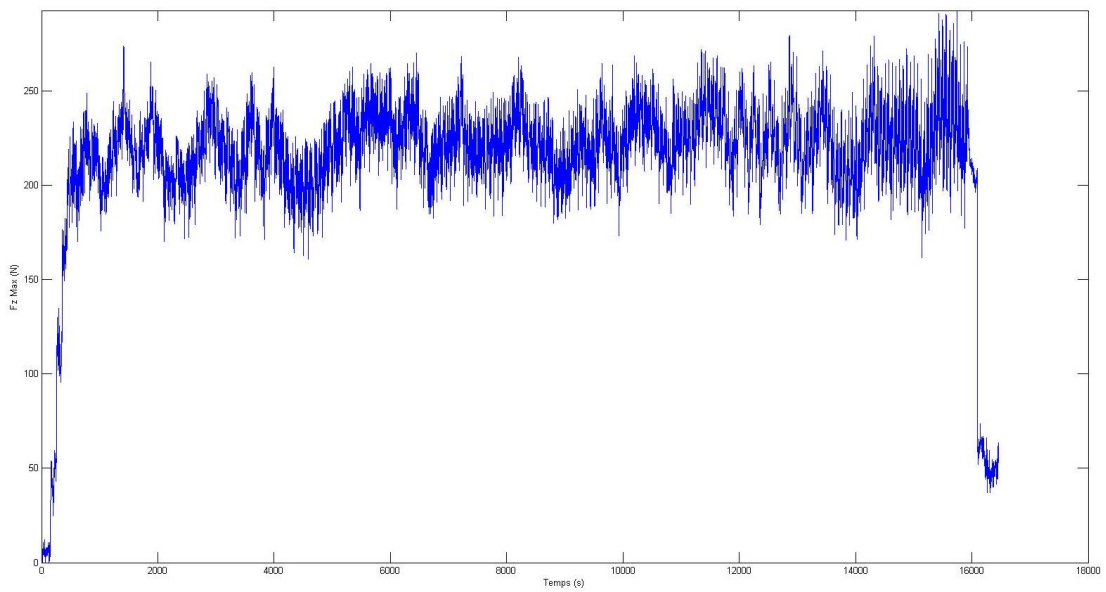


Figura B.18 Evolució de la força al llarg de l'experiment 09 TPIF

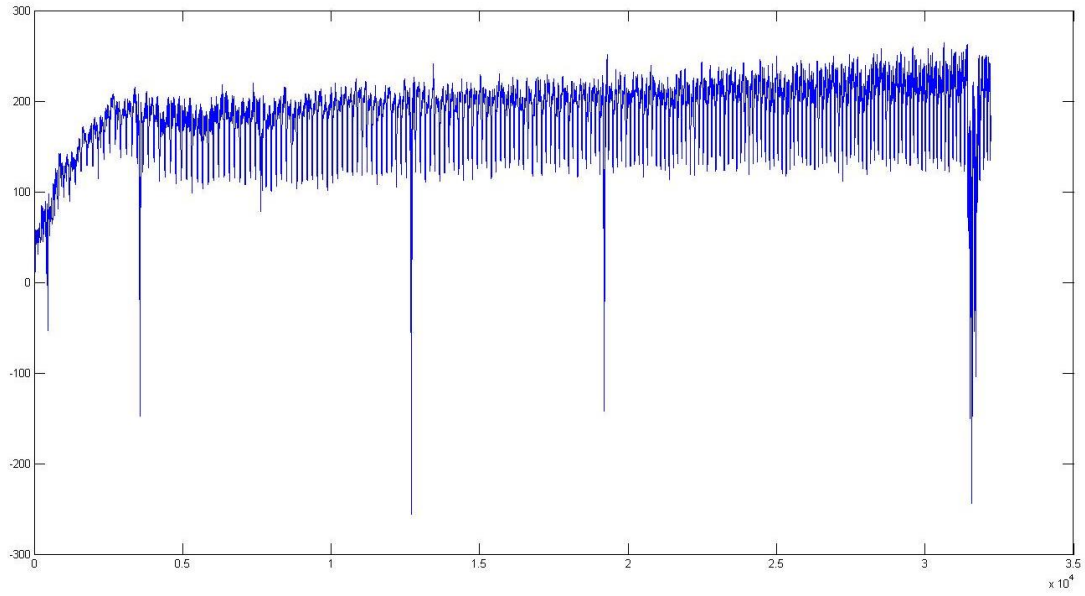


Figura B.19 Evolució de la força al llarg de l'experiment 10 SPIF

