



**EPS**

Escola Politècnica  
Superior

## **Projecte/Treball Fi de Carrera**

**Estudi:** Enginyeria Industrial. Pla 2002

**Títol:** ANÀLISI ENERGÈTIC DE DEFORMACIÓ INCREMENTAL  
DE XAPA EN MATERIALS POLIMÈRICS

**Document:** RESUM

**Alumne:** Aleix Lleget Novell

**Director/Tutor:** Maria Luisa Garcia-Romeu de Luna  
**Departament:** Eng. Mecànica i de la Construcció Industrial  
**Àrea:** Enginyeria dels processos de fabricació

**Convocatòria** (mes/any): Setembre 2014

## RESUM

A finals dels anys 70 va ser presentada per part de Mason al 1978 una nova tecnologia de deformació anomenada conformació incremental de xapa, en anglès *Incremental Sheet Forming (ISF)*. Aquesta tecnologia va ser presentada com a una alternativa a l'embotició, ja que pretenia reduir el temps necessari de conformació i augmentar la flexibilitat de producció.

Aquest procés consisteix en aplicar una deformació local sobre la xapa que s'està treballant, la qual pot ser de diferents materials, com metàl·lics o polimèrics. La deformació esmentada es realitza mitjançant un punxó acabat amb una forma semiesfèrica, que pot tenir diferents radis. Aquestes eines permeten conformar peces de diferents característiques geomètriques, per tant no és necessari adaptar l'eina a la peça que es vulgui realitzar. Aquesta característica del procés, permet disminuir els costos per lots reduïts, ja que no s'ha de fabricar una eina i una matriu específica per cada peça.

El principi de funcionament de l'ISF consisteix en fixar la làmina que es vol deformar en un suport i amb el punxó es realitza una trajectòria en el pla sobre aquesta làmina. Una vegada s'ha finalitzat la trajectòria sobre el pla, el punxó descendeix una profunditat determinada i torna a descriure una trajectòria en el pla. Aquest procediment es repeteix fins a obtenir la geometria desitjada de la peça. Un avantatge destacat d'aquesta tecnologia és la reducció dels costos de producció per lots petits respecte altres tecnologies convencionals com l'embotició, per tant es poden fer peces molt personalitzades gràcies a la programació amb el CAM.

Existeixen varis estudis que avaluen el consum energètic derivat del procés de producció de ISF, principalment per materials metàl·lics. Per tant, l'objectiu d'aquest projecte és determinar el consum energètic en la conformació de materials plàstics en aquets procés, concretament en policlorur de vinil (PVC) i policarbonat (PC), utilitzant el centre de mecanitzat Kondia HS1000 del Grup de Recerca en Enginyeria del Producte, Procés i Producció (GREP).

Per poder aconseguir els objectius del present projecte s'han dut a terme diverses operacions al llarg d'aquest que es presenten a continuació:

- Preparar un sistema de mesura elèctrica online durant el procés de conformat per poder enregistrar les dades de consum i poder relacionar-ho amb l'energia

consumida depenent dels diferents paràmetres de procés. Aquest sistema de mesura es presenta a l'apartat 2 de la Memòria i que es mostra a la següent figura 2.

