

ANÀLISI DEL DISSENY D'UN TAP D'UN ENVÀS COSMÈTIC FABRICAT MITJANÇANT LA TÈCNICA D'INJECCIÓ DE POLÍMERS

J. Saurina, J. Farjas, J.J. Suñol, O. Rojas, R. Berlanga, J. Arnau

Departament d'Enginyeria Industrial, Universitat de Girona, av. Lluís Santaló, s/n, 17071 Girona (Spain).

A/e: EI GRM@speedy.udg.es

RESUM

En aquest treball es presenta l'anàlisi numèrica d'un procés real de fabricació d'un tap d'un envàs utilitzant la tècnica d'emmotllat per injecció. En aquesta anàlisi s'ha emprat un programari d'enginyeria assistida per ordinador. Per tal d'aconseguir unes prediccions acurades cal disposar d'una bona caracterització de les propietats fisicoquímiques del material, així com la utilització d'uns models empírics propers millor a la realitat. A partir dels resultats obtinguts es pot comprovar una bona concordança entre el procés real i la simulació, la qual cosa ha permès detectar un defecte estructural del motlle.

RESUMEN

En este trabajo se presenta el análisis numérico de un proceso real de fabricación de un tapón de un envase utilizando la técnica de moldeado mediante inyección. En este análisis se ha empleado un programa de ingeniería asistida por ordenador. Con el fin de conseguir unas predicciones idóneas es necesario disponer de una buena caracterización de las propiedades físico-químicas del material, así como la utilización de unos modelos empíricos lo más cercanos posibles a la realidad. A partir de los resultados obtenidos se puede comprobar una buena concordanca entre el proceso real y la simulación, lo que ha permitido detectar un defecto estructural del molde.

ABSTRACT

The design of a cosmetic bottle cap using polymer injection techniques involves several parts: choosing the material, the cooling system, the runners network, selecting the machine and characterising the material. The consistency of the full design can be improved by using CAE software. This software requires accurate data on the material's properties and reliable mathematical models to generate the best predictions. Numerical analysis results reproduce a design problem in the original manufacture mould.

Keywords: Injection Moulding, rheology, Pressure-Volume-Temperature data, residual stress.

INTRODUCCIÓ

Una de les tècniques industrials més esteses en la fabricació de components plàstics és la injecció de polímers dins d'un motlle. En el disseny d'aquest motlle, així com en les condicions de tot el procés de fabricació, cal tenir en compte els passos següents: selecció del polímer, disseny del sistema de refrigeració, xarxa dels corredors de transport material, tria de la màquina injectora i caracterització de les pro-

pietats físiques i químiques del polímer. Per aconseguir una rendibilitat econòmica òptima del procés d'emmotllat cal tenir en compte la qualitat i consistència del procés, abans fins i tot de la fabricació del motlle. La consistència del disseny complet es pot optimitzar emprant programari CAE (enginyeria assistida per ordinador). Per tal d'aconseguir que les prediccions d'aquest programari reproduïxin fidelment el procés industrial de fabricació cal disposar d'un coneixement acurat de les propietats del material, així com dels models empírics associats.

DESCRIPCIÓ DE LA MODELITZACIÓ

L'objectiu d'aquest treball és la millora del disseny d'un tap d'un envàs. El polímer escollit es un polipropilè. La màquina d'injecció és una Novapax MPS92 N110. Les simulacions numèriques s'han dut a terme mitjançant el programari comercial C-MOLD de la casa AC Technology. El programari C-MOLD inclou tot un seguit de programes informàtics per desenvolupar la simulació numèrica del processament de plàstics. El procés d'injecció es pot separar en dues etapes: ompliment (*filling*) i empaquetat (*post-filling*). El principal mecanisme físic implicat en l'etapa d'ompliment és el flux de polímer, mentre que en l'empaquetat el procés és governat pel procés de compressió i solidificació. Per analitzar cadascuna de les etapes cal utilitzar característiques diferents del material, que es descriuen a continuació (M.J Bozart et al., 1992).

Etapa d'ompliment.

La simulació del flux del polímer requereix fonamentalment un bon coneixement de les propietats reològiques del polímer. La major part dels polímers presenten dos règims de flux diferenciats: newtonià i cisalla d'estricció (*shear-thinning*). El flux newtonià es dona per velocitats de cisalla (*shear rate*) petites. Dins d'aquest règim la relació entre l'esforç de cisalla (*shear stress*) i la velocitat de cisalla és lineal. A grans velocitats de cisalla la viscositat decreix quan augmenta la velocitat de cisalla.