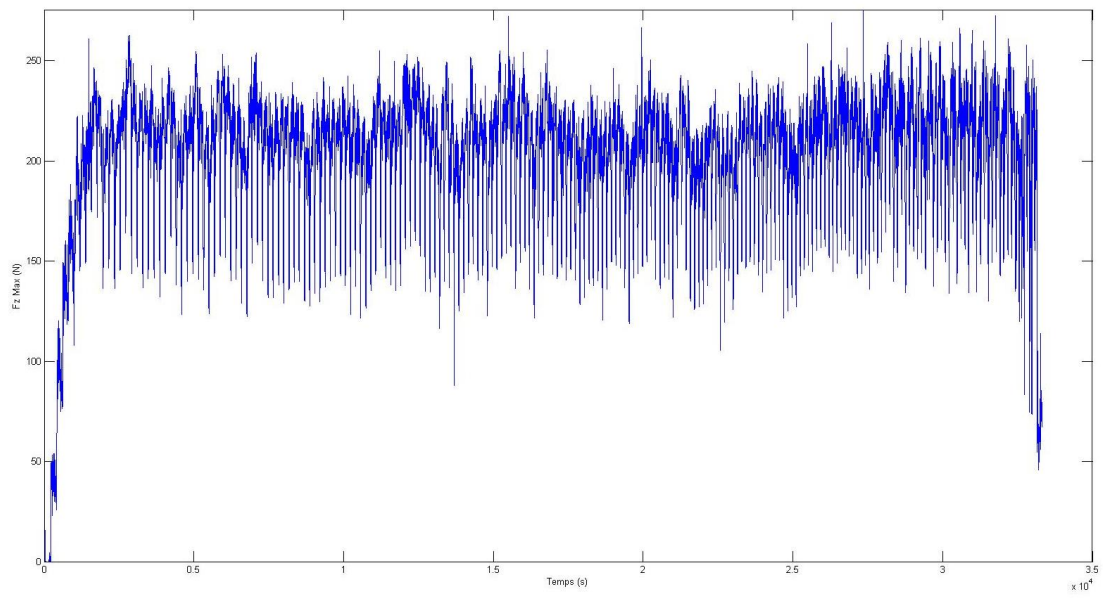


Figura B.20 Evolució de la força al llarg de l'experiment 10 TPIF

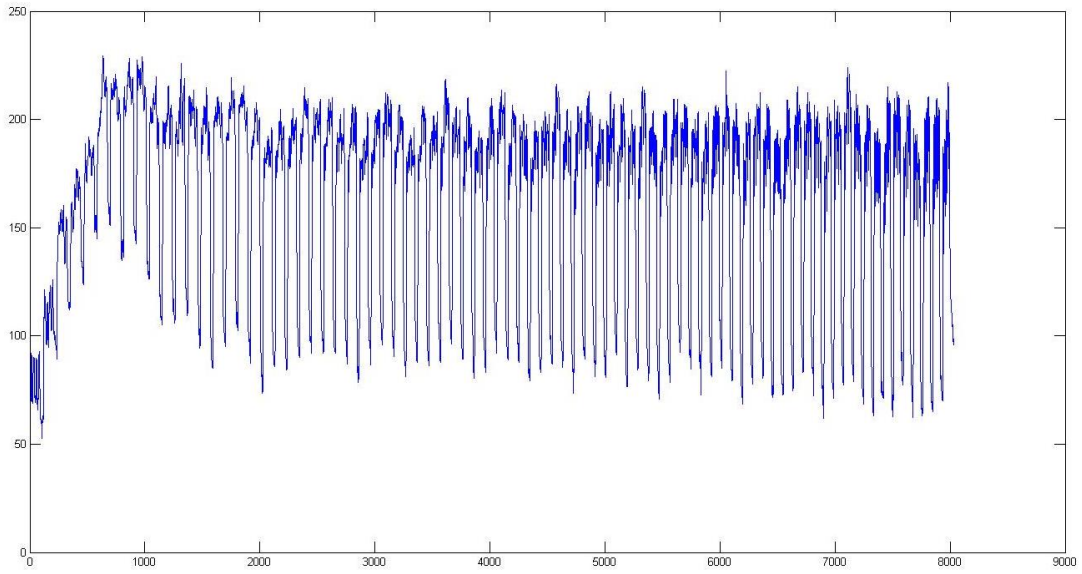


Figura B.21 Evolució de la força al llarg de l'experiment 11 SPIF

