



Artículo Original

# Agentes espumantes químicos en el moldeo de bases de escobas: por la sustentabilidad en la industria del plástico

## Chemical foaming agents in the molding of broom bases: to a sustainability in plastic industry

Carlos Manuel Sánchez Menéndez<sup>1</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-6931-9437>, Lourdes Mariana Crespo Zafra<sup>2</sup> 

<https://orcid.org/0000-0002-4799-3447>, Luisa Matos Mosqueda<sup>2</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-2387-163X>

### Resumen:

**Contexto:** La producción de escobas es una de las líneas productivas fundamentales de la Empresa CEPIL. El consumo de polímeros plásticos utilizados en este producto es relativamente elevado y la disponibilidad de plásticos primarios importados o de material reciclado es limitada en el país lo cual provoca afectaciones productivas.

**Objetivo:** Evaluar la pertinencia de la utilización de agentes espumantes químicos (AEQ) para disminuir el consumo de material plástico en las bases de escobas en el sentido de una mayor eficiencia económica y estabilidad productiva, desde un paradigma de sostenibilidad.

**Métodos:** Se realizó un diseño de experimentos para evaluar la efectividad en el uso de estos aditivos. Se probaron dos AEQ a diferentes proporciones en las mezclas con tres tipos de polipropilenos.

**Resultados:** Con 21 corridas los resultados fueron favorables con un porcentaje de disminución del consumo de polímero respecto a las bases sin espumar en el rango del 21 % al 49 % según condiciones de cada experimento, sin existir afectaciones en la calidad del producto y en la estabilidad tecnológica del proceso. Los mejores resultados se obtuvieron para el AEQ endotérmico Hydrocerol 1004 y el PP copolímero Impacto PPC 5660.

**Conclusiones:** La disminución del consumo de materiales plásticos no biodegradables derivados de combustibles fósiles representa una acción de sustentabilidad medioambiental y mayor eficiencia económica al reducir costos.

**Palabras clave:** agentes espumantes químicos, bases plásticas para escobas, espumado en moldeo por inyección de plásticos.

### Abstract:

**Background:** The production of brooms is one of the fundamental production lines of the CEPIL Company. The consumption of plastic polymers used in this product is relatively high and the availability of imported primary plastics or recycled material is limited in the country, which causes productive effects.

**Objective:** Evaluate the relevance of the use of chemical foaming agents (CFA) to reduce the consumption of plastic material in broom bases in the sense of greater economic efficiency and productive stability, from a sustainability paradigm.

**Methods:** An experimental design was carried out to evaluate the effectiveness of the use of these additives. Two AEQs were tested at different proportions in the mixtures with three types of polypropylenes.

**Results:** In the 21 runs carried out, the results were favorable with a percent decrease in polymer consumption with respect to the unfoamed bases in the range of 21% to 49% depending on the conditions of each experiment without affecting the quality of the product and in the technological stability of the process. The best results were obtained for the endothermic AEQ Hydrocerol 1004 and the PP copolymer Impact PPC 5660.

**Conclusions:** The reduction in the consumption of non-biodegradable plastic materials derived from fossil fuels represents an action of environmental sustainability and greater economic efficiency by reducing costs.

**Keywords:** chemical foaming agents, plastic bases for brooms, foaming in plastic injection molding.

### Historial del artículo

Recibido: 7 mayo 2023

Aceptado: 20 junio 2023

<sup>1</sup>Empresa CEPIL, Ciego de Ávila, Cuba;

<sup>2</sup>Universidad de Camagüey "Ignacio Agramonte Loynaz", Camagüey, Cuba.

Email:

[luisa.matos@reduc.edu.cu](mailto:luisa.matos@reduc.edu.cu)

Artículo de acceso abierto bajo licencia Creative Commons Atribución NoComercial CompartirIgual (CC-BY-NC-SA) 4.0.



### Citación recomendada para este artículo:

Sánchez Menéndez, C. M., Crespo Zafra, L. M. y Matos Mosqueda, L. (2023). Agentes espumantes químicos en el moldeo de bases de escobas: por la sustentabilidad en la industria del plástico. *Monteverdia*, 16 (1), 52-60. Recuperado de: <https://revistas.reduc.edu.cu/index.php/monteverdia/4591>

### Introducción

La Empresa CEPIL es uno de los principales transformadores de plásticos en el país. La tecnología de moldeo por inyección abarca actualmente la

totalidad de los artículos fabricados en la industria. El ahorro de polímeros plásticos constituye una de las direcciones esenciales del desarrollo estratégico de la organización, por su dimensión económica y medioambiental. Ese objetivo está alineado con las

disposiciones emitidas por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente en los aspectos relacionados sobre la contaminación por plásticos (Organización de Naciones Unidas [ONU], 2023) y el Macroprograma Nacional sobre Recursos Naturales y Medio Ambiente (Ministerio de Economía y Planificación [MEP], 2021), rectorado por el Ministerio de Ciencia, Innovación Tecnológica y Medio Ambiente, CITMA.