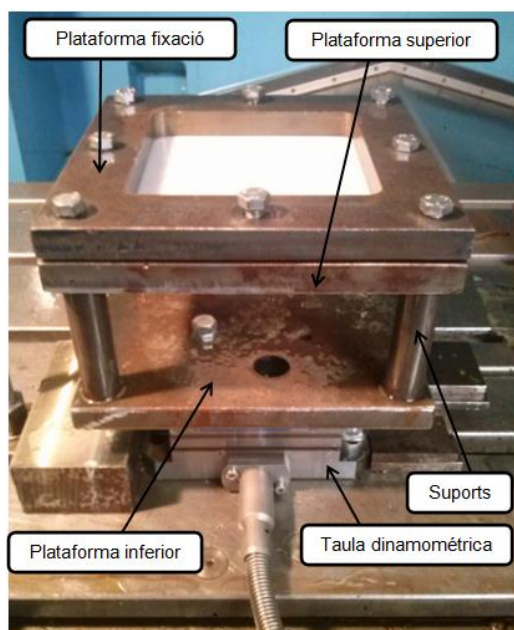


Figura 1 Utilatge de fixació de la xapa

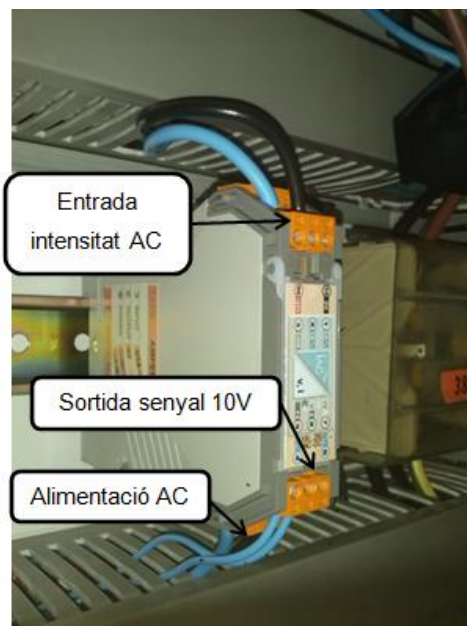


Figura 2 Transformador d'intensitat a senyal de voltatge

- Paral·lelament a les mesures elèctriques, realitzar mesures de temperatures, forces, profunditats i rugositats, per poder determinar la qualitat de les peces obtingudes i poder buscar un compromís entre energia i qualitat de la peça. Els sistemes de mesura utilitzats es presenten a l'apartat 2 de la Memòria.
- El disseny d'experiments amb diferents paràmetres de fabricació (mostrat a l'apartat 3 de la Memòria) per poder fer l'estudi del procés.
- Identificar quines són les emissions derivades de l'obtenció de la matèria primera utilitzades en el procés i les derivades a al consum d'energia per poder analitzar l'impacte ambiental del procés (Presentat a l'apartat 4.4 de la memòria).

Durant el llarg del projecte s'han analitzat diferents aspectes durant els experiments, on els anàlisis es presenten a l'apartat 4 de la Memòria i resumidament són:

- La influència del material en el consum elèctric del procés.
- L'anàlisi del temps i energia gastats en els diferents estats de la màquina des de que s'engega fins que es para i obtenir les gràfiques de consum de potència (Figures 3 i 4).
- Identificació dels paràmetres que més influeixen en el consum d'energia amb l'anàlisi estadístic ANOVA.

- Comparació dels resultats obtinguts amb els obtinguts per Ingarao al 2014 en un anàlisi realitzat en materials metàl·lics per corroborar els resultats obtinguts.
- Identificar quins són els consums mitjans en funció dels paràmetres de procés per poder realitzar posteriorment el càlcul d'emissions de CO<sub>2</sub>.
- Realitzar un anàlisi ANOVA de les característiques de les peces obtingudes per poder trobar un compromís entre la qualitat de la peça final i el consum energètic
- Calcular l'empremta ambiental del procés i fer-ne un model de predicció d'emissions.

Amb tots els experiments analitzats s'ha pogut extreure una sèrie de conclusions presentades a l'apartat 6 de la Memòria, de les quals es fa un resum a continuació:

Primerament, amb els gràfics de consum de potència (Figura 3) s'ha pogut determinar que si es fa un anàlisi del procés des de que s'engega el centre de mecanitzat fins que es para s'identifiquen quatre estats diferents de treball, el primer estat és quan s'engega l'ordinador i el control numèric, el segon quan s'habiliten els eixos del centre de mecanitzat i es referencien els eixos i peça, seguit de l'estat de fabricació, el qual és el més important en quant a consum (també es pot veure gràcies al repartiment del temps representat a la Figura 4), i, finalment, s'arriba a l'estat de parada. Gràcies als gràfics també s'ha pogut identificar que aquest centre de mecanitzat consta d'una unitat refrigeradora que s'activa en funció de la temperatura del capçal de l'eina i, per tant, no és un factor que es pot controlar en quin moment s'activarà, només s'ha identificat que el fet d'engegar-se comporta un salt en el consum de potència d'uns 400 W i que si els processos que es duen a terme al centre de mecanitzat són sempre amb rotació lliure està al voltant del 65 % del temps activada i si tots fossin amb rotació gairebé ho està el 100 % del temps.

