

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO Y DEL IMPACTO DEL AGENTE
ESPUMANTE NO QUÍMICO “EXPANCEL” EN EL PROCESO DE
ROTOMOLDEO**

DANIEL OSORIO OCHOA

MARÍA ADELAIDA LONDOÑO ARRUBLA

**UNIVERSIDAD EAFIT
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE DISEÑO DE PRODUCTO
PROYECTO DE GRADO
MEDELLÍN
2011**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO Y DEL IMPACTO DEL AGENTE
ESPUMANTE NO QUÍMICO “EXPANCEL” EN EL PROCESO DE
ROTOMOLDEO**

DANIEL OSORIO OCHOA

MARÍA ADELAIDA LONDOÑO ARRUBLA

**Trabajo de grado presentado para optar al título de
Ingeniero de Diseño de Producto**

Asesora

Doctora MÓNICA ÁLVAREZ LÁINEZ

Ingeniera química de la Universidad Nacional de Colombia

Doctor en física de Universidad de Valladolid

**UNIVERSIDAD EAFIT
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE DISEÑO DE PRODUCTO
PROYECTO DE GRADO
MEDELLÍN
2011**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Coordinador de proyecto de grado

Jurado

Jurado

Abril de 2011

AGRADECIMIENTOS.

Los autores del presente documento manifiestan sus agradecimientos a:

Rotoplast S.A, por permitir la realización de los ensayos de rotomoldeo en sus instalaciones, por la colaboración prestada y por la facilitación de las materias primas y del prototipo.

El señor José Santiago Gómez Piedrahita, por la asesoría y el apoyo prestado durante las primeras etapas de desarrollo de la investigación.

El señor Carlos Lalinde, ingeniero de Expancel en Medellín, por su acompañamiento, asesoría y por el suministro del material espumante.

A la señora Lena Jönsson, ingeniera de aplicación de Expancel en Suecia, por la información suministrada.

El laboratorio de materiales de la universidad EAFIT por la asesoría, préstamo de equipos y acompañamiento durante el desarrollo de los ensayos mecánicos.

CONTENIDO.

RESUMEN.	
ABSTRACT.	
INTRODUCCIÓN.	
ANTECEDENTES.	
1. JUSTIFICACIÓN.	19
2. OBJETIVOS.	21
2.1. OBJETIVO GENERAL.	21
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	21
3. MARCO TEÓRICO.	23
3.1. MATERIALES.	23
3.1.1. Descripción del polietileno.	23
3.1.2. Descripción del espumante.	23
3.2. ROTOMOLDEO.	27
3.3. PRUEBAS MECÁNICAS Y QUÍMICAS.	27
3.3.1. Densidad.	28
3.3.2. Resistencia a la compresión.	29
3.3.3. Flexión a tres puntos.	29
3.3.4. Absorción de agua.	31
3.3.5. Morfología de las espumas.	32
4. PROCESO DE FABRICACIÓN DE LAS ESPUMAS.	33
4.1. MÁQUINA.	33
4.2. MOLDE.	33
5. FABRICACIÓN DE MUESTRAS.	35
5.1. ENSAYOS PRELIMINARES.	36
5.2. MODIFICACIONES AL PROCESO DE ROTOMOLDEO PARA FABRICAR MATERIAL ESPUMADO.	37

5.3. RESULTADOS PRELIMINARES.	39
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	40
6.1. DENSIDAD.	40
6.2. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.	42
6.3. FLEXIÓN A TRES PUNTOS.	45
6.4. ABSORCIÓN DE AGUA.	48
6.5. MORFOLOGÍA DE LAS ESPUMAS.	50
7. FABRICACIÓN DE PROTOTIPOS.	51
7.1. PROTOTIPO 1.	51
7.2. PROTOTIPO 2.	52
7.3. PROTOTIPO 3.	54
8. VIABILIDAD ECONÓMICA.	56
9. PROPUESTA DE PROCESO.	60
10. CONCLUSIONES.	62
11. RECOMENDACIONES.	65
BIBLIOGRAFÍA.	67

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1. Composición de las microesferas de Expancel.	26
Tabla 2. Especificaciones técnicas de las microesferas de Expancel.	26
Tabla 3. Parámetros de fabricación de la pieza comparativa en PEMD.	35
Tabla 4. Parámetros de fabricación de las piezas correspondientes a los ensayos 1 y 2.	37
Tabla 5. Productos necesarios para realizar el análisis económico.	56
Tabla 6. Parámetros de producción de la pieza en condiciones normales.	57
Tabla 7. Parámetros de producción del prototipo conservando el peso de la pieza estándar. Concentración de espumante equivalente al 0,55% del peso total de la pieza.	57
Tabla 8. Parámetros de producción del prototipo conservando el volumen de la pieza estándar. Concentración de espumante equivalente al 0,55% del peso total de la pieza.	59
Tabla 9. Propuesta de proceso para la tapa del saladero.	61

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Geometría fabricada en la primera serie de ensayos.	34
Figura 2. Resultado del primer ciclo de ensayos de rotomoldeo con Expancel.	36
Figura 3. Resultado de las muestras obtenidas en el ensayo 1.	38
Figura 4. Resultado de las muestras obtenidas en el ensayo 2.	38
Figura 5. Densímetro METTLER TOLEDO.	40
Figura 6. Densidad aparente promedio.	41
Figura 7. Equipo utilizado y montaje de la prueba de compresión.	42
Figura 8. Esfuerzo – Deformación del ensayo de compresión.	43
Figura 9. Resistencia a la compresión.	44
Figura 10. Absorción de energía en el ensayo de compresión.	45
Figura 11. Punto máximo de deformación de la probeta en el ensayo de flexión a tres puntos.	46
Figura 12. Esfuerzo – Deformación de las probetas ensayadas a flexión.	47
Figura 13. Resistencia a la flexión.	47
Figura 14. Absorción de agua.	49
Figura 15. Fotografías SEM de las muestras fabricadas.	50
Figura 16. Primer prototipo.	52
Figura 17. Segundo prototipo.	53
Figura 18. Tercer prototipo.	55

RESUMEN.

En la actualidad, la industria de procesamiento del plástico se preocupa por la fabricación de productos de óptimas calidades pero con menores densidades y buenas prestaciones mecánicas, ya que esto puede traducirse en beneficios económicos y en reducción de uso de materias primas. Para ello, se han utilizado, nuevos materiales y variaciones en los procesos convencionales de transformación de plásticos. En los últimos años, se ha incrementado notablemente el uso de agentes espumantes no químicos con el fin de obtener los beneficios anteriormente mencionados. Sin embargo, es evidente la ausencia de dichos espumantes en el proceso de rotomoldeo, por lo que no hay información suficiente para determinar si estos agentes son viables o no en este proceso productivo.

Se realizaron ensayos de espumado en el proceso de rotomoldeo utilizando diferentes referencias de microesferas espumantes marca EXPANCEL, desarrolladas por la empresa sueca AKZO NOBEL, y polietileno virgen de media densidad. Se extrajeron probetas a las cuales se les realizaron pruebas de resistencia mecánica, de absorción de agua y de apariencia física. Por último, se fabricaron prototipos utilizando los moldes y los equipos de la empresa local ROTOPLAST S.A.

Finalmente, se presentaron los resultados obtenidos y se analizaron respecto a probetas y piezas fabricadas únicamente con polietileno. Se seleccionó una sola referencia, aquella que presentó mejor desempeño general y se realizó un estudio de viabilidad económica para determinar si la utilización del producto es viable o no.

Palabras clave: Agente espumante no químico, microesferas, Expancel, polietileno, rotomoldeo, probetas, resistencia mecánica, prototipos.

ABSTRACT.

Nowadays, the plastic processing industry is worried about the fabrication of high quality products but with lower densities and thinner wall thicknesses in order to obtain economical benefits. To achieve these facts they've been using new materials, procedures and variations in the conventional processes. In the last few years the use of no chemicals foaming agents has significantly increased in order to obtain the benefits mentioned above without sacrificing the mechanical properties of the materials. However is obvious the lack of such materials in the rotational molding process, so there is not enough information to determine if these agents are feasible or not in this productive process.

Foaming trials were conducted in the rotomoulding process using different Expancel microspheres references, developed by the Swedish company AKZO NOBEL, and raw polyethylene. Samples were extracted and tested for mechanical strength and physical appearance; finally prototypes were manufactured using molds and machinery of the local company ROTOPLAST S.A.

The results obtained in these test were compared with the samples made of just polyethylene. Finally the Expancel reference with better overall performance was selected. The team developed an economical study for it in order to determine if the foaming product implantation is viable or not.

Key words: No chemical foaming agent, microspheres, Expancel, polyethylene, rotomoulding, samples, mechanical resistance, prototypes.

INTRODUCCIÓN.

Los materiales espumados han alcanzado protagonismo evidente en la actual industria del procesamiento de plásticos, ya que, con estos pueden obtenerse gran cantidad de productos con modificaciones específicas sea en sus propiedades físicas o químicas. Ejemplos evidentes de aplicación de productos espumados son los productos de baja densidad y alta flotabilidad, aislantes térmicos y sonoros, y algunos más específicos que dependen del uso y función para el que hayan sido concebidos.

Las propiedades mecánicas y físicas de los materiales espumados varían entre sí dependiendo del tipo de polímero, espumas, celdas y proceso utilizado para su fabricación, ya que dichos factores condicionan la estructura del material y por ende su comportamiento, desempeño y reacción ante diferentes fenómenos.

En el medio se utilizan gran cantidad de elementos espumantes y se fabrican productos bajo diferentes procesos productivos; bajo procedimientos estandarizados y definidos. Esta investigación tiene como finalidad determinar la viabilidad de uso del espumante Expancel, fabricado por la empresa Akzo Nobel, en el proceso de rotomoldeo bajo condiciones estándares en una empresa local y analizar si las piezas fabricadas con este material cumplen o no con los requisitos mínimos exigidos para la fabricación de productos comerciales. Para ello se realizaron variaciones en el proceso productivo, pruebas físicas y químicas, se obtuvieron resultados que fueron analizados y con base en ellos se plantearon las respectivas conclusiones.

ANTECEDENTES.

Gracias a los avances que ha tenido la industria del procesamiento del plástico se ha podido demostrar que las nuevas tecnologías de espumado de materiales poliméricos es efectiva y que además permiten a los productos elaborados bajo ésta dinámica satisfacer necesidades que anteriormente solo podrían cumplir aquellas estructuras rígidas, macizas y compactas, destacando su buen desempeño y comportamiento. Pero estos beneficios no han sido notorios solamente en productos físicos, sino también en los procesos mismos; en la inyección, los ciclos productivos pueden reducir su duración y la fuerza de cierre necesaria para obtener las piezas, en la extrusión y en el rotomoldeo se pueden alcanzar considerables reducciones de densidad y mayores espesores de pared (en el caso del rotomoldeo), así mismo, nuevas investigaciones y desarrollos han hecho posible el termoformado de piezas espumadas, obteniendo excelentes acabados superficiales [1].

Debido a los crecientes desarrollos que se han llevado a cabo en los últimos años, cada vez es más factible cambiar un producto o una aplicación de material compacto por una espumada, además, cada vez hay más potencial para desarrollar nuevos productos en los que las piezas espumadas puedan sustituir a las convencionales, reduciendo la densidad del producto final, permitiendo integrar varias piezas y funciones en una sola [1].

Las principales propiedades o características de un polímero espumado incluyen, entre otras, la baja densidad de las piezas conformadas, la alta resistencia por unidad de peso, un mejor aislamiento térmico y mejores cualidades de absorción de energía ó de impacto directo.[2].