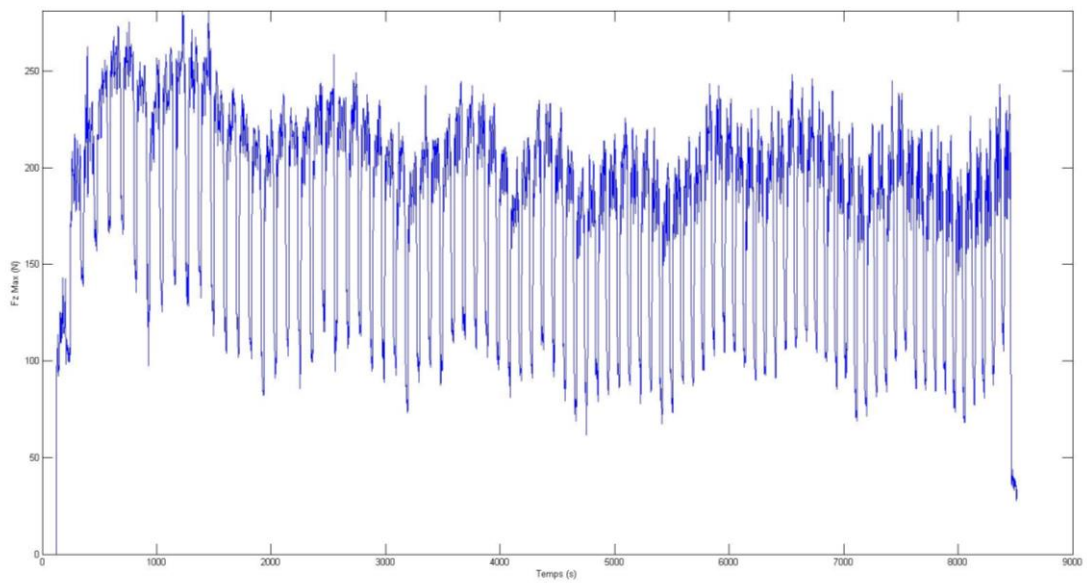


Figura B.22 Evolució de la força al llarg de l'experiment 11 TPIF

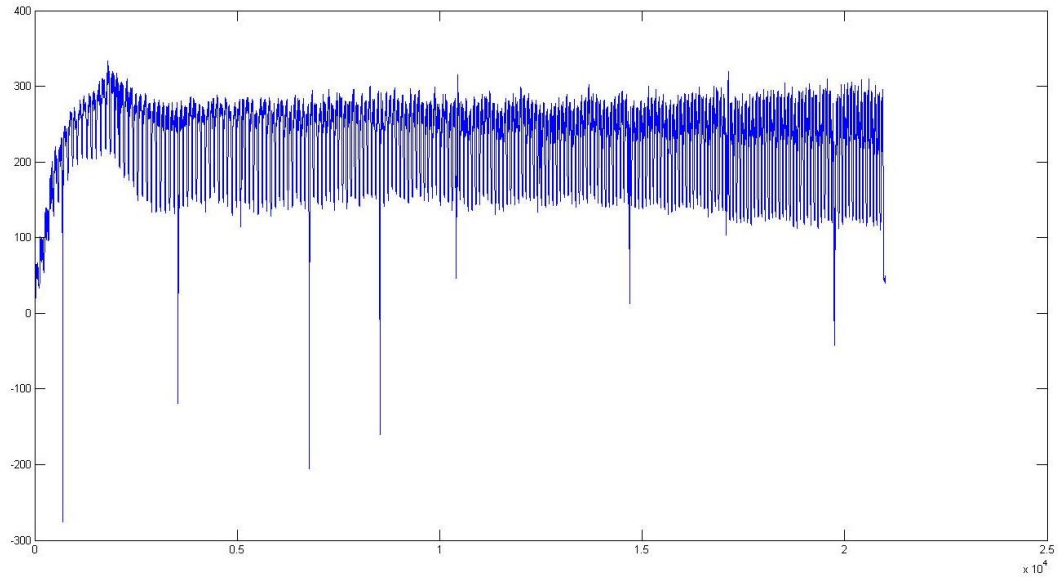