A més a més, la viscositat s'afebleix en augmentar la temperatura. Aquest comportament es coneix amb el nom de cisalla d'estricció. Per tenir en compte ambdós règims s'utilitza el model Cross-WLF M.L. Williams et al. (1995), que expressa la dependència de la viscositat del polímer vers la temperatura, T , velocitat de cisalla, i pressió, p . En la descripció del règim de cisalla per estricció el paràmetre més rellevant és l'esforç de cisalla. S'ha escollit un model tipus Arrhenius per descriure la dependència de la viscositat amb la temperatura. S'ha millorat aquest model incloent-hi la desviació del model d'Arrhenius per $(T-T_g) > 100^\circ\text{C}$ - on T_g és la temperatura de referència corresponent a la transició vítria (P. Pagès et al., 1996):

$$\eta(T, \dot{\gamma}, p) = \frac{\eta_0(T, p)}{1 + \left[\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{T} \right]^{1-n}}$$

amb

$$\eta_0(T,p) = D_1 \exp \left[\frac{A_1 (T-T_g)}{A_2^*(p) + (T-T_g)} \right]$$

on

$$A_2^*(p) = A_2 + D_3 p$$

En aquest model la caracterització de la viscositat preveu sis constants referents al material. Aquestes constants estableixen la dependència de la viscositat vers la temperatura, velocitat de cisalla, i la influència de la pressió en un interval gran de temperatures. En el nostre cas els valors de les constants són: $n=0.24723$, $\tau=41530$ Pa, $D_1=1.64 \cdot 10^{14}$ Pa s, $T_g=263.15$ K, $A_1=32.383$ i $A_2=51.6$ K. Cal remarcar que durant el procés d'injecció la temperatura roman molt per sobre de T_g , és a dir, no és necessari considerar la dependència en la pressió de T_g .

Etapa d'empaquetat

L'etapa d'empaquetat requereix el coneixement d'unes altres propietats físiques: densitat, ρ , volum específic, v , calor específica, C_p , conductivitat tèrmica, k . En la descripció d'aquesta etapa esdevé especialment crítica la modelització de la compressibilitat del polímer. Aquesta informació s'obté mitjançant dades de pressió-volum-temperatura (PVT). Aquestes dades permeten establir la transició del material quan aquest presenta un canvi de fase en passar d'un estat fos a un de sòlid. Per conèixer la dependència del volum específic vers la temperatura i la pressió en els estats fos i sòlid, respectivament, fem l'equació de Tait C-Mold (1995) modificada de manera que contingui dos dominis (un per a cada fase):

$$v(T,p) = v_0(T) \left[1 - C \ln \left[1 + \frac{p}{B(T)} \right] \right]$$

amb $C=0.0894$,

$$T_c = b_5 + b_6 p \quad ; \quad \bar{T} \equiv T - b_5$$

$$\text{si } T > T_c(p) \quad v_0 = b_{1m} + b_{2m} \bar{T}, \quad B(T) = b_{3m} \exp[-b_{4m} \bar{T}].$$

$$\text{si } T < T_c(p) \quad v_0 = b_{1s} + b_{2s} \bar{T}, \quad B(T) = b_{3s} \exp[-b_{4s} \bar{T}].$$

on

En el polímer analitzat s'observen dues transicions: una és de l'estat fos a l'estat cristal·lí, i l'altra és de l'estat fos a l'estat vítri. En el procés d'empaquetat la fase sòlida assolida correspon a l'estat cristal·lí, llavors per l'equació de (només s'ha considerat la transició cristal·lina. Els intervals de temperatura i pressió on aquesta equació és vàlida són els següents: des de temperatura ambient fins a la temperatura de treball (~550 K), i per la pressió des de 0 fins a 200 MPa. Les propietats del polímer en el model de Tait modificat queden especificades en les deu constants següents: $b_5=395.15 \text{ K}$, $b_6=2.6 \cdot 10^7 \text{ K} \cdot \text{Pa}^3$, $b_{1m}=0.001243 \text{ m}^3 \cdot \text{Kg}^{-1}$, $b_{2m}=8.7 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $b_{3m}=8.5 \cdot 10^7 \text{ Pa}$, $b_{4m}=0.0043 \text{ K}^{-1}$, $b_{1s}=0.001154 \text{ m}^3 \cdot \text{Kg}^{-1}$, $b_{2s}=4.6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $b_{3s}=1.7 \cdot 10^8 \text{ Pa}$ i $b_{4s}=0.002 \text{ K}^{-1}$. Les constants b_{2m} i b_{2s} representen el coeficient d'expansió tèrmica del polímer en els estats fos i sòlid respectivament. Els valors de la calor específica i de la conductivitat tèrmica en funció de la temperatura es donen a les taules 1 i 2, respectivament.