La producción de cepillos y escobas constituyen las líneas productivas fundamentales de la Empresa. La capacidad de producción es de tres millones de unidades anuales de escobas. Este nivel de producción demanda un consumo estimado de polímeros plásticos de 345 t para el moldeo de las bases plásticas, lo cual representa una erogación en divisas para el país de 862 500.00 dólares, tomando como referencia un precio promedio estimado de 2 500 USD por tonelada según comportamiento actual para los tipos de plásticos utilizados.

El elevado consumo de plásticos primarios no biodegradables del tipo poliolefinas (Polietileno y Polipropileno) para la producción de escobas y cepillos, las fluctuaciones en los precios y en la disponibilidad de resinas plásticas en el mercado internacional, unido a las limitaciones existentes en el país para acceder a financiamientos en divisas para importarlas, provocan interrupciones productivas por falta de materias primas con la consiguiente afectación a trabajadores y al desempeño de la organización.

Para enfrentar esta situación la Empresa ha buscado diversas alternativas. La más extendida ha sido potenciar el uso de materiales plásticos reciclados. Por esta vía se han incorporado desde enero a octubre de 2023 más de 90 t de material plástico recuperado, el 42,1 % del total de plástico transformado en la industria.

La presente investigación tiene la intención de ofrecer otra alternativa a la reducción del consumo de materiales plásticos con el uso de agentes espumantes químicos (AEQ) incorporados como aditivos en la matriz polimérica en el proceso de moldeo por inyección de las bases plásticas de escobas.

El moldeo de estas producciones justifica el uso de los agentes espumantes por ser piezas de grandes espesores de pared que demandan elevados consumos de material plástico y altos tiempos de enfriamiento para disipar el

calor. El espumado permite obtener una base plástica menos compacta, que facilita el proceso posterior de encerdado.

El antecedente conocido de investigaciones sobre el uso de AEQ en el moldeo por inyección en Cuba data de finales de la década de los años 80 del siglo XX en los trabajos realizados por Aida Vila y Ángel Seijo, investigadores del entonces Centro de Investigación de la Unión del Plástico (A. Seijo, comunicación personal, 30 de marzo de 2023).

El análisis epistemológico realizado sobre el moldeo por inyección de polímeros termoplásticos con agentes espumantes químicos demuestra que es un proceso multifactorial en el cual los factores más influyentes son: las características físico – químicas de los polímeros plásticos, los tipos y mecanismos de acción de los agentes espumantes y la tecnología de moldeo por inyección utilizada.

Los agentes espumantes son aditivos de proceso conformados por una amplia gama de sustancias químicas inorgánicas y orgánicas que se adicionan en una determinada proporción y en condiciones tecnológicas reguladas al polímero en el proceso de transformación para obtener estructuras porosas o celulares con fines específicos, mediante la generación de gas en el interior de la matriz polimérica (Wypych, 2017). Rohleder y Jakob (2015), Wypych (2017) y Oliveira (2015) abordan en sus investigaciones aspectos relacionados con la morfología de las espumas y el mecanismo de acción de los agentes espumantes. Estos aditivos se dividen en dos grupos según la forma o proceso a través del cual se genera el gas: físicos y químicos.

En los agentes espumantes físicos el gas se genera por un proceso físico como puede ser la evaporación o son gases, generalmente inertes en estado supercrítico, que se inyectan directamente en el polímero fundido. Los agentes espumantes químicos crean una estructura celular porosa en la pieza moldeada debido a la dispersión dentro de la matriz polimérica de un gas aportado por una reacción química, generalmente una reacción de descomposición térmica del agente espumante (Beltrán, 2017). El rendimiento del gas, entendido como la cantidad de gas generado por una determinada cantidad de agentes espumante químico ( $\text{cm}^3$  de gas por g de AEQ), varía considerablemente de un tipo a otro, lo cual determina la dosis a utilizar en la mezcla para obtener el efecto deseado (Bergen

International, 2020).

Los agentes espumantes químicos pueden ser clasificados en exotérmicos o endotérmicos de acuerdo a la energía involucrada en el proceso de descomposición del agente espumante (Beltrán, 2017).

El uso de AEQ ha constituido un reto tecnológico para los transformadores con relación al control de las condiciones de proceso y al mantenimiento de los requisitos de calidad del producto (López, 2015). El uso de estos aditivos provoca procedimientos de moldeos más rigurosos al ser necesario controlar la descomposición del gas durante la plastificación y enfriamiento de la masa fundida para mantener la estabilidad del proceso (Clariant, 2023). La mayoría de los agentes espumantes químicos no provocan afectaciones sobre el medioambiente, de tal manera que su manejo y procesamiento son seguros (Wypych, 2017).

El objetivo general de la investigación es disminuir el consumo de material plástico en las bases de escobas con la utilización de agentes espumantes químicos, lo cual permita una mayor eficiencia económica y estabilidad productiva al disminuir los costos de producción y los niveles de importación de polímeros plásticos no biodegradables.

