

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Química

Estudio de la influencia de la formulación química en las propiedades físico-mecánicas de las espumas flexibles de poliuretano producidas por una empresa dedicada a la fabricación de colchones en la ciudad de Cuenca

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico


Autores:

Bryan Joel Reinoso Galora

Michael Rene Reyes Armijos

Tutor:

María Eulalia Vanegas Peña

ORCID:  0000-0003-1976-8346

Cuenca, Ecuador

2023-10-25

Resumen

Esta investigación fue de tipo cuantitativo experimental, y tuvo como objetivo establecer una relación entre los cambios de las formulaciones químicas con las propiedades físico-mecánicas de las espumas flexibles de poliuretano (PUF). Se dispuso de un diseño factorial 2^3 , donde los factores seleccionados fueron: catalizador amínico (AM), catalizador organometálico (OE) y silicona (SI). Los niveles seleccionados fueron la variación de ± 0.2 , ± 0.3 y ± 0.5 , con respecto a la formulación estándar del PUF de densidad de 10 kg/m^3 , donde los experimentos se llevaron a cabo en función de los procedimientos para ensayos de la empresa. A estos experimentos se evaluaron las propiedades físico-mecánicas como la densidad, donde se obtuvo un promedio de $11.32 \text{ kg/m}^3 \pm 0.69 \text{ kg/m}^3$; resiliencia, con un promedio de $27.52 \% \pm 3.28 \%$; dureza B, con un promedio de $186.33 \text{ N} \pm 37.40 \text{ N}$; resistencia a la tracción, con un promedio de $50.19 \text{ kPa} \pm 2.39 \text{ kPa}$; elongación a la rotura, con un promedio de $63.55 \% \pm 11.32 \%$; y comportamiento al fuego, con un promedio de $3.42 \text{ mm/s} \pm 0.20 \text{ mm/s}$. A partir de esto, se observó que a niveles altos de AM y OE mejoraba la densidad y la resistencia a la tracción, y también, se encontró que la interacción de AM y OE afectaba directamente al alargamiento antes de la rotura. La formulación de experimento 5 (P5) fue la mejor porque permitió mantener y mejorar todas las propiedades mencionadas anteriormente, y fue llevada a la prueba industrial para verificar si se mantenían los mismos resultados de propiedades. Por consiguiente, se constató que las variaciones más altas en las propiedades son de $12,81 \%$. Esta formulación condujo a la reducción de la cantidad de AM y SI, y un aumento de la cantidad de OE; por lo que podría presentar una disminución de los costos de producción.

Palabras clave: PUF, catalizadores, polimerización, diseño factorial, prueba industrial



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

This research was of a quantitative experimental type, and its objective was to establish a relationship between changes in chemical formulations and the physical-mechanical properties of flexible polyurethane foams (PUF). A 2^3 factorial design was employed, where the selected factors were amino catalyst (AM), organometallic catalyst (OE), and silicone (SI). The selected levels involved variations of ± 0.2 , ± 0.3 , and ± 0.5 , relative to the standard PUF formulation with a density of 10 kg/m^3 . The experiments were carried out following the company's testing procedures. These experiments included the evaluation of physical-mechanical properties such as density, with an average of $11.32 \text{ kg/m}^3 \pm 0.69 \text{ kg/m}^3$; resilience, with an average of $27.52\% \pm 3.28\%$; hardness B, with an average of $186.33 \text{ N} \pm 37.40 \text{ N}$; tensile strength, with an average of $50.19 \text{ kPa} \pm 2.39 \text{ kPa}$; elongation at break, with an average of $63.55\% \pm 11.32\%$; and fire behavior, with an average of $3.42 \text{ mm/s} \pm 0.20 \text{ mm/s}$. Consequently, it was observed that higher levels of AM and OE improved density and tensile strength, and the interaction of AM and OE directly affected elongation before rupture. The formulation of experiment 5 (P5) proved to be the best, as it allowed for the maintenance and improvement of all the properties mentioned above. It was then subjected to industrial testing to verify whether the same property results were maintained. Consequently, it was found that the highest variations in properties were 12.81%. This formulation led to a reduction in the amount of AM and SI and an increase in the amount of OE, potentially resulting in a reduction in production costs

Keywords: PUF, catalysts, polymerization, factorial design, industrial test



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

Introducción	8
Objetivos	12
Objetivo General	12
Objetivos específicos.....	12
1. Contenido teórico	13
1.1. Poliuretano	13
1.2. Métodos de síntesis.....	14
1.2.1. Método “one shot”	14
1.2.2. Método del prepolímero	14
1.3. Reacciones de síntesis.....	15
1.3.1. Reacción de gelificación o polimerización	15
1.3.2. Reacción de expansión o soplado.....	16
1.4. Espumas de poliuretano	17
1.5. Espumas flexibles de poliuretano	18
1.6. Materia prima	19
1.6.1. Isocianato.....	19
1.6.2. Polioliol	21
1.6.3. Agentes soplantes.....	22
1.6.4. Catalizadores	23
1.6.5. Agentes de actividad superficial	24
1.6.6. Retardantes a la llama	25
1.6.7. Agentes entrecruzantes y extensores de cadena	25
1.7. Propiedades de las espumas de poliuretano	25
1.7.1. Densidad aparente.....	25
1.7.2. Dureza de indentación	26
1.7.3. Resiliencia por bola rebotante	26
1.7.4. Resistencia a la tracción y alargamiento a la rotura	27
1.7.5. Comportamiento al fuego	27