T (K)	C_p (J·Kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
313.15	2930.71
353.15	3768.06
388.15	10885.5
423.15	3349.38
473.15	2512.04

Taula 1. Calor específica en funció de la temperatura.

T (K)	k (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
353.15	0.1967762
403.15	0.1967762
413.15	0.1904961
423.15	0.142349
473.15	0.142349

Taula 2. Conductivitat tèrmica en funció de la temperatura.

En els punts d'estrangulació del sistema d'ompliment (corredors o portes) es poden produir baixades sobtades en la pressió del polímer fos. Per tant, per desenvolupar una simulació realista cal incloure un model empíric que tingui en compte possibles pèrdues de càrrega en el sistema d'ompliment. Aquests models s'anomenen pèrdues de punts d'unió (*junction-loss*). El model que s'ha aplicat involucra dues noves constants que identifiquen el material: $C_7=3.6 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ i $C_8=2.098$.

Es pot obtenir informació sobre les tensions residuals (*residual stress*) del producte final si en el model s'inclou la dependència lineal de l'expansió tèrmica vers la temperatura. Per simplificar, suposem que aquesta dependència és lineal. Atesa l'anisotropia del polímer estudiat, ha calgut introduir dos coeficients per a l'expansió transversa: $\zeta_1=0.000156 \text{ K}^{-1}$ i $\zeta_2=0.00013 \text{ K}^{-1}$.

Finalment, per poder completar la simulació del procés d'injecció, cal tenir la següent informació de la màquina d'injecció: força de tancament màxima $1.1 \cdot 10^6 \text{ N}$, volum d'injecció màxim 0.000334 m^3 , pressió d'injecció màxima $2.03 \cdot 10^8 \text{ Pa}$, velocitat d'injecció màxima $0.00118 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, temps d'ompliment 0.84 s , temps d'empaquetat 5.68 s , temps d'obertura de motlle 5 s i temperatura d'injecció 548.15 K .

RESULTATS I DISCUSSIÓ

Per evitar defectes i aconseguir que les tensions residuals de la peça siguin com més petites millor cal que tot el procés d'injecció sigui el màxim d'homogeni, és a dir, cal evitar variacions sobtades. A continuació s'analiza l'avanç del front de flux (*melt-front advancement*), la distribució espacial de temperatura (*bulk temperature*) i pressió, l'evolució temporal de la solidificació (*frozen layer fraction*), la distribució de velocitats del flux (*melt-front speed*) i la diferència dimensional entre la cavitat del motlle i la peça.

A la figura 1 s'observa l'avanç del front de flux en funció del temps. Cadascuna de les línies correspon a la posició del front de flux en un instant determinat de temps i s'anomena isolínia. El color de la línia identifica el temps, que varia des de 0 s (blau) fins al temps final d'ompliment (vermell). Per mantenir un avanç del flux balancejat cal que les isolínies siguin com més equidistants millor.

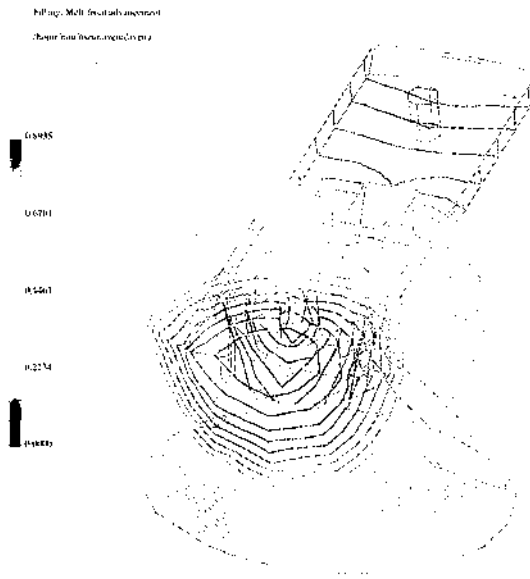


Figura 1. Avanç del front de flux en funció del temps. El color de la línia identifica el temps, que varia des de 0 s (blau) fins al temps final d'ompliment (vermell).

