

Disseny d'una peça de plàstic reciclat:

Metodologia i aplicació

M. Sánchez-Soto^{1,2}, R. Gámez¹, A. Gordillo^{1,2}, P. Pagés², M. LL. Maspoch¹

1. Centre Català del Plàstic. Terrassa (Barcelona)
2. Dept. de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica. Universitat Politècnica de Catalunya. Terrassa. (Barcelona)

Resum

El disseny d'una peça de plàstic és un procés complex que implica el coneixement de les característiques mecàniques, elèctriques i físiques de la peça, i també dels processos de transformació. La principal tasca del dissenyador és traduir una sèrie de requeriments i idees prèvies en les dimensions i formes finals de la peça. Per aconseguir-ho de manera òptima, el dissenyador ha de fer ús, a banda de l'experiència i els coneixements propis, d'una metodologia de disseny adequada. L'objectiu d'aquest article és posar de manifest els passos a seguir quan s'aborda un disseny i la seva aplicació a una peça de plàstic fabricada en material reciclat.

Paraules Clau

Tècniques CAE, reciclatge, disseny, materials plàstics, selecció de materials.

En abordar el disseny d'una peça, un article o un mecanisme, el dissenyador ha de prendre en consideració nombrosos factors o requisits que són previs a la definició de l'objecte i que tindran una gran influència sobre les prestacions finals. Traduir aquests factors en idees, formes i dimensions és, en definitiva, el fi últim del disseny. L'objectiu d'aquest article és posar de manifest una metodologia de disseny i la seva aplicació final a l'exemple d'una peça fabricada en material plàstic reciclat.

La creació d'una peça és un procés complex en què el dissenyador, a més de conèixer-ne els requeriments funcionals, ha d'estar familiaritzat amb els processos de transformació que s'utilitzen, i també ha de conèixer les condicions a què estarà sotmesa la peça durant la seva vida útil. Una de les dificultats afegides és que, molt sovint, gran part dels requisits no són coneguts a priori o no estan prou definits.¹

L'objectiu d'un procés de disseny és proporcionar una solució adequada al problema que es planteja, però a més, la solució s'ha de donar en el moment just. Actualment el nivell d'exigència del mercat obliga a retallar el temps de desenvolupament de producte, mentre que d'altra banda cal reduir costos i incrementar la qualitat dels elements que es fabriquen.

Tanmateix, per aconseguir un disseny òptim cal invertir-hi temps i recursos. La solució d'aquesta aparent contradicció rau en l'ús d'eines de disseny i simulació de grans prestacions i en l'adopció d'una metodologia de disseny efectiva.

Les tècniques de simulació a través d'elements finits (CAD/CAE) constitueixen eines de suport fonamentals per a la consecució i el desenvolupament efectiu del producte, mentre que la utilització de disciplines basades en l'enginyeria concurrent (Figura 1) permet anticipar solucions en les etapes primàries de definició del producte, és a dir, quan els costos són menors.

La intenció fonamental de l'enginyeria concurrent és implicar des de bon començament totes les persones que hi tindran una participació futura. Així s'aprofita l'experiència de cada participant per tal d'arribar més ràpidament a la solució.

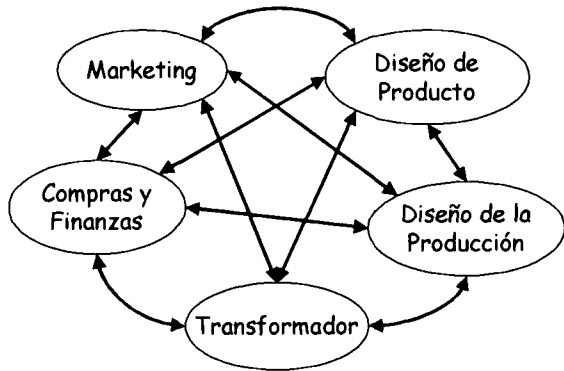


Figura 1. Esquema del procés d'enginyeria concurrent

El procés que condueix a la definició completa de la peça té un caràcter iteratiu. Les etapes bàsiques que el formen es poden visualitzar a la Figura 2. Algunes de les etapes fonamentals es descriuen a continuació

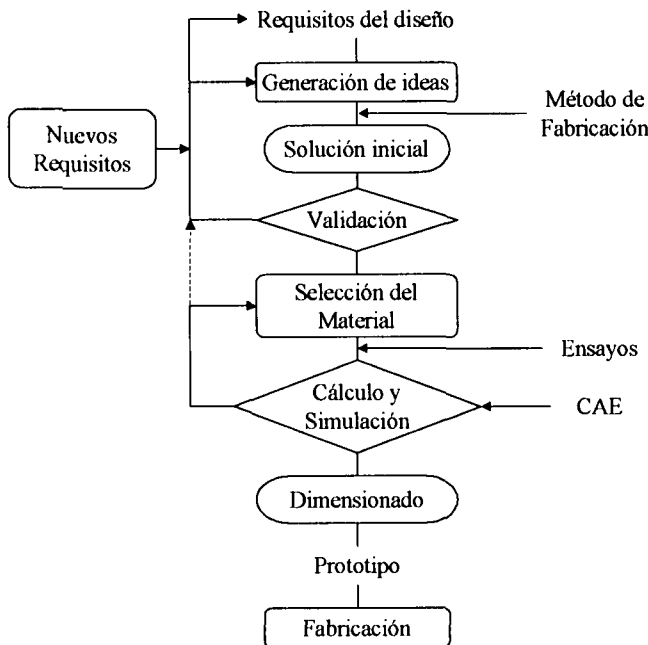


Figura 2.- Esquema del procés de disseny

Especificacions o requisits de disseny

El primer pas a realitzar és establir les necessitats que la peça haurà de satisfer i acotar-ne i definir-ne tots els requeriments funcionals i no funcionals.