En la industria del plástico son comúnmente utilizados gran variedad de agentes espumantes; de éstos existen muchas referencias, marcas y tipos, pero

generalmente se podrían dividir en dos grandes grupos: agentes espumantes químicos y no químicos, éstos últimos también conocidos como espumantes físicos [1].

Los agentes espumantes químicos son aditivos reactivos capaces de liberar gases a partir de reacciones químicas; por lo general estos gases son nitrógeno ó dióxido de carbono. Cuando éstas reacciones se efectúan se producen gases que generan poros y burbujas en la estructura, desplazando las partículas del material base y reduciendo la densidad de la pieza conformada. Además de poros, también se generan residuos sólidos que en algunas ocasiones actúan como puntos de nucleación, lo que facilita la creación de burbujas que pueden causar deterioros en las herramientas de procesamiento (cuando se trabaja en procesos de reprocesamiento y transformación de plásticos los residuos generados en la expansión pueden actuar como agentes externos que reducen la vida útil de las herramientas). Además de estos residuos sólidos, pueden presentarse también residuos de agua. Los agentes espumantes químicos pueden ser clasificados como endotérmicos y exotérmicos, dependiendo de si absorben o liberan calor durante la reacción química [1].

Éstos productos son diseñados para reducir el peso, además, las piezas pueden llegar a ser incluso, más fáciles de pintar y post procesar.

Con éste tipo de compuestos se pueden alcanzar reducciones de peso en los productos finales del 5 al 10%.

Aquellas partículas, gases o líquidos introducidos en el material base y que no generan ningún tipo de producto residual (ni agua, ni gases, ni partículas externas) son considerados agentes de espumado físicos; éstos pueden ser dióxido de carbono, nitrógeno o incluso vapor de agua, entre otros.

Entre los agentes espumantes físicos se destacan las microesferas, sean de vidrio o poliméricas, que pueden ser utilizadas también como agente de relleno de bajo

peso y de relativo bajo costo. De éste tipo de productos hay diferentes marcas y empresas desarrolladoras, las más sobresalientes son las desarrolladas por la compañía sueca Expancel, perteneciente al grupo Akzo Nobel.

Las microesferas de Expancel; de color blanco puro y brillante, con diámetro promedio 10 a 40 μm (cuando no están expandidas), están conformadas por una cubierta polimérica (Poliacrilonitrilo - PAN) que encapsula en su interior un hidrocarburo en estado gaseoso. Bajo el efecto del calor, la cubierta termoplástica se suaviza y la presión del hidrocarburo aumenta, obteniendo como resultado la expansión de las partículas, alcanzando un incremento en el volumen. Las esferas incluso, pueden alcanzar de 40 a 60 veces su diámetro inicial, lo que tiene un efecto drástico sobre la densidad y el volumen del polímero base [3].

Las microesferas tienen rangos de temperatura de expansión que varían entre 80 y 210°C [4], dependiendo de la referencia; si las temperaturas exceden estos valores máximos el espumante comenzará a degradarse y perderá propiedades tanto físicas como mecánicas. Las esferas pueden ser utilizadas en ambientes donde estén en contacto con materiales químicos, tales como solventes, sin presentar ningún efecto negativo en la expansión ó en sus propiedades. El Expancel cuenta con una excelente resistencia a las sustancias químicas.

El Expancel es una interesante alternativa como agente espumante ya que en concentraciones cercanas al 3%, puede reducir hasta un 38% el peso de una pieza moldeada, ventaja que está siendo convenientemente aprovechada en la industria de la madera plástica [3], en la que se está reduciendo la cantidad de material utilizado, siendo en un alto porcentaje reemplazado por el agente espumante, reduciendo no solo densidad sino también costos.

El uso de Expancel como agente espumante en la inyección y en la extrusión ofrece un proceso de espumado constante, predecible y controlable, ya que el

grado de expansión depende de la referencia utilizada y del porcentaje de espumante utilizado en la mezcla de materias. Las piezas conformadas con Expancel generalmente presentan ventajas en la estructura celular¹, ya que se pueden obtener estructuras 100% cerradas, el tamaño de las celdas puede ser controlado según sea el tamaño de las esferas de expansión y la espuma es notoriamente más estable que las generadas con otros productos ó técnicas de expansión. Además el Expancel, es de muy fácil manejo ya que no se requieren de procesos especiales para homogenizar las esferas con el material polimérico [3].

Gracias a las múltiples referencias de espumantes, Expancel puede ser utilizado no solo en varios procesos productivos, sino también bajo diversas condiciones fisicoquímicas. Los productos de referencia DU - DE (Dry-Unexpanded y Dry-Expanded respectivamente.) son altamente recomendados para procesos como la inyección, extrusión e incluso el rotomoldeo, en los cuales no hay ningún tipo de contacto ni se producen residuos de sustancias acuosas, son proceso 100% secos, caso contrario, las referencias WU - WE (Wet-Unexpanded y Wet-Expanded), estas trabajan bajo condiciones en las cuales debe haber agua para garantizar el éxito del proceso. El Expancel MB (Masterbatch) es utilizado en aplicaciones de termoplásticos para mejorar la dispersión de las microesferas. Por último, la referencia SL que es utilizada en procesos en los que se requiere que la mezcla se disperse muy fácilmente, generalmente es necesaria la presencia de agua [5].

Otra alternativa de microesferas utilizadas en el procesamiento de plásticos, pero, aparentemente no tan utilizada como las termoplásticas son las esferas de vidrio de interior hueco. Estas esferas contienen un compuesto a base de sulfuros que,

¹ Estructura celular, hace referencia a las celdas o poros creados por el agente espumante dentro de la matriz polimérica.

al momento de introducir las partículas de vidrio en el horno, el calor permite generar burbujas en su interior. La empresa 3M ha desarrollado una nueva referencia de microesferas huecas capaces de usarse en procesos de inyección a alta presión y extrusión, ya que son aproximadamente un 40% más resistentes que las convencionales y relativamente más ligeras que otras cargas de expansión. La mayor diferencia de estas esferas de vidrio respecto a las termoplásticas radica en que las segundas poseen mayor capacidad de expansión que las primeras [6].

Para los procesos de espumado en plásticos, como alternativa a los espumantes con microesferas, existe un método basado en el espumado microcelular, que consiste en la inyección de gases supercríticos de dióxido de carbono ó nitrógeno, directamente en el polímero, para crear una masa homogénea que al ser inyectada permite la rápida expansión del material dentro de la cavidad, obteniendo así ciclos de producción más cortos. Éste proceso no se limita solamente a estructuras microcelulares, sino también a las de celdas convencionales (poros abiertos y cerrados).

En Japón, la empresa Shiina Kasey Co. Desarrolló una nueva técnica de espumado en el proceso de rotomoldeo [7]. En ésta técnica no se utilizan agentes espumantes externos sino que la expansión se obtiene gracias al diseño de unos nuevos gránulos de resina. Éstos poseen un núcleo de espuma. Cuando éstas aumentan su tamaño, forman esferas de espuma con un cascarón. Una notable ventaja de éste producto es que permite la carga del molde en un solo paso. Los cascarones externos a la espuma forman redes estructurales al interior de la pieza, dándole soporte y resistencia, mientras que la baja densidad dentro de las esferas mantiene la densidad global del producto. Pese a sus aparentes bondades, el promedio de expansión típica de éste nuevo material es de aproximadamente 13 veces su tamaño original, comparado con el espumante Expancel que puede alcanzar hasta 40 o 60 veces su tamaño inicial.

Se espera que éste producto pueda ser utilizado en la fabricación de dispositivos de flotación, refrigerantes, artículos deportivos, tanques de almacenamiento en general y muelles.

Ajenos a los procesos de microesferas, existen metodologías de expansión adicionales para el rotomoldeo [8]. Estas tienden a ser complejas, costosas y en muchos casos no presentan los mejores resultados: Existe una técnica llamada "Drop Box" en la cual se instala un embudo en la parte exterior del molde. Por éste se dispensa material espumante luego de ser formada la primera capa del producto (constituida únicamente por el polímero base). El montaje del proceso puede resultar altamente costoso, teniendo en cuenta que el sistema se acciona manualmente y no es muy exacto.

En otros métodos, se introduce el material espumante en recipientes plásticos que se degradan con el calor, cuando esto sucede se libera el espumante. La principal desventaja de ésta metodología son los residuos contaminados generados por la degradación del recipiente plástico.

La membrana fusible [9] fue una solución más simple, desarrollada por R. Dru Laws, director de ingeniería en Mity Fence Systems, Orem, consiste en un método de formación de espuma para el rotomoldeo en el cual se propone utilizar un recipiente de politetrafluoroetileno para contener el agente espumante, sellado por la membrana plástica. Éste se monta sobre las rejillas de ventilación del molde, cuando la temperatura de la cavidad interna aumenta, la membrana se ablanda y se encoge, separando los bordes de la abertura del contenedor, liberando el agente espumante. Las funciones de la membrana son automáticas y sistemáticas. La temperatura de liberación puede adaptarse cambiando el contenido de acetato de vinilo (VA) y el espesor de la membrana de copolímero EVA. En los experimentos se descubrió que la distribución adecuada del agente espumante se logró gracias a la correcta rotación del molde dentro del horno.

El método de membrana fusibles se puede utilizar para cualquier rotomoldeo de segunda capa este comportamiento es el que permite crear un mejor acabado al crear una piel de PE sobre el molde antes de tener el material espumado. Sin embargo, no puede ser utilizado para todo tipo de productos ya que este requiere el retiro del contenedor, hecho que limita su uso y que puede hacerlo incluso inviable.

En cuanto a los procesos, muchos de éstos agentes y métodos espumantes son concebidos y desarrollados en pro de la disminución de los tiempos de producción, representando alternativas para alcanzar mayores velocidades de llenado de los moldes. Estas son necesidades netamente relacionadas con el proceso de inyección o la extrusión, pero, en el caso del rotomoldeo, cuyo ciclo productivo es lento y en el que simplemente es difícil e incluso inviable reducir los tiempos de producción, las necesidades son diferentes. Los objetivos reales en éste proceso son obtener reducciones de densidades, espesores de pared mayores y obviamente, pesos más bajos; tratando de hacerlo de la manera más eficiente, sencilla y económica posible.

Gracias a la investigación realizada para el desarrollo de este informe se ha determinado que un agente espumante, adicionado al polietileno de media densidad (PEMD), representaría una posible solución a éstas demandas, gracias a sus reducciones notables en la densidad (dependiendo de la referencia y de la concentración de espumante vs PEMD) y al aumento en gran proporción del tamaño de sus partículas al expandirse, es el Expandel. Aparentemente, este representaría una alternativa considerable para obtener las mejoras deseadas en los productos finales.

1. JUSTIFICACIÓN.

Actualmente se utilizan en la industria del plástico gran variedad de espumantes químicos y físicos que permiten obtener reducción en las densidades de los productos terminados, disminución de los costos de producción y algunas otras modificaciones en sus propiedades físicas y mecánicas. Estos productos son comúnmente utilizados en los procesos de extrusión e inyección, pero en el caso del rotomoldeo no son muy comunes; no hay métodos estandarizados establecidos para lograr resultados uniformes y totalmente satisfactorios con agentes espumantes.

“Expancel” es un producto de la compañía Akzo Nobel. Es un espumante físico que cuando se expone a altas temperaturas expande el tamaño de sus microesferas, disminuyendo la densidad del producto y generando mayores espesores en relación a menores volúmenes, además, aumenta la flexibilidad del material, obteniendo las mismas piezas con menor cantidad de materia prima.