Colateralmente se evalúan diferentes tipos de agentes espumantes y sus proporciones en las mezclas con distintos tipos de polímeros para seleccionar las combinaciones que ofrezcan mejores resultados técnico - económicos, y se establecen las disposiciones técnicas a considerar en el moldeo de bases de escobas y cepillos con agentes espumantes químicos.

### **Materiales y métodos**

La parte experimental de la investigación se desarrolló en la Unidad Empresarial de Base (UEB) de Envases Plásticos de la Empresa CEPIL. Esta UEB consta con un taller de moldeo por inyección de plástico con siete inyectoras hidráulicas del fabricante chino HAIXING puestas en funcionamiento en el año 2020. De ellas, se seleccionó una máquina de inyección Modelo HXF – 260 de 2600 kN de fuerza de cierre.

El molde utilizado posee dos cavidades, está hecho en acero, con bebedero de colada fría y expulsión mecánica. Porta un diseño de escoba denominado internamente en la Empresa como Base de escoba económica, Referencia C 529-1. Las dimensiones

generales de la base de escoba en la cavidad del molde, sin tener en cuenta las contracciones que experimenta el producto al enfriarse, son de 235 mm de largo, 42 mm de ancho y un espesor de 14 mm.

Se utilizó un equipo de refrigeración de agua para el enfriamiento del molde y el sistema hidráulico de la máquina de inyección del fabricante chino Plastic Machinery Co., modelo XC-03 ACI, con una capacidad de refrigeración de 1 623 kJ/h. La temperatura del agua se estableció a  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Las mezclas polímero/agente espumante se realizaron en un mezclador de tipo tambor que gira a 30 vueltas por minuto con capacidad máxima de carga de 100 kg. Las bases de escobas desmoldeadas se sumergen en un tanque con agua con capacidad de  $0,25\text{ m}^3$  a temperatura ambiente con recirculación continua. El tanque posee una tapa basculante que obliga a las bases de escobas a permanecer sumergidas para concluir su enfriamiento y evitar deformación por contracción volumétrica mientras se enfrían. El tiempo de permanencia se estableció superior a 15 min.

La tarea investigativa presupone la ejecución de un diseño experimental para evaluar la interacción de diferentes agentes espumantes químicos y matrices poliméricas en el proceso de moldeo por inyección de bases de escobas.

Para ello se escogieron tres tipos diferentes de polipropilenos (PP) teniendo en cuenta que en la revisión bibliográfica realizada este tipo de polímero tiene un mejor desempeño en el espumado por tener una temperatura de cristalización más alta que los polietilenos de baja y alta densidad, lo cual facilita el enfriamiento de las bases y disminuye el efecto que provoca el indeseable fenómeno de post-expansión que sufre la moldeada al ser expulsada de la cavidad (Oliveira, 2015). Para evaluar el efecto estructural de la cadena polimérica en el espumado se seleccionaron tres tipos diferentes de polipropilenos: homopolímero, copolímero random y copolímero impacto.

Los tres tipos de polipropilenos utilizados fueron:

a) Polipropileno homopolímero. Tipo: L5E89, Marca: Kunlun, Fabricante: China National Petroleum and Chemical Corporation (CNPC), País: China. Posee un índice de fluidez promedio de  $3,5\text{ g}/10\text{ min}$  (ISO 1133-1). La temperatura de deflexión al calor es de  $104\text{ }^{\circ}\text{C}$  y la temperatura de fusión alrededor de  $164\text{ }^{\circ}\text{C} - 170\text{ }^{\circ}\text{C}$ . El módulo de flexión es de  $1\text{ 650 MPa}$  (ISO 178)

lo cual ofrece alta rigidez. Es un polipropileno con alto grado de cristalinidad e isotacticidad (Plaswin Chemical, 2023).

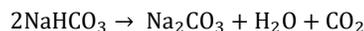
b) Polipropileno copolímero random. Tipo: RB801CF-11, Marca: Bomed, Fabricante: Borealis AG, País: Austria. Copolímero del propeno con el eteno de forma aleatoria. Cuenta con una distribución media del peso molecular y un índice de fluidez de 1,9 g/10 min (ISO 1133-1). La temperatura de ablandamiento Vicat es de 125 °C (ISO 306) y la temperatura de fusión de 140 °C (ISO 11357-3). Posee alto brillo, transparencia, bajo módulo de flexión de 750 Mpa (Norma ISO 178) que lo hace un material más flexible y con buena resistencia al impacto (Borealis Group, 2023).

c) Polipropileno copolímero impacto. Tipo: PPC 5660, Fabricante: Total Petrochemicals, Bélgica. Copolímero heterofásico con un índice de fluidez de 7 g/10 min (ISO 1133). Recomendado para el moldeo de artículos para uso doméstico e industrial que requieren rigidez y alta resistencia al impacto. Módulo de flexión de 1200 Mpa (ISO 178), temperatura de ablandamiento Vicat (ISO 306) de 145 °C (Total Energies, 2023).

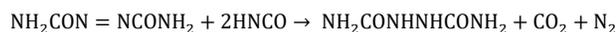
Según la hoja de seguridad de los fabricantes, los tres tipos de polipropilenos no son peligrosos para el ser humano ni para el ambiente, son reciclables y difícilmente biodegradables. Las temperaturas de procesamiento están en el rango de 180 °C – 240 °C.