Establir aquests requisits és una de les tasques més difícils i també més importants en qualsevol disseny, perquè com millor sigui la definició de les especificacions de la peça més s'ajustaran les seves prestacions a la utilització prevista. D'altra banda, si la definició de condicionants és incompleta o incorrecta, el resultat serà una peça no vàlida o no totalment optimitzada.

Sovint resulta molt difícil anticipar algun dels requisits d'un producte, sia perquè es desconeixen, com per exemple les condicions d'abús o mal ús, sia com a resultat d'una definició difícil, com per exemple en conceptes subjectius com podria ser l'estètica. Tot i així, sempre és més útil i pràctic tractar de trobar propietats o característiques que es puguin mesurar i que representin la qualitat que es desitja per a l'article.

Un cop acotats els requeriments del disseny s'identifiquen totes les variables lliures i les restriccions de la peça i s'agrupen en termes d'aspectes funcionals comuns (esforços mecànics, condicions ambientals de treball, requeriments dimensionals i legals, etc.). A partir d'aquí es quantifiquen les especificacions tècniques elaborant expressions matemàtiques que mostren les relacions existents entre les diverses variables per seleccionar-ne posteriorment les que exerceixen més influència en el disseny.

Concepte preliminar de la peça

Un cop s'han establert els requisits de la peça, es pot desenvolupar un disseny preliminar o conceptual del producte. En aquest disseny conceptual s'elabora una primera visió de la peça i se n'estableixen les dimensions generals i les interrelacions amb l'exterior o amb altres components.

També se n'especifiquen les dimensions o funcions que son fixes i les que des del punt de vista del disseny poden estar subjectes a canvis.

Al llarg d'aquesta etapa no es determina la definició completa de la peça, sinó que preferentment es defineixen els elements comuns que obligatòriament ha de proporcionar, contenir o assegurar el producte.

El pas següent a seguir és elegir els materials que s'adaptin millor a les especificacions tècniques de la peça.

Selecció de materials

L'elecció del material constituent és un factor determinant en el disseny d'una peça, per la qual cosa aconseguir una bona aproximació al començament del procés pot estalviar molt esforç, temps i, sobretot, diners. Actualment existeix una gran varietat de tipus i graus diferents de materials amb propietats molt diverses, de manera que la selecció del material ideal per a una peça o un component no és una feina fàcil.

Una primera aproximació assenyada és utilitzar formes i materials que tradicionalment s'han utilitzat o encara s'utilitzen en peces amb funcionalitat semblant a la que ens ocupa. Tanmateix, això deixa de ser vàlid quan s'aborden dissenys nous o quan es busquen alternatives més barates i eficients que les ja existents.

A partir de l'establiment dels requisits finals de la peça, el dissenyador pot generar un perfil de propietats clau amb el qual li serà possible començar a comparar i seleccionar els materials més adequats per a l'aplicació final. En aquest sentit, serà útil fer la comparació en funció de les propietats que no són susceptibles de ser millorades a través del disseny, com per exemple la transparència, la resistència química, la conductivitat elèctrica, etc.

Un altre procediment per elegir el material és utilitzar una sèrie de gràfiques [2-3] en les quals s'agrupen les diferents famílies de materials en funció dels atributs que, segons requereixi el disseny, es pretenguin maximitzar o minimitzar. Aquests atributs s'hauran definit anteriorment i reflectiran els paràmetres o relació de paràmetres que normalment tenen influència en els dissenys, com ara: mòdul de Young/densitat; resistència/densitat; tenacitat/resistència; expansió tèrmica/conductivitat; mòdul/cost; etc. un cop seleccionats els paràmetres crítics, l'aplicació d'aquestes gràfiques proporcionarà al dissenyador un seguit de famílies de materials que d'acord amb els paràmetres esmentats compleixen les prestacions requerides.

En aquest nivell de desenvolupament del producte és útil disposar de diversos materials candidats per poder contrastar-los entre si. D'altra banda, cal tenir en consideració que les propietats d'aquests materials seran diferents i que, per tant, també ho serà la geometria de les peces associades a cada una d'elles. Per exemple, un material amb rigidesa doble que un altre necessitarà en principi la meitat de gruix per suportar el mateix esforç mecànic.

Procés de fabricació

Tant important com realitzar una selecció de materials correcta és assegurar que la peça es pugui fabricar mitjançant els processos de transformació i la tecnologia existents. No haver considerat aquest factor pot desembocar en una peça de disseny excel·lent però impossible de fabricar o econòmicament inviable. Així doncs, qualsevol procés de disseny ha de considerar les restriccions que el mètode de fabricació imposa.

En el cas de la transformació de materials plàstics, les principals restriccions afecten a mesures, gruixos i formes de peça assolibles. Caldrà, doncs, verificar la viabilitat de realització de la peça o modificar-la adequadament per aconseguir fabricar-la sense dificultats.

Igual que per a la selecció de materials, s'han elaborat gràfiques genèriques [3] que permeten seleccionar els processos més adequats per a la fabricació de la peça d'acord amb paràmetres com són l'àrea específica de la peça, el gruix, el pes, la rugositat superficial o la temperatura de fusió.

