

Simulación de moldeo por inyección basado en el Método de Volúmenes Finitos (FVM)

Mold Injection Simulation based on Finite Volume Method (FVM)

DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.16.2.2020.08>

Artículo de Investigación Científica. Fecha de Recepción: 11/26/2019. Fecha de Aceptación: 25/08/2020.

Adrian José Benitez-Lozano 

Instituto Tecnológico Metropolitano - Universidad Nacional de Colombia. Medellín (Colombia)
adrianbenitez@itm.edu.co – abenitez@unal.edu.co

Carlos Andrés Vargas-Isaza 

Instituto Tecnológico Metropolitano. Medellín (Colombia)
cvargas@itm.edu.co

Wilfredo Montealegre-Rubio 

Universidad Nacional de Colombia. Medellín (Colombia)
wmontealegrer@unal.edu.co

Para citar este artículo:

A. Benitez-Lozano, C. Vargas-Isaza & W. Montealegre-Rubio, “Simulación de moldeo por inyección basado en el método de volúmenes finitos (FVM)”, *INGE CUC*, vol. 16, no. 2, pp. 119–130, 2020. DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.16.2.2020.08>

Resumen

Introducción— Una de las principales preocupaciones en la industria de moldeo por inyección es garantizar un procesamiento eficiente de materiales y la adquisición de productos a costos razonables que reflejen sólidas economías de escalas para grandes series de producción. El tiempo de enfriamiento es una variable influyente y decisiva para la eficiencia de estas series, en ciertas condiciones de temperatura, aumenta junto con el espesor de la pieza. Por lo tanto, para cierto espesor, una baja temperatura del molde y una alta temperatura de extracción de la pieza tienen una influencia considerable en la reducción del tiempo de enfriamiento, lo que constituye un gran lapso del tiempo del ciclo de proceso: entre 80% y 85%. En este trabajo, el proceso de moldeo por inyección se simula para explorar la distribución de la temperatura y el proceso de llenado del material de un molde diseñado para hacer “etiquetas de oreja-chapetas”, que se utilizan para el control visual del ganado.

Objetivo— Como objetivo fundamental se busca identificar las variables esenciales en el proceso (tiempos de cierre y llenado del molde, presiones de inyección y empaquetamiento, fuerzas de sujeción y velocidad de inyección), así como su influencia en los tiempos de enfriamiento y la distribución de temperaturas finales del molde.

Metodología— Para lo anterior se establece una metodología de Diseño de Experimentos (DOE) basado en el diseño factorial 2^k , partiendo de simulaciones basadas en el Método de Volúmenes Finitos (FVM).

Resultados— Este DOE, adaptado a los resultados numéricos, revela como resultado fundamental de este trabajo, las variables de estudio que son inherentes en el proceso, además de lograr su caracterización.

Conclusiones— Los resultados permitieron estudiar el comportamiento de la distribución de la temperatura en el molde, identificando como variables fundamentales a considerar en la experimentación: la temperatura inicial del molde y las interacciones comprendidas entre tiempo de enfriamiento - empaquetamiento y tiempo de enfriamiento-temperatura inicial del molde.

Palabras clave— Método de volúmenes finitos; moldeo por inyección; tiempos de enfriamiento; ciclo de vida del producto-PLM; diseño de experimentos; elementos finitos

abstract

Introduction— One of the main concerns in the mold injection industry is to ensure efficient material processing and procurement of products at reasonable costs that reflect solid economies of scales for large production series. Cooling time is an influential and decisive variable for the efficiency of these series, under a certain temperature condition, it increases along with the thickness of the piece. Therefore, for a certain thickness, a low mold temperature and a high piece extraction temperature have a considerable influence on the reduction of cooling time, which constitutes a large span of the process cycle time: between 80 % and 85%. In this work, the injection molding process is simulated to explore the temperature distribution and material filling process of a mold designed to make ‘ear tags’, which are used for the visual control of cattle.

Objective— The main goal is to identify the essential variables in the process (time process, injection and packaging pressures, clamping forces and injection velocity), as well as their influence on compression times and temperature distribution.

Methodology— For the above, an Experiment Design methodology (DOE) is established based on the 2^k factorial design, based on simulations based on the finite volume method (FVM).

Results— This DOE, adapted to the numerical results, reveals as a fundamental result of this work, the study variables that are inherent in the process, in addition to achieving its characterization.

Conclusions— The results allowed studying the temperature behavior distribution in the mold, identifying as initial variables to consider in the experimentation: the initial mold temperature and the interactions between the cooling times-packaging and cooling times-initial mold temperature.

Keywords— Finite volume method FVM; mold injection; cooling times; product life cycle management PLM; design of experiments; finite elements



I. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo hace parte de un proyecto de investigación focalizado en una metodología de diseño conceptual para moldes de inyección de plásticos, con fines de optimización en la vida útil del molde y el procesamiento, para el producto del proceso estudiado, el cual consiste en un prototipo de diseño de una chapeta o dispositivo usado para el control visual de semovientes como se muestra en la Fig. 1, se determinan las condiciones de procesamiento de moldeo por inyección para un material termoplástico polipropileno homopolímero - PP (PH1310), y se desarrolla un diseño factorial completo de experimentos (2^k) para variables esenciales en el proceso, como lo son (i) la temperatura inicial de molde o de los canales de refrigeración, (ii) tiempo de enfriamiento y (iii) tiempo de empaquetamiento (sostenimiento), en niveles inferiores (-) y superiores (+). Lo anterior permitirá encontrar valores iniciales con base a los resultados de las diferentes simulaciones para validaciones experimentales futuras en el molde de inyección, a fin de optimizar los tiempos de procesamiento y disminuir los efectos en el molde de inyección (mejora en la distribución de temperatura de molde) por efecto de la temperatura de procesamiento para reducir la fuerza de cierre al cual estará expuesto a lo largo de su ciclo de vida útil para grandes volúmenes de producción.

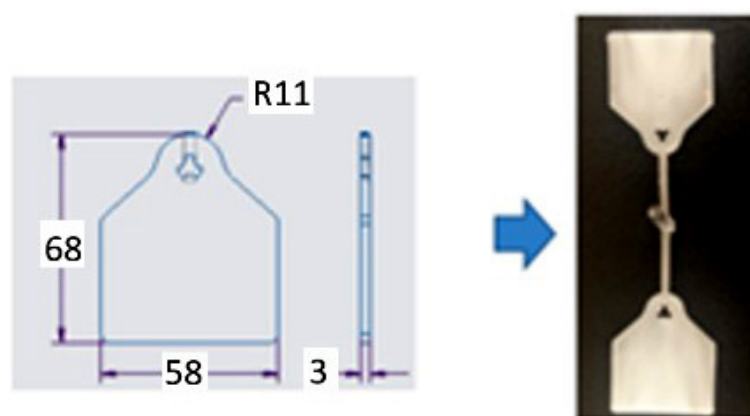


Fig. 1. a) Geometría de la pieza (medidas en mm).
b) Prototipo de piezas inyectadas con sistema de alimentación.
Fuente: Autor(es).