En la investigación se utilizaron dos tipos de agentes espumantes químicos recomendados para poliolefinas, uno exotérmico (Azodicarbonamida) y el otro endotérmico (Hydrocerol 1004), los cuales poseen las siguientes características:

a) Hydrocerol. Tipo: 1004. Fabricante: Clariant. País: Alemania. Es un agente espumante químico endotérmico que contiene agente nucleante para mejorar la estructura celular. Rendimiento de gas de 90 cm<sup>3</sup>/g – 100 cm<sup>3</sup>/g. Se presenta en forma de gránulos blancos, en el cual el elemento activo y el resto de los aditivos están aglomerados en una resina plástica. El elemento activo es el hidrogeno-carbonato de sodio. El gas principal de la descomposición térmica es el CO<sub>2</sub>. Especialmente recomendado para ser usado en poliolefinas. Se activa a 140 °C y para lograr un óptimo rendimiento del gas la temperatura de procesamiento debe estar entre 170 °C a 210 °C (Clariant Masterbatches, 2015). La reacción de descomposición típica del hydrocerol es:



b) Azodicarbonamida. Marca: PREMIX AZ. Fabricante: RDC Rubber Dispersión Chemical. País: Italia. AEQ exotérmico suministrado en polvo de color amarillo-naranja con diámetro promedio de partícula de 0,003 mm (3 micras). Temperatura de descomposición entre 200 °C – 215 °C. Dependiendo de las condiciones de la reacción de descomposición los productos de la degradación pueden variar. La temperatura de descomposición comienza a 200 °C, por lo que los mayores rendimientos se deben lograr a temperaturas ligeramente superiores. El rendimiento del gas es de 230 cm<sup>3</sup>/g de agente espumante (Rifracor Group, 2023). Las reacciones de descomposición típicas de la azodicarbonamida son:



Los agentes espumantes químicos utilizables son amigables con el medio ambiente y la salud humana, los productos de la descomposición no son nocivos. Los gases quedan confinados dentro de la cámara de plastificación y dejan de actuar dentro del molde al enfriarse el producto moldeado.

El diseño de experimento se estableció independiente para cada tipo de agente espumante, debido a que no se definieron los mismos niveles de proporción en la mezcla para ambos por tener diferentes rendimientos de gas. En total, se realizaron 24 pruebas de moldeo: 21 experimentos según la combinación de factores y niveles definidos más tres corridas asociadas a los tipos de PP sin espumantes utilizadas como referencias comparativas. Para cada uno de ellos se seleccionaron 50 muestras aleatorias de las bases moldeadas para el procesamiento estadístico de las variables de respuesta.

En la Tabla 1 se muestran los factores y niveles adoptados en el diseño de experimento para cada agente espumante.

Las variables de respuesta medidas para comprobar la efectividad del espumado en las bases de escoba moldeadas fueron: el peso de las bases, para determinar la reducción lograda en el consumo de polímero con relación a las bases moldeadas sin agentes espumantes,

y las dimensiones (largo, ancho y espesor), para determinar los efectos en la deformación de las bases por el fenómeno de post-expansión o contracción.

Tabla 1. Factores y niveles adoptados en el diseño de experimento

Factor	Niveles para el Hydrocerol 1004	Niveles para la Azodicarbonamida
Factor 1: Tipo de Polipropileno	Polipropileno homopolímero	Polipropileno homopolímero
	Polipropileno Copolímero Randon	Polipropileno Copolímero Randon
	Polipropileno copolímero impacto	Polipropileno copolímero impacto
Factor 2: Proporción de agente espumante	50 %	25 %
	75 %	50 %
	1 %	75 %
	1.25 %	

Las variables de respuesta medidas para comprobar la efectividad del espumado en las bases de escoba moldeadas fueron: el peso de las bases, para determinar la reducción lograda en el consumo de polímero con relación a las bases moldeadas sin agentes espumantes, y las dimensiones (largo, ancho y espesor), para determinar los efectos en la deformación de las bases por el fenómeno de post-expansión o contracción.

Para cada corrida del experimento se registró el ciclo de moldeo logrado con el objetivo de observar la incidencia del espumado sobre la productividad. Se valoraron las afectaciones cualitativas en la calidad del producto y la estabilidad del moldeo a la vez que se realizó una caracterización visual de la morfología del espumado lograda en la sección transversal de las bases de escobas.

La resistencia a la rotura de las bases de escobas se determinó de forma experimental, tomando en cuenta si uno de los extremos podía soportar más de 5 kg de peso sin partirse. Las bases de escobas moldeadas fueron enceradas para evaluar el comportamiento en este proceso y determinar la resistencia de la mota a la fuerza de tracción la cual debe ser superior a 50 N, según el ensayo descrito en la Norma Cubana NC 889:2012 Plásticos. Escobas. Requisitos y métodos de ensayo (ONN, 2016).

El tratamiento estadístico de los resultados se realizó utilizando el software estadístico para análisis de datos Statgraphics en su versión Centurión 19.