Dado que en Colombia no se ha explorado lo suficiente éste tema, contemplando el potencial crecimiento de la industria del rotomoldeo en el país y analizando las ventajas que éste espumante podría traer para el desarrollo de nuevos productos y nuevas metodologías de trabajo en procesos ya existentes, consideramos que sería pertinente realizar una investigación que permita evaluar la posibilidad de implementación de agentes espumantes físicos en el proceso de rotomoldeo.

Un factor importante a tener en cuenta es que al no haber información suficiente, la investigación podría ser material relevante y de interés para la industria nacional, específicamente para aquellas empresas dedicadas al rotomoldeo de materiales plásticos.

Uno de los principales objetivos de este proyecto es plantear una metodología que permita aplicar a las técnicas convencionales de rotomoldeo, el espumante Expancel. Para ello se realizaron actividades de contacto entre dos de las posibles empresas interesadas: Rotoplast, empresa de rotomoldeo local y Akzo Nobel, empresa sueca con representación en Medellín y fabricante del espumante.

Rotoplast se encargó de facilitar tanto el polietileno de media densidad (PEMD) como las instalaciones mismas de la empresa, equipos, máquinas, moldes y personal.

Por otro lado, Akzo Nobel suministró las tres referencias de los espumantes, prestó asesoría técnica y facilitó las micrografías SEM.

El hecho de investigar y realizar aportes sobre aspectos que no se han tenido en cuenta, o que no son tan comunes, en una industria con tanto potencial (rotomoldeo), que cada vez crece más; además de la posibilidad de contar con el apoyo de una empresa líder en el procesamiento del plástico en el país, junto con la asesoría de una empresa internacional que hace parte de la multinacional Akzo Nobel, son factores suficientes que motivan y que son determinantes, no solo para realizar una investigación en el marco de un trabajo de grado, sino también para que lo concluido pueda influir ó aportar materia de conocimiento a la industria ó al contexto dentro de cual fue propuesto el proyecto.

2. OBJETIVOS.

2.1 OBJETIVO GENERAL:

Evaluar la viabilidad de implementar el espumante Expancel en el proceso de rotomoldeo, a través del análisis del comportamiento físico y productivo de piezas comerciales elaboradas con un porcentaje de éste.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Realizar una caracterización técnica del material espumante (Expancel), para elegir el que mejor se adapte al proceso de rotomoldeo.
- Proponer e implementar una técnica productiva aplicable al proceso de rotomoldeo con Expancel que garantice resultados adecuados en las muestras.
- Fabricar piezas estándar, de geometría simple mediante rotomoldeo con las mejores relaciones PE/Expancel con el fin de determinar las propiedades físicas y los acabados de las muestras.
- Determinar las propiedades físicas y mecánicas de las muestras comparadas con las obtenidas en un producto rotomoldeado sólido, para establecer los cambios en propiedades.
- Proponer, basándose en los resultados anteriores, productos específicos en los cuales se pueda implementar el proceso y el agente espumante seleccionado.

- Desarrollar un estudio de costos aproximados para determinar la viabilidad de utilización del agente en el proceso.

3. MARCO TEÓRICO.

En este numeral se presenta de manera resumida y breve los materiales utilizados en la investigación, el proceso productivo y las pruebas físicas y químicas realizadas a las muestras fabricadas.

3.1 MATERIALES.

Expancel es un espumante físico que permite crear estructuras espumadas con celdas cerradas. Actualmente se utiliza en la industria del procesamiento del plástico una alta gama de polímeros transformados bajo gran cantidad de procesos productivos, con el fin de obtener productos de mayor espesor, menor densidad y propiedades específicas que aplican para casos puntuales (conductividad térmica, reducción de vibraciones, elementos flotantes, entre otros). Es común ver productos fabricados utilizando dicho espumante y polietileno, no es común encontrarlos fabricados mediante el rotomoldeo.

3.1.1 Descripción del polietileno:

Polietileno virgen de media densidad, producido y pulverizado en México por la empresa POLÍMEROS MEXICANOS S.A.

Densidad del material pulverizado: $0,34 \text{ g/cm}^3$.

Densidad del material conformado (en un producto terminado): $0,93 \text{ g/cm}^3$.

Temperatura de fusión: $170 - 215 \text{ }^\circ\text{C}$.

El material utilizado fue natural, es decir, no fue pigmentado en ningún momento.

3.1.2 Descripción del espumante [4]:

Las microesferas de Expancel son partículas cerradas, lo que resulta siendo ventajoso para muchas aplicaciones, ya que aumenta el nivel de impermeabilidad

de los productos. Cuando la estructura disminuye se eliminan las porosidades, reduciendo posibles puntos de acceso de fluidos o gases, permitiendo la conformación de productos aptos para entrar en contacto con fluidos sin que estos representen algún tipo de amenaza para ellos.

Algunos de los procesos en los cuales se utiliza el espumante y que a su vez son mencionados en la bibliografía técnica de Akzo Nobel son:

- Impregnación de superficies.
- Laminado.
- Revestimiento (Coating).
- Aspersión (Spraying).
- Moldeo simple.
- Superficies anti-deslizantes.
- Moldeo por inyección.
- Extrusión.
- Soplado.

Propiedades:

Resistencia química: El agente espumante Expancel puede ser utilizado en presencia de productos químicos y solventes, sin que esto afecte el proceso de espumado ni las propiedades físicas y mecánicas de las espumas y sin presentarse decoloraciones del material. Las referencias de Expancel utilizadas en esta investigación obtuvieron una calificación de 5 puntos (en una escala de 0 a 5 y siendo 5 el valor máximo) en cuanto a resistencia a agentes químicos externos con base en pruebas extremas realizadas por Akzo Nobel.

Resistencia mecánica: Todas las referencias del espumante Expancel presentan altos grados de resistencia a los esfuerzos de compresión y tensión. Cuando las esferas expandidas son comprimidas retoman inmediatamente su forma, volumen

y sus propiedades originales, sin presentar daños ni rupturas estructurales. Las esferas pueden resistir múltiples ciclos de comprensión a altas presiones sin presentar rupturas. En pruebas realizadas en los laboratorios de Akzo Nobel se sometieron espumas a presiones equivalentes a 6 bares (0,6 MPa); las microesferas retomaron su forma inicial al retirar la presión.

Para la elaboración de ésta investigación se probaran diferentes referencias de Expancel en el rotomoldeo; un proceso en el cual el espumante no ha sido abiertamente utilizado y en el cual no hay la experiencia ni el conocimiento necesarios para obtener resultados adecuados de un proceso productivo estandarizado.

En reuniones previas con el personal encargado de los ensayos y la distribución de Expancel en sur América y en Medellín respectivamente se acordó que los espumantes que mejor desempeño alcanzarían en éste proceso serían aquellos denominados como DU (Dry Unexpanded), es decir, partículas utilizadas en procesos secos, en ausencia de agua y que aumentan su diámetro proporcionalmente en presencia de fuentes de calor determinadas y previamente establecidas.

Las referencias de espumante que se utilizarán serán entonces:

- 093 DU – 120
- 909 DU – 80
- 950 DU – 80

Los primeros tres dígitos indican el tipo de polímero y de hidrocarburo presente en el espumante, las letras DU (Dry Unexpanded) y los últimos dos dígitos indican el tamaño aproximado de expansión final de la partícula en micras.

Especificaciones técnicas de las microesferas de Expancel [3]:

Tabla 1. Composición de las microesferas de Expancel. Fuente: Los autores.

Expancel	Composición de la corteza	Gas propelente
093 DU - 120	Poliacrilonitrilo Polimetacrilonitrilo	isopentano
909 DU - 80	Poliacrilonitrilo Polimetacrilonitrilo	isopentano
950 DU - 80	Poliacrilonitrilo Polimetacrilonitrilo	Isoctano/isopentano

Tabla 2. Especificaciones técnicas de las microesferas de Expancel. Fuente: Los autores.

Expancel	Díámetro inicial (μ)	Díámetro final (μ)	T. Inicial ($^{\circ}\text{C}$)	T. Final ($^{\circ}\text{C}$)	Densidad (g/cm^3)	Resistencia química
093 DU - 120	28 - 38	120	120 - 130	188 - 203	$\leq 0,0065$	5
909 DU - 80	18 - 24	80	120 - 130	175 - 190	$\leq 0,01$	5
950 DU - 80	18 - 24	80	138 - 148	188 - 200	$\leq 0,012$	5

Nota: Siendo, en resistencia química "5" el máximo valor de calificación en una escala de 0 - 5.

3.2 ROTOMOLDEO.

Proceso de transformación del plástico en el cual un molde metálico gira en dos sentidos simultáneamente mientras éste se calienta, ya sea por medio de la aplicación de llama directa o en un horno por convección.

El molde debe estar previamente cargado con material polimérico (generalmente en polvo) de manera que por acción de gravedad el polvo choca con las superficies internas del molde al mismo tiempo que se va fundiendo formando una capa uniforme que da forma a la pieza.

El enfriamiento de la pieza se realiza por ventilación y aspersion de agua, luego la pieza puede ser retirada.

Es un proceso generalmente utilizado en formas huecas y de gran tamaño.

3.3 PRUEBAS MECÁNICAS Y QUÍMICAS.

Con el fin de determinar las diferencias entre los diferentes materiales se realizaron, para cada una de las muestras fabricadas, pruebas de resistencia mecánica y de determinación de propiedades químicas. Se analizaron los procedimientos más relevantes para el caso de estudio siguiendo los parámetros sugeridos en la norma NTC 1397.

Los ensayos y procedimientos de laboratorio fueron realizados en el laboratorio de materiales de la universidad EAFIT.

A continuación se enuncian y se explican brevemente las pruebas realizadas:

3.3.1 Densidad.

A partir del principio de Arquímedes, y utilizando el densímetro del laboratorio de materiales de la universidad EAFIT se calcularon las densidades de las diferentes probetas extraídas de las piezas fabricadas. Para cada muestra se realizaron tres medidas, reportando el valor medio.

La densidad se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{A}{A - B} \times \rho\theta$$

Fuente: obtenida en el documento de uso del densímetro utilizado, suministrado por METTLER TOLEDO.

En donde:

A= Peso de la muestra en el aire.

B= Peso de la muestra en el agua.

$\rho\theta$ = Factor de corrección de densidad, relacionado a la temperatura a la cual se desarrolló la prueba (este valor es constante para todas las probetas y fue obtenido en el documento de uso del densímetro, suministrado por METTLER TOLEDO).

3.3.2 Resistencia a la compresión.

Para determinar la resistencia a la compresión de las probetas extraídas se utilizó un sistema de platos paralelos, uno fijo y el otro móvil, montados en la máquina universal marca INSTROM de compresión del laboratorio de materiales de la universidad EAFIT. Para cada muestra se realizaron tres medidas, reportando el valor medio.

Siguiendo las indicaciones de la Norma Técnica Colombiana (NTC1397) se calcularon los valores correspondientes a la resistencia a la compresión, los cuales resultan del cociente de la división de la carga máxima alcanzada durante el ensayo entre la superficie inicial de la sección recta de cada poción de ensayo:

$$R = \frac{F}{A}$$

Fuente: Extraída de la página 9 de la NTC 1397.

En donde:

R = Resistencia a la compresión en daN/cm².

F = Fuerza (carga) máxima alcanzada en daN.

A = Superficie (área) de la probeta en cm².

3.3.3 Flexión a tres puntos.

Para determinar la resistencia a la flexión se montó en la maquina universal del laboratorio de materiales de la universidad EAFIT un sistema de tres puntos de

apoyo, en el cual se ubicaron las probetas previamente seleccionadas y se aplicó fuerza constante en el centro de las mismas. Para cada muestra se realizaron cinco medidas, reportando el valor medio.