II. REVISIÓN LITERARIA

A. Método de los volúmenes finitos y software Sigmasoft®

El Método de los Volúmenes Finitos (FVM), permite discretizar y resolver numéricamente ecuaciones diferenciales. Es un método alternativo al de diferencias y elementos finitos [1], ampliamente utilizado en el estudio y comportamiento de fluidos como el plástico en estado fundido, condición fundamental para su procesamiento y conformación [2]-[8]. Comparado con el método de diferencias finitas, es mucho más flexible ya que puede implementarse en mallas estructuradas y no estructuradas, por tal motivo el método puede implementarse en problemas para la resolución de flujos con geometrías complejas [9].

Considerando una malla de discretización del espacio fluido, en cada punto o nodo de la malla, se construye un volumen de control que no se traslapa con los puntos vecinos, de esta forma el volumen total del fluido resulta ser igual a la suma de los volúmenes de control considerados [9]. Se emplea el software Sigmasoft® para el cálculo del comportamiento de las magnitudes físicas como la distribución de la temperatura, la simulación del proceso de inyección y la transferencia de calor por volúmenes finitos. El nodo se calcula en el centro del elemento y la forma de los elementos es cúbica como se muestra en la Fig. 2.

Son muchas las variables que intervienen en el proceso de inyección de una pieza plástica, es por esto que un software de simulación permite evaluar diferentes escenarios de diseño u optimización, así, dependiendo de la necesidad, existen varios objetivos cuando se aborda la simulación del proceso de inyección. Una optimización típica que se busca es la reducción de las presiones de inyección y fuerzas de cierre que se generan en el molde, ya que estos valores son fundamentales para la selección de una máquina inyectora.

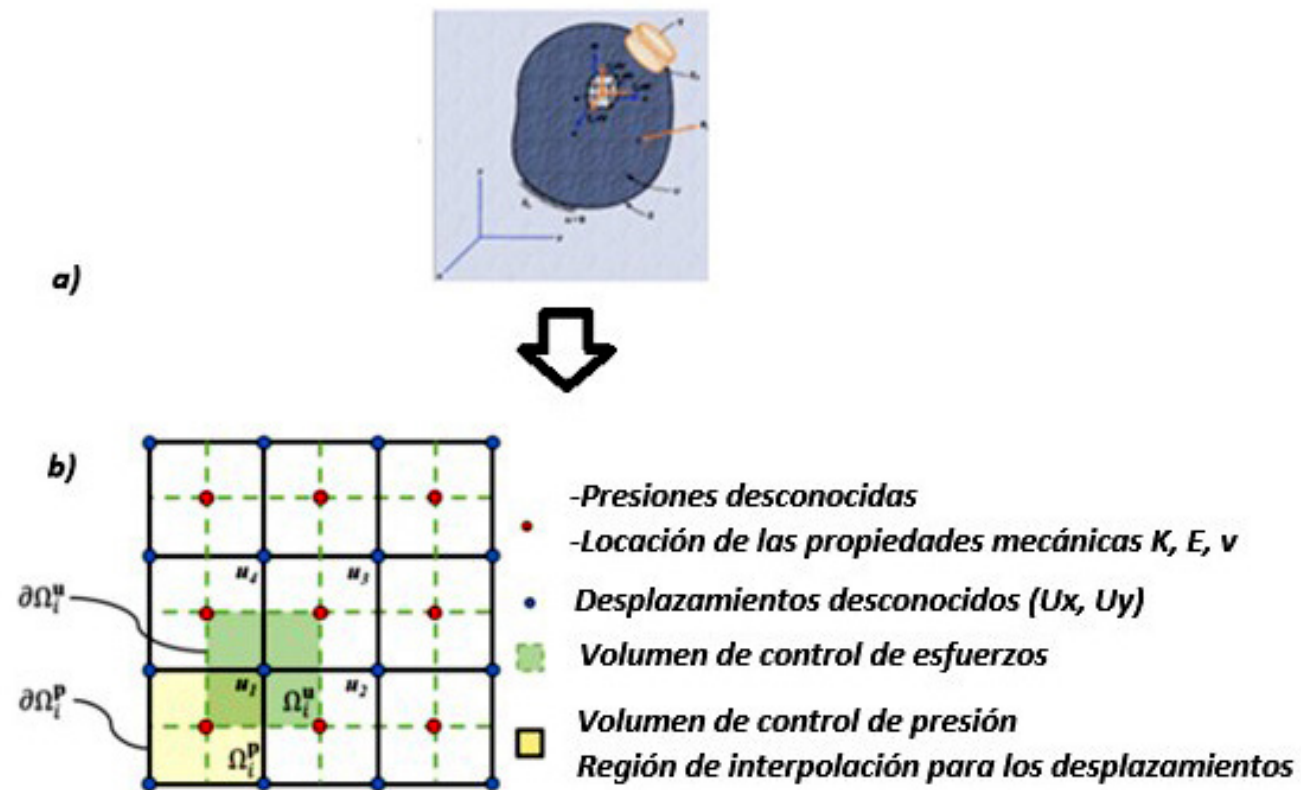


Fig. 2. a) Representación tridimensional del volumen finito con nodo en el centro, condiciones de frontera y grados de libertad en un dominio definido, b) Malla con los nodos en los centros de los volúmenes de control.

Fuente: a) [10], b) [11].