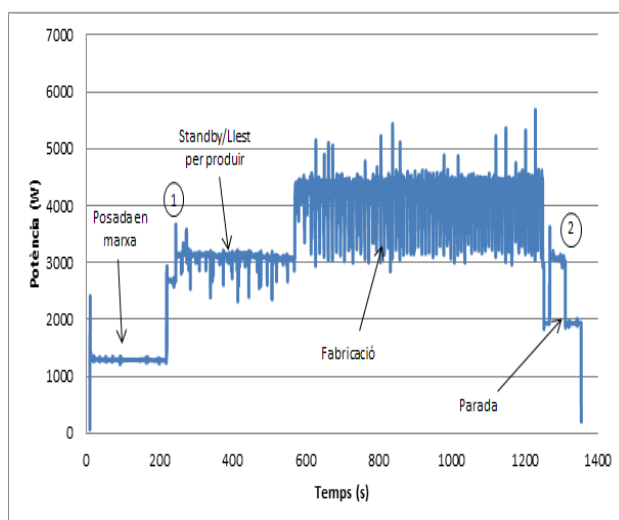


Figura 3 Gràfic de la potència consumida en l'experiment 3 en policarbonat

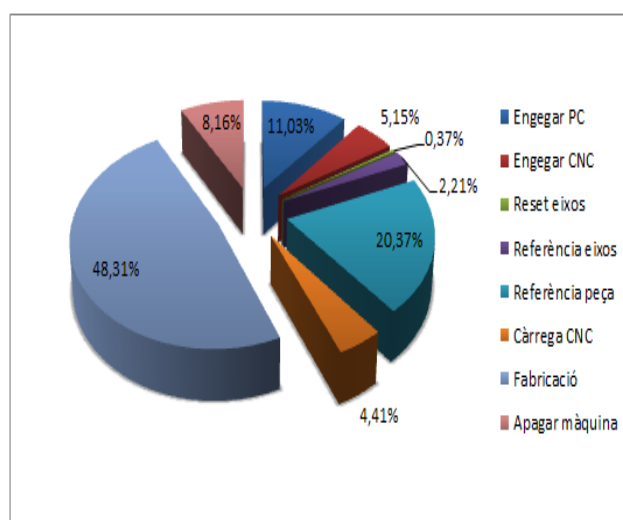


Figura 4 Percentatge del temps de cada etapa en l'experiment 3 en policarbonat

Pel que fa als paràmetres de procés que afecten al consum d'energia durant el procés de fabricació s'ha identificat que el material, el gruix de la xapa i el diàmetre de l'eina no influeixen, en canvi, la velocitat de rotació de l'eina, la velocitat d'avanç i el pas incremental afecten d'una manera determinant. Pel cas de la velocitat de rotació de l'eina augmenta el consum d'energia perquè augmenta el consum d'energia degut a l'activació del motor que dóna la rotació i perquè augmenta el temps de procés. Pel cas de la velocitat d'avanç i el pas incremental, augmenta el consum perquè com més baixos són més temps dura el procés i això comporta l'augment del consum d'energia.