2. Materiales y métodos	29
2.1. Materiales y equipos.....	29
2.2. Métodos.....	31
2.2.1. Levantamiento de información preliminar.....	31
2.2.2. Análisis químico de Polioliol y Diisocianato.....	31
2.2.2.1. Análisis químico del Polioliol.....	31
2.2.2.2. Análisis químico del Diisocianato.....	31
2.2.3. Planteamiento del diseño experimental.....	32
2.2.4. Procedimiento para la fabricación de los PUF.....	34
2.2.5. Determinación de las propiedades mecánicas.....	35
3. Resultados y discusiones	40
3.1. Levantamiento de información.....	40
3.1.1. Manipulación de reactivos.....	40
3.1.2. Manejo de formulaciones.....	41
3.1.3. Control de reacciones.....	42
3.1.4. Análisis químico de polioliol e Isocianato.....	47
3.2. Evaluación de las propiedades mecánicas.....	48
3.3. Análisis estadístico.....	51
3.3.1. Estadística descriptiva.....	51
3.3.2. Análisis de varianza (ANOVA).....	52
3.4.1. Gráfico de superficie de respuesta para la densidad.....	60
3.4.2. Gráfico de superficie de respuesta para la resistencia a la tracción.....	61
3.4.3. Gráfico de superficie de respuesta para el porcentaje de elongación.....	62
3.4.4. Gráfico de superficie de respuesta para el comportamiento al fuego.....	64
3.5. Correlación de variables.....	65
3.6. Corroboración de los experimentos.....	66
3.7. Comprobación en línea de producción.....	68
4. Conclusiones	69
5. Recomendaciones	70
Referencias	71

Índice de figuras

Figura 1. Isómeros del difenilmetano (MDI)	20
Figura 2. Isómeros del diisocianato de tolueno (TDI).....	21
Figura 3. Molde de madera recubierta en su interior de plástico para la realización de los experimentos	30
Figura 4. Dimensiones de la probeta tipo 1A	37
Figura 5. Mediciones de la humedad relativa y la temperatura ambiente dentro del área de producción de la línea discontinua	43
Figura 6. Tendencia del tiempo de reacción y humedad relativa del ambiente en cada lote producido	44
Figura 7. Tendencia del tiempo de reacción en relación a la humedad relativa del ambiente .	45
Figura 8. Diagrama de Pareto estandarizada para la densidad.	53
Figura 9. Diagrama de Pareto estandarizada para la resistencia a la tracción.	55
Figura 10. Diagrama de Pareto estandarizada para el porcentaje de elongación.	57
Figura 12. Gráfico de superficie de respuesta que representa la relación entre el catalizador amínico (AM), el catalizador organometálico (OE) y la densidad de la espuma PU.	61
Figura 13. Gráfico de superficie de respuesta que representa la relación entre el catalizador amínico (AM), el catalizador organometálico (OE) y la resistencia a la tracción de la espuma PU.	62
Figura 14. Gráfico de superficie de respuesta que representa la relación entre el catalizador amínico (AM), el catalizador organometálico (OE) y el porcentaje de elongación de la espuma PU.....	63
Figura 15. Gráfico de superficie de respuesta que representa la relación entre el catalizador amínico (AM), el catalizador organometálico (OE) y la inflamabilidad de la espuma PU.	64
Figura 16. Espumas de poliuretano correspondiente al experimento P5 y P9	67

Índice de tablas

Tabla 1. Características de diferentes poliols usados para obtener espumas de PU	22
Tabla 2. Agentes físicos de expansión más comunes en la producción de PU	23
Tabla 3. Catalizadores más usados en la industria del PU	24
Tabla 4. Equipos de laboratorio para la determinación de las propiedades mecánicas	29
Tabla 5. Diseño experimental general	32
Tabla 6. Diseño experimental	33
Tabla 7. Matriz de experimentos	33
Tabla 8. Formato de reporte para la prueba industrial	39
Tabla 9. Cambios realizados en la formula durante los 34 lotes	41
Tabla 10. Parámetros químicos analizados en los monómeros	47
Tabla 11. Resumen de resultados de las pruebas físico-mecánicas realizadas	49
Tabla 12. Observaciones realizadas a las espumas del diseño experimental	50
Tabla 13. Estadística descriptiva de los experimentos	52
Tabla 14. Análisis de varianza (ANOVA) de la densidad	53
Tabla 15. Análisis de varianza (ANOVA) de la resistencia a la tracción	55
Tabla 16. Análisis de varianza (ANOVA) del porcentaje de elongación	57
Tabla 17. Análisis de varianza (ANOVA) del comportamiento al fuego	59
Tabla 18. Coeficientes de correlación Pearson entre las propiedades mecánicas.	66
Tabla 19. Resultados de las pruebas mecánicas realizadas a los experimentos P5 y P9 con sus respectivas réplicas	68
Tabla 20. Reporte de la prueba industrial aplicando la fórmula del experimento P5.....	68

Introducción

Durante las últimas décadas hemos sido testigos de un asombroso avance en el desarrollo de tecnologías basadas en polímeros, tales como plásticos y fibras sintéticas. Estos avances han encontrado una amplia aplicación en diversos campos, y han revolucionado sectores industriales, como el mobiliario y la industria alimentaria (Sarkar et al., 2022). En la década de los años 30, el doctor Otto Bayer realizó el primer desarrollo de la espuma de poliuretano (PU) como una alternativa innovadora a productos con mayor resistencia a la abrasión, impacto y una amplia gama de propiedades mecánicas. Desde entonces, estos materiales son indispensables en la vida diaria de las personas ya que se encuentran presentes en una gran variedad de productos que se utiliza en la actualidad (Kizilkaya et al., 2023).