En el gràfic de temperatura màssica es veu la distribució espacial de temperatures en un instant determinat (figura 2). En el nostre cas s'ha triat el temps corresponent al final de l'ompliment. Les temperatures més elevades es donen en les zones pròximes al punt d'injecció, i les més baixes en els punts on primer ha deixat de circular el polímer o en els punts de menys gruix. L'objectiu és assolir gradients de temperatura com més baixos millor, és a dir, que la separació entre isoterms sigui aproximadament constant.

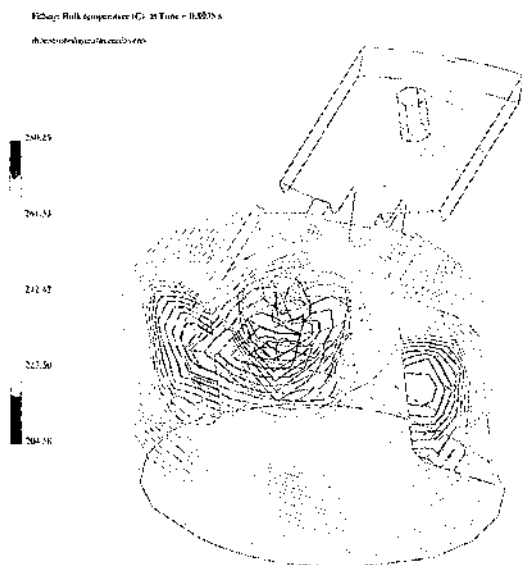


Figura 2. Temperatura màssica a l'instant final de l'ompliment. El color de les línies isoterms indica la temperatura que varia des de 204.58 °K (blau) fins a 280.25 ° K (vermell).

La distribució de pressió en el polímer a l'instant final del temps d'ompliment es visualitza a la figura 3. Les pressions més elevades es donen prop del punt d'injecció, i les més baixes en els punts més allunyats d'aquest. Per aconseguir un flux com més homogeni millor cal evitar gradients de pressió elevats, és a dir, que les línies isòbares romanguin tan equidistants com sigui possible.

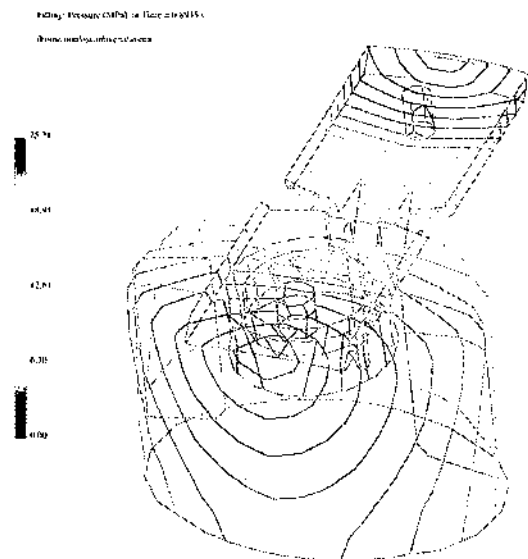


Figura 3. Distribució de pressions a l'instant final de l'ompliment. El color de les línies isòbares indica la pressió, que varia des de 0 MPa (blau) fins a 25.21 MPa (vermell).

En el gràfic de capa congelada es representa el percentatge de polímer solidificat en funció del temps per a un element finit de la malla (figura 4). La informació que esdevé d'aquest gràfic permet detectar problemes d'obstrucció en zones de pas del polímer a causa d'una excessiva congelació prematura. Una fracció solidificada superior al 25% pot suposar l'aparició d'aquesta obstrucció. Les zones especialment crítiques són les zones de pas estretes, per exemple la corba representada en color verd. En aquest cas, tot i que s'arriba a una important solidificació prematura ((18%), aquesta no suposa una obstrucció, perquè amb el pas del temps la fracció solidificada disminueix.

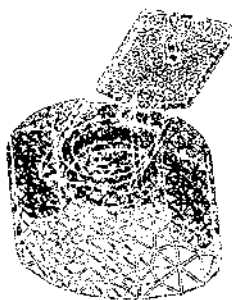
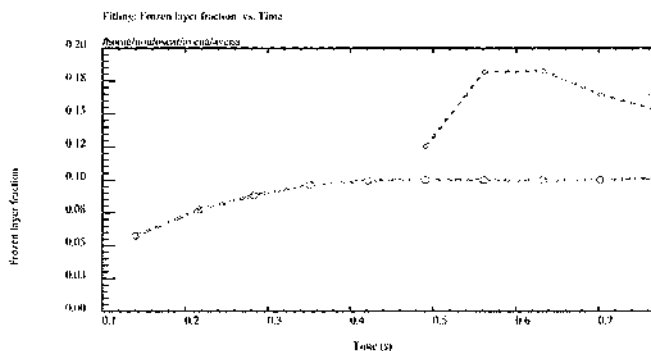


Figura 4.
Percentatge de polímer solidificat en funció del temps per a cinc elements finits de la malla.