Siguiendo las indicaciones de la Norma Técnica Colombiana (NTC1397) se calcularon los valores correspondientes a la resistencia a la flexión. Para hacerlo se utilizó la siguiente ecuación:

$$Rf = \frac{M}{W}$$

Fuente: Extraída de la página 9 de la NTC 1397.

En donde:

Rf = Resistencia a la flexión en daN/cm².

M = Momento de flexión en el centro de la porción de ensayo, en daN-cm.

W = Momento de resistencia de la sección transversal de la porción de ensayo, en cm³.

El momento de flexión se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$M = \frac{f * ls}{4}$$

Fuente: Extraída de la página 9 de la NTC 1397.

En donde:

f = Fuerza, en daN.

l_s = Distancia entre los soportes, en cm.

Finalmente, el momento de resistencia se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$W = \frac{b * h^2}{6}$$

Fuente: Extraída de la página 10 de la NTC 1397.

En donde:

b = Ancho de la porción de ensayo, en cm.

h = Altura de la porción de ensayo, en cm.

3.3.4 Absorción de agua.

Con el fin de verificar si las probetas absorbían o no agua al estar sumergidas por un espacio de tiempo, se ubicaron las muestras en recipientes individuales por un período de 24 horas. Posteriormente se midió su peso y se comparó con el valor inicial, antes de ser sumergidas.

Inicialmente se registró la masa de cada una de las muestras. Luego, fueron sumergidas en grupos de tres (3) en recipientes seleccionados con anterioridad y con 250 cm³ de agua en su interior. Los especímenes se dejaron reposar, sumergidas por un período de tiempo de 24 horas.

Finalmente, las muestras se extrajeron de los recipientes, se secaron levemente las superficies externas con papel de alta absorción, para retirar el exceso de agua e inmediatamente se midió su masa.

Siguiendo las indicaciones de la Norma Técnica Colombiana (NTC1397) se calcularon los valores correspondientes a la absorción de agua. Para hacerlo se utilizó la siguiente ecuación:

$$A = \frac{W2 - W1}{W1} \times 100$$

Fuente: Extraída de la página 14 de la NTC 1397.

En donde:

A = Absorción de agua, en % de peso.

W1 = Peso inicial de la porción de ensayo, en gramos.

W2 = Peso final de la porción de ensayo, en gramos.

3.3.5 Morfología de las espumas.

Para determinar la morfología y la estructura interna de las muestras, se extrajeron probetas y fueron llevadas a un microscopio electrónico de barrido (SEM) para realizar estudios sobre la morfología superficial.

4. PROCESO DE FABRICACIÓN DE ESPUMAS.

En la primera fase del proceso se seleccionaron los materiales con los cuales se realizaría el estudio: Con base en sugerencias del personal de Expancel se utilizaron las referencias mencionadas en el numeral 3.1.2, éstas tendrían las mayores posibilidades de presentar los mejores resultados, ya que sus características técnicas los hacen, por decirlo de alguna manera, idóneos para el proceso.

4.1 MÁQUINA.

Todas las muestras fueron fabricadas en las instalaciones de Rotoplast S.A. Para ello se utilizó una máquina norteamericana de tipo carrusel (turret) de tres brazos rotatorios, los cuales se ubican en cada una de las fases del proceso: preparación y cargado del molde, quemado y enfriamiento.

4.2 MOLDE.

Para la elaboración de las muestras y los ensayos de espumado se utilizó un molde de acero con forma cúbica de 150x150x150 mm, tal como el que se muestra en la Figura 1. La parte superior del molde presenta una sección cilíndrica de 50 mm de diámetro y 30 mm de altura. Dicha superficie de la pieza fue desechada, ya que sólo era de interés para la investigación aquellas caras totalmente planas.

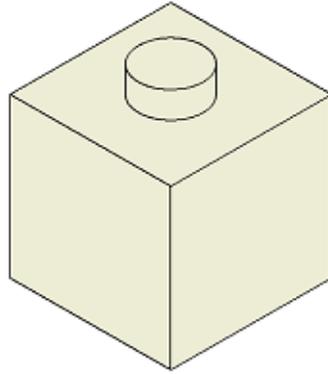


Figura 1: Geometría fabricada en la primera serie de ensayos. Fuente: Los autores.

De las cinco superficies planas de cada una de las piezas fabricadas se extrajeron probetas para los ensayos propuestos por la NTC 1397; en cada una de las caras se marcaron, utilizando los instrumentos de medida adecuados, las formas de las probetas que fueron posteriormente extraídas y ensayadas bajo condiciones controladas.

5. FABRICACIÓN DE LAS MUESTRAS

Antes de fabricar cualquier elemento espumado, se fabricó un cubo con PE sólido con el molde ilustrado en la Figura 1, para tener un patrón de comparación con los cubos espumados.

Este ensayo fue fabricado bajo los siguientes parámetros:

Tabla 3. Parámetros de fabricación de la pieza comparativa en PEMD. Fuente: Los autores.

Polietileno (g)	800
Temperatura de quemado (°C)	304,44
Tiempo de quemado (minutos)	11
Tiempo de enfriamiento (Aire – agua – aire) (minutos)	7 – 3 – 2

Siendo “quemado” el término utilizado en la empresa donde se fabricaron las muestras para nombrar el proceso de conformación de las piezas dentro del horno.

Teniendo la pieza de control ya fabricada se prosiguió con la elaboración de las piezas espumadas. El objetivo de estos ensayos fue realizar una caracterización del espumante y definir los parámetros ideales de procesamiento y determinar cuál de las referencias es más viable para el proceso. Para ello se realizó el siguiente procedimiento:

Se propusieron tres concentraciones diferentes para cada uno de los agentes espumantes, es decir, con cada una de las tres referencias de Expancel se fabricaron tres piezas iniciales con el fin de evaluar cualitativamente los efectos del

espumante en las muestras. Para dichos ensayos se utilizaron entonces concentraciones de espumante equivalentes al 1%, 1.5% y 2% del peso total de la pieza (relación peso/peso). Estos porcentajes fueron seleccionados teniendo en cuenta las recomendaciones del proveedor y la relación de volumen a alcanzar.

5.1 ENSAYOS PRELIMINARES.

Estos ensayos se realizaron con la finalidad de conocer la sensibilidad térmica que presenta el Expancel, al ser adicionado al PEMD, a la temperatura (T°) de quemado. Los parámetros de fabricación de este ensayo fueron los mismos de la pieza de PEMD (tabla 3)

La primera fase de ensayos culminó con resultados defectuosos; aparentemente las piezas estuvieron demasiado tiempo (11 minutos) expuestas a las altas temperaturas del horno lo que causó problemas de espumado, porosidades, degradación del espumante y acabados superficiales de baja calidad.

Por motivos prácticos solamente se adjuntan tres fotografías (ver figura 2) de las muestras realizadas, pero en términos generales los resultados fueron muy similares en los otros especímenes.



Figura 2: Resultado del primer ciclo de ensayos preliminares de rotomoldeo con Expancel; de izquierda a derecha; PE + 909 DU 80 1,5%, PE + 950 DU 80 1,5%, PE + 093 DU 120 1,5%.

Fuente: Los autores.

Basados en los resultados se determinó que el causante del deterioro en la superficie exterior de las muestras es el alto gradiente de temperatura que se presenta entre la cara interna del molde y la primera capa de material rotomoldeado (piel): El material entra al horno, que se encuentra a una temperatura constante de 304,4°C. Al calentarse tan rápidamente, las esferas espumantes se degradan, generando así coloraciones amarillentas en las piezas y permitiendo la formación de poros y cúmulos de aire que comprometen las propiedades mecánicas y superficiales de las piezas.

5.2 MODIFICACIONES AL PROCESO DE ROTOMOLDEO PARA FABRICAR MATERIAL ESPUMADO.

Teniendo en cuenta los resultados y las conclusiones preliminares obtenidas a partir del primer ensayo se modificaron los parámetros de la prueba como se muestra en la tabla 4:

Tabla 4. Parámetros de fabricación de las piezas correspondientes a los ensayos 1 y 2. Fuente: Los autores.

	Ensayo 1	Ensayo 2
Peso (PE + Expancel) (g)	800	800
Temperatura de quemado (°C)	304,44	304,44
Tiempo de quemado (minutos)	9	7
Tiempo de enfriamiento (Aire – agua – aire) (minutos)	7 – 3 – 2	7 – 3 – 2

Además de reducir el tiempo de curado en el horno se sugirió un cambio en el proceso productivo: el molde (con el material en su interior) no se ingresó al horno

cuando este se encontraba a 304,44 °C. En cambio, el molde se introdujo al horno de la máquina apagado. La temperatura se incrementó gradualmente hasta alcanzar los 304,44°C, con esto se buscaba reducir el gradiente de temperatura que se asume era el principal responsable de la degradación de las piezas.



Figura 3: Resultado de las muestras obtenidas en el ensayo 1. Fuente: Los autores.

Se lograron reducir las porosidades tanto en la cara externa de las muestras como en el interior. Sin embargo, se seguían presentando coloraciones amarillentas, lo que indudablemente comprometía la calidad visual del producto. Por ello se decidió realizar un cambio en el tiempo de quemado.



Figura 4: Resultado de las muestras obtenidas en el ensayo 2. Fuente: Los autores.

Este ensayo productivo (ensayo 2) fue el que presentó mejores resultados: El espumado fue similar al de los casos anteriores, pero el acabado superficial fue muy superior y se redujeron sustancialmente la cantidad de poros y cúmulos de aire.

5.3 RESULTADOS PRELIMINARES.

- El tiempo ideal de quemado de las piezas para los ensayos fue de siete (7) minutos, siguiendo la metodología utilizada en los ensayos anteriores.
- Aunque en el segundo y tercer ensayo las porosidades se redujeron mucho y los espesores fueron más constantes, no fue posible obtener piezas regulares y superficialmente aceptables cuando se utilizaron concentraciones del 2% del espumante. En estos casos se espumó el material en exceso, lo que causó deformidades en las piezas. Por ello se decidió no seguir utilizando los espumantes en concentraciones del 2% del peso de la muestra.
- A pesar de las mejoras en las últimas muestras, no fue posible obtener resultados uniformes en los ensayos realizados con la referencia 093 DU 120. Dado que los mejores resultados se obtuvieron con las otras dos referencias se decidió eliminar la primera y hacer especial énfasis en las otras dos.

Con el agente espumante 909 DU 80 (fue este el que mejores resultados presentó) se decidieron realizar muestras a una concentración de 0,55%, ya que por recomendación de la empresa fabricante del agente, se pueden obtener espesores de pared y reducciones de densidad aceptables, de manera más viable económicamente.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Para cada una de las pruebas mecánicas y físicas realizadas se utilizaron probetas con las especificaciones sugeridas en la norma NTC 1397. En el presente informe se darán detalles de cada una de ellas en los puntos correspondientes a cada ensayo.

6.1 DENSIDAD.

Para determinar la densidad de las probetas se utilizó el densímetro de marca METTLER TOLEDO del laboratorio de materiales de la universidad EAFIT (ver figura 5), la prueba se realizó a condiciones ambientales controladas.



Figura 5: Densímetro METTLER TOLEDO, propiedad del laboratorio de materiales de la universidad EAFIT, utilizado para la medición de densidad de las muestras. Fuente: Los autores.

Las probetas a medir se extrajeron utilizando una broca sierra de 1", cortando muestras circulares iguales de cada una de las caras de las piezas fabricadas con el material espumado. Se pesaron en la parte superior del densímetro, obteniendo

entonces un valor denominado "A". Dentro del equipo se dispuso un recipiente con 300 cm³ de agua destilada, en el cual se introdujeron una a una las muestras con el propósito de obtener la masa de cada una de ellas dentro del agua, obteniendo un valor numérico denominado "B".