La demanda global de los PU sigue en constante crecimiento. En 2021, el mercado de este polímero alcanzó un valor superior a los 50 mil millones de dólares, y se estima que este crecimiento se mantendrá hasta 2027 con una tasa anual del 5%. En el mercado de los plásticos, los productos de PU ocupan actualmente el sexto lugar en términos de importancia, siendo Asia y Norteamérica los principales productores en este sector (Mordor Intelligence, 2022).

En cuanto a la producción local, varios países de Latinoamérica cuentan con empresas dedicadas a la fabricación y comercialización de productos de PU. Brasil, México, Argentina y Colombia son algunos de los principales actores en la región. En el caso específico de Ecuador, también se pueden encontrar empresas destacadas en el sector del PU como: Chaide y Chaide S.A, Productos Paraíso del Ecuador S.A y Resiflex-Duraflex, que son ejemplos de empresas que han demostrado un importante crecimiento económico en los últimos años en el país (Superintendencia de Compañías, Valores y Seguros, 2023).

La espuma flexible de poliuretano (PUF) es un material muy versátil, ya que presenta una amplia variedad de características tanto físicas como mecánicas, que permiten satisfacer una alta gama de requerimientos técnicos. Al ser un polímero poroso permite dar confort, amortiguación y soporte en una gran cantidad de productos de uso masivo y especializado. Su uso más popular recae en las industrias manufactureras como las de calzado, muebles, colchones y automotriz. Además, tiene un uso importante en otras industrias como la de pinturas, recubrimientos y adhesivos, industria automovilística, industria eléctrica y electrónica; en fibras para la industria textil, en la industria biomédica, entre otros (García, 2017; Vargas, 2019).

Una empresa con sede en la ciudad de Cuenca (cuyo nombre no puede ser revelado debido a acuerdos de confidencialidad), se dedica a la producción y comercialización de colchones. Con el objetivo de abastecerse internamente, cuenta con una subdivisión encargada de la

formulación, producción y comercialización de espumas flexibles de poliuretano (PUF). Sin embargo, la empresa también mantiene acuerdos de suministro con clientes externos que producen asientos de vehículos, sillas, sofás y otros productos similares.

Dentro de la empresa, se emplea una nomenclatura precisa para la identificación de cada tipo de espuma, la cual se basa en el valor de densidad expresado en kg/m^3 . Esta característica resulta fundamental, ya que determina el tipo de espuma, sus características, costos, calidad y uso final del producto. En cuanto a la producción, la empresa cuenta con tres líneas de producción, dos de las cuales son continuas y utilizan espumadoras automáticas. Mientras que la tercera línea es discontinua y se caracteriza por el uso de grandes bloques de madera como moldes para el vertido y crecimiento de la espuma.

En el proceso discontinuo, inicia con la recepción de la materia prima en donde no se realiza ningún tipo de control o análisis de calidad de los reactivos. Posteriormente, se cuantifican las cantidades de los reactivos según la formulación específica de cada tipo de espuma que se va a producir. Estos reactivos medidos se vierten en el mezclador, donde se someten a un proceso de homogeneización durante aproximadamente 30 segundos a una velocidad de 400 revoluciones por minuto (rpm). Durante esta etapa, los componentes se mezclan de manera uniforme para lograr una consistencia adecuada.

Posteriormente, la mezcla líquida viscosa se descarga en el molde de madera, lo que permite que el PUF se forme, adquiriendo las propiedades y características deseadas para su posterior uso en la fabricación de colchones y otros productos.

Los encargados de la producción hacen uso de un registro de fórmulas químicas que indican la cantidad de reactivos a utilizar en cada tipo de espuma. Sin embargo, la dosificación de los reactivos puede variar en función del criterio del responsable de la producción. Estas variaciones se realizan teniendo en cuenta factores ambientales como la humedad relativa y la temperatura, así como los requisitos específicos de las propiedades deseadas para cada espuma.

Es importante destacar que estos ajustes se realizan sin contar con ningún documento o procedimiento estandarizado para su control y documentación. La falta de un sistema formalizado dificulta la estandarización de las formulaciones y la trazabilidad de los procesos.

Además, la empresa enfrenta dificultades adicionales debido a la ausencia de un laboratorio de análisis químico interno para evaluar la calidad de los reactivos utilizados y estandarizar las formulaciones químicas. La falta de capacidad para realizar pruebas de calidad y análisis químicos limita la posibilidad de obtener certificaciones de calidad reconocidas, lo que puede afectar la credibilidad y competitividad de la empresa en el mercado.

Recientemente, la empresa ha implementado un laboratorio para evaluar las propiedades físico-mecánicas de los productos fabricados en su planta. Esta medida se ha tomado con el objetivo de obtener certificaciones y mejorar la calidad de los productos. En el laboratorio, se realizan pruebas para analizar propiedades físico-mecánicas como la densidad aparente, resiliencia, fatiga bajo carga constante, deformación remanente, comportamiento al fuego, dureza de indentación, entre otras.

Sin embargo, el departamento de calidad ha reportado la existencia de variaciones en las propiedades físico-mecánicas de las espumas en algunos casos. Estas variaciones han sido acompañadas por un aumento en la generación de desperdicios debido a defectos en los productos. Además, se han recibido constantes solicitudes de los clientes externos para mejorar o cambiar propiedades específicas, como la dureza y la resiliencia.

Estos problemas han generado grandes pérdidas económicas, bajos rendimientos y una alta saturación en el área de molino, donde se reprocesan los desperdicios. La empresa se enfrenta a desafíos para optimizar la calidad de sus productos, reducir los desperdicios y satisfacer las demandas de los clientes en términos de propiedades específicas.