Los parámetros tecnológicos fueron establecidos según las sugerencias de los fabricantes de los polímeros y agentes espumantes usados, las recomendaciones obtenidas en la revisión bibliográfica con relación al moldeo de termoplásticos con AEQ y las exigencias prácticas demandadas durante el proceso de moldeo.

### Resultados y discusión

Las tablas 2 y 3 muestran los resultados obtenidos en las bases de escobas al aplicar el diseño de experimento con el agente espumante químico endotérmico Hydrocerol 1004 y al exotérmico Azodicarbonamida Premix AZ, respectivamente. Los valores de las variables para cada experimento (peso, largo, ancho y espesor) están expresados en la media estadística y acompañados por el coeficiente de variación (CV) en porciento.

Tabla 2. Resultados del diseño de experimento para el agente espumante químico endotérmico Hydrocerol 1004.

Agente espumante endotérmico Hydrocerol 1004										
No.	Tipo de PP	AE (%)	Peso		Largo		Ancho		Espesor	
			Media, (g)	C.V (%)	Media, (mm)	C.V (%)	Media, (mm)	C.V (%)	Media, (mm)	C.V (%)
1	Homo	0	106.458	6.9	227.320	7.3	41.716	1.3	11.876	2.6
2	Homo	0.5	83.748	13.3	225.840	6.6	41.398	1.1	15.272	17.9
3	Homo	0.75	73.268	5.9	226.360	6.9	41.416	0.8	14.616	10.4
4	Homo	1	71.728	10.9	226.720	6.4	41.586	1.3	14.754	14.8
5	Homo	1.25	70.234	12.0	225.940	6.0	41.364	2.1	12.456	14.9
6	Random	0	107.100	7.3	228.000	0.0	41.994	0.3	12.080	4.0
7	Random	0.5	84.614	9.2	227.940	3.4	41.756	1.2	12.766	12.2
8	Random	0.75	75.630	16.6	227.900	4.3	41.596	1.3	11.820	15.7
9	Random	1	73.336	8.9	227.000	0.0	41.770	1.1	13.496	12.9
10	Random	1.25	72.312	14.2	227.940	3.4	41.748	1.5	12.850	12.2
11	Impacto	0	109.156	7.4	227.000	0.0	41.692	0.4	12.306	2.0
12	Impacto	0.5	79.010	11.2	226.520	7.1	41.226	1.2	14.198	10.6
13	Impacto	0.75	75.028	10.1	227.000	0.0	41.218	1.5	13.998	11.8
14	Impacto	1	73.902	10.2	226.900	4.3	41.240	0.9	14.240	10.7
15	Impacto	1.25	73.100	11.4	227.020	2.0	41.084	1.0	12.994	10.2

En todos los experimentos realizados el coeficiente de variación para cada variable fue inferior a 30 % lo que demuestra que la media aritmética obtenida es representativa para el conjunto de datos y que existe homogeneidad en los resultados (Universos Fórmulas, 2023).

Tabla 3. Resultados del diseño de experimento para el agente espumante químico exotérmico Azodicarbonamida Remix AZ.

Agente espumante químico exotérmico Azodicarbonamida Remix AZ										
No	Tipo de PP	AE (%)	Peso		Largo		Ancho		Espesor	
			Media, (g)	C.V (%)	Media, (mm)	C.V (%)	Media, (mm)	C.V (%)	Media, (g)	C.V (%)
1	Homo	0	106.458	6.9	227.320	7.3	41.716	1.3	11.876	2.6
2	Homo	0.25	79.048	21.9	225.920	3.9	41.258	1.1	13.402	16.7
3	Homo	0.50	64.746	16.1	226.000	0.0	41.358	1.6	14.620	11.9
4	Homo	0.75	57.344	5.0	228.000	0.0	41.000	0.0	16.730	13.3
5	Random	0	107.100	7.3	228.000	0.0	41.994	0.3	12.080	4.0
6	Random	0.25	82.744	6.9	227.000	0.0	41.582	0.8	12.246	7.5
7	Random	0.50	71.430	7.7	227.660	6.8	41.646	1.2	15.860	9.9
8	Random	0.75	63.944	8.0	228.000	0.0	41.500	0.0	16.662	14.7
9	Impacto	0	109.156	7.4	227.000	0.0	41.692	0.4	12.306	2.0
10	Impacto	0.25	81.552	14.1	226.000	0.0	41.230	0.9	13.554	9.1
11	Impacto	0.50	72.702	18.9	226.880	4.6	41.310	0.7	13.720	15.1
12	Impacto	0.75	69.648	6.3	227.000	0.0	41.492	0.6	14.380	9.7

Las variables de largo y ancho no tienen significación estadística en el experimento porque la dispersión de los datos en cada corrida es pequeña. Las variables de mayor interés son: el peso de la base de la escoba relacionada con la disminución del consumo de polímero y el espesor por los fenómenos de contracción o post-expansión que pueden estar presentes en el moldeo y que, posteriormente tienen incidencia en el proceso de encerdado.