En quant a paràmetres de qualitat de la peça obtinguda en el procés de conformació, s'ha pogut observar que els paràmetres que fan que augmenti la temperatura durant la fabricació fan que la força necessària per deformar la xapa sigui menor, cosa que és favorable a l'hora del procés, però el paràmetre que més influeix en que augmenti la temperatura és la velocitat de rotació de l'eina i aquesta penalitza la rugositat i la profunditat assolida. S'ha considerat que les propietats més importants són la rugositat i la profunditat màxima assolida i per analitzar quins paràmetres de procés afavoreixen a aquestes dos propietats s'ha realitzat un anàlisi estadístic ANOVA i s'ha ponderat els resultats en percentatges per tal de poder determinar-ho. Finalment, amb l'anàlisi realitzat, s'ha obtingut que els millors paràmetres de procés amb un bon compromís entre les propietats mecàniques i l'energia són una velocitat d'avanç de 3000 mm/min, un diàmetre d'eina de 10 mm, un pas incremental de 0,5 mm i la velocitat de rotació lliure. Pel cas del policarbonat, aquests paràmetres esmentats donen molt bones propietats mecàniques i milloren el consum d'energia, però encara s'obtenen millors propietats mecàniques amb una velocitat d'avanç de 1500 mm/min, però així es penalitza el consum d'energia i la productivitat, per tant s'hauria de fer una valoració de les propietats que es volen obtenir però es considera que són adequades les que s'obtenen amb la velocitat d'avanç de 3000 mm/min. Les propietats mecàniques obtingudes en les peces finals han estat ponderades i representades en la Figura 5 pels dos experiments en que aquestes propietats han estat millors.

Finalment, les emissions de CO<sub>2</sub> depenen de la fabricació i de l'obtenció de la matèria primera. Per les emissions derivades de la fabricació les més favorables són com menys energia es consumeixi, però s'ha pogut comprovar que és molt més important les emissions derivades de l'obtenció del material, concloent que pels dos materials estudiats és millor utilitzar el policlorur de vinil i com menys gruix tingui la xapa menys emissions se'n deriven.

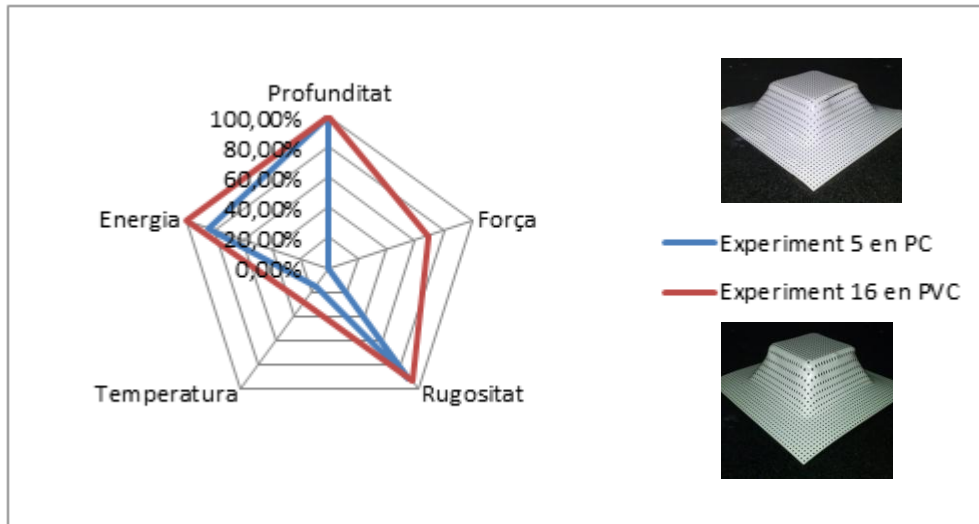


Figura 5 Propietats ponderades dels millors casos en PC i PVC

Per poder dur a terme aquets projecte considerant el muntant referent al cost del material i cost de mà d'obra per executar les tasques necessàries per la realització de l'anàlisi energètic de deformació incremental de xapa en materials polimèrics el total del pressupost ascendeix 11329,95 € (ONZE MIL TRES-CENTS VINT-I-NOU AMB NORATA-CINC CÈNTIMS), els quals són una despesa, ja que no ha estat una comada d'un client.

Girona, 4 de setembre de 2014

Aleix Lleget Novell