De manera general, los problemas mencionados pueden ser atribuidos a varios factores. Uno de ellos puede ser la falta de control de calidad en la adquisición de los reactivos utilizados en la producción de las espumas PUF. La calidad y consistencia de los reactivos son fundamentales para obtener productos finales consistentes y de alta calidad. Otro factor puede ser el desconocimiento o subestimación del impacto de los factores ambientales en el proceso de producción de las espumas. La humedad relativa, la temperatura y otros factores ambientales pueden influir en las propiedades físicas y mecánicas de las espumas, lo que puede resultar en variaciones no deseadas. Además, la falta de formulaciones químicas estandarizadas y documentadas puede llevar a incertidumbre en los procesos de fabricación de las espumas. La experiencia y el criterio de los técnicos de la empresa pueden haber sido la base para las formulaciones utilizadas, pero la falta de procedimientos de fabricación establecidos y estándares basados en pruebas experimentales previas pueden generar inconsistencias y dificultades para reproducir resultados consistentes.

Dado el crecimiento de la demanda de espumas PUF en diversas industrias a nivel mundial y local, es crucial establecer una producción adecuada basada en formulaciones químicas bien fundamentadas. Esto no solo garantiza la capacidad de satisfacer la demanda, sino que también reduce la generación de desperdicios y mejora la rentabilidad en el largo plazo.

En la empresa, la espuma PUF con la densidad más baja (10 kg/m^3) es la más producida y se utiliza principalmente como recubrimiento entre los componentes internos del colchón y la capa de tela superior del mismo, así como para otros usos. Sin embargo, al finalizar el año 2022, los desperdicios generados por esta espuma ascendieron a aproximadamente 43,000 dólares, y se identificaron varios problemas de formulación como causa de su descarte. Dadas estas circunstancias, se justifica de manera razonable la elección de esta PUF, como objeto de investigación en este trabajo de titulación.

La importancia de este estudio radica en establecer correlaciones entre diferentes formulaciones químicas, variando las cantidades de catalizadores amínicos, catalizadores organometálicos y la silicona, con respecto a propiedades físico-mecánicas como densidad aparente, resistencia a la tracción, alargamiento a la rotura, dureza, comportamiento al fuego y resiliencia. Con base en esta información, se podrá determinar una fórmula adecuada que pueda reemplazar a la formulación original y pueda ser replicada en el área de producción.

Además, se buscará determinar si existe alguna relación entre las condiciones ambientales, como la temperatura y la humedad, y el tiempo de reacción de las espumas. Esto resulta crucial para reducir la generación de desperdicios en la industria y aumentar la eficiencia en la producción de la empresa. En este estudio, se mantendrán en reserva los formulas completas y cualquier tipo de información que puede comprometer el acuerdo de confidencialidad.

Objetivos

Objetivo General

Establecer una relación entre las distintas formulaciones químicas con las propiedades físico-mecánicas de las espumas flexibles de poliuretano.

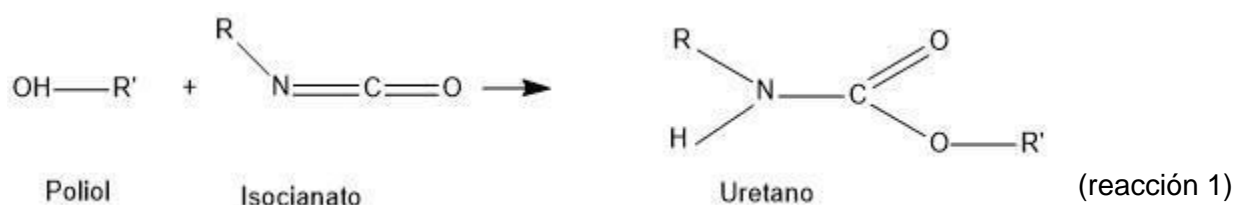
Objetivos específicos

- Levantar información preliminar relacionada al manejo de formulaciones, la manipulación de los reactivos y control de reacción química.
- Determinar las correlaciones entre las espumas de distintas formulaciones con sus propiedades físico-mecánicas.
- Comprobar las correlaciones obtenidas en el proceso de producción.

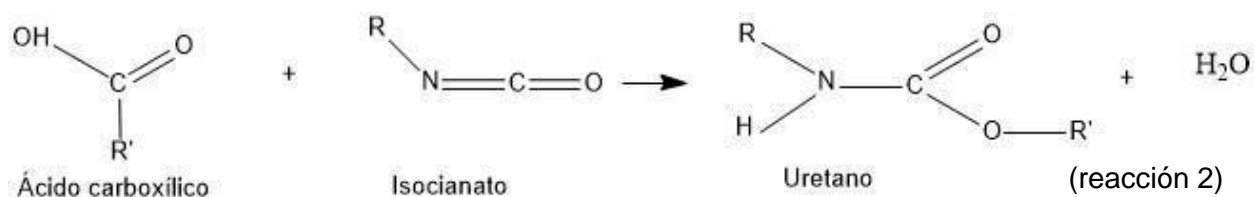
1. Contenido teórico

1.1. Poliuretano

Los poliuretanos (PU) se obtienen por reacciones de adición o condensación de compuestos que contienen grupos hidroxilo, como los polioles, y compuestos que contienen grupos isocianatos, como el diisocianato de tolueno (TDI). Además, los PU pueden contener otras funcionalidades como grupos éster, éter, carbonilos y amino, lo que depende de los reactivos usados en la síntesis y de las condiciones experimentales, a su vez, esto genera cambios en su estructura y, por ende, diferentes propiedades (Lucas-Freile, 2018).