Se realizaron mediciones para tres probetas de cada una de las piezas elaboradas, posteriormente se realizaron los cálculos utilizando la ecuación presentada en el numeral 3.3.1 y se obtuvieron los resultados presentados en la Figura 6.

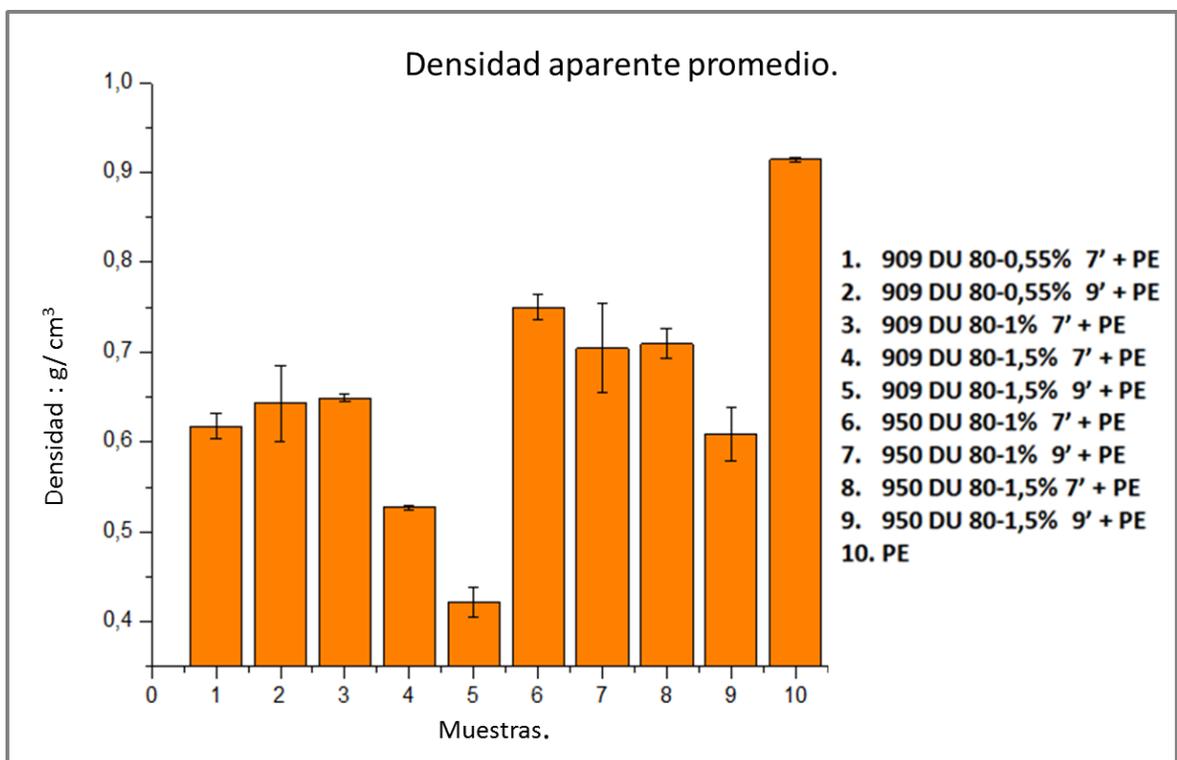


Figura 6: Densidad aparente promedio. Fuente: Los autores.

Observando la tendencia de la gráfica, se determinó que a medida que aumenta el porcentaje del agente espumante en las muestras la densidad disminuye.

Se puede además observar que las muestras fabricadas con PE + 909 DU 80 obtuvieron índices menores que las piezas fabricadas con PE + 950 DU 80. Comparadas con el PE sólido.

6.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

La prueba fue realizada bajo los parámetros propuestos en la norma NTC 1397.

Fue realizada bajo las siguientes condiciones:

Velocidad de deformación: 2 MPa por segundo.

Porcentaje de compresión: 50%.

Para realizar las pruebas de compresión en las muestras seleccionadas se utilizó la máquina universal SCHENCK TREBEL del laboratorio de materiales de la universidad EAFIT (ver figura 7), la cual cuenta con un sistema de platos paralelos; uno estático y otro móvil.

Para los ensayos fueron necesarias tres probetas de 50mm x 50mm de cada una de las diez (10) piezas realizadas.



Figura 7: Equipo utilizado y montaje de la prueba de compresión. Fuente: El autor.

Los resultados de este ensayo se enuncian en las figuras 8, 9 y 10 correspondientes a las gráficas de esfuerzo vs deformación, resistencia a la compresión y absorción de energía respectivamente.

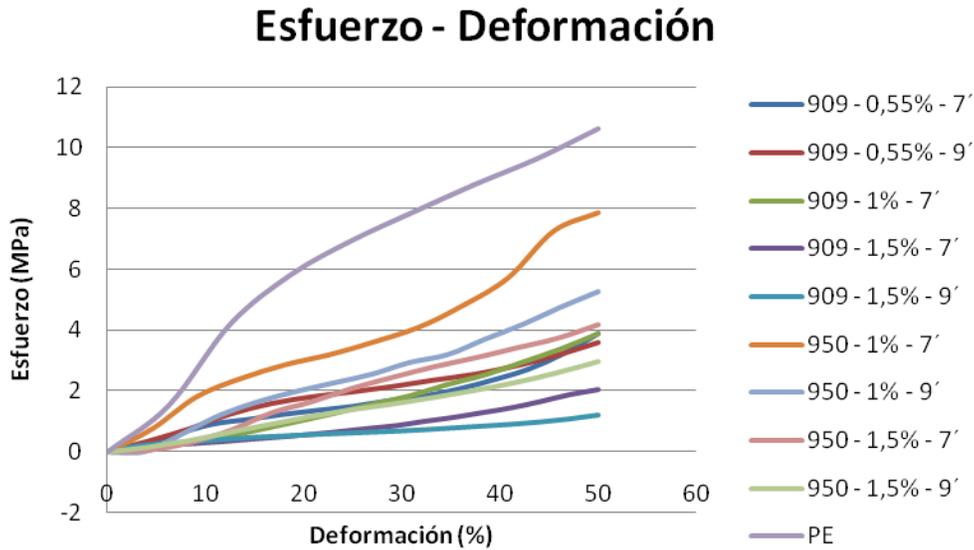


Figura 8: Esfuerzo – Deformación del ensayo de compresión. Fuente: Los autores.

El comportamiento de las probetas fabricadas con las diferentes mezclas de polietileno (PEMD) y Expancel fue muy similar. Todas las muestras presentaron la misma tendencia de comportamiento cuando fueron sometidas al esfuerzo de compresión, sin embargo, dependiendo del tipo y de la cantidad de espumante la resistencia fue mayor o menor. Las probetas fabricadas con mayor cantidad de espumante resistieron menos que aquellas cuyo porcentaje de concentración era inferior al 1% en relación al peso total de la pieza. Los especímenes que mejor desempeño presentaron en esta prueba fueron aquellos fabricados con Expancel 950 DU 80, sin embargo, su resistencia fue menor comparada con los fabricados únicamente con polietileno (PEMD).

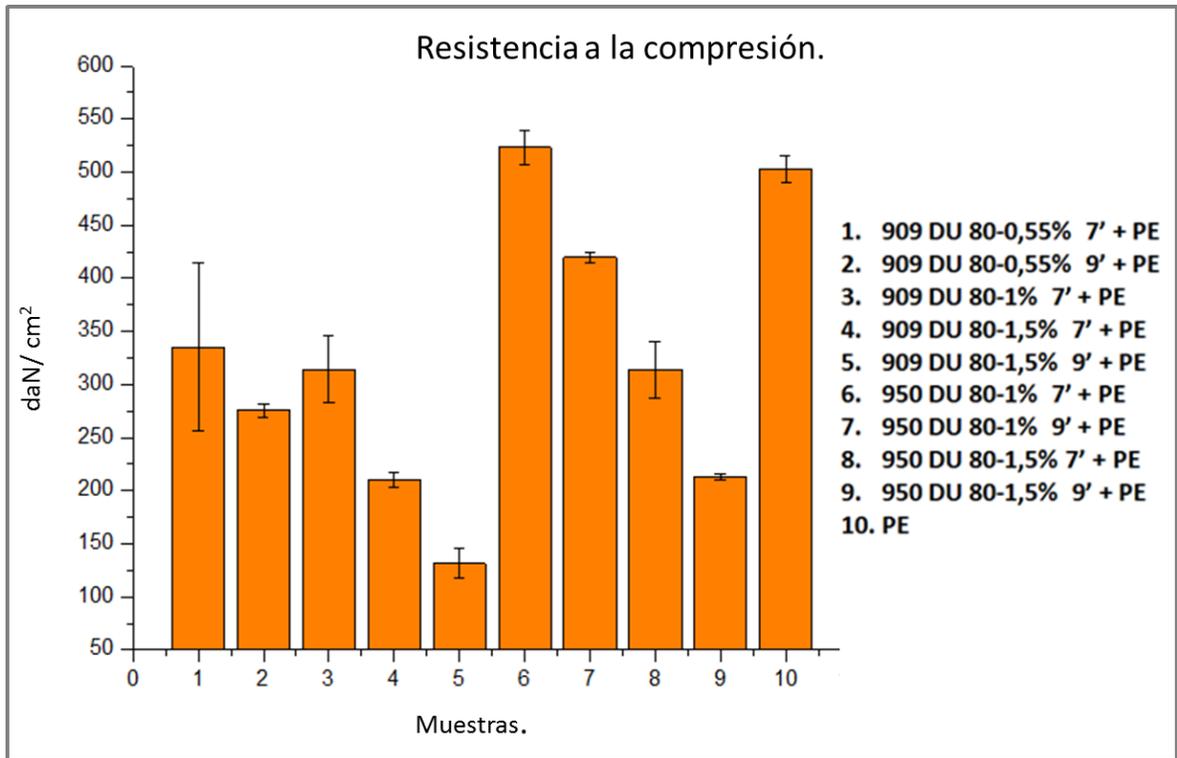


Figura 9: Resistencia a la compresión. Fuente: Los autores.

La gráfica de resistencia a la compresión (figura 9) fue calculada utilizando la ecuación presentada en el numeral 3.3.2. Esta gráfica permitió determinar que las piezas fabricadas con la referencia 950 DU 80 son, en gran medida, más resistentes a los esfuerzos de compresión que aquellas que fueron fabricadas con 909 DU 80. De igual manera se pudo determinar que a mayor cantidad de material espumante la resistencia decrece de manera evidente.

Utilizando la gráfica de esfuerzo y deformación del ensayo de compresión se calculó el área bajo la curva correspondiente a cada una de las probetas ensayadas. Esta área se puede denominar como la energía absorbida por la pieza durante el ensayo, utilizando estos valores se realizó una gráfica comparativa de absorción de energía (ver figura 10).