En este sentido, modificaciones en el sistema de alimentación de moldes pueden contribuir a la reducción de estas variables [12], otra alternativa es evaluar diferentes condiciones de proceso [13]. La predicción del patrón de llenado de moldes, con geometrías complejas y determinación de defectos en la pieza durante esta etapa, pueden determinarse de igual forma mediante simulación (líneas de unión, efecto jetting, entre otros) [14]-[16]. Otro parámetro de calidad fundamental de las piezas inyectadas son las contracciones y deformaciones finales de la pieza producida. Se sabe que las diferencias de contracciones en la pieza generan deformaciones en esta, a su vez, se conoce que la contracción del material inyectado depende, especialmente, de la velocidad de enfriamiento, determinado por las temperaturas de inyección y molde, tiempo enfriamiento y controlado mediante la pospresión o empaquetamiento (presión y tiempo), variables ampliamente evaluadas mediante simulación [13], [17]-[19]. De esta forma, diferentes aplicaciones de productos inyectados son optimizados para reducir sus deformaciones finales [20]-[23]. En consecuencia, para la solidificación y definición de calidad del producto inyectado, diversas variables afectan estas características; sin embargo, la temperatura de molde es la variable fundamental para tal propósito junto con el tiempo de enfriamiento. A pesar de esto, muchos análisis o estudios suponen una temperatura de molde constante, situación que no ocurre en la realidad. Un análisis detallado de la distribución de temperaturas de molde desde el punto de vista de las variables que la determinan y, que efecto, puede generar una distribución de temperaturas de molde uniforme o no en las deformaciones de la pieza inyectada, es llevado a cabo en el presente estudio mediante el análisis de un molde prototipo de inyección para chapetas termoplásticas en función de las variables temperatura de molde, tiempos de enfriamiento y empaquetamiento.

III. MATERIALES Y METODOLOGÍA

A. Materiales

El molde con el cual se realizarán las diferentes corridas y simulaciones consiste en una aleación de aluminio de alta resistencia conocido como Duraluminio, con 1.6% Cu, 2.4% Mg, 0.1% Mn, 0.13% Cr y 6% Zn. La dureza es de 150-180 HB. En la [Tabla 1](#) se presentan las

propiedades físicas y mecánicas representativas del material del molde que son tomadas por el software.

TABLA 1. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL DURALUMINIO.

Propiedades típicas – físicas y *mecánicas	Unidades	Valor
Densidad	g/cm ³	2.83
Dilatación térmica	/°C	23.7 × 10-6
Conductividad térmica	W/m °C	153
Calor específico	J/Kg°C	857
Módulo de elasticidad	Mpa	73.000
Módulo de compresión	Mpa	73.000
Coeficiente de “Poisson”	-	0.33
Intervalo de fusión	°C	475-630
*Resistencia a la tracción	Mpa	535
%Reducción de área	%	1.5

Fuente: Asteco [24].

Para el líquido que fluye por los canales de enfriamiento o atemperamiento se utiliza el agua natural. El material termoplástico a inyectar es un polipropileno homopolímero – PP (PH1310) del cual se presentan sus principales propiedades en la [Tabla 2](#).

TABLA 2. PROPIEDADES DEL POLIPROPILENO HOMOPOLÍMERO PH1310.

Propiedades Polipropileno PH1310			
Propiedades típicas	Ensayos ASTM	Unidades	Valor
Densidad		g/cm ³	0.905 +/-0.005
Índice de Fluidez 2.16 Kg/230°C	D-1238	g/10 min	13
Temperatura de ablandamiento VICAT (1 Kg)	D-1525	°C	154
Temperatura de deformación térmica –HDT (455 kPa)	D-648	°C	110
Resistencia al impacto IZOD a 23°C	D-256	J/m	25
Resistencia a la tracción (En el punto de fluencia)	D-638	Mpa	34
Elongación (En el punto de fluencia)	D-638	%	12
Módulo de elasticidad en flexión	D-790	Mpa	1550

Fuente: Petroquim [25].

Adicionalmente, otras propiedades como las térmicas (difusividad y conductividad), la reología (viscosidad vs tasa de cizalladura) y diagramas presión, temperatura, y volumen específico son consideradas, ya que los valores de sus propiedades son tomadas de la base de datos del software. Esto con el fin de considerar la velocidad de enfriamiento del polímero, la presión de inyección y fuerza de cierre generada por la viscosidad del polímero fundido, así como las contracciones y deformaciones finales de la pieza inyectada [26].

B. Condiciones de procesamiento

Para las condiciones de procesamiento se recomiendan algunos valores de las variables relacionadas al proceso [27], tales como: La temperatura del cilindro de inyección para un PP debe estar entre 200°C y 250°C; una temperatura de molde entre 20°C y 50°C; una pospresión de inyección entre 1000 psi y 1500 psi (100 Bar aprox.) [28], los tiempos de enfriamiento pueden ser estimados mediante (1) [27] y está en función del espesor de la pieza (3 mm), los cuales dependen del dispositivo de refrigeración del molde, del líquido de refrigeración y del material a inyectar (PP).

$$ts = \frac{-s^2}{2\pi\phi} \operatorname{Ln} \left[\frac{\pi T_x - T_m}{4(T_c - T_m)} \right] \quad (1)$$

En la [Tabla 3](#) se presentan los datos de procesamiento recomendados para un PP [27]; de acuerdo a ello, el cálculo teórico del tiempo mínimo de enfriamiento, valor referente para establecer los niveles superiores e inferiores que se analizarán en el DOE presentado en la sección D.

TABLA 3. DATOS DE PROCESAMIENTO Y CÁLCULO DEL TIEMPO DE ENFRIAMIENTO PARA UN PP.

Datos para el cálculo teórico del tiempo mínimo de enfriamiento		
Variable	Nombre	Valor para el PP
Ts	Tiempo mínimo de enfriamiento (S)	16.8
S	Espesor máximo de la pieza (cm)	0.3
ϕ	Difusividad térmica del material (cm ² /s)	0.85×10^{-3}
Tx	Temperatura a la que se extrae la pieza (HDT)(°C)	107
Tm	Temperatura del molde (°C)	40
Tc	Temperatura del material fundido	220–240

*Tiempo teórico calculado con base a los datos presentados en la tabla.

Fuente: Moldeo por inyección de termoplásticos [27].

Para los datos calculados en la [Tabla 3](#), el tiempo mínimo de enfriamiento ideal teórico es de 16,8 segundos, de acuerdo a lo anterior se fija la necesidad de explorar los resultados de la simulación con base a tiempos menores al calculado y su influencia en las temperaturas del molde y los desplazamientos de la pieza, se establecen 2 niveles comprendidos entre 12 y 17 segundos de tiempo de enfriamiento.

El tiempo de empaquetamiento, o también llamado de presión de sostenimiento (pospresión), viene determinado por el lapso de parada del tornillo de inyección, una vez ha terminado la inyección. Su objetivo es evitar la formación de rechupes o encogimientos. En este tiempo, el tornillo actúa como pistón y empuja material adicional en el molde para compensar su encogimiento y darle el peso final al producto inyectado. En general, se aplica una presión más baja que la de inyección, si la pieza es de espesor delgado o un polímero amorfo, debido que esto reduce la posibilidad de contracciones. En caso contrario, la presión se debe aplicar a un nivel mayor que la presión de inyección para geometrías de espesores gruesos (> 2.5 mm) y polímeros semicristalinos, condiciones que favorecen altos grados de cristalización, contracciones y deformaciones [26], [29]. El tiempo y el valor de la presión de sostenimiento dependen de varios factores como el diámetro y longitud de los bebederos, canales de alimentación, tipo de material y forma de la pieza, los valores aproximados obedecen a pruebas iniciales en moldeo de piezas similares con las capacidades de proceso que cuenta la inyectora en la que se han hecho experiencias prácticas de procesamiento. Para el caso de estudio se tiene establecido tiempos de sostenimiento entre 1.5 y 3 segundos.