En la reacción 1 se puede observar la interacción entre el grupo hidroxilo presente en el polioliol y el grupo isocianato del TDI, lo que conduce a la creación de enlaces uretano. Este proceso se conoce como polimerización por adición, ya que no genera ningún subproducto adicional durante su desarrollo. Por otro lado, en la reacción 2 se ilustra la formación de enlaces uretano a partir de la interacción entre el grupo carboxilo y el grupo isocianato. Sin embargo, en esta reacción de condensación, se produce la liberación de agua como subproducto.



De igual modo, se requiere la acción de otras sustancias químicas que actúan como adyuvantes o estabilizantes de las reacciones, entre estas tenemos los surfactantes, catalizadores, los agentes de expansión físicos y retardantes de llama, de manera que, todas ellas interactúan de manera específica dentro del sistema reactivo (Vargas, 2019).

1.2. Métodos de síntesis

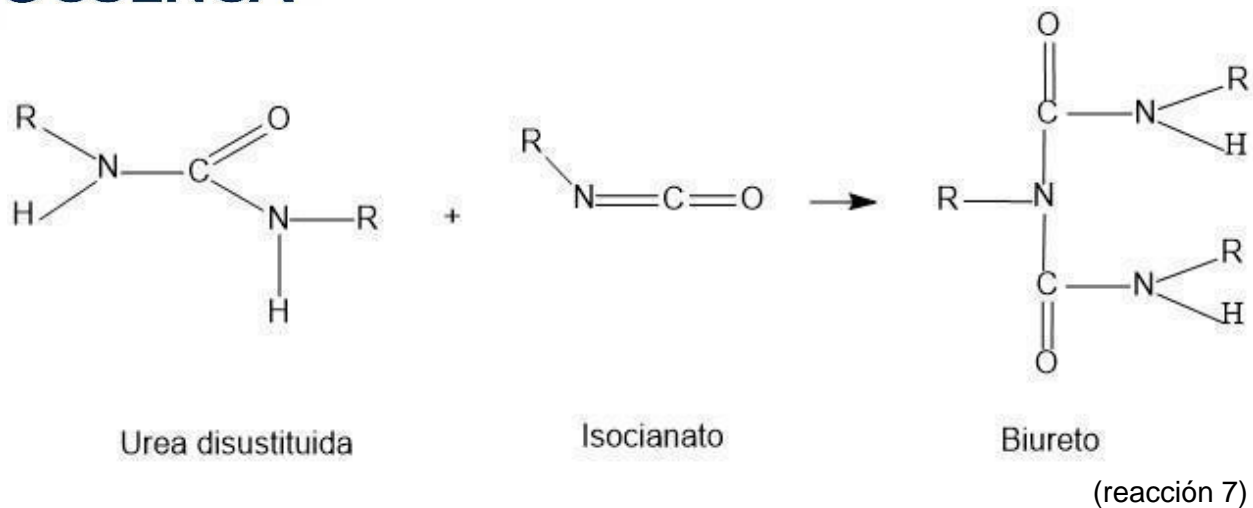
Existen dos métodos principales de síntesis para la producción de los PU, dependiendo del tipo de método empleado, y a su vez, afecta a sus propiedades finales como el grado de entrecruzamiento, flexibilidad, etc. Estos métodos son:

1.2.1. Método “one shot”

Es una técnica de síntesis de PU en la cual todos los reactivos necesarios se mezclan simultáneamente para su producción. Este método implica dos reacciones principales: la primera involucra la reacción entre los grupos isocianato (NCO) y los grupos hidroxilo (OH), lo cual es beneficioso para la producción del PU. Sin embargo, la segunda reacción es el principal inconveniente de este método, ya que los grupos NCO reaccionan con las aminas, lo que reduce la cantidad de grupos NCO disponibles para reaccionar con los grupos OH del polioliol. El uso del método "one-shot" puede resultar en una estructura menos uniforme de los PU, debido a la presencia de poros con diferentes tamaños. Esto está relacionado con las altas temperaturas alcanzadas durante el proceso de producción; las cuales pueden superar los 100°C si la reacción no es controlada con un agente regulador de temperatura. Estas altas temperaturas también conducen a velocidades de reacción más rápidas. (Akindoyo et al., 2016; Lucas-Freile, 2018).

1.2.2. Método del prepolímero

Esta técnica implica la producción previa de un prepolímero antes de la formación del polímero final. En este método, se realiza una reacción química entre un polioliol y un exceso de isocianato para formar el prepolímero, el cual es una cadena polimérica parcialmente formada que contiene grupos NCO en sus extremos. La formación del prepolímero se realiza bajo condiciones controladas, incluyendo una temperatura específica que generalmente oscila entre 13°C y 16°C, así como un tiempo de reacción determinado. Posteriormente, el prepolímero se utiliza como uno de los componentes en el proceso de fabricación del PU final. Durante esta etapa, se lleva a cabo una reacción conocida como poliadición, en la cual los grupos isocianato restantes del prepolímero reaccionan con los grupos hidroxilo de un polioliol adicional, dando lugar a la formación del polímero. Este método es ampliamente empleado en la fabricación de PU debido a su capacidad para controlar y ajustar las propiedades del polímero resultante, tales como la densidad, dureza y flexibilidad. Además, se logra una estructura más uniforme, caracterizada por la presencia de poros con un tamaño relativamente uniforme y pequeño. Esto se debe al hecho de que la reacción se lleva a cabo a temperaturas bajas en comparación con el método "one shot". Sin



Todas las reacciones secundarias producidas al reaccionar los subproductos con el isocianato, son debido a la presencia de un exceso estequiométrico de grupos isocianato, por lo que todos los subproductos generados intervienen directamente como agentes entrecruzantes del sistema reactivo de las espumas flexibles de poliuretano (Vargas, 2019).