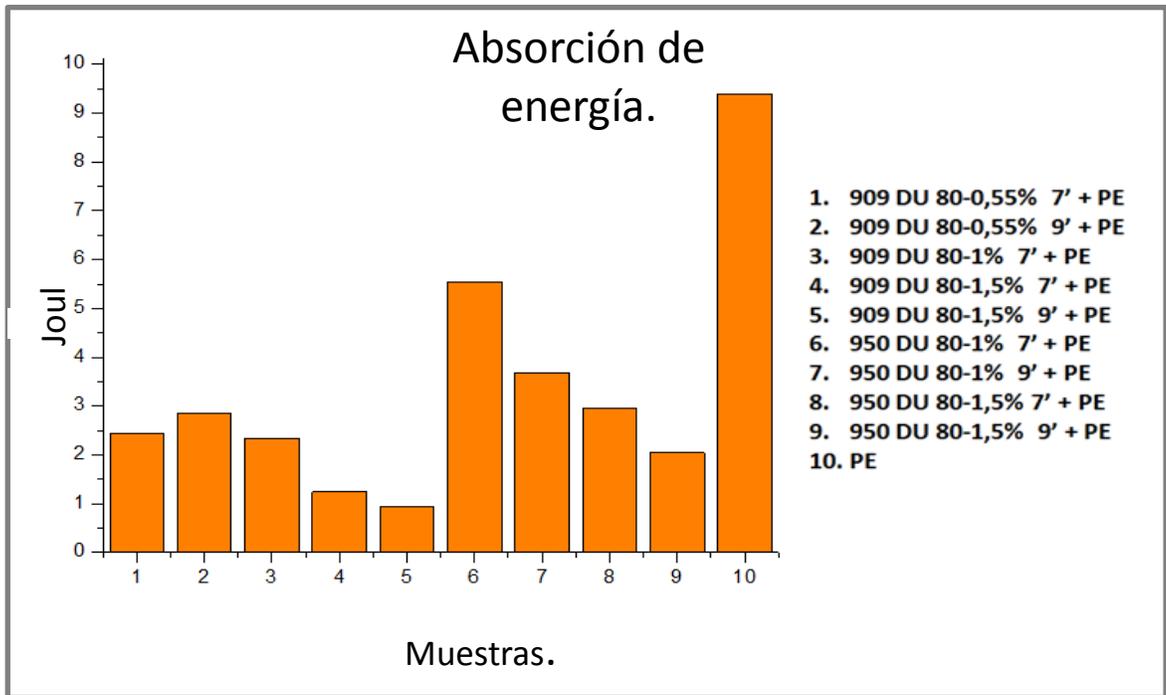


Figura 10: Absorción de energía en el ensayo de compresión. Fuente: Los autores.

Conservando la tendencia de los resultados anteriores, la gráfica de absorción de energía permitió evidenciar la capacidad de absorción que tuvieron las muestras fabricadas únicamente con polietileno (PEMD) y como decrece esta a medida que se incorpora material espumante. Así mismo, se determinó que las muestras fabricadas con 950 DU 80 absorben mayor cantidad de energía que las fabricadas con 909 DU 80 pero menos que las de polietileno.

6.3 FLEXIÓN A TRES PUNTOS.

La prueba fue realizada bajo los parámetros propuestos en la norma NTC 1397.

Para realizar las pruebas de compresión en las muestras seleccionadas se utilizó la máquina universal INSTROM del laboratorio de materiales de la universidad EAFIT.

Para los ensayos fueron necesarias cinco probetas de 25mm x 120mm de cada una de las diez (10) piezas realizadas.

Los puntos de apoyo entre la probeta y la máquina se encontraban separados por una distancia de 100mm. (ver figura 11).

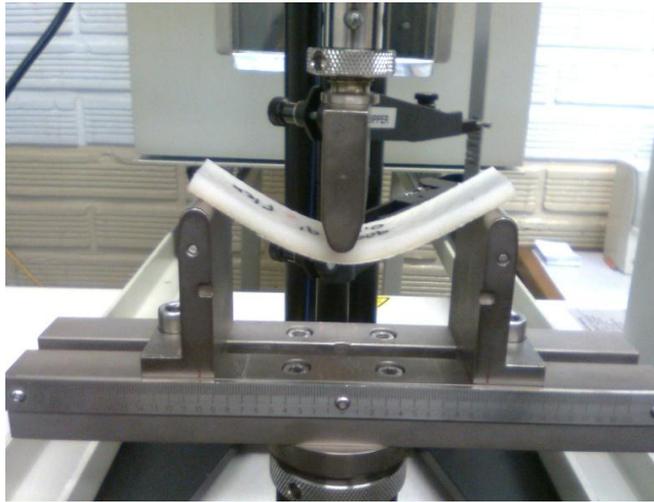


Figura 11: Punto máximo de deformación (20mm) de una probeta fabricada con PE + 909 al 0,55% y quemada en horno por 7 minutos. Fuente: Los autores.

Utilizando los datos arrojados por la máquina universal se realizó una gráfica de esfuerzo – deformación en la que se relacionan todas las probetas ensayadas (ver figura 12).

Esfuerzo - Deformación

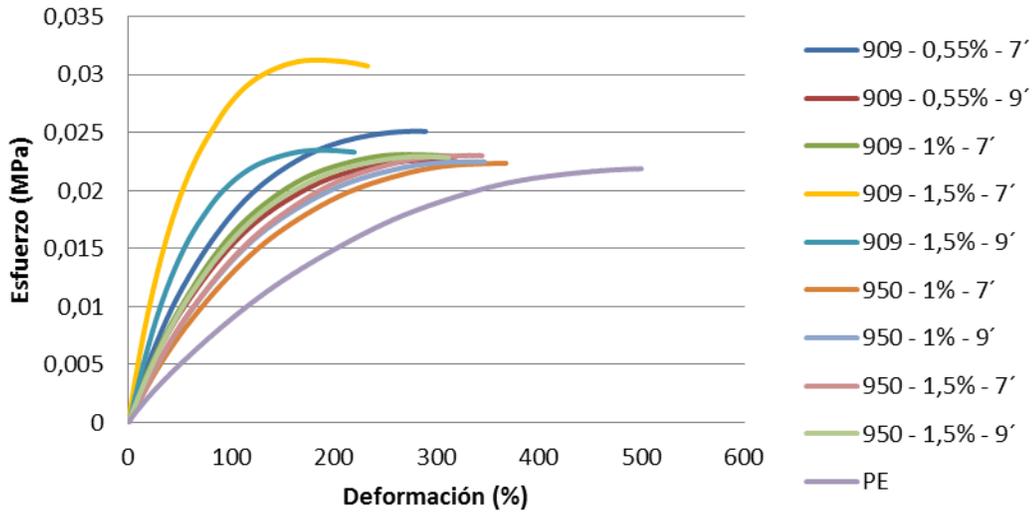


Figura 12: Esfuerzo – Deformación de las probetas ensayadas a flexión. Fuente: Los autores.

Los valores de resistencia obtenidos para cada una de las muestras, calculados con las ecuaciones presentadas en el numeral 3.3.3, se presentan en la Figura 13.

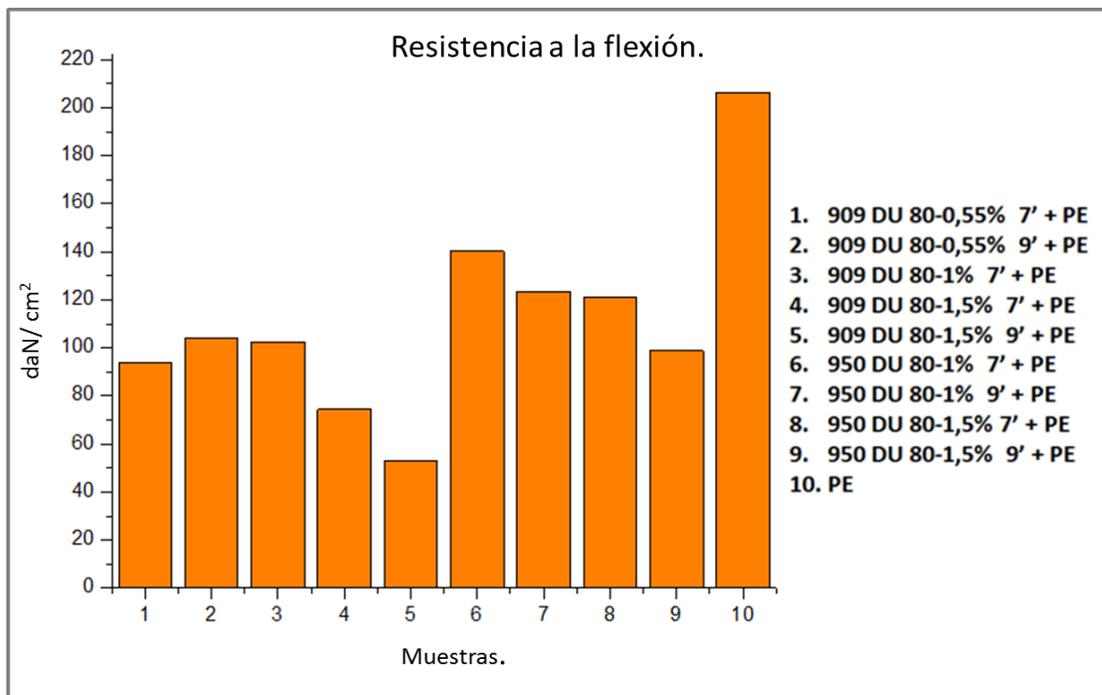


Figura 13: Resistencia a la flexión. Fuente: Los autores.

Basándose en esta gráfica se puede observar que a medida que se adicionan mayores cantidades del agente espumante la resistencia a la flexión disminuye. Los mejores resultados en la prueba de flexión corresponden a las muestras fabricadas con la referencia 950 DU 80.

El fenómeno es constante para ambos tipos de espumas, ya que en los dos grupos analizados el mayor índice de resistencia lo tienen las probetas con menor cantidad de espumante. Este valor decrece a medida que aumenta la cantidad de microesferas en la estructura de las muestras.

Es evidente que el polietileno (sin el agente espumante) presenta mayor resistencia a los esfuerzos de flexión.

6.4 ABSORCIÓN DE AGUA.

La prueba fue realizada bajo los parámetros propuestos en la NTC 1397.

Las mediciones se realizaron en el laboratorio de materiales de la Universidad EAFIT. Para ello fue necesaria la utilización de una balanza analítica METLER TOLEDO.

La diferencia entre los valores finales e iniciales tomados utilizando la balanza analítica fue la cantidad de agua que ingresó en las muestras, estos resultados se ingresaron a la gráfica correspondiente al ensayo de absorción de agua denominada figura 14.

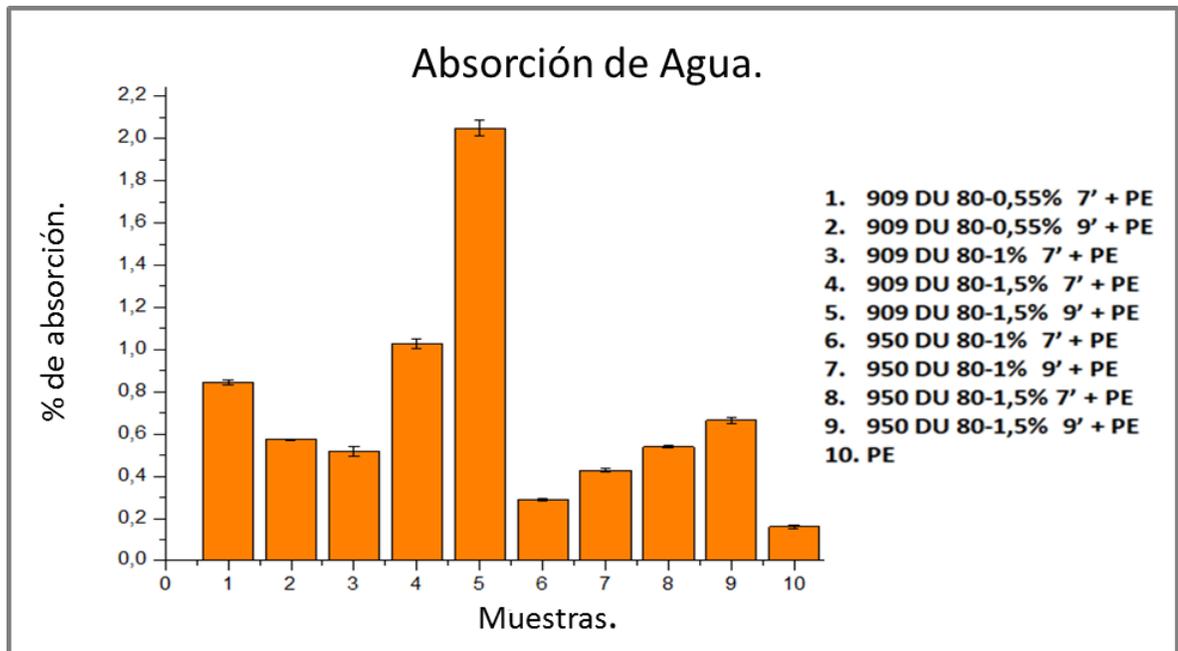


Figura 14: Absorción de agua. Fuente: Los autores.