Figura B.23 Evolució de la força al llarg de l'experiment 12 SPIF

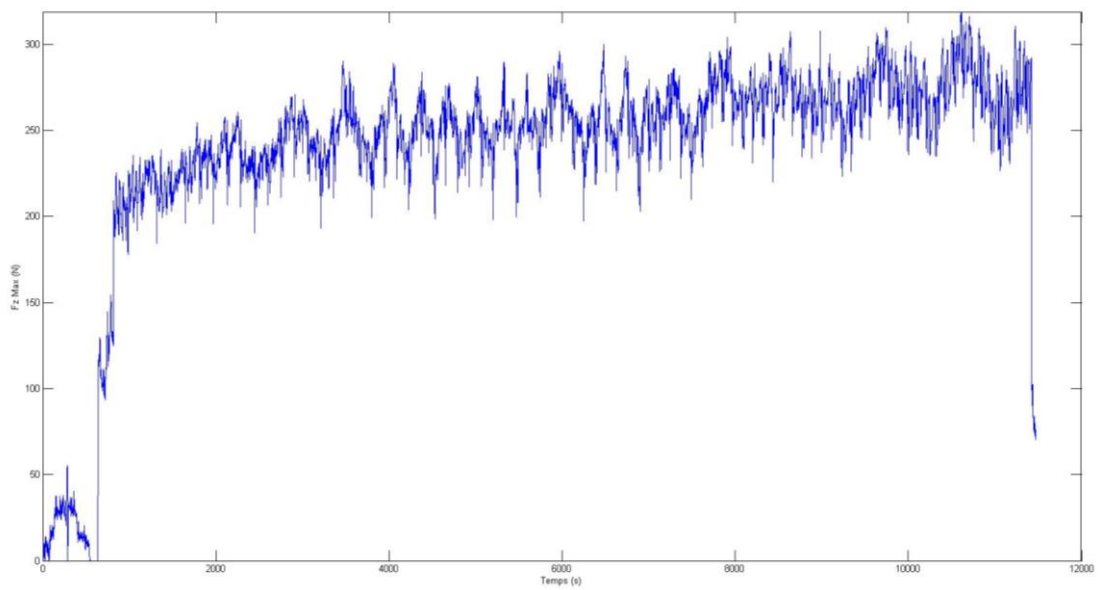


Figura B.24 Evolució de la força al llarg de l'experiment 12 TPIF

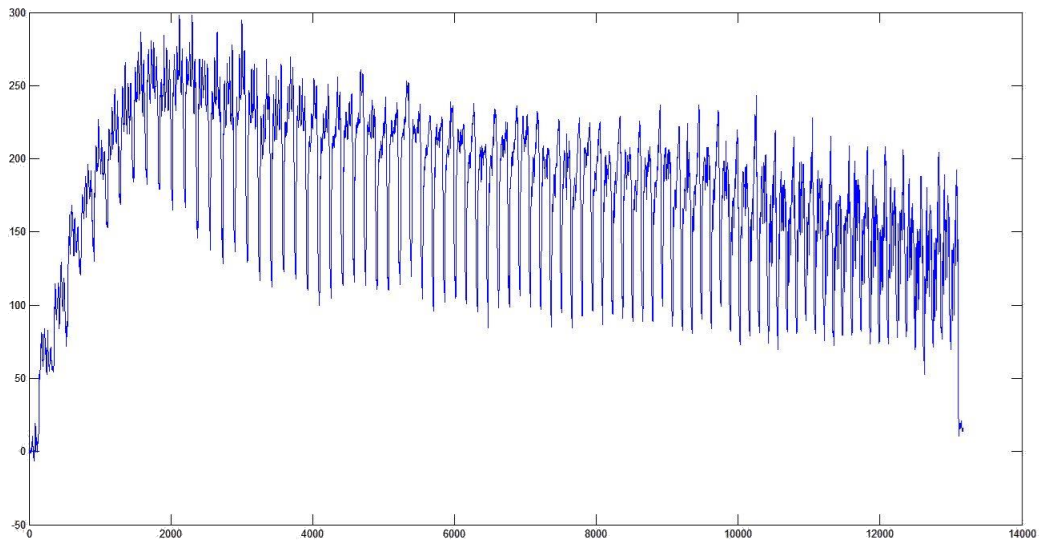