La figura 5 il·lustra la distribució espacial de velocitats del front de flux. El que interessa és que aquest sigui tan constant com sigui possible al llarg de tota la peça. En el nostre cas s'observen zones que tenen un augment de velocitat, com són: la tapa, la part posterior del tap i el punt d'injecció. En la part de la tapa això no representa cap problema perquè es tracta d'un únic front que avança solidàriament. En canvi en la part posterior del tap es troben dos fronts, un prové de la sortida del nervi posterior i l'altre que prové de la part superior del tap. L'augment de velocitat del front que ve del nervi fa que aquest arribi abans al final del motlle i retorni cap enrere fins a trobar el segon front. En aquest punt es produeix un atrapament d'aire que causa el defecte d'aquesta peça.

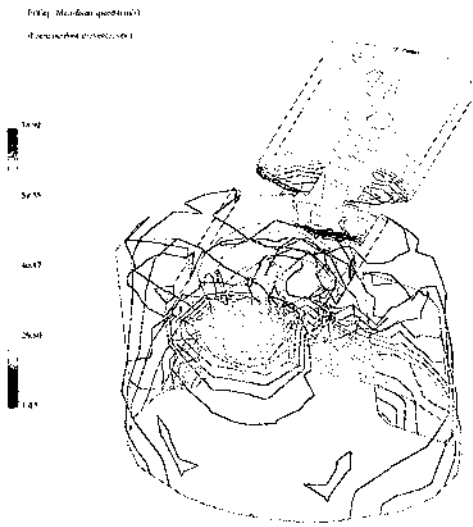


Figura 5. Distribució espacial de velocitats del front de flux. El color de les línies indica la velocitat del front de flux que varia des d'1.43 cm/s (blau) fins a 78.92 cm/s (vermell).

Finalment, a la figura 6 es representa la diferència dimensional entre la cavitat i la peça un cop aquesta és extreta del motlle. En aquest cas s'observa que la peça es dilata lleugerament en ésser alliberada de les tensions que li aplica el motlle, però no s'observa cap deformació apreciable.

Show Edge and Warnings: Dimensional difference between cavity and final part (mm)
 Dimensional difference between cavity and final part (mm)

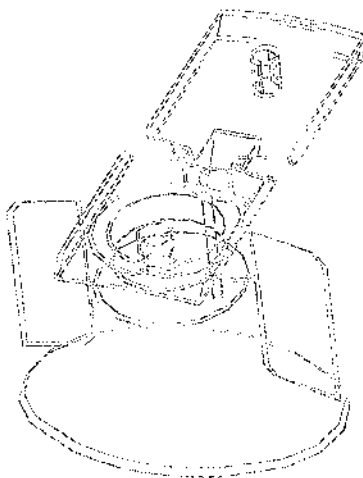


Figura 6. Diferència dimensional entre la cavitat i la peça un cop aquesta és extreta del motlle.

CONCLUSIONS

A partir dels resultats de l'apartat anterior, es pot concloure que el punt conflictiu del disseny s'observa clarament en la distribució de velocitats d'avançament del front de flux. En aquest diagrama s'observa una variació sobtada de velocitats deguda a un efecte venturi en passar pel nervi posterior. Aquest efecte provoca un atrapament d'aire a la part posterior del tap. Aquest diagnòstic concorda amb el defecte observat en les peces. Malauradament, aquest defecte és estructural, és a dir, no es pot solucionar canviant els paràmetres del procés, sinó que cal modificar el disseny del motlle, com podria ésser eixamplar la secció d'aquest nervi.

Bibliografia

- BOZART, M.J. CHEN, T.Y. i WANG, V.W. 1992. Crystallisation and its effects on the processing on polypropylene. *SPE Technical Papers*. XXXVIII:102-107.
- C-MOLD REFERENCE MANUAL 1995. *C-Mold Reference Manual*. A.C. Technology. Ithaca, Nova York.
- PAGÈS, P. CARRASCO, F. SAURINA, J. COLOM, X. 1996. Study by Fti.r. and DSC of the HDPE structural changes and mechanical properties variation when exposed to weathering ageing during the canadian winter. *J. Appl. Pol. Sci.* 60:153.
- WILLIAMS, M.L. LANDEL, R.F. i FERRY, J.D. *J. Am. Chem. Soc.* 77:3701.