El procés pel qual es transformen més peces de plàstic diferents i la major part de peces tècniques és la injecció. Per això al llarg d'aquest article ens referirem específicament al cas d'objectes injectats; tanmateix, la metodologia de treball és anàloga independentment del mètode de transformació emprat.

Selecció final de materials

Un dels procediments que es pot emprar a l'hora d'emprendre la selecció final del material amb què es realitzarà la peça és el de la quantificació objectiva de cada un dels materials resultants de la selecció efectuada a l'etapa anterior.

En primer lloc, és convenient fer una llista exhaustiva de totes les propietats que des del punt de vista del material ha de tenir la peça, per exemple, en termes de resistència mecànica, resistència química, mòdul elàstic, etc. En segon lloc, cada una de les propietats es valora amb un índex numèric atorgant, si és el cas, més importància a aquella o aquelles propietats que siguin de vital importància per a la peça. Finalment, es procedirà al còmput de totes les propietats i s'extraurà com a resultat un valor global representatiu del material que indicarà si és més o menys adequat per a la finalitat prevista.

Consideracions que cal tenir en compte en el disseny de peces de plàstic

Tal com hem vist, el disseny d'una peça s'ha de concebre en funció de les propietats del material, ja que no és el mateix dissenyar una frontissa o una molla en metall o en plàstic.

Tradicionalment, per a la concepció d'una peça injectada de plàstic s'ha partit d'un primer disseny funcional i de l'elecció d'un tipus, grau i formulació del material. A partir d'aquestes dues primeres seleccions, es procedeix al càlcul o a l'estimació de les característiques mecàniques de la peça, a fi de col·locar els nervis i els reforços necessaris per proporcionar la rigidesa i la consistència mecànica adequades.

La baixa conductivitat tèrmica, juntament amb les contraccions que el material plàstic pateix en refredar-se dins del motlle, limiten el gruix màxim que pot tenir la peça injectada i obliga, per tant, a dissenyar amb grans superfícies específiques. El disseny de peces injectades amb gruixos considerables és problemàtic i difícil, ja que comporta nombrosos defectes i implica temps de processat llargs.

En comparació amb altres alternatives com els metalls o els materials ceràmics, els plàstics tenen un mòdul elàstic baix. Per tant, per obtenir, per exemple, una rigidesa en flexió equivalent cal compensar el baix mòdul del material amb l'augment del moment d'inèrcia. L'augment del moment d'inèrcia s'aconsegueix a través de l'adequada disposició de nervis i reforços, que hauran de ser estrets i profunds tant per maximitzar el moment d'inèrcia com per evitar els vacúols interns o els xuclets superficials que es poden produir quan el material es refreda.

Un altre aspecte a considerar a propòsit de la viabilitat d'una peça injectada és la manera en què es distribueix el material dins el motlle durant el procés d'injecció. És ben sabut [4] que les condicions emprades en la injecció poden alterar les propietats i fins i tot les dimensions finals de les peces. Per tant, serà molt útil anticipar al màxim els problemes que poden aparèixer en la peça abans de la construcció del motlle.

El desenvolupament dels mètodes de càlcul numèric per ordinador i l'aparició d'ordinadors cada vegada més ràpids està permetent la implementació extensiva de tècniques CAE per al càlcul i el disseny de peces de plàstic que, en general, aborden dos conceptes: el càlcul mecànic i la simulació de la injecció.

Procés de càlcul mecànic

Com a conseqüència de la seva naturalesa viscoelàstica, els materials plàstics presenten un comportament elàstic quan se sol·liciten a velocitats de deformació altes, mentre que quan se sol·liciten a velocitats de deformació baixes predomina un comportament viscos. Aquest comportament està provocat per la llibertat de moviments dels segments de cadena polimèrica. En veiem la representació a la Figura 3.

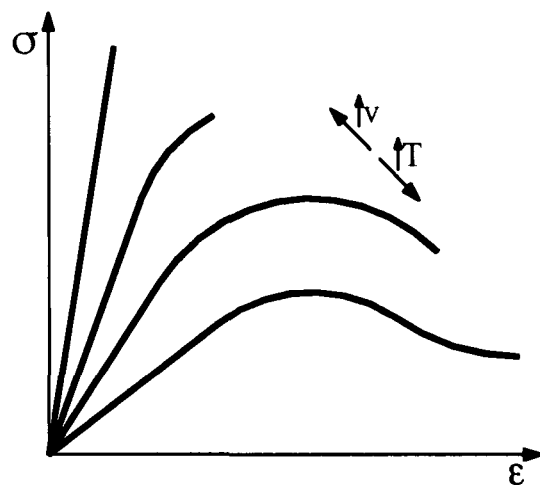
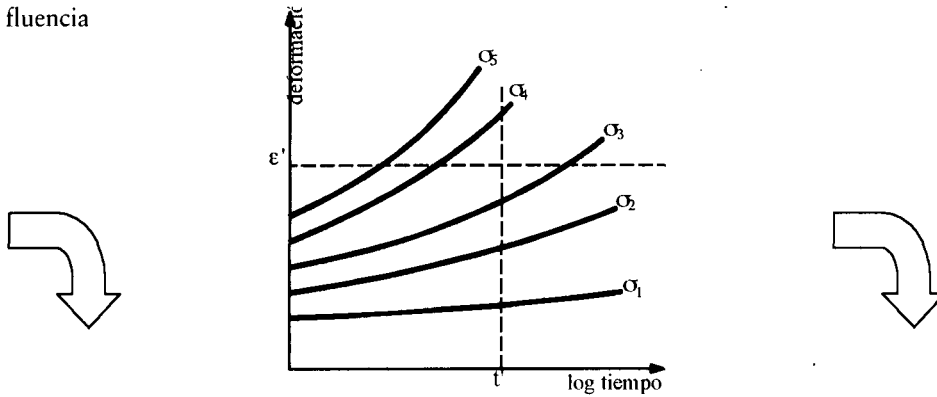