Figura B.25 Evolució de la força al llarg de l'experiment 13 SPIF

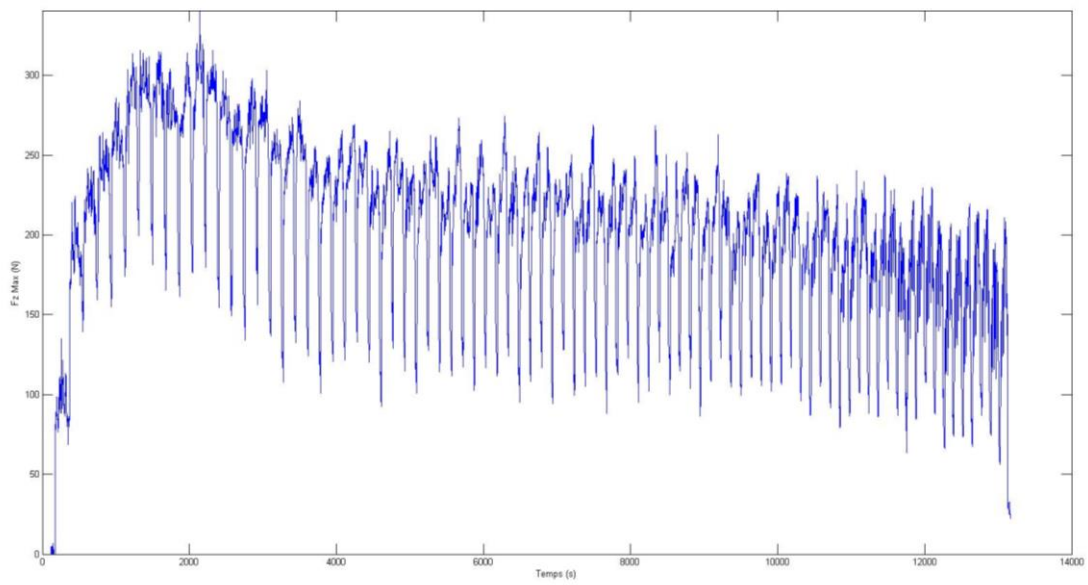


Figura B.26 Evolució de la força al llarg de l'experiment 13 TPIF

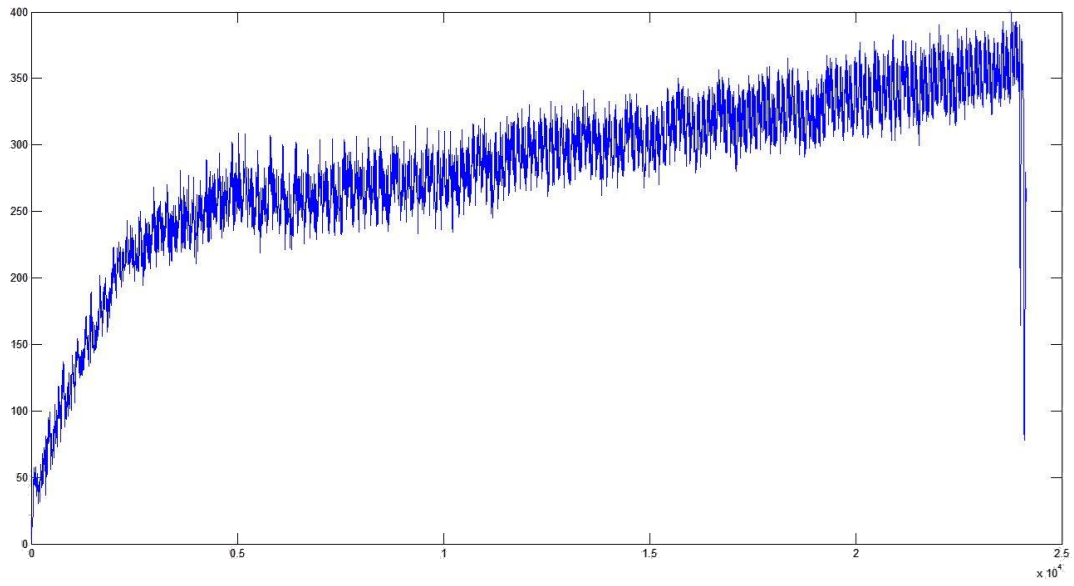