C. Diseño de experimentos: Diseño factorial 2^k

Para el estudio del proceso se seleccionaron 3 variables fundamentales en el proceso de moldeo por inyección; estas corresponden al tiempo de enfriamiento, el cual consiste en el tiempo transcurrido entre una vez se ha llenado el molde y este permanece cerrado hasta lograr una solidificación completa del material; la temperatura inicial del molde, la cual es lograda por medio de la configuración de la temperatura del líquido en los canales de atemperamiento del molde, como se observa en la [Fig. 3](#); y finalmente, el tiempo de compactación o pospresión, el cual es un tiempo necesario para que se sostenga la presión determinada y se solidifique la totalidad de la geometría del producto, es decir, que toda la cavidad del molde este completamente llena.

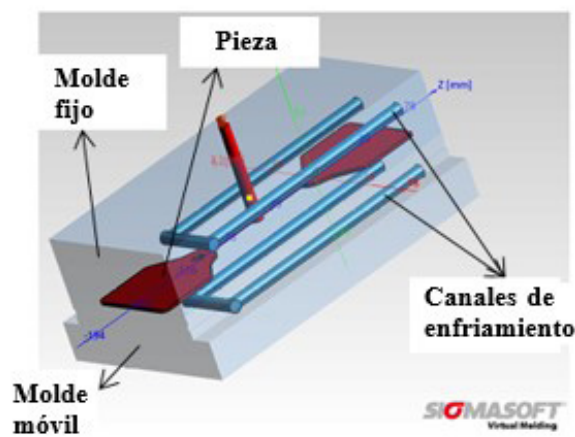


Fig. 3. Configuración de las partes del molde de inyección.
Fuente: Autor(es).

Tiempos de empaquetamiento muy cortos pueden generar encogimientos en la geometría de la pieza, producto de las contracciones del material, una vez llenado el molde, y, por el contrario, tiempos de empaquetamiento muy altos podrían generar rebabas en la pieza, producto de una mayor presión sostenida en el molde y mayores demoras en el tiempo de ciclo.

Es fundamental lograr los mejores parámetros en función de la calidad dimensional de la pieza y los menores tiempos de ciclo en el proceso de moldeo por inyección. Los resultados analizados y simulados serán comparados con las corridas y medidas experimentales en el proceso de moldeo por inyección para la obtención de los prototipos de las chapetas utilizadas en el control visual de semovientes.

Los valores de las variables en sus niveles se presentan en la [Tabla 4](#), estos valores fueron seleccionados de acuerdo a la experimentación previa en la práctica de moldeo por inyección para la chapeta mediante inyecciones preliminares de molde prototipo y simulaciones iniciales de la geometría de la pieza en el software de simulación.

Tabla 4. VALORES DE LOS NIVELES DE LAS VARIABLES ESTUDIADAS.

Variables estudiadas		
Variable	Nivel inferior (-)	Nivel superior (+)
Tiempo de enfriamiento(S)	12	17
Tiempo de empaquetamiento (S)	1.5	3
Temperatura inicial del molde (°C)	30	45

Fuente: Autor(es).

La [Tabla 5](#) presenta el diseño factorial completo 2^3 para un total de 8 corridas por tratamiento, en las cuales se determina como variable de estado o desempeño la distribución de temperaturas en el molde en la etapa final del llenado y los desplazamientos generados en la pieza.

Tabla 5. DISEÑO DE EXPERIMENTOS FACTORIAL COMPLETO.

Diseño Factorial Completo (2^3)			
Corrida/ Simulación	Tiempo de refrigeración (S)	Tiempo de empaquetamiento - compactación (S)	Temperatura inicial de Molde (°C)
1	12 (-)	1.5 (-)	30 (-)
2	17 (+)	1.5 (-)	30 (-)
3	12 (-)	3 (+)	30 (-)
4	17 (+)	3 (+)	30 (-)
5	12 (-)	1.5 (-)	45 (+)
6	17 (+)	1.5 (-)	45 (+)
7	12 (-)	3 (+)	45 (+)
8	17 (+)	3 (+)	45 (+)

Fuente: Autor(es).

Se establecerán 2 tratamientos en los cuales se presentarán 16 (8 corridas por 2 tratamientos) resultados para temperaturas y desplazamientos en el molde y prototipo de pieza, respectivamente.

Los diseños factoriales se usan ampliamente en experimentos que incluyen varios factores cuando es necesario estudiar el efecto conjunto de los mismos (tiempos y temperaturas) sobre una respuesta (temperatura de molde final o desplazamientos en la pieza. El diseño 2^k es de particular utilidad en las etapas iniciales del trabajo experimental, cuando probablemente se estén investigando factores. Este diseño proporciona el menor número de corridas con las que pueden estudiarse k factores en un diseño factorial completo [30]; por consiguiente, estos diseños se usan ampliamente en los experimentos de tamizado o selección de factores, como es el caso de estudio.

Es preciso anotar que se realizó un análisis de convergencia, donde se hicieron simulaciones previas con diferentes tamaños de volúmenes finitos y mallas para la discretización de la Fig. 3. Se procuró definir un refinamiento de malla mínimo de 6 elementos en el espesor, con el cual se ha evidenciado que los fenómenos de flujo en la inyección como velocidades, presiones, temperaturas, entre otras variables pueden ser calculados adecuadamente [31]-[34]. Luego del refinamiento de la malla y de realizar un análisis de convergencia se logró una malla compuesta por volúmenes finitos tipo hexaedro con dimensiones de $(0.5 \times 0.5 \times 0.35)$ mm para un total de 1.912.712 celdas cartesianas o volúmenes finitos. Como punto de partida del análisis se consideró un tamaño de volúmenes finitos de $(2 \times 2 \times 2)$ mm, las simulaciones fueron realizadas en el software Sigmasoft®.