El peso disminuye en la medida que aumenta el porcentaje de agente espumante en la mezcla para los diferentes tipos de polipropilenos (PP). Con el agente espumante químico exotérmico azodicarbonamida se obtiene una mayor disminución del peso de las bases de escobas en las proporciones utilizadas en el experimento debido a que posee un mayor rendimiento de gas al descomponerse (230 cm<sup>3</sup>/g).

Con el PP homopolímero se lograron las mayores disminuciones del peso con ambos agentes espumantes. Este tipo de PP requirió un aumento del perfil de temperatura para la plastificación y para evitar la formación de tacos fríos en la punta de la boquilla por la tendencia a enfriarse más rápido. Con el PP homo se logran los tiempos más elevados en la plastificación para el mismo valor de contrapresión establecido de 0,8 MPa. El incremento de la temperatura favorece el espumado por mayor generación de gas. Este

comportamiento puede ser una dificultad en el control del espumado dada la variabilidad obtenida en los pesos de las bases.

Con el agente espumante endotérmico Hydrocerol 1004 existe una reducción apreciable del peso cuando se usa la primera proporción del diseño de experimento al 0,5 % para cada tipo de PP pero, posteriormente no es tan marcada la disminución que se logra cuando se incrementan las proporciones de 0,75 % a 1,25 % lo cual puede estar asociado a que su descomposición genera menor cantidad de gas, de 90 cm<sup>3</sup>/g a 100 cm<sup>3</sup>/g, por lo que pequeños incrementos en la proporción utilizada no provocan notables incrementos en la generación del gas para disminuir pesos.

La Fig. 1 resume el comportamiento del peso de la base de escoba para los dos agentes espumantes utilizados en diferentes proporciones en los tres tipos de polipropilenos seleccionados en el diseño de experimento.

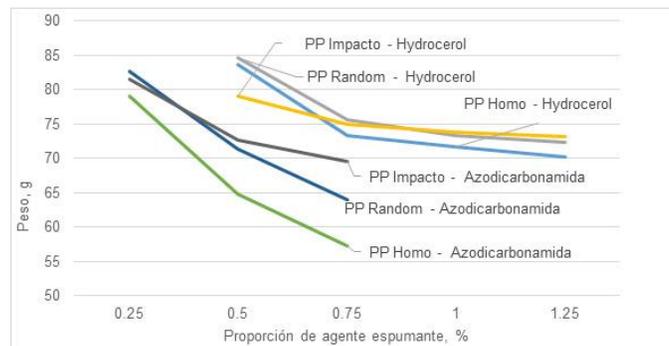


Fig. 1. Comportamiento del peso de las bases de escobas según diseño de experimento aplicado.

El espesor de las bases de escobas, medido en el centro de la sección transversal, aumenta con el uso de agentes espumantes, en comparación con las bases compactas no espumadas, debido a la expansión ejercida por el gas residual al desmoldear el producto lo cual provoca un efecto de soplado en la superficie de la base, también aumenta la variabilidad del espesor en las mediciones realizadas a las muestras de cada experimento, lo cual es una condición que debe ser controlada para no afectar el posterior proceso de encerdado. En esta variabilidad influyó el hecho de que no siempre se logró un llenado semejante de las dos cavidades del molde lo cual provoca diferencias de espesores y pesos.

Un incremento en la proporción del agente espumante no siempre provoca un mayor espesor de la base de escoba. Las bases de escobas desmoldeadas están

sometidas a dos procesos que actúan de forma contraria durante el enfriamiento: la contracción volumétrica que disminuye el espesor y el fenómeno de post-expansión que provoca el agente espumante que lo aumenta. El espesor de la base de escoba dependerá de la forma en que, tecnológicamente, se controlen ambos procesos y de cual prevalezca durante el enfriamiento.

En la expulsión de la moldeada, la capa externa compacta pegada a la superficie del molde en el perfil estructural del espumado debe ser lo suficientemente resistente para impedir la deformación superficial que ejerce la presión del gas desde el interior de la moldeada. En el posterior enfriamiento comienza a ocurrir la contracción de la pieza y a dejar de actuar el gas. En la medida que aumenta la proporción del agente espumante, disminuye la masa del polímero y es más rápido el enfriamiento al disminuir la cantidad de calor a intercambiar.

En la Tabla 4 se muestra el efecto de los agentes espumantes en el moldeo de las bases de escobas en la Reducción del Consumo del polímero (RC) y en el valor del Factor de Post-expansión (FPE).

Para determinar el porcentaje de RC y el FPE se utilizaron las siguientes expresiones:

$$\%RC = \frac{RC}{\frac{\text{Peso de la base sin AEQ} - \text{Peso del experimento}}{\text{Peso de la base sin AEQ}}} \times 100$$

$$FPE = \frac{\text{Espesor medio del experimento}}{14}$$

El porcentaje de reducción del consumo de polímero en la base de escoba con el uso del hydrocerol 1004 oscila desde el 21 % al 34 % con relación al peso de la base moldeada sin agente espumante y en el caso de la Azodicarbonamida está en el rango de 24 % al 49 %. Para el factor de post-expansión se tomó como referencia el espesor de la base en la cavidad del molde de 14 mm. Factores de expansión menores que 1 indican que existe una contracción y superiores indican una expansión.