1.4. Espumas de poliuretano

La espuma de poliuretano se puede definir como un material polimérico altamente poroso, formado por la difusión del gas a través de la matriz polimérica. Este gas es generado por diversas reacciones producidas durante el proceso de síntesis, el cual puede quedar encapsulada o eliminarse de la matriz polimérica (Lucas-Freile, 2018). Estos polímeros contienen segmentos blandos, dependiendo del tipo de polioliol utilizado, y también, contienen segmentos duros, dependiendo del tipo de isocianato utilizado. Estos segmentos se alteran para controlar sus estructuras y propiedades (Oppon et al., 2015).

De manera general, existen tres tipos principales de espumas PU, los cuales se diferencian por su densidad: espumas flexibles, espumas rígidas y elastómeros. Las espumas flexibles son comúnmente utilizadas en la producción de colchones, tapizados y asientos para la industria automotriz. Estas espumas se caracterizan por tener una estructura de celdas abiertas, ya que durante el proceso de producción se elimina el agente soplante, ya sea físico o químico, de la estructura. Esto da lugar a una densidad que varía en el rango de 10 a 80 kg/m³, debido a que se fabrican con un bajo nivel de entrecruzamiento para mejorar su flexibilidad. Por otro lado, las espumas rígidas se utilizan principalmente en la industria de los aislantes térmicos, equipos de refrigeración, camiones frigoríficos y como material estructural para la industria de la construcción, ya que estas espumas presentan una estructura de celdas cerradas, lo que

significa que el gas permanece dentro de las celdas, lo que resulta en una baja conductividad térmica. A diferencia de las espumas flexibles, las espumas rígidas tienen un alto nivel de entrecruzamiento, lo que le proporciona una alta resistencia a la compresión. La densidad de las espumas rígidas varía entre 30 y 50 kg/m³. Finalmente, los elastómeros son considerados espumas flexibles, pero con densidades más altas, que superan los 100 kg/m³. Entre los elastómeros, se destacan los materiales microcelulares que tienen densidades entre 400 y 800 kg/m³. Estas espumas presentan una estructura de celdas cerradas y son ampliamente utilizadas en la industria automotriz y del calzado. (Ocampo, 2012; Mazo, 2011). Algunas propiedades como la resistencia, dureza y viscoelasticidad del PU dependen de la longitud de cadena de polioliol que reacciona con el isocianato, por ende, haciendo énfasis en las espumas flexibles de PU, se presentan largas cadenas de polioliol para el desarrollo de la flexibilidad requerida en este tipo de espumas (Abdullah, 2023).

1.5. Espumas flexibles de poliuretano

La espuma flexible de poliuretano (PUF) es definida según el Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN) como: “Material celular producido por la reacción de un polioliol con un poliisocianato orgánico, en la presencia de agua y que puede incluir catalizadores, agentes activos de superficie, agentes sopladores, auxiliares, rellenos, plastificantes, colorantes y otros aditivos que no afecten adversamente las propiedades de la espuma” (INEN, 1995).

Los PUF presentan una matriz polimérica de red entrecruzada que contiene dos segmentos, que dependen del tipo de polímero formado. Los segmentos blandos o flexibles se destacan por la presencia de cadenas hidrocarbonadas alifáticas que son formadas por la reacción de un compuesto con grupos hidroxilo y un compuesto con grupos isocianato, generando así enlaces de uretano con macromoléculas en los lados, las cuáles son apolares y aportan flexibilidad al producto (Yuan et al., 2022). Por otro lado, los segmentos duros o rígidos son formados por la reacción de un compuesto con grupos isocianato y un extendedor de cadena, la cual es generalmente agua, generando compuestos con grupos urea y dióxido de carbono, que son moléculas apolares y de bajo peso molecular, la cual contribuye directamente al soporte de la espuma, por su aporte de rigidez al mismo (Lucas-Freile, 2018; Ocampo, 2012). A partir de esta premisa, se indica la existencia de una dependencia directa de la distribución de la proporción de segmentos duros y blandos con las propiedades finales de los PUF.

1.6. Materia prima

1.6.1. Isocianato

Los isocianatos son compuestos que presentan el grupo NCO en su estructura, los cuales son altamente reactivos. Los reactivos utilizados en la síntesis de PU deben contener al menos dos grupos funcionales reactivos, por ende, en la mayoría de estudios se presenta el diisocianato (Taguado, 2020). Debido a las características de este reactivo, su almacenamiento debe realizarse en contenedores sellados herméticamente para evitar el contacto directo con el agua y, no favorecer la generación de urea y dióxido de carbono. Además, no debe alcanzar altas temperaturas, puesto que puede ocurrir un proceso de dimerización, generando sólidos insolubles que afectan al proceso de polimerización del PU (Ocampo, 2012).