IV. RESULTADOS

Se presenta en la Fig. 4 los resultados para el comportamiento de los desplazamientos en la pieza prototipo con base en la simulación de las diferentes corridas presentadas en el diseño de experimentos de la Tabla 5. La imagen corresponde a los resultados generados en desplazamientos de la pieza con los datos de las variables de la corrida número 3. Los resultados para los desplazamientos generados en las diferentes corridas y simulaciones se presentan en la Tabla 6.

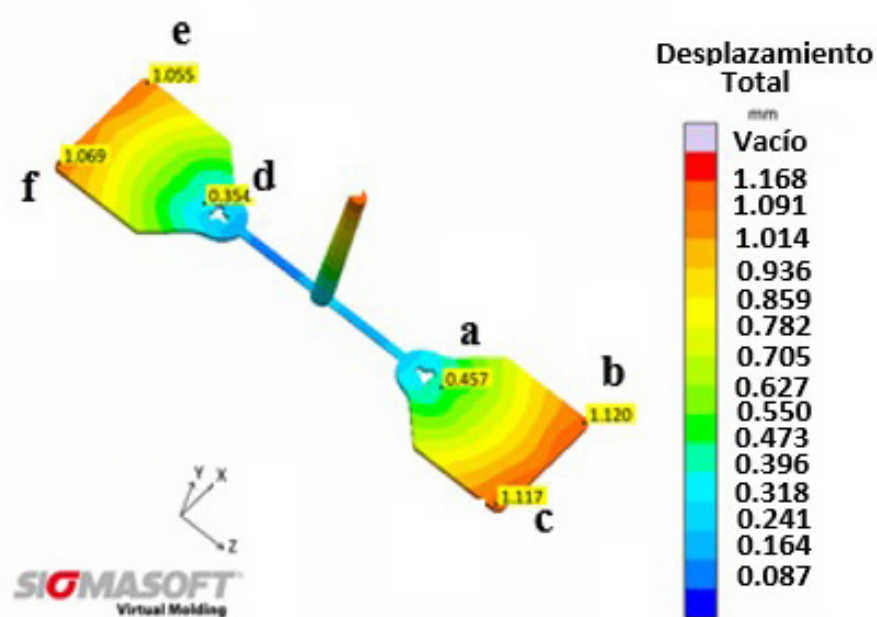


Fig. 4. Simulación de desplazamientos generados en la pieza-DOE Corrida 3.
Fuente: Autor(es).

Los desplazamientos sufridos en diferentes puntos de la pieza se sitúan en los extremos inferiores de la misma y en la parte inicial del bebedero o sistema de alimentación de la pieza, estos datos se presentan en la Tabla 6.

El esquema del modelo simulado del molde móvil, la pieza prototipo y el respectivo mallado se presenta en la Fig. 5.

TABLA 6. RESULTADOS DISEÑO DE EXPERIMENTOS FACTORIAL COMPLETO PARA EL DESPLAZAMIENTO EN DIFERENTES PUNTOS DE LA PIEZA.

Resultados diseño de experimentos (2 ³) – Simulaciones						
Corrida/Simulación	Desplazamiento en diferentes puntos de la pieza a/b/c/d/e (mm)					
	a	b	c	d	e	f
1	0.45	1.13	1.13	0.37	1.07	1.07
2	0.23	0.73	0.73	0.21	0.66	0.67
3	0.46	1.12	1.12	0.35	1.06	1.07
4	0.29	0.71	0.71	0.19	0.64	0.65
5	0.52	1.29	1.29	0.43	1.23	1.23
6	0.38	0.96	0.97	0.3	0.89	0.9
7	0.52	1.27	1.26	0.45	1.25	1.26
8	0.39	0.97	0.96	0.31	0.91	0.91

Fuente: Autor(es).

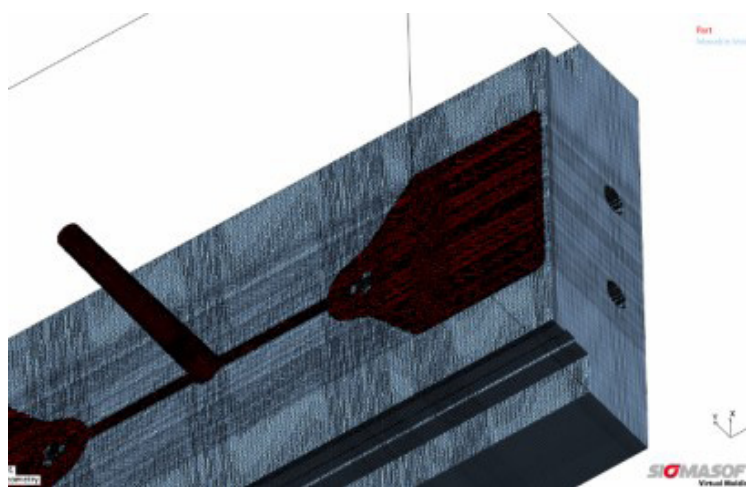


Fig. 5. Mallado de la pieza y el molde con volúmenes finitos cúbicos.
Fuente: Elaboración propia.

La malla utilizada presenta un volumen finito compuesto por un hexaedro con espesor mínimo de pared de 0.5 mm de lado en el eje x, 0.5 mm de lado en el eje y, y 0.35 mm de altura en el eje z, para un total de 1.912.712 celdas cartesianas. Las condiciones de frontera se dan de acuerdo a la temperatura del material fundido que corresponde a 220°C, y se encuentra en contacto con las cavidades del molde (Conducción) y la presión de inyección (generada en la pieza inyectada) de 1450.4 psi (100 Bar) a la cual está expuesta las cavidades del molde.

Respecto a la simulación de distribución de temperaturas en el molde, se presenta la Fig. 6, que también corresponde a los datos de las variables de la corrida número 3. Los resultados completos de la distribución de temperaturas de las diferentes corridas/simulaciones se presentan en la Tabla 7.

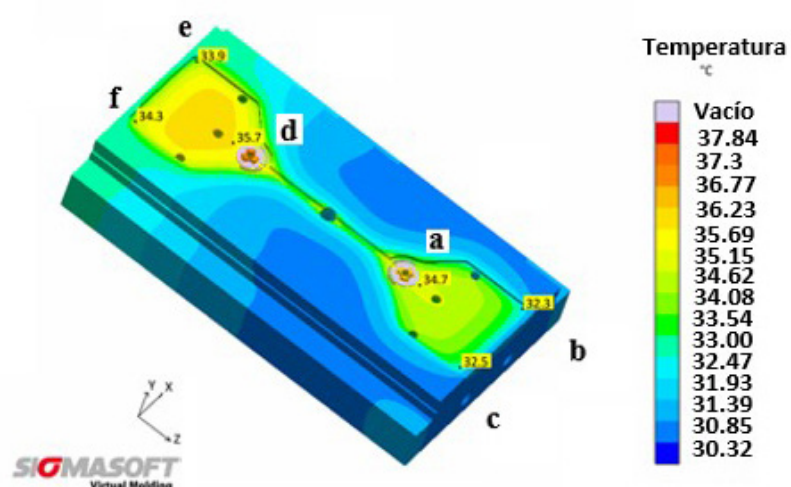


Fig. 6. Simulación de distribución de temperaturas en el molde- DOE Corrida 3.
Fuente: Autor(es).