Tabla 4. Comportamiento en la reducción del consumo de polímero y del factor de post-expansión en los experimentos realizados.

No.	Tipo de PP	Hydrocerol 1004				Azodicarbonamida Remix AZ			
		AE (%)	RC (g)	RC (%)	FPE	AE (%)	RC (g)	RC (%)	FPE
1	Homo	0	0	0	0.85	0	0.0	0	0.85
2	Homo	0.5	22.7	21.3	1.09	0.25	27.4	25.7	0.96
3	Homo	0.75	33.2	31.2	1.04	0.50	41.7	39.2	1.04
4	Homo	1	34.7	32.6	1.05	0.75	49.1	46.1	1.20
5	Homo	1.25	36.2	34	0.89				
6	Random	0	0.0	0	0.86	0	0.0	0	0.86
7	Random	0.5	22.5	21	0.91	0.25	24.4	22.7	0.87
8	Random	0.75	31.5	29.4	0.84	0.50	35.7	33.3	1.13
9	Random	1	33.8	31.5	0.96	0.75	43.2	40.3	1.19
10	Random	1.25	34.8	32.5	0.92				
11	Impacto	0	0.0	0	0.88	0	0.0	0	0.88
12	Impacto	0.5	30.1	27.6	1.01	0.25	27.6	25.3	0.97
13	Impacto	0.75	34.1	31.3	1.00	0.50	36.5	33.4	0.98
14	Impacto	1	35.3	32.3	1.02	0.75	39.5	36.2	1.03
15	Impacto	1.25	36.1	33	0.93				

En el moldeo con PP random y PP Impacto existe la tendencia a la contracción durante el enfriamiento. Las moldeadas están ligeramente expandidas al ser expulsadas y durante el enfriamiento en el tanque de agua se contraen.

El PP copolímero random utilizado requiere mayores tiempos de enfriamiento de las bases y condiciones de moldeo muy lentas en la expulsión para evitar deformaciones de la rosca al expulsar. El tiempo de plastificación es el más rápido al vencer con mayor facilidad la contrapresión por ser menos viscoso.

En todas las corridas la fuerza de resistencia del mechón en la base encerdada fue superior al valor mínimo establecido en la Norma Cubana de Escobas de 50 N. Ninguna de las bases moldeadas se partió en el ensayo a la flexión. Las bases moldeadas con PP homo tienen menor resistencia al impacto y por tanto se pueden romper con mayor facilidad. El tiempo del ciclo de moldeo se incrementa para el PP copolímero random para evitar que la rosca se deforme al expulsar, por ser un material más flexible y con temperatura de cristalización más baja; pero es inferior al tiempo del ciclo de moldeo que se logra si se moldea la base sin agente espumante. Con el resto de los PP utilizados se

logran ciclos de moldeo alrededor de los 52 s, los que no provocan deterioros en la productividad respecto al moldeo de las bases compactas.

El corte de la sección transversal de todos los experimentos muestra una estructura celular por capas, típica. La capa externa pegada a la superficie del molde es fina y compacta, con un espesor promedio alrededor de los 2mm. El núcleo y capa intermedia están espumadas con microporos distribuidos uniformemente.

En los experimentos con una proporción más alta de agente espumante en la mezcla, se observan algunos poros de mayor tamaño, pero con diámetros pequeños que no afectan la calidad del espumado. La Fig. 2 muestra este comportamiento para los tres tipos de polipropileno utilizados. En cada recuadro, la columna de tres muestras corresponde a las mezclas con Azodicarbonamida y la otra con 4 muestras al Hydrocerol, colocadas en orden ascendente de la proporción.



Fig. 2. Morfología de la estructura celular en la sección transversal de las bases espumadas para cada uno de los experimentos. A: PP Homo L5E89, B: PP Random RB801CF-12, C: PP Impacto 5660.

La investigación ofrece como resultados que el uso de agentes espumantes químicos puede ser una opción viable para reducir el consumo de polímero plástico en el moldeo de las bases de escobas de forma significativa, con una incidencia en la reducción de los costos. La disminución del costo unitario del polímero en la base es mucho mayor que el costo adicional por utilizar los AEQ. La posibilidad de utilizar menor cantidad de polímero reduce el nivel de importaciones y ahorra divisas al país, lo cual puede favorecer la estabilidad productiva.

Con las diferentes combinaciones utilizadas en el diseño de experimento se pudo lograr estabilidad en el moldeo y calidad en las bases de escobas. Los mejores resultados integrales se alcanzaron en las combinaciones de PP copolímero impacto PC 5660 con el AEQ endotérmico Hydrocerol 1004 en las proporciones más bajas de 0,5 % y 0,75 %.