Figura B.27 Evolució de la força al llarg de l'experiment 14 SPIF

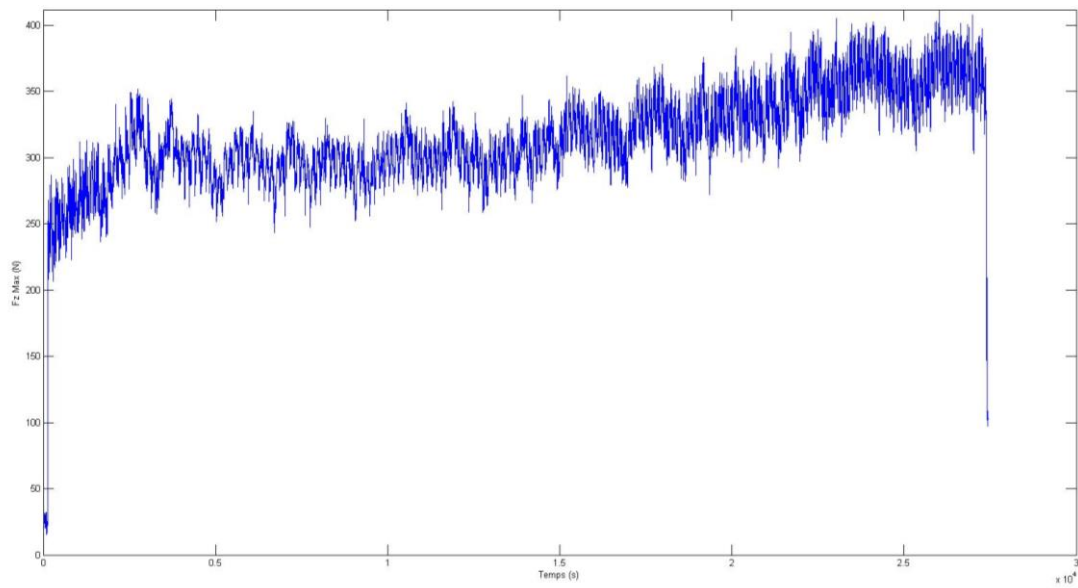


Figura B.28 Evolució de la força al llarg de l'experiment 14 TPIF

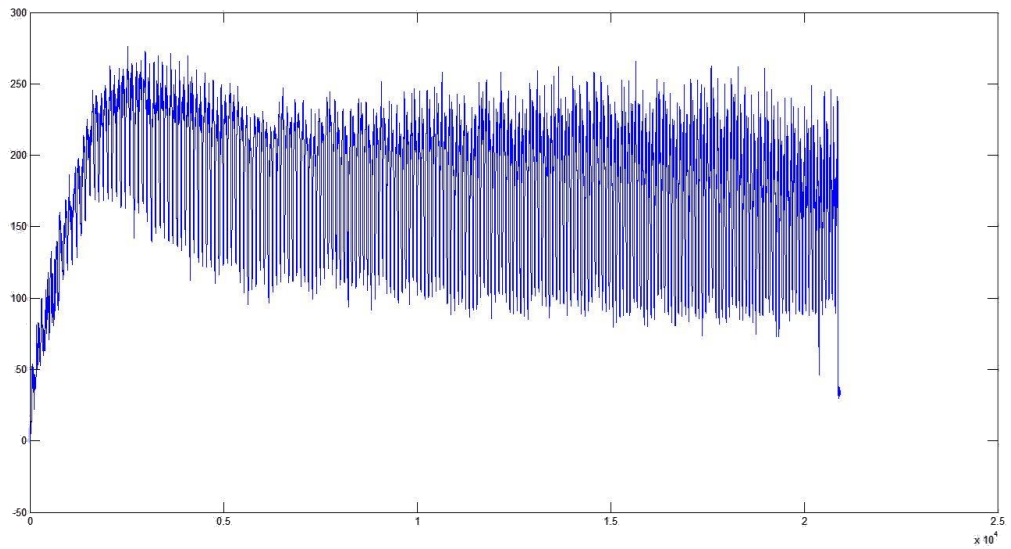