Las temperaturas máximas se presentan justo en el inserto de la pieza (37.84°C) y en el centro de la pieza (aproximadamente entre 34.7° y 35.7°C, puntos a y d de la Fig. 6), los datos de las temperaturas en el punto máximo para cada corrida simulada se presentan en la Tabla 7.

De acuerdo a los resultados en desplazamientos de puntos en la pieza de las diferentes simulaciones y corridas establecidas en el DOE, se puede observar que los mayores desplazamientos para todas las corridas y simulaciones se generan en las esquinas inferiores de la pieza (puntos b, c, e y f de la Fig. 4) obteniéndose el mayor en la corrida número 5 (12 segundos de tiempo de enfriamiento, 1.5 segundos de tiempo de empaquetamiento y una temperatura inicial de molde de 45°C) con un valor de 1.29 mm; en contraposición los menores desplazamientos en estos puntos críticos se presentan en la corrida número 4 (17 segundos de tiempos de enfriamiento, 3 segundos de tiempo de empaquetamiento y una temperatura inicial de molde de 30°C) con un valor de 0.64 mm, lo anterior conlleva a mayores tiempos de ciclo y producción pero mejores resultados dimensionales en la calidad de la pieza. Lo anterior se puede relacionar con respecto a los esfuerzos residuales generados en el proceso de inyección, donde dependiendo de las condiciones de procesos evaluadas, los esfuerzos residuales pueden cambiar drásticamente y pueden tener una influencia en las deformaciones finales de la pieza [35], [36].

TABLA 7. RESULTADOS DISEÑO DE EXPERIMENTOS FACTORIAL COMPLETO PARA EL DESPLAZAMIENTO EN DIFERENTES PUNTOS DEL MOLDE.

Resultados diseño de experimentos (2 ³) – Simulaciones						
Corrida/Simulación	Temperatura del molde en punto a/b/c/d/e/f (°C)					
	a	b	c	d	e	f
1	34.7	32.4	33	35.7	34	34
2	34.6	32	32.3	35.6	32.8	33.3
3	34.7	32.3	32.5	35.7	33.9	34.3
4	34.6	32.4	32.7	35.6	33.9	34
5	49.1	47	47.5	49.9	47.8	48.4
6	49	46.9	47.3	49.8	47.6	48.1
7	49.1	46.9	46.9	49.8	47.7	48.2
8	49	46.8	47.1	49.8	47.2	48.2

Fuente: Autor(es).

De acuerdo a los resultados de las temperaturas en diferentes puntos del molde, las mayores temperaturas se concentran en la zona de la cavidad correspondiente al centro de la pieza y/o cavidad (cercanos a los puntos a y d de la Fig. 6) estas temperaturas logran un valor máximo de 49.9°C, con la corrida número 5; curiosamente, los desplazamientos sufridos en la pieza son mínimos en esta zona, como se puede observar en la Fig. 4 y los diferentes resultados de la Tabla 6. Esto se debe a la presencia de protuberancias en la geometría de la pieza que ayudan a darle rigidez al producto inyectado inhibiendo la deformación en esta zona, a diferencia de las esquinas de la pieza que tienen más facilidad para liberar las contracciones y esfuerzos residuales, causas principales de la deformación en piezas inyectadas [35], [36]. En general, los gradientes de temperatura en las cavidades que conforman la pieza inyectada oscilan entre los 2 °C y 3°C (contornos de color de verde a naranja) lo que se considera una distribución de temperatura de pared de molde uniforme, excepto la zona de las protuberancias de la cavidad que indica un valor singular de máxima temperatura. Esto se explica por el hecho que esta zona genera alta fricción y calentamiento del polímero que fluye a alta velocidad contra estos bordes agudos de la cavidad del molde (puntos a y d).

Estas premisas deben ser validadas y argumentadas por medio de futuras pruebas estadísticas como análisis de varianza (ANOVA), pruebas Kruskal Wallis, HSD Tukey, y/o análisis de sensibilidades. Para este caso se presenta en la Tabla 8 la tabla ANOVA organizada con el diseño 23 para las simulaciones presentadas en este trabajo.

TABLA 8. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL DOE INICIAL.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	1084.02	154.86	878.64	0.000
Lineal	3	1073.37	357.79	2030.02	0.000
Tiempo de enfriamiento (s)	1	0.00	0.00	0.00	1.000
Tiempo de empaquetamiento (s)	1	0.81	0.81	4.60	0.064
Temperatura inicial del molde (°C)	1	1072.56	1072.56	6085.46	0.000
Interacciones de 2 términos	3	10.22	3.41	19.34	0.001
Tiempo de enfriamiento (s)* Tiempo de empaquetamiento (s)	1	7.84	7.84	44.48	0.000
Tiempo de enfriamiento (s)* Temperatura inicial del molde (°C)	1	1.82	1.82	10.34	0.012
Tiempo de empaquetamiento (s)* Temperatura inicial del molde (°C)	1	0.56	0.56	3.19	0.112
Interacciones de 3 términos	1	0.42	0.42	2.40	0.160
Tiempo de enfriamiento(s)* Tiempo de empaquetamiento (s)* Temperatura inicial del molde (°C)	1	0.42	0.42	2.40	0.160
Error	8	1.41	0.18		
Total	15	1085.43			

Fuente: Minitab.

Con un nivel de confianza establecido del 95% , se encontró valor p (parámetro que valida el nivel de confiabilidad para rechazar la hipótesis nula la cual establece que todas las variables o factores son iguales, aceptando la hipótesis alterna que establece que alguna o varias variables son significativamente diferentes) que la temperatura inicial del molde, las interacciones tiempo de enfriamiento y tiempo de empaquetamiento, tiempo de enfriamiento y temperatura inicial del molde son factores significativos en la variable respuesta (temperatura final del molde), por lo cual es necesario dedicar especial atención a las mismas y los valores establecidos en ellas.

V. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente trabajo son el insumo principal para desarrollar las corridas experimentales y los tratamientos necesarios para realizar los analisis respectivos del diseño de experimentos presentado en su etapa inicial, además de ello las validaciones experimentales de las simulaciones y corridas presentadas en el DOE de la [Tabla 8](#) y los respectivos resultados consolidados en la [Tabla 6](#) y [Tabla 7](#).

Las distribuciones de temperatura de molde son en general uniformes, con gradientes máximos en la cavidad entre 2°C a 3°C. Las mayores deformaciones se presentan en las esquinas de la pieza inyectada, ya que permiten una mayor liberación de contracciones y esfuerzos residuales. Mayores tiempos de ciclo y producción pueden mejorar los resultados dimensionales en la calidad de la pieza.

La temperatura de molde es el factor mas influyente en la variable respuesta (Temp. Final del molde) de acuerdo al DOE analizado.

Los resultados permitirán concluir la influencia, dependencia de las variables y sus valores en la variable respuesta estudiada como los desplazamientos generados en la pieza y la distribución de temperaturas en el molde de inyección utilizado para la fabricación de chapetas termoplásticas.

FINANCIAMIENTO

Artículo de investigación científica derivado del proyecto de investigación de doctorado “Diseño de moldes de inyección de plásticos y/o metales mediante el método de optimización topológica” de la Universidad Nacional de Colombia y el proyecto de investigación “Diseño de una mezcla polimérica como material sustituto para la fabricación de chapetas para el manejo y control de semovientes”, financiado por el Instituto Tecnológico Metropolitano e ID TAG Company bajo el convenio con código P17-102”.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Colombia y el Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín por el aporte de su personal técnico y científico, así como la disposición de equipos de cómputo necesarios para las diferentes corridas y simulaciones.

REFERENCIAS

- [1] M. E. Cendón Vásquez, *Introducción al método de los volúmenes finitos*. SCQ, ES: USC, 2008.
- [2] J. Gong, L. Xuan, B. Ying, & H. Wang, "Thermoelastic analysis of functionally graded porous materials with temperature-dependent properties by a staggered finite volume method," *Compos. Struct.*, vol. 224, no. 947, pp. e111071, Sep. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111071>
- [3] N. S. Myers & L. Kramer, "Simulation and experimental verification of two cavity balance in injection molding," in *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials 2019*, NJ: MPIF, pp. 212–224, 2020.
- [4] G. R. Berger, D. Zorn, W. Friesenbichler, F. Bevc, & C. J. Bodor, "Efficient cooling of hot spots in injection molding. A biomimetic cooling channel versus a heat-conductive mold material and a heat conductive plastics," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 59, no. s2, pp. E180–E188, 2019. <https://doi.org/10.1002/pen.25024>
- [5] R. Schiffers, M. Janßen, J. P. Siepmann, J. Wortberg, & F. A. Heinzler, "Using 3D injection molding simulation to explain emerging two- and three-dimensional surface structures of ABS and PC/ABS parts within the process of electroplating on plastics," *AIP Conf Proc*, vol. 2065, pp. 30002-1–30002-5, 2019. <https://doi.org/10.1063/1.5088260>
- [6] S. Kumar & A. K. Singh, "Volumetric shrinkage estimation of benchmark parts developed by rapid tooling mold insert," *Sadhana - Acad. Proc. Eng. Sci.*, vol. 45, no. 1, pp. 1–9, May. 2020. <https://doi.org/10.1007/s12046-020-01373-7>
- [7] Moldex 3D, "¿Qué es Moldex 3D? - Moldex3D," *Moldex3d.es*, [online]. Available: <http://www.moldex3d.es/moldex3d-software-simulacion-inyeccion-materiales-plasticos/que-es-moldex-3d/> [Accessed: 10-Aug-2020].
- [8] J. Pedro, B. Ramôa, J. M. Nóbrega, & C. Fernandes, "Verification and validation of openInjMoldSim, an open-source solver to model the filling stage of thermoplastic injection molding," *Fluids*, vol. 5, no. 2, pp. 1–24, May. 2020. <https://doi.org/10.3390/fluids5020084>
- [9] Y. Niño, *Metodo de volúmenes finitos*. (Sem. Primavera 2002). *Modelacion numerica en ingenieria hidraulicay ambiental*. CL: Uchile. Available: https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2008/2/CI71D/1/material_docente/bajar?id=200975
- [10] J. Osses, "El método de volúmenes finitos," *Tecnología de Simulación, Fluidodinámica*, 2016.
- [11] I. Sokolova, M. G. Bastisya, & H. Hajibeygi, "Multiscale finite volume method for finite-volume-based simulation of poroelasticity," *J. Comput. Phys.*, vol. 379, pp. 309–324, Feb. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.11.039>
- [12] M. Moayyedian, K. Abhary, & R. Marian, "Elliptical cross sectional shape of runner system in injection mold design," *Int. J. Plast. Technol.*, vol. 20, no. 2, pp. 249–264, Jul. 2016. <https://doi.org/10.1007/s12588-016-9153-4>
- [13] S. Kitayama and S. Natsume, "Multi-objective optimization of volume shrinkage and clamping force for plastic injection molding via sequential approximate optimization," *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 48, pp. 35–44, Nov. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2014.07.004>
- [14] S. Hashimoto, S. Kitayama, M. Takano, Y. Kubo, & S. Aiba, "Simultaneous optimization of variable injection velocity profile and process parameters in plastic injection molding for minimizing weldline and cycle time," *J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf.*, vol. 14, no. 3, pp. JAMDSM0029, 2020. <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2020jamdsm0029>
- [15] S. Hua, "Experimental and numerical investigation of jetting phenomenon in injection molding," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 42, no. 4, pp. 1–13, Mar. 2020. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02278-6>
- [16] T. Wöhner, A. Islam, H. N. Hansen, G. Tosello, & B. R. Whiteside, "Blister formation in film insert moulding," *Micromachines*, vol. 11, no. 4, pp. 1–11, Apr. 2020. <https://doi.org/10.3390/mi11040424>
- [17] W. Z. Nie & T. P. Shi, "Prediction of plastic injection shrinkage ratio using grey theory," *Adv. Mater. Res.*, vol. 1028, pp. 96–104, Sep. 2014. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1028.96>
- [18] Q. Li, L. Li, X. Si, & W. Rongji, "Modeling the effect of injection molding process parameters on warpage using neural network theory," *J. Macromol. Sci. Part B Phys.*, vol. 54, no. 9, pp. 1066–1080, Sep. 2015. <https://doi.org/10.1080/00222348.2015.1068680>
- [19] J. H. Han & Y. C. Kim, "Study on Effects of Mold Temperature on the Injection Molded Article," *Arch. Metall. Mater.*, vol. 62, no. 2, pp. 1271–1274, 2017. <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0191>
- [20] G. Zheng, W. Guo, Q. Wang, & X. Guo, "Influence of processing parameters on warpage according to the Taguchi experiment," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 29, no. 10, pp. 4153–4158, Oct. 2015. <https://doi.org/10.1007/s12206-015-0909-0>
- [21] R. Surace, V. Bellantone, G. Trotta, & I. Fassi, "Replicating capability investigation of micro features in injection moulding process," *J. Manuf. Process.*, vol. 28, part. 1, pp. 351–361, Aug. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.07.004>
- [22] Y. Chen & J. Zhu, "Warpage analysis and optimization of thin-walled injection molding parts based on numerical simulation and orthogonal experiment," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 688, no. 3, pp. 1–3, 2019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/688/3/033027>
- [23] C. M. Lin & W. C. Chen, "Optimization of injection-molding processing conditions for plastic double-convex Fresnel lens using grey-based Taguchi method," *Microsyst. Technol.*, vol. 26, no. 8, pp. 2575–2588, Mar. 2020. <https://doi.org/10.1007/s00542-020-04798-6>
- [24] Asteco, "Productos - Duraluminio 7075," *Asteco.com*. Available: <https://www.asteco.com.co/images/imagenes/productos/aceros/acerosparamoldes/fichastecnicas/7075.pdf>