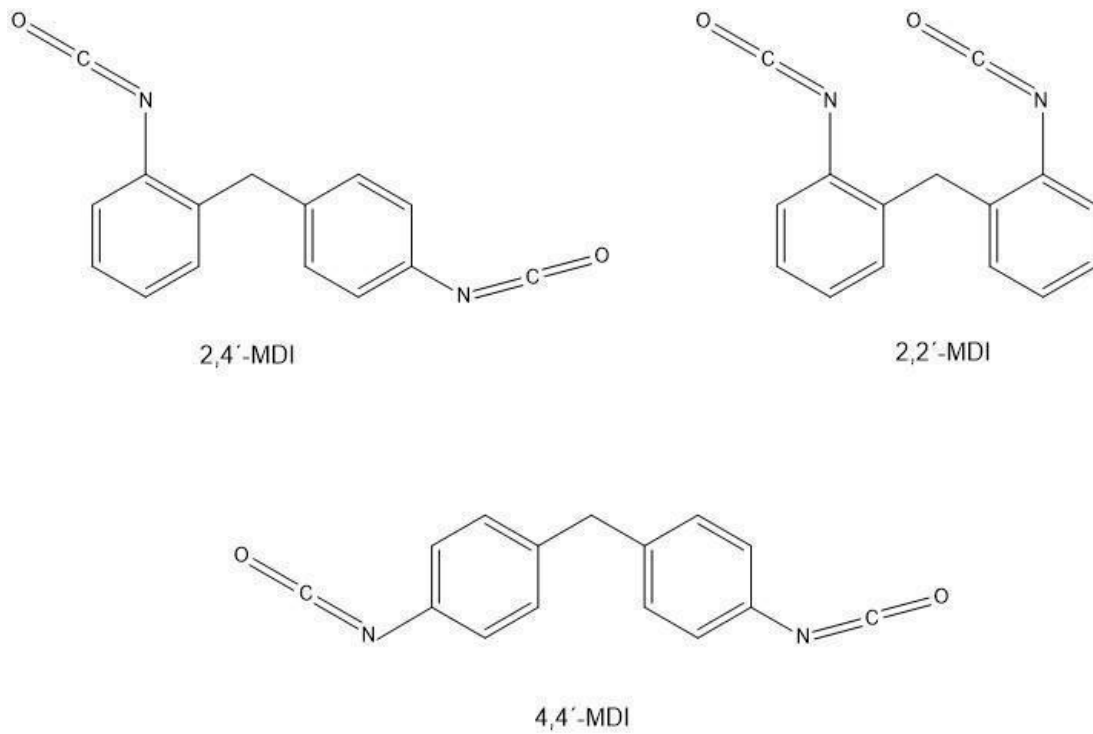
Estos compuestos pueden ser alifáticos y aromáticos, donde los alifáticos son utilizados en la industria de recubrimientos y elastómeros especiales, este tipo de isocianatos son más costosos, sin embargo, resultan en las espumas de PU una mayor estabilidad frente a la radiación UV. Mientras que los aromáticos son los más utilizados en la industria de los PU, específicamente en la producción de espumas y la mayoría de elastómeros. Son muy utilizadas por su alta reactividad con toda la mezcla de reactivos, sin embargo, sufren la oxidación de los dobles enlaces del anillo aromático, y con el tiempo, genera un oscurecimiento y presencia de compuestos tóxicos durante su proceso de utilización y degradación (Taguado, 2020; Amin, 2016). En algunos isocianatos preiniciados o prepolimerizados, el contenido de grupos isocianato puede variar desde un 18 a 35 % de funcionalidad (Porras, 2012).

Los isocianatos más comunes en la producción de espumas de PU son:

- MDI (Diisocianato de difenilmetano): Es una molécula simétrica con dos grupos isocianato de igual reactividad. El isómero más importante es el 4,4'-MDI, la cual puede estar en estado puro, que es utilizado para la producción de espumas flexibles y elastómeros. También, se presenta como un sólido, para la preparación de un prepolímero, que es utilizado en la producción de elastómeros y, crudo, como un líquido negro para la producción de espumas rígidas. Generalmente, su uso no es muy común debido al alto costo que presenta, sin embargo, este reactivo presenta una menor toxicidad y presión de vapor, con respecto al TDI (Sarmiento, 2007; Díaz et al., 2014). Su estructura se presenta en la Figura 1.

Figura 1

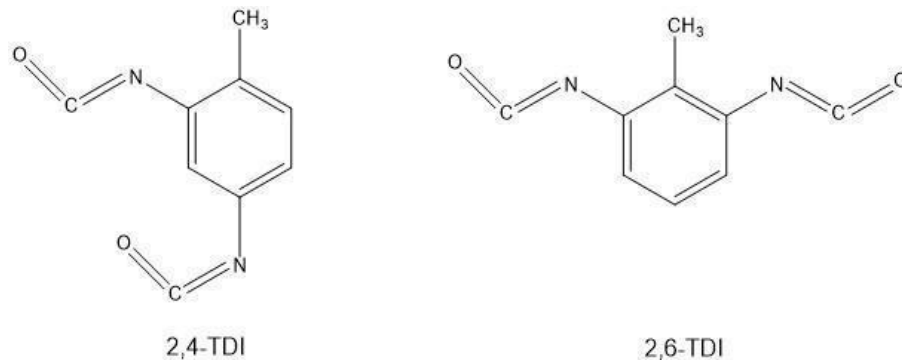
Isómeros del difenilmetano (MDI)



- TDI (Diisocianato de tolueno): Es una molécula asimétrica con dos grupos isocianato de diferente reactividad debido a la posición de los grupos químicos, donde la posición 4 presenta una reactividad cuatro veces mayor que el de la posición 6. Este compuesto presenta dos tipos de isómeros más importantes que son los isómeros 2,4 e isómeros 2,6, los cuales están representados en la Figura 2. Debido a esto, el producto comercial puede presentar diferentes concentraciones de los isómeros, siendo la más común el TDI (80/20), el cual contiene en un 80% de isómero 2,4 y el 20 % de isómero 2,6. El isómero 2,4 es el más reactivo de todos los isómeros, por eso su concentración es alta para favorecer la reacción con los grupos hidroxilos del polioli, y mediante esto evitar la formación de reacciones secundarias. Además, en el mercado pueden presentarse productos comerciales de TDI de concentración 65/35, 90/10 o en estado puro, esto dependerá del campo de utilización, sin embargo, el TDI (80/20) es el más utilizado en los PUF, por su bajo costo (Cáceres, 2018; Pérez, 2015).