Figura B.29 Evolució de la força al llarg de l'experiment 15 SPIF

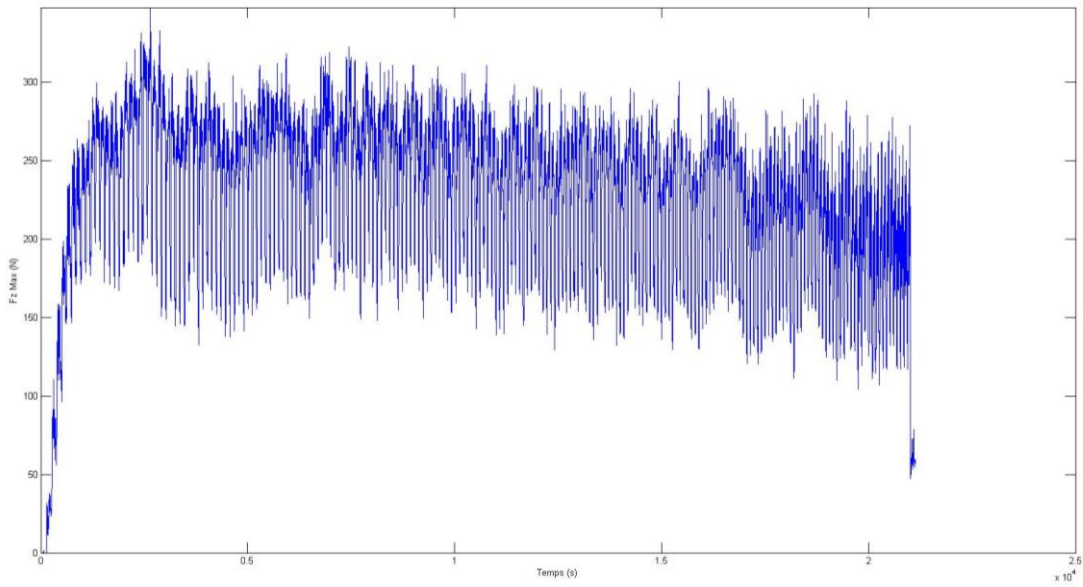


Figura B.30 Evolució de la força al llarg de l'experiment 15 TPIF