- [25] Petroquim, “PP Homopolímero PH1310_ Plassol,” *Petroquim.cl*, Dic. 2012. Available: <http://www.petroquim.cl/wp-content/uploads/2012/12/FT-PH1310-Dic-2012.pdf>
- [26] W. Pötsch, G. Michaeli, *Injection Molding 2E. An Introduction*. Ltpy. Twp, Oh., USA: Hanser Gardner Publications, 2007 .
- [27] S. Sánchez, I. G. Yáñez, & O. S. Rodríguez, *Moldeo por inyección de termoplásticos*. CDMX, MX: LIMUSA, 2005.
- [28] J. M. Almarrán, “Diseño y fabricación de un molde para inyección en Plástico,” *Trabajo de grado*, Dpto. Ing. Dis. Mec., ICAI, Md., Es., May. 2014.
- [29] F. L. Osswald Tim, Menges Georg, Flórez Jairo, *Ciencia de los polímeros para ingenieros*. Cuc., Co.: Editorial Guadales Limitada, 2010.
- [30] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments. 5th ed.*, NY., USA: Hardcover, 2001.
- [31] C. Vargas, J. Sierra, J. Posada, & J. Botero, “Analysis and modeling of simulated residual stress of mold injected plastic parts by using robust correlations,” *Rev. Mater.*, vol. 22, no. 4, pp. 1–13, Oct. 2017. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620170004.0228>
- [32] A. Östergren, “Prediction of residual stresses in injection moulded parts,” *Master’s Thesis in the Applied Mechanics*, Dpt. Appl. Mech., CUT, Gbg., Se., 2013. Available: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/179639/179639.pdf>
- [33] J. A. P. de Oliveira, “Análise numérica de tensões induzidas pelo escoamento não isotérmico de um polímero no preenchoimento de cavidades de paredes finas,” *Grau de Doutor*, dpto. eng. qui, UFRGS, RS, BR, 2012. Available: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/75762>
- [34] A. Nita & E. Oanta, “Improving the quality of the molded polymeric parts by reducing the residual stress,” *2nd International Conference on Manufacturing Engineering, Quality and Production Systems, MEQAOS10*, Cnd., Ro., pp. 77–82, Sep. 3-5, 2010. Available: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2010/Constantza/MEQAPS/MEQAPS-14.pdf>
- [35] C. Vargas, J. Sierra, J. Posada, and J. Botero, “Analysis and modeling of simulated residual stress of mold injected plastic parts by using robust correlations,” *Rev. Mater.*, vol. 22, no. 4, pp. 1–13, Oct. 02, 2017. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620170004.0228>
- [36] A. Guevara-Morales and U. Figueroa-López, “Residual stresses in injection molded products,” *J. Mater. Sci.*, vol. 49, no. 13, pp. 4399–4415, Mar. 2014. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8170-y>

Adrian Benitez Lozano. Candidato a Doctor en Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia-UNAL. Magister en Ingeniería en modalidad de Investigación, Especialista en Rediseño de Productos e Ingeniero de Producción de la Escuela de Administración Finanzas y Tecnologías-EAFIT (Colombia). Su línea de énfasis aborda temáticas de manufactura integrada por computador, conocimientos de mecanizado, CNC y CA /CAM/CAE y la gestión de ciclo de vida del producto PLM. Actualmente trabaja en el grupo de investigación Calidad Metrología y Producción del Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín-ITM (Colombia), y Diseño y Optimización Aplicada (DOA) de la Universidad Nacional de Colombia adscritos a MINCIENCIAS. <https://orcid.org/0000-0002-0872-1158>

Carlos Andrés Vargas Isaza. Ingeniero Mecánico de la Universidad Pontificia Bolivariana (Colombia), especialista en procesos de transformación de plástico y caucho de la Universidad EAFIT (Colombia), con 13 años de experiencia profesional en el sector del plástico y caucho, desarrollando proyectos de diseño de moldes de inyección, diseño y desarrollo de productos plásticos, docencia en materiales poliméricos y su procesamiento. Experiencia en desarrollos de proyectos de productividad y competitividad, gestión de calidad y energía. Competencias para la ejecución y gestión de proyectos mencionados empleando herramientas de software CAE, gestión de proyectos, lenguajes de programación y simulación de procesos. <https://orcid.org/0000-0002-8816-4928>

Wilfredo Montealegre Rubio. Ingeniero Mecánico de la Universidad de Ibagué (Colombia), con maestría y doctorado en Ingeniería Mecánica de la Universidade de São Paulo (Brasil). Actualmente se desempeña como profesor asociado de la Universidad Nacional de Colombia (Medellín). Ha sido autor de mas de 35 productos académicos y revisor de diferentes revistas científicas internacionales como *Sensors (Basel)*, *DYNA*, *Mechanics Research Communications*, *Engineering Computations*, *Latin American Journal of Solids and Structure*, *Ultrasonics*, *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures* y *Mechanism and Machine Theory*. Tiene experiencia en Ingeniería Mecánica con énfasis en el diseño de máquinas, actuando principalmente en los siguientes temas: Topology optimization, Finite elements, MEMS, Piezoelectric Materials, Ultrasonics applications, y Functionally Graded Materials. <https://orcid.org/0000-0003-2579-7733>