Es evidente que, a mayor proporción de espumante mayor absorción de agua presentan las probetas. Esto se debe a que, al tener mayor volumen hay mas superficie de contacto en la que pueden alojarse las partículas de agua, sin embargo, la absorción es relativamente baja, ya que el polietileno (PEMD) es impermeable y el Expancel no genera porosidades. Las muestras fabricadas con 950 DU 80 absorbieron menor cantidad de agua que las fabricadas con 909 DU 80, por otro lado, el menor índice de absorción lo presentaron los especímenes fabricados únicamente con polietileno (PEMD), estos resultados pueden atribuirse a los diferentes espesores de las muestras, las fabricadas con 909 DU 80 presentan, proporcionalmente espesores mayores a las fabricadas con la otra referencia, motivo que permite que se acomoden pequeñas partículas de agua en las secciones transversales de las muestras. Los índices de absorción son relativamente bajos en la mayoría de las muestras.

6.5 MORFOLOGÍA DE LAS ESPUMAS.

Para determinar la manera en que se formaron las estructuras celulares con las microesferas de Expancel y el polietileno (PEMD), las muestras extraídas de las piezas fabricadas fueron llevadas a un microscopio electrónico de barrido (SEM). Se realizaron microfotografías de cada una de las muestras. La primera con un aumento de 25X y la segunda de 100X.

En la Figura 15 puede observarse como a medida que el porcentaje de espumante incrementa se forman mayor número de microesferas. Además, se puede establecer que el crecimiento de estas es homogéneo y constante en los tres casos, es decir, el crecimiento de las esferas es independiente de la cantidad que exista del agente espumante.

En las microfotografías se puede observar una buena dispersión de las microesferas durante el proceso.

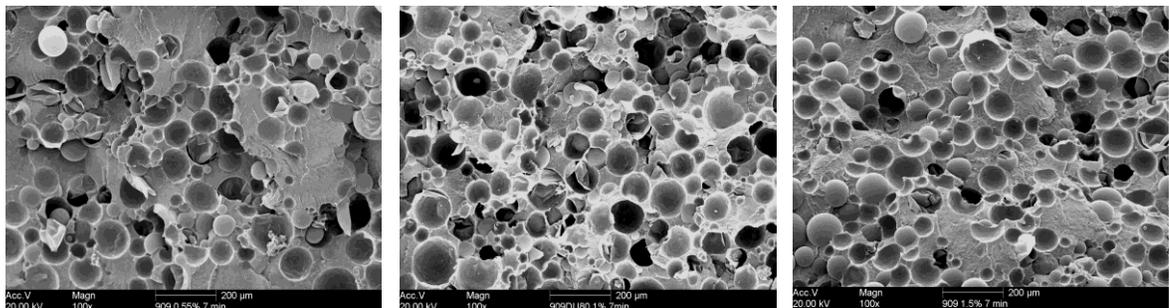


Figura 15: De izquierda a derecha, fotografías SEM de la muestra fabricada con PE + 909 DU80 al 0,55%, PE + 909 DU80 al 1% y PE + 909 DU80 al 1,5% respectivamente. Fuente: Los autores.

7. FABRICACIÓN DE PROTOTIPOS.

Siguiendo con el desarrollo del proyecto se fabricaron una serie de prototipos aplicando los principios productivos para el Expancel tipo 909 DU 80 al 0,55% - mejores acabados superficiales, espesores de pared aceptable y aparente propuesta económicamente viable.

7.1 PROTOTIPO 1: TRAMPA DE GRASAS.

La pieza fabricada en el primer ensayo productivo (ver figura 16) presentó condiciones deficientes para un producto comercial:

- Espesores de pared irregulares e inconstantes.
- Porosidad excesiva en la superficie externa del producto.
- Exceso y deficiencia de zonas de espumado específicas.
- Superficie amarillenta que sugiere altas T° de la pieza.

Los resultados en esta pieza fueron muy similares a los obtenidos en los ensayos preliminares. Estos defectos pueden atribuirse a las condiciones propias del molde utilizado, ya que, este fue fabricado utilizando láminas de acero. El bajo espesor de estas láminas permite que el calor emitido por el horno caliente de manera acelerada la superficie interna del molde (alto gradiente), alcanzando rápidamente la temperatura de curado del polietileno pero excediendo, en muy poco tiempo, la temperatura máxima de resistencia de las microesferas de Expancel, causando la degradación del espumante, la ruptura de las esferas y por ende la emisión de los gases en ellas contenidos, provocando poros y cambios drásticos en el color y textura de la pieza.



Figura 16: Primer prototipo fabricado; Trampa de grasas. Fuente: Los autores.

Con base en los resultados obtenidos en los primeros ensayos y en la fabricación del primer prototipo se planteó la posibilidad de realizar más ensayos productivos sustituyendo los moldes fabricados con acero por moldes fabricados con aleaciones de aluminio, que, al tener mayores espesores de pared podrían reducir la transferencia de calor acelerada causante de los defectos de las piezas anteriormente fabricadas.

7.2 PROTOTIPO 2: CAMILLA DE RESCATE.

Como se menciona en el numeral anterior, los ensayos en productos reales realizados posteriormente al **PROTOTIPO 1** se efectuaron en moldes de aleaciones de aluminio. En el caso de la camilla de rescate (ver figura 17), no sólo se cambió el material del molde sino que además se trabajó con polietileno

pigmentado, es decir, se utilizó PE + Pigmento amarillo, color con el cual se fabrican dichas camillas.

El propósito de este ensayo, además de verificar si el material del molde era determinante para la adecuada conformación de las piezas, fue evaluar que tanto podría variar el pigmento o color de las piezas cuando se incorpora el agente espumante.



Figura 17: Segundo prototipo fabricado; Camilla de rescate. Fuente: Los autores.

El acabado superficial del **PROTOTIPO 2** fue mucho mejor que el del primero. No obstante se encontraron algunos excesos de material espumado y poros. Se evidenció de manera clara que el material del molde podría ser un factor determinante para la correcta conformación de las piezas cuando se utiliza Expandel, ya que el gradiente de temperatura es menor en los moldes de aluminio que en los de acero.

Los excesos de material espumado y los poros se atribuyeron a posibles problemas de fluidez del material al interior del molde, ya que este era complejo y estrecho, lo que causó problemas de llenado de la totalidad de la cavidad, causando acumulaciones indeseadas de material que terminaron en focos de espuma irregular. Dados estos resultados se sugirió la posibilidad de un tercer ensayo en el cuál la geometría de la pieza, menos compleja, permitiera una mejor distribución del material y por ende mejores acabados.

En cuanto al pigmento se observó una leve decoloración en la pieza, obteniendo un color menos vivo, tono más claro, factor que sería importante evaluar si se diera una estandarización del proceso, ya que indudablemente influiría en la coloración de los productos.

7.3 PROTOTIPO 3: TAPA DE SALADERO.

Para el tercer y último prototipo se utilizó también un molde fabricado en aleación de aluminio, pero con una geometría más simple que la del **PROTOTIPO 2**. Con esto se garantiza mejor distribución de la materia prima al interior del molde.

Se fabricó entonces la tapa de un saladero inteligente (ver figura 18), producto en el cual se introduce la sal para el consumo vacuno.

Las variables del proceso permanecieron constantes y no se utilizaron pigmentos, ya que en el ensayo anterior se evidenció que el color de las piezas puede variar.



Figura 18: Tercer prototipo fabricado; Tapa de saladero inteligente. Fuente: Los autores.

Los acabados superficiales del **PROTOTIPO 3** fueron notablemente mejores que los de las piezas fabricadas anteriormente. Cabe anotar que fue la pieza con mejores características cualitativas fabricada en todo el proceso investigativo.

Del producto pueden resaltarse las siguientes observaciones:

- Acabados lisos y perfectos.
- Porosidad mínima – normal para piezas rotomoldeadas.
- Ningún tipo de coloración como señal de degradación del material.
- Aumento del espesor de pared.
- Ningún rastro de problemas de espumado.
- La pieza quedó estable y correctamente conformada.

Aceptando entonces las bondades y características del **PROTOTIPO 3**, y considerando viable el método productivo utilizado para su fabricación. Se concluyó la fase de fabricación de prototipos, ya que con este se demostró que si se pueden obtener productos rotomoldeados y espumados con Expancel, conservando las propiedades físicas, visuales y estéticas de los productos fabricados.

8. VIABILIDAD ECONÓMICA.

Uno de los principales factores determinantes en la utilización de este tipo de espumantes en el proceso de rotomoldeo es que sea económicamente viable; no tiene sentido utilizar un material adicional, sacrificar algunas propiedades y mejorar otras si los costos de producción se incrementan a tal punto que generen pérdidas en las ventas o sobrecostos productivos.

Si se decidiera fabricar algún producto de manera masiva utilizando este agente espumante sería conveniente realizar un análisis económico que permita determinar si su utilización en el proceso es económicamente viable o no. Para ello se comparó en tres (3) escenarios diferentes los costos y los insumos necesarios para fabricar la tapa del saladero inteligente, correspondiente al **PROTOTIPO 3**. Dicha comparación permitió establecer la viabilidad económica del espumante en el proceso.

En la tabla 5 se enuncian algunos aspectos básicos de los materiales que deben considerarse para determinar los costos de producción de las piezas. La información suministrada en la tabla 5 corresponde a un (1) kg de cada material.

Tabla 5: Productos necesarios para realizar el análisis económico. Fuente: Los autores.

Producto	Cantidad (g)	Precio (COP)	Densidad (g/ cm ³)	Volumen (l)
Polietileno media densidad	1000	3560	0.93	1.07
Expancel DU 909	1000	45250	0.01	100

En la empresa donde se fabricaron los prototipos no se utiliza a nivel productivo ningún tipo de espumante. Las piezas son fabricadas únicamente con polietileno de media densidad (PEMD). En la tabla 6 se enuncia la cantidad de materia prima necesaria, el costo y el volumen de la pieza cuando esta es fabricada bajo los parámetros productivos de la empresa. Este caso fue el referente utilizado para comparar los otros dos posibles escenarios.

Tabla 6: Parámetros de producción de la pieza en condiciones normales. Fuente: Los autores.

Producto	Cantidad necesaria (g)	Costo de la cantidad necesaria (COP)	Volumen (l)
Polietileno media densidad	2400	8544	2,581

En el segundo caso comparativo, se analizó el producto final con los parámetros de fabricación del **PROTOTIPO 3**, es decir, utilizando una concentración de espumante del 0,55% en relación al peso total de la pieza. En la tabla 7 se enuncian los parámetros de fabricación de dicha pieza.

Tabla 7: Parámetros de producción del prototipo conservando el peso de la pieza estándar. Concentración de espumante equivalente al 0,55% del peso total de la pieza. Fuente: Los autores..