Figura 3. Diagrames tensió-deformació a velocitats de sol·licitació diferents

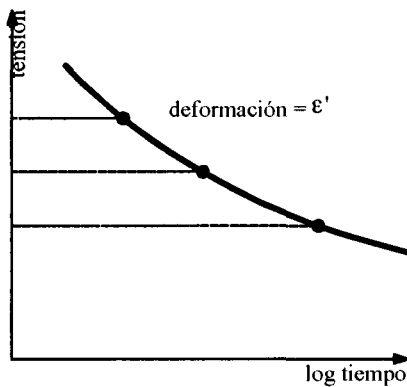
A la gràfica anterior s'observa que a mesura que la temperatura augmenta, el mòdul elàstic i la tensió de cadència disminueixen i l'elongació a trencament augmenta, mentre que a mesura que la velocitat de deformació augmenta succeeix exactament el contrari. Això implica que a més de la variació de les propietats respecte de la temperatura, en els materials plàstics caldrà tenir en compte el temps d'aplicació de la càrrega, sobretot en els casos en què una determinada càrrega està aplicada sobre una peça durant un període de temps llarg.

Quan una peça de plàstic és sol·licitada de manera contínua, exhibirà inicialment una deformació elàstica instantània seguida d'un increment de deformació continu causat pel comportament viscos del material. Aquesta darrera deformació depèn del temps d'aplicació de la càrrega i, òbviament, de la tensió aplicada (Figura 4).

Curva de fluencia



Curva Isométrica



Curva isocrona

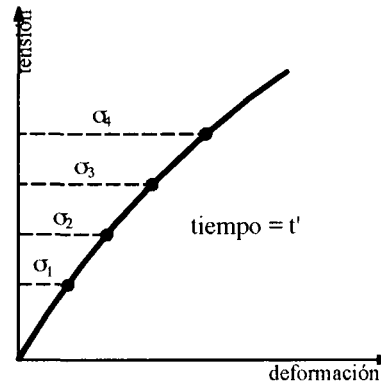


Figura 4. Corbes genèriques de fluència amb el temps d'un material plàstic. Corbes isomètrica i isòcrona

Per obtenir una peça que suporti una càrrega aplicada durant un període de temps llarg cal utilitzar les corbes de fluència amb el temps del material i assegurar que la peça no es trencarà o deformarà massa durant la seva vida en servei. Una manera senzilla, si bé conservadora, és treballar amb la corba tensió-deformació isòcrona en el temps que es desitgi que suporti la peça i extreure les propietats mecàniques a partir d'aquesta corba. Així, per exemple, el mòdul elàstic s'obté a partir de la fórmula:

$$E_i(t, T) = \frac{\sigma_i}{\epsilon(t, T)}$$

O també pel pendent de la corba isòcrona traçada en el temps t . La manera més exacta de calcular-ho és disposar de les corbes experimentals del material en forma d'equació matemàtica i analitzar l'evolució de les tensions de la peça amb el temps, per exemple, mitjançant programes de càlcul mecànic per elements finits [5]; d'aquesta manera fins és pot predir el comportament de la peça sota esforços variables. D'altra banda, el comportament dels plàstics és diferent en tracció que en compressió, de manera que caldrà aplicar els diversos valors de compressió o de tracció, segons es sol·licita la part de la peça en qüestió. En cas d'indeterminació, caldrà aplicar els valors de tracció més crítics. Tanmateix, a la pràctica és habitual treballar amb les corbes de tracció del material i mantenir un petit nivell de seguretat.

Simulació de la injecció

Els programes de simulació de la injecció permeten predir el comportament reològic dels plàstics en el motlle i determinar els paràmetres del procés de transformació, i fins optimitzar el disseny del motlle, amb la qual cosa s'obtenen millores significatives en la qualitat del producte final [6].

Per portar a terme la simulació del procés d'injecció cal conèixer la geometria de la peça a injectar, el tipus de màquina, el material del motlle i les característiques del material que s'injecta (temperatura d'injecció, corbes PVT, etc.). De tota manera, el mateix programa de càlcul [7] incorpora la major part de característiques i propietats que es necessiten.

En un primer pas s'introdueixen les característiques aproximades del procés: temperatura d'injecció, temperatura del motlle i d'expulsió. El programa proporcionarà el que coneixem com a finestra de procés, en la qual es reflecteixen les condicions en què la injecció serà factible (Figura 5).

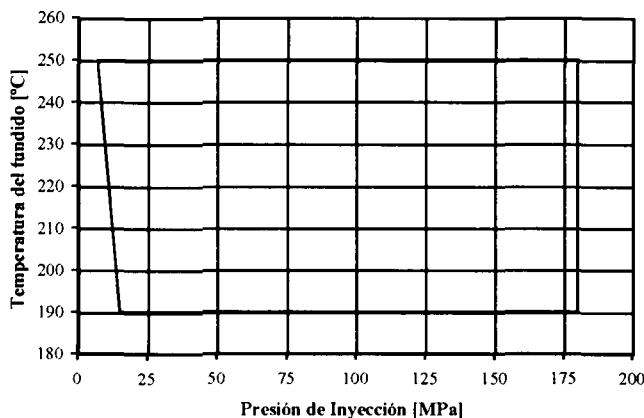


Figura 5. Exemple de finestra de procés

A partir d'aquest punt, el programa proporciona una primera aproximació a les variables òptimes del sistema. Per exemple, es pot determinar el perfil de velocitats d'injecció recomanat, el temps d'injecció i de manteniment de pressió o una primera estimació de les oclusions d'aire i de, si fos el cas, les línies de soldadura.