Con la disminución del consumo del polímero en las

bases de escobas se logra reducir el impacto negativo que tiene sobre el ambiente la acumulación de materiales no biodegradables. La escoba es muy difícil de reciclar cuando cesa su vida útil debido a los diferentes materiales que la componen que no son fáciles de separar. La combinación del uso de materiales reciclados y la incorporación de agentes espumantes en el moldeo puede ofrecer la opción más atractiva para disminuir el consumo de plásticos primarios no biodegradables en las bases de escobas.

### Financiamiento de la investigación

La investigación se realizó bajo los auspicios de la Empresa CEPIL y la Universidad de Camagüey “Ignacio Agramonte Loynaz”.

### Contribución de los autores

Sánchez Menendez: Planeación de la investigación, ejecución del experimento, análisis y procesamiento de los datos obtenidos, redacción y revisión final del manuscrito.

Crespo Zafra: Planeación de la investigación, análisis y procesamiento de los datos obtenidos, redacción y revisión final del manuscrito.

Matos Mosqueda: Planeación de la investigación, análisis y procesamiento de los datos obtenidos, redacción y revisión final del manuscrito.

### Conflictos de intereses

No se manifiestan conflictos de intereses.

### Referencias

- Beltrán, M. y Marcilla, A. (2017). *Tecnología de polímeros*. Universidad de Alicante. Recuperado de: [https://kupdf.net/download/86149756-tecnologia-de-polimeros-m-beltran-y-a-marcilla1\\_59c2e0ea08bbc50918687098\\_pdf](https://kupdf.net/download/86149756-tecnologia-de-polimeros-m-beltran-y-a-marcilla1_59c2e0ea08bbc50918687098_pdf)
- Bergen International. (2020). *Foamazol. Chemical Foaming Agents. Injection molding processing guide*. Recuperado de: <https://www.bergeninternational.com/files/MoldProcessingGuide.pdf>
- Borealis Group. (2023). *Product data sheet Bormed RB801CF-11*. Recuperado de: <https://www.borealisgroup.com/products/product-catalogue/bormed-rb801cf-11>
- Chemdo Group. (2020). *Technical data sheet PP L5E89*. Recuperado de:

<https://www.chemdo.com/uploads/Polypropylene-ResinPP-L5E89-Homo-polymer-Yarn-Grade-MFR2.0-4.0TDS.pdf>

Clariant Masterbatches. (2015). *Technical product information Hydrocerol 1004*. Recuperado de: <https://www.promaplast.com/es/uploads/Hydrocerol1004TPI082715.pdf>

Clariant. (2023). *Technical guide. Hydrocerol. Chemical foaming and nucleating agents. Avient Corporation*. Recuperado de: <https://www.avient.com/sites/default/files/2023-01/HydrocerolChemicalFoamingAgentsforInjectionMoldingTechnicalBulletin.pdf>

López, L. (2015). Treinta años de moldeo por inyección. *Tecnología del Plástico*, 30(1), 1-2. <http://www.plastico.com/temas/30-anos-de-moldeo-por-inyeccion+103371?pagina=1>

Ministerio de Economía y Planificación. (2021). *Macroprograma 5: Recursos Naturales y Medio Ambiente*. Recuperado de: <https://www.mep.gob.cu/en/node/1346>

Oliveira, L. (2015). *Cinéticas de espumación y control de la estructura celular en materiales basados en caucho natural y poliolefinas*. (Tesis de doctorado, Universidad de Valladolid, Valladolid, España). Recuperado de: <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/15242>

Organización de las Naciones Unidas. (2023). *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. UNEP/PP/INC.2/4: Posibles opciones de elementos hacia un instrumento internacional jurídicamente vinculante, basado en un enfoque global que aborde todo el ciclo de vida de los plásticos*. Recuperado de: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/42190/K2304607E-UNEP-PP-INC.2-4-Spanish.pdf>

Plaswin Chemical. (s/f). *Hoja de datos técnicos PP Homo LE589*. Recuperado de: <http://www.plaswinchem.com/pdf/PPL5E89.pdf>

Rohleder, M., Jakob, F. (2015). Foam Injection Molding. En H.P, Heim (ed), *Specialized Injection Molding Techniques*. (53- 106). Londres: Elsevier Inc. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-323-34100-4.00002-X>

Sánchez, C. (7 de junio de 2017). Evaluación del agente

espumante Hydrocerol 1004 en el moldeo por inyección de bases de escobas. *VII Conferencia Internacional Ciencia y Tecnología para un Desarrollo Sostenible*. Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte y Loynaz, Camagüey, Cuba.

Total Energies. (2023). *Technical data sheet PPC 5660*. Recuperado de: [https://polymers.totalenergies.com/sites/g/files/wompnd1726f/site\\_collection\\_documents/TechnicalDatasheets/PPC\\_5660.pdf](https://polymers.totalenergies.com/sites/g/files/wompnd1726f/site_collection_documents/TechnicalDatasheets/PPC_5660.pdf)

Universo Fórmulas. (2023). *Estadística Descriptiva. Coeficiente de Variación*. Recuperado de: <https://www.universoformulas.com/estadistica/descriptiva/coeficiente-variacion-pearson>

Wypych, G. (2017). *Handbook of Foaming and Blowing agents*. United States: ChemTec Publishing.