Producto	Cantidad necesaria (g)	Costo de la cantidad necesaria (COP)	Volumen (l)
Polietileno media densidad	2386,8	8497,008	2,566
Expancel DU 909 (0,55%)	13,2	597,3	1,32
Total	2400	9094,308	3,886

El segundo estudio evidenció que conservando el peso del producto (2400g) con 13,2 g de Expancel, es decir, el 0,55% del peso total de la pieza, el volumen es mayor al deseado, razón por la cual se calculó la cantidad de polietileno y Expancel necesaria para obtener el volumen estándar.

Para hacerlo se utilizó la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Siendo:

Densidad (ρ)= 2400 g/ 3886 cm³

Densidad (ρ)= 0,618 g/cm³

Volumen Tapa PE: 2,581 l.

Masa (m)= 2581 x 0,618

Masa (m)= 1593 g.

Peso del producto 1593, con 8,762 g de Expancel, el 0,55% de concentración y 1584,238 de polietileno de media densidad.

En el tercer caso comparativo se realizó un estudio con las condiciones ideales de producción. El volumen final de la pieza, incluso con adición de Expancel debe ser 2,581 litros, es decir, el valor hallado en el primer análisis, ya que este es el volumen estándar de esta pieza.

En la tabla 8 se enuncian los parámetros necesarios para calcular la viabilidad económica del tercer escenario conservando el volumen de la pieza, haciendo

variaciones en la cantidad de material utilizado pero guardando la proporción de concentración del 0,55% de espumante en relación al peso total del producto.

Tabla 8: Parámetros de producción del prototipo conservando el volumen de la pieza estándar. Concentración de espumante equivalente al 0,55% del peso total de la pieza. Fuente: Los autores.

Producto	Cantidad necesaria (g)	Costo de la cantidad necesaria (COP)	Volumen (l)
Polietileno media densidad	1584,238	5639,887	1,703
Expancel DU 909 (0,55%)	8,762	396,481	0,876
Total	1593	6036,368	2,579

Partiendo de la diferencia entre el tercer y el primer escenario, teniendo en cuenta la disminución de polietileno y la adición del espumante se evidenció un ahorro equivalente al 29,350% respecto a los costos en materia prima, equivalente a un ahorro de \$2.507,632 COP por unidad. El promedio de producción mensual de este producto es de 500 unidades, lo que equivale a un ahorro anual de \$15'045.792 COP.

9. PROPUESTA DE PROCESO.

En el rotomoldeo, como en la mayoría de los procesos de transformación del plástico, no hay una metodología exacta que aplique para todos los productos, ya que, dependiendo del tamaño de la pieza deberá tener mayor o menor cantidad de materia prima, moldes de distintos materiales, diferentes tiempos de procesamiento y diferentes tipos de enfriamiento.

En este informe se presenta una propuesta de proceso para la pieza fabricada como el **PROTOTIPO 3**, es decir, para la tapa del saladero inteligente, ya que fue este en ensayo que arrojó mejores características superficiales, económicamente viable y que bajo las condiciones de fabricación podría ingresarse al ciclo productivo de la empresa.

En la tabla 9 se presenta la propuesta de proceso desarrollada para la tapa del saladero inteligente.

Tabla 9: Propuesta de proceso para la tapa del saladero. Fuente: Los autores.

Selección de material (g)	Polietileno: 1584,238.
	Expancel: 8,762.
Mezcla de materiales	Los materiales deben ser mezclados perfectamente de manera homogénea, para ello se sugiere el uso de una mezcladora.
Limpieza del molde	Limpiar del molde todas las partículas de polvo y suciedades, aplicar desmoldante. El molde debe ser de aleación de aluminio.
Llenado del molde	Llenar el molde con la mezcla preparada, llenando en lo posible todas las cavidades (buena distribución del material).
Pre calentamiento del horno	Con el horno apagado se ingresa la pieza. A partir de ese momento se calienta gradualmente hasta alcanzar la temperatura indicada. El tiempo de procesamiento (quemado) se cuenta desde que se enciende el horno.
Quemado de piezas en el horno	Máquina: Tipo Turret cerrada, horno de convección. Temperatura: 304,44 °C. Tiempo: 7 minutos.
Enfriamiento	Aire: 7 minutos. Agua: 3 minutos. Aire: 2 minutos.
Extracción del molde	No utilizar barras ni elementos metálicos, al ser una pieza espumada puede dañarse fácilmente.

10. CONCLUSIONES.

Las piezas fabricadas utilizando Expancel deben ser procesadas en moldes de aleación de aluminio y no de láminas de acero.

Los moldes de aluminio tienen mayor espesor, lo que disminuye el gradiente de temperatura entre la superficie interna del molde y la superficie exterior de la pieza (piel). Al presentarse dicha disminución, el calentamiento del molde es más uniforme y no inmediato, lo que permite que el espumante se conforme de manera correcta, sin excesos de calor causantes de la degradación del material. Aunque el aluminio presenta mejores propiedades de conductividad térmica que el acero se asume que el espesor del molde es determinante en la distribución del calor entre el molde y el producto.

Con el fin de obtener productos espumados de buena calidad es necesario modificar el proceso productivo utilizado en la empresa: deben adicionarse etapas previas al proceso y deben realizarse cambios en los tiempos de procesamiento. Antes de ingresar el material al molde debe homogenizarse la mezcla de polietileno (PEMD) con el Expancel. Para ello debe utilizarse una mezcladora.

En la etapa de procesamiento deben disminuirse los tiempos de quemado, ya que la exposición a altas temperaturas por períodos prolongados de tiempo genera cambios irreversibles en los productos, causados por la degradación de las esferas; el tiempo de procesamiento puede variar según la pieza que se fabrique, es decir, dependiendo de la pieza fabricada el tiempo de procesamiento será mayor o menor.

No todas las referencias de Expancel pueden ser utilizadas en el proceso de rotomoldeo. La 093 genera demasiada espuma, lo que compromete la apariencia y la resistencia mecánica de las piezas, razón por la cual fue eliminada de los

ensayos en la primera etapa del proceso de investigación y no se tuvo en cuenta para las pruebas mecánicas ni para la fabricación de los prototipos.

Las muestras fabricadas con polietileno y Expancel indicaron, de manera notable, índices menores de resistencia a la compresión y a la tensión en comparación con las fabricadas únicamente con polietileno, hecho que permite concluir que los productos espumados son relativamente menos resistentes que los fabricados de manera tradicional, factor que condiciona su implementación, ya que limita su uso a productos que no vayan a ser sometidos a grandes esfuerzos.

A mayor porcentaje de espumante, menores las propiedades físicas del material. Es decir, en la medida que la concentración de Expancel aumenta en relación a la cantidad de polietileno, el material se vuelve más frágil y por ende menos resistente a esfuerzos específicos como flexión y compresión.

Las muestras fabricadas con Expancel 950 DU 80 presentaron mejor desempeño en todas las pruebas de resistencia mecánica, sin embargo no se obtuvieron acabados superficiales uniformes en ninguno de los ensayos productivos, por lo que se decidió fabricar los prototipos finales con 909 DU 80, que, aunque presentó menores índices de resistencia mecánica lograron excelentes acabados superficiales. El desempeño en los productos fabricados con las dos referencias de espumante pudo variar debido a la composición interna de las microesferas.

Las muestras fabricadas con polietileno y Expancel presentaron mayor absorción de agua que las fabricadas con polietileno únicamente, sin embargo, este aumento fue relativamente bajo, considerado despreciable y se atribuye a pequeñas gotas adheridas a las superficies externas de las probetas.

Este bajo índice de absorción se debe a que las celdas de Expancel son cerradas, (no se generan poros en la estructura) factor que minimiza el ingreso de agua al interior de la pieza. Esta condición no influye en el comportamiento normal de los

polímeros espumados y su flotabilidad. Igualmente, puede decirse que los productos espumados con Expancel no pierden la impermeabilidad característica del polietileno.

Al realizarse un análisis económico de la propuesta productiva utilizada para fabricar el prototipo final, se estableció que esta es rentable y que constituye un ahorro tanto monetario como de materia prima considerable en el desarrollo de la pieza estándar bajo las demandas normales de producción anual, factores que permiten declarar dicho procedimiento como viable económicamente y que posibilitan su implementación en el ciclo productivo.

Aplicando el proceso productivo sugerido en este informe se logró fabricar una pieza con excelentes acabados superficiales y de buena consistencia, producto que podría cumplir de manera exitosa las funciones para las cuáles fue diseñado. Esta técnica productiva garantizó las óptimas condiciones de la pieza.

11. RECOMENDACIONES.

Utilizar concentraciones de Expancel no mayores al 1% del peso del producto final ya que en mayores cantidades, las piezas tienden a espumarse de manera excesiva, causando defectos superficiales y disminuyendo, en mayor proporción, las propiedades mecánicas del material. Como se menciona en los numerales 8 y 9; viabilidad económica y conclusiones respectivamente, utilizando concentraciones inferiores al 1% se logran ahorros económicos significativos y menores reducciones en las propiedades mecánicas de las piezas.

Expancel puede ser utilizado en adición al polietileno (PEMD) en productos que no serán sometidos a esfuerzos mecánicos altos (saladeros, tapas, materos y elementos decorativos), de alta flotabilidad (boyas), los cuáles se encuentran actualmente en el portafolio de productos de Rotoplast o en futuros desarrollos de productos como aislantes de calor y ruido entre otros.

Seguir el modelo productivo recomendado en caso de implementar el uso del espumante Expancel en el proceso de rotomoldeo, acogiéndose a cada uno de los aspectos planteados en la tabla 9 y asegurándose de cumplir con los requerimientos en ella planteados: correcta concentración entre espumante y polietileno, mezcla homogénea, utilizar moldes de aluminio, ingresar la pieza al horno con este apagado e incrementar gradualmente la temperatura y cumplir estrictamente con los tiempos de procesamiento y enfriamiento.

En caso de implementar el espumante Expancel en el proceso productivo se recomienda utilizar moldes de fundición aluminio o de acero, pero de mayor espesor, ya que se determinó que el espesor del molde es un factor determinante para la correcta conformación de la pieza y de la no degradación del material. En caso de utilizar moldes de acero de mayor espesor sería necesario evaluar

nuevamente los resultados, ya que en este estudio no se realizó ningún ensayo en ningún molde de dichas características.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1]. FLÓREZ, Laura. Creciendo como espuma, nuevas oportunidades de aplicación. En: Revista digital “Plástico”.
- [2]. GROOVER, Mikell. Fundamentos de manufactura moderna, tercera edición.
- [3]. Akzo Nobel. Product specifications for Expancel microspheres, Issue 2009.10.27.
- [4]. Akzo Nobel. Microesferas Expancel en termoplásticos, Boletín técnico número 24.
- [5]. Akzo Nobel. Expancel Microspheres A Technical Presentation, Technical Bulletin No 40.
- [6]. ANDERSSON, Helene, GRISS, Patrick, STEMME, Gorän. Expandable microspheres – surface immobilization techniques. Department of Signals, Sensors and Systems, Microsystem Technology, Royal Institute of Technology, 100 44 Stockholm, Sweden.
- [7]. Tokio, Japón. Gránulos espumados para rotomoldeo. En: Revista digital “Plástico”, El: 23 de marzo de 2010.
- [8]. NAITOVE, Matthews H. New way to rotomold foam/solid PE part, close Up rotomolding, plastics technology, 2006.
- [9] THE PLASTIC PROFESSIONALS, Rotational-molding, multilayered parts, 2003.
- CRAWFORD, R.J. Rotational Moulding of Plastics. The Queen’s University of Belfast, UK.
- Norma Técnica Colombiana – NTC 1397. PLÁSTICOS. ESPUMAS RÍGIDAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO. ENSAYOS.