Un dels gràfics que proporciona més informació és el que mostra l'avanç del flux de material fos per l'inte-

rior de la peça. A partir d'aquest resultat es pot determinar la posició més idònia per al punt d'injecció, definir si el pas del material està convenientment compensat i, en cas que no ho estigui, adoptar les mesures correctores corresponents. Així doncs, aquesta primera fase d'anàlisi permet optimitzar en el motlle l'alimentació, l'equilibri, la situació i la dimensió de l'entrada a la peça i la posició de sortida de gasos i línies de soldadura.

En un segon nivell de profunditat en la simulació, introduint la geometria dels canals de refrigeració del motlle es pot obtenir el temps de refrigeració de la peça i, en conseqüència, el temps total de cicle, la qual cosa ens permet obtenir una aproximació fiable al cost final de la peça. A banda del que hem esmentat, el sistema proporciona l'eficiència dels canals de refrigeració i la distribució de temperatures dins de la peça, i en conseqüència, una estimació del potencial enguerriment o deformació de la peça.

Com a últim nivell de resultats, el sistema proporciona les contraccions i deformacions de la peça simulada. L'estimació de les contraccions i deformacions és un dels principals objectius en el disseny de motlles ja que té una gran repercussió des del punt de vista econòmic.

Les causes principals de contracció es poden agrupar en tres categories [8]: orientació del flux, diferències de pressió i cristallització i refrigeració diferencial de la peça. A partir de l'observació de la contracció volumètrica de la peça, dels possibles refluxos del material dins del motlle i de l'evolució de la velocitat de deformació, es pot optimitzar el perfil i el temps d'aplicació de pressions de manteniment, dos factors de gran importància per a l'estabilitat dimensional i la qualitat de la peça.

Aplicació: suport d'un palet en plàstic reciclat

A través d'aquesta anàlisi es vol comprovar la viabilitat de la fabricació en material plàstic reciclat d'una peça que s'utilitza com a suport o pota d'un palet. El palet consta de dos elements, una planxa o base realitzada en cartró premsat i cinc de les peces esmentades que li fan de suport. El palet s'utilitza bàsicament per a transportar sacs, caixes o altres mercaderies. La geometria de la peça està inicialment definida (Figura 6), però es vol aconseguir millorar-ne, tant com sigui possible, les prestacions mecàniques.

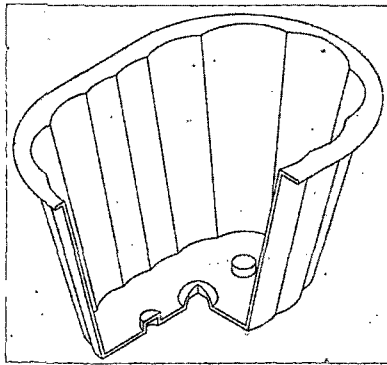


Figura 6. Geometria inicial de la peça

Especificacions de la peça

Els requeriments inicials de la peça són els següents:

- Planxa de dimensions 800 x 600 mm amb cinc suports, quatre a les cantonades i un de central.
- Força a compressió màxima de 1000 kg sobre el palet complet.
- Utilitzar material reciclat com a requisit.
- Muntatge manual (esforç de muntatge 50 N):
- Geometria de la peça inicialment definida segons la figura 6.
- Cost mínim.
- Temperatura de treball màxima = 50° C.
- Procés de fabricació per injecció.

Les condicions de mal ús o de seguretat de la peça no són conegudes. Considerant, doncs, l'ús de la peça s'ha cregut convenient que la peça ofereixi una bona seguretat de funcionament. Per tant, com a criteri de disseny es parteix de la premissa que cada peça haurà de suportar ella sola una càrrega màxima de 500 kg.

Selecció de materials

La selecció de materials en aquest cas particular es limita als materials plàstics. Donada la funció de la peça, interessa que el mòdul elàstic i la resistència a compressió siguin màxims. La densitat i, en conseqüència, el pes de la peça no són paràmetres crítics, si bé cal minimitzar els gruixos de la peça. A partir de les gràfiques d'Ashby [3] podem comparar els diversos polímers en funció de les característiques esmentades. En el cas que ens ocupa, s'han pres en consideració les gràfiques:

- Mòdul versus resistència a flexió* (*alternativa a compressió per manca de dades)
- Resistència versus temperatura
- Mòdul versus cost
- Tenacitat versus resistència a flexió.

Concepte	Materials		
	HDPE	PP	PVC
Mòdul elàstic	10	11	18
Resist. compressió o flexió	12	12	18
Temperatura màxima	14	16	10
Fluïdesa en injecció	9	9	8
Cost	9	9	7
Densitat	9	9	7
Existència de reciclat	9	10	10
Total	72	76	78

Taula 1. Valoració comparativa dels materials

Nota: Valoració d'1 a 10. Tres primers conceptes afectats per factor multiplicador de 2.