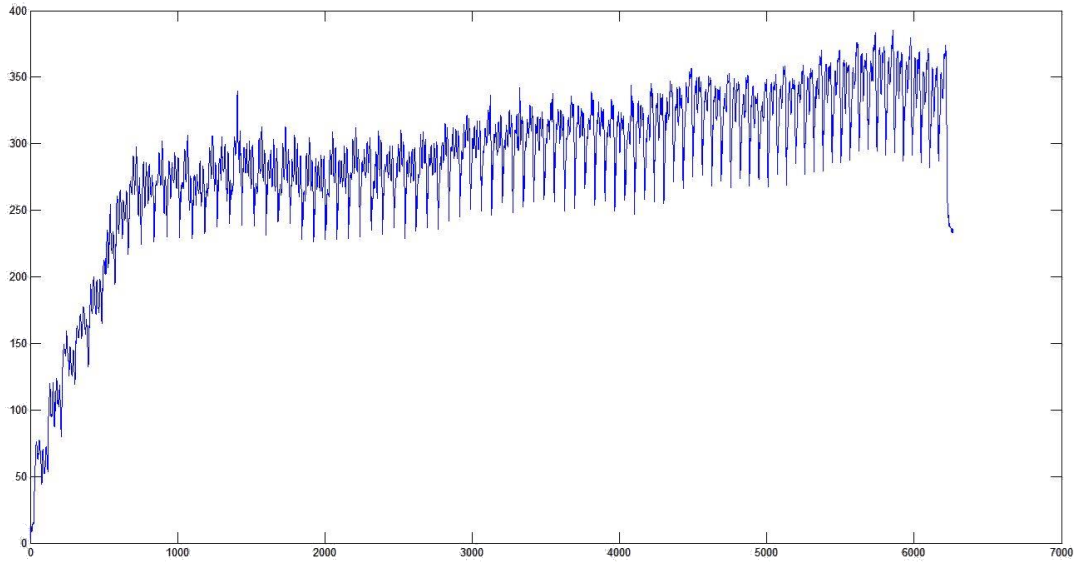


Figura B.31 Evolució de la força al llarg de l'experiment 16 SPIF

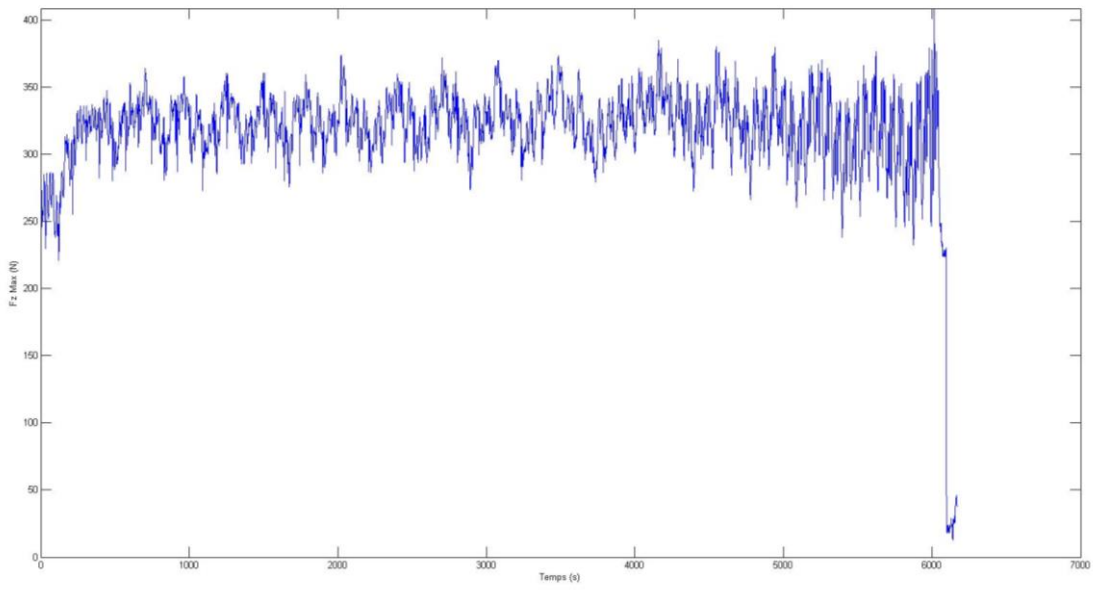


Figura B.32 Evolució de la força al llarg de l'experiment 16 TPIF