Com a resultat de l'observació d'aquestes gràfiques, els materials potencials són: LDPE, HDPE, PP i PVC. El polietilè de baixa densitat es descarta d'entrada pel baix mòdul, en comparació amb les altres opcions, que li impedeix acomplir els requisits de càrrega. Els altres tres materials es comparen a la taula següent.

Com es pot observar, la diferència entre els materials considerats és petita, per tant, tots són vàlids per a l'aplicació considerada. En el cas real, el desenvolupament del disseny s'ha portat a terme tenint en compte les dues millors alternatives, és a dir, el polipropilè i el PVC. D'altra banda, l'augment de la necessitat de trobar aplicacions a compostos reciclats en PVC ha afavorit la utilització d'aquest material en la peça que ens ocupa. En aquest article mostrarem bàsicament els resultats obtinguts amb el PVC.

Caracterització del material

Abans de començar la realització dels càlculs, cal conèixer algunes característiques mecàniques dels materials que s'utilitzaran. En el nostre cas, i donat que es tracta d'un material reciclat, ha calgut caracteritzar prèviament el material trobant les corbes tensió-deformació en tracció mitjançant una màquina universal d'assaigs. La corba de resultats del PVC és la que

apareix a la figura 7. Pel que fa al polipropilè es van fer servir dades proporcionades pel fabricant calculades per a polipropilens reciclats sense càrrega. El resum de propietats es mostra a la Taula 2.

	PP	PVC
E (MPa)	1300	2300
σ_{max} (MPa)	22	30
Coef. Poisson*	0.43	0.42
Densidad (Kg/m ³)	985	1350

*[9]

Taula 2. Resum de propietats.

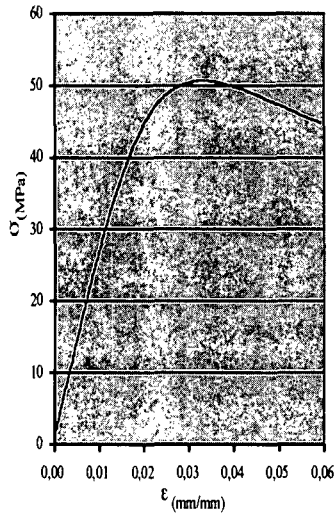


Figura 7. Corba tensió-deformació per al PVC reciclat. V = 5 mm/min

Les característiques en funció del temps s'han obtingut a partir d'experiències realitzades amb el material verge, ja que la realització d'assaigs de fluència a llarg temps resulta molt costosa. D'altra banda, a priori es considera que la diferència entre material verge i material reciclat serà poc significativa i que a la pràctica l'efecte del temps serà menyspreable, ja que la fluència apareix en tensió i la nostra peça està sol·licitada a compressió. L'equació que regeix el comportament amb el temps per al PVC és la següent:

$$\epsilon_{creep} = \epsilon_0 + 2.1 * 10^{-3} \sigma^{1.0068} t^{0.2037}$$

Càlcul mecànic

Al llarg d'aquest apartat s'apliquen les tècniques de discretització per elements finits per simular el comportament a compressió del suport. A través d'aquesta tècnica es coneixen les tensions màximes que apareixen sobre la peça i la seva localització. També és possible conèixer els desplaçaments de l'estructura sota la càrrega aplicada.

Prenent el model geomètric de la peça, s'han introduït els valors de les propietats dels materials trobats en l'apartat anterior per procedir a la simulació de la peça. S'ha simulat 1/4 de peça aprofitant la simetria geomètrica i de càrrega existents. Els resultats per a les tensions i els desplaçaments en compressió suportats per la peça es poden veure a la Figura 8.

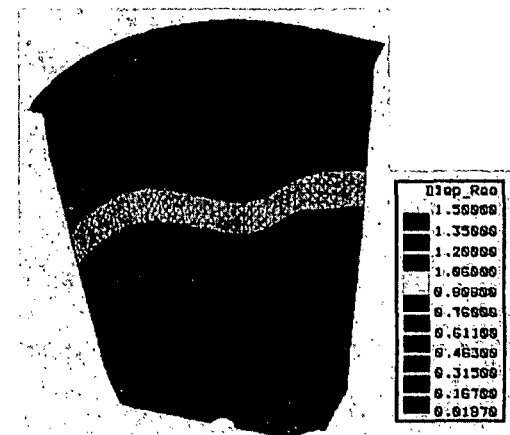
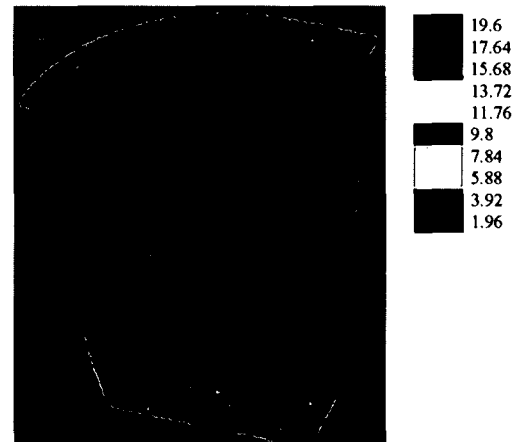


Figura 8.-A: Tensions a compressió (MPa)

Figura 8.-B: Desplaçament en compressió (mm) Càrrega=500kg.(PVC)

Com es pot observar, les tensions màximes estan per sota de les admissibles per al PVC, per la qual cosa es pot assegurar que la peça no fallarà quan s'hi apliqui l'esforç màxim. També es pot observar que les tensions màximes apareixen a la zona inferior de la peça, que tendeix a bombar-se cap a l'exterior quan se li aplica la càrrega.

El desplaçament produït per l'esforç superior (Figura 8-B) s'absorbeix principalment a la part superior del suport, que té tendència a obrir-se pels flancs. Aquest moment és el que ocasiona que l'esforç màxim es produeixi a la part de més corbatura de la peça. Altres anàlisis [10] s'han orientat en el sentit de trobar una solució geomètrica per reduir les tensions màximes; aquesta solució ha consistit en la inclusió de cinc manxes a les zones més corbades de la peça en lloc les tres que té actualment (vegeu Figura 6).

Pel que fa al PP, les anàlisis realitzades indiquen que, a causa d'un mòdul menor, amb la concepció de peça actual no s'assoleixen les prestacions requerides. En aquest cas, cal dotar la peça de més rigidesa canviant-ne la geometria.

Simulació de la injecció

El primer nivell d'anàlisi de la injecció serveix per establir una primera aproximació a les variables del sistema. El resultat d'aquest estudi és independent del material emprat, que es considera isotròpic i de propietats independents de la pressió o de la temperatura. Com a resultats, s'han obtingut el perfil de velocitats de cargol òptim i la situació de les oclusions d'aire (Figura 9). El perfil de velocitats és un paràmetre a introduir en l'anàlisi de segon nivell.

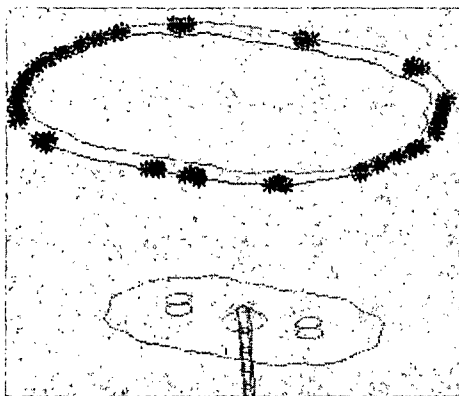


Figura 9. A: Aire atrapat.

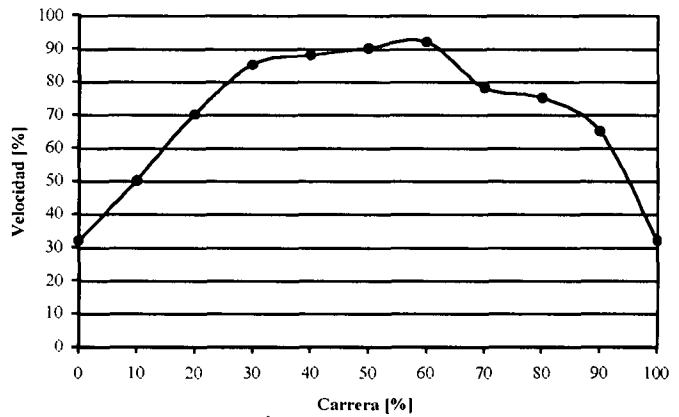


Figura 9.B: Perfil de velocitats en funció de la carrera del cargol

Una altra dada rellevant és l'avanç del flux del material fos a l'interior del motlle (Figura 10). Es pot observar que l'emplenament del motlle és uniforme i que el pas del material està ben distribuït, ja que a totes les zones de la part superior, la més allunyada del punt d'injecció, arriba el material fos al mateix temps. Això ens indica l'absència de problemes a l'hora d'injectar el plàstic.

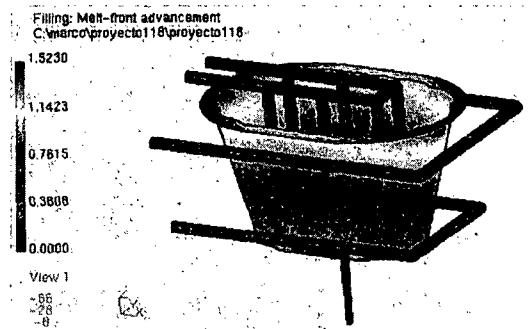


Figura 10. Avanç previst del flux del material fos a l'interior del motlle

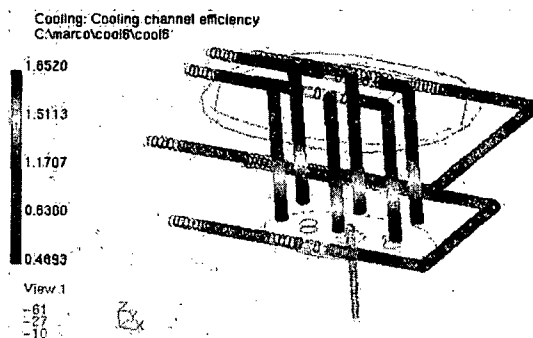


Figura 11 A: Canals de refrigeració.

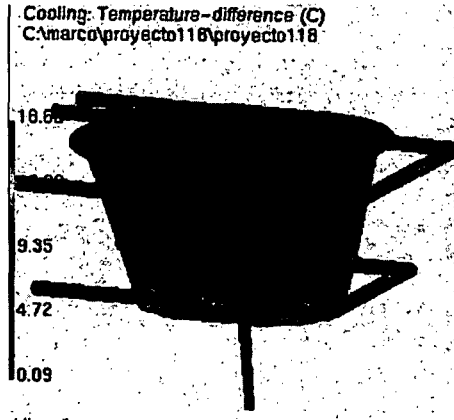


Figura 11 B: Diferències de temperatura a la peça

El temps de cicle previst és de l'ordre de 49 segons, força elevat per a la peça que es fabrica. Tanmateix, aquest fet està motivat per la baixa temperatura d'expulsió de la peça (47°), que comporta un allargament considerable del temps de refredament.

La diferència de temperatures entre punts extrems de la peça és aproximadament de 18° C (Figura 11), que es considera baixa i no tindrà repercussió pel que fa a provocar futurs enguerriments de la peça. L'optimització de la refrigeració ha portat a la disposició de canals que s'aprecia a la Figura 11-A.

Per a l'anàlisi de les pressions de manteniment s'ha realitzat una simulació que considera en conjunt les fases de l'emplenament i empaquetat de la peça dins el motlle. Les principals variables de procés que regeixen el sistema són el temps de manteniment de la pressió i el nivell o el perfil d'aquesta. El criteri aplicat per establir el temps de refredament és el tancament del pas del canal d'alimentació, de manera que n'hi haurà prou amb determinar el moment en què s'ha solidificat l'entrada a la cavitat. En el material considerat, l'entrada s'ha solidificat totalment al cap de 30 segons, per tant, el temps que queda fins als 49 segons totals corresponen al temps que cal perquè la peça arribi a la temperatura d'expulsió preseleccionada. A la pràctica, es podrà reduir el temps expulsant la peça del motlle a major temperatura. El perfil de pressió de manteniment recomenada per a la peça i el material considerat es mostra a la Figura 12. Com a resultat final de la simulació, a la taula 3 es reflecteix el resum de paràmetres obtinguts de la simulació de la pota del palet.

Material	T iny (°C)	T molde (°C)	T expuls. (°C)	ΔT peça (°C)	T. inyec.(s)	T. pres.(s)	T. ciclo (s)
PVC	210	25	47	18	1,5	30	49

Taula 3. Paràmetres representatius obtinguts amb la simulació

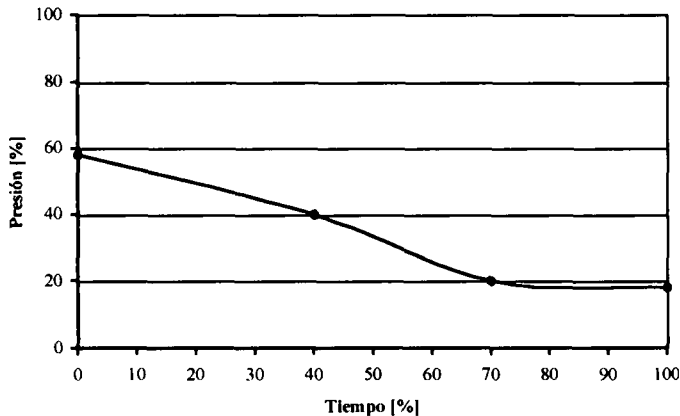


Figura 12. Representació del perfil de la pressió de manteniment

Conclusions

Mitjançant l'ús de programes de simulació de càlcul mecànic i d'injecció s'ha aconseguit verificar la viabilitat de la fabricació d'una peça suport realitzada amb PVC reciclat per a un palet. La selecció de materials realitzada indica que el polipropilè i el PVC reciclats seran els òptims. Finalment, i a causa de les sol·licitacions mecàniques de la peça, s'ha optat pel PVC com a material ideal. S'han comprovat les característiques mecàniques de la peça per tal d'assegurar-ne el funcionament sota una càrrega durant tot el període de servei previst. Igualment s'ha comprovat la injecció en la fabricació de la peça, la qual cosa ha permès optimitzar aspectes com ara la posició de l'entrada o la refrigeració del motlle, és a dir, trobar els paràmetres de fabricació més adequats. Mitjançant la metodologia exposada, s'ha aconseguit reduir el temps de disseny i la posada en servei de la peça amb una gran reducció de costos.

Referències

- 1- SANCHEZ-SOTO M., GORDILLO A., MARTÍNEZ A.B., *Diseño optimizado de piezas de plástico*. Plásticos Universales nº 43 pag 96-99. Febrero 1997.
- 2- ASHBY M.F. *Materials selection in mechanical design*. Pergamon Press 1992.
- 3- ASHBY M.F. *Materials selection in mechanical design. Materials and process selection charts*. Pergamon Press 1992.
- 4- GORDILLO A. *Influencia de la inyección sobre el comportamiento mecánico de compuestos de polipropileno*. Tesis Doctoral. UPC 2000.
- 5- COSMOS V 1.75. *Finite element simulation program*. Structural Research and Analysis Corporation. Santa Mónica California. 1998
- 6- GORDILLO A., SANCHEZ-SOTO, M., MASPOCH M.LL., MONGE M.V., *Herramientas CAE aplicadas al diseño de moldes de inyección de plástico XIII Congreso Nacional del Ingeniería mecánica*. Vol 3. Pp 98-102. 1998
- 7- C-MOLD V 1999-7. A.C Technology. Ithaca, New York. Actually Mold-Flow.
- 8- ZOU Q., HORNEY R. *Minimize injection molded plastic warpage by applying analysis in mold design*. ANTEC conference proceedings. 1104-1110. (1994).
- 9- PROGELHOF R.C., THRONE J.L., *Polymer engineering principles. Properties, processes, test for design*. Hanser Publishers, 1993.
- 10- SANTALO G. SANCHEZ-SOTO M. *Estudio y optimización del diseño y simulación de la inyección de soportes para palets realizados en material plástico*. U.P.C 1998.