Figura 2

Isómeros del diisocianato de tolueno (TDI)



1.6.2. Poliol

Es un compuesto polihidroxiado, es decir, aquella molécula que en su estructura contiene dos o más grupos hidroxilos. Existen dos categorías principales de polioles, el poliol poliéster (-C-O-C) y poliol poliéter (-C-O-C-), donde este último, representa el 90 % del poliol utilizado en la industria del PU (Sarmiento, 2007). Para la caracterización de los polioles se tienen como principales factores al índice de OH, contenido de sólidos, tamaño de partícula y viscosidad, además se pueden incluir la funcionalidad y el peso molecular (Izarra et al., 2021).

La funcionalidad del poliol hace referencia al número de sitios reactivos por molécula, donde se puede presentar los dioles, que son polioles de funcionalidad 2 que se utilizan en la fabricación de elastómeros y revestimientos; los trioles, son polioles de funcionalidad 3 que se utilizan en la fabricación de PUF; tetroles a octoles, son polioles de funcionalidad de 4 a 8 que se utilizan en la fabricación de espumas rígidas (Kobold, 2002).

Según Lucas-Freile (2018), el uso de polioles con menor funcionalidad produce una menor reactividad en las PUF, por lo que no se produce una reacción completa con el isocianato, por ende, indica que estos parámetros influyen de manera determinante en las propiedades finales del producto, esencialmente en su flexibilidad y rigidez. Las características principales se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1

Características de diferentes poliols usados para obtener espumas de PU

Propiedad de poliol	Espumas Flexibles	Espumas rígidas
Peso molecular (g/mol)	1000-6500	150-1600
Funcionalidad	2-3	3-8
Índice OH (mg KOH/g)	28-160	250-1000

Uno de los parámetros más importantes dentro de la producción de PU es el índice de isocianato o *NCO index* (NCO/OH). Este se define como la relación entre la cantidad de grupos isocianato libres (NCO) y la cantidad de grupos hidroxilo (OH) presentes en la mezcla de reacción. Este índice se expresa generalmente en forma de porcentaje o en equivalentes por peso, y es un parámetro fundamental para controlar y ajustar las propiedades finales de los productos de poliuretano, como la dureza, la elasticidad y la resistencia mecánica. Sus valores oscilan comúnmente entre 0.8 a 1.5 (Zhang et al., 2020).

1.6.3. Agentes soplantes

Los agentes soplantes o espumantes son sustancias que producen una estructura celular que da origen al PUF, mediante la liberación de las burbujas de gas. El agente expansor más común es el agua, la cual reacciona con el isocianato formando poliurea y liberando dióxido de carbono, la cual expande la masa reactiva y la transforma en espuma (Mendonça, 2015).

También existen agentes de expansión auxiliares que se utilizan de manera simultánea con el agua, ya que, si solo se mantiene este último reactivo como agente de expansión, provoca problemas en la difusión de las moléculas. Estos agentes son solventes de bajo punto de ebullición que no reaccionan con ningún otro componente de la reacción, sino que utilizan el calor desprendido por las reacciones simultáneas para evaporarse y así, aumentar el volumen de la masa reactiva y generar la espuma (Gómez, 2003). En la Tabla 2 se presenta los agentes más utilizados, siendo el cloruro de metileno el más utilizado.

Tabla 2

Agentes físicos de expansión más comunes en la producción de PU

Nombre Común	Nombre químico y fórmula	Punto de ebullición (°C)
Fluorocarburo-11 (F-11) Refrigerante-11 (R-11)	Triclorofluorometano CCl ₃ F	23.8
Cloruro de metileno	Diclorometano CH ₂ Cl ₂	40
Fluorocarburo-12 (F-12) Refrigerante-12 (R-12)	Triclorofluorometano CCl ₂ F ₂	-29.8

1.6.4. Catalizadores

Los catalizadores son parte fundamental del proceso de producción de las espumas PUF, ya que nos permite ajustar la reactividad de la reacción según las necesidades y condiciones del proceso de producción (Kobold, 2002). Estos catalizadores promueven y controlan las reacciones del isocianato con polioliol (reacción de cremado) y las reacciones del isocianato con agua (reacción de soplado), donde los catalizadores frecuentemente utilizados son las aminas terciarias y los compuestos organometálicos (Porrás, 2012).

- Aminas terciarias

Este tipo de catalizadores tiene como función principal el balanceo y control de la reacción de gelificación, y en menor proporción, la reacción de expansión, aunque esto dependerá del tipo de catalizador comercial utilizado. Dependiendo del producto final a obtener, el tipo y concentración de estos reactivos se pueden seleccionar para que cumplan con el perfil de crecimiento, tiempos de reacción e incluso la superficie exterior de la espuma. Mientras que la dosis se puede ajustar para mejorar el paso del aire y reducir al mínimo las variaciones de densidad (Huaraca, 2018).

- Compuestos organometálicos

Estos derivados orgánicos son considerados catalizadores de gelado porque afectan preferentemente a la reacción de gelificación. Al usar este catalizador en combinación con el catalizador amínico se puede lograr un mejor balanceo de reacción expansión/gelificación. Los catalizadores organometálicos a base de estaño son los más utilizados, y dentro de los cuáles, resalta el octoato de estaño. La dosificación de este catalizador es un punto crítico ya que, por debajo del nivel mínimo el bloque de espuma colapsa o se produce una raja, debido a la

incapacidad de gelificación del sistema induciendo a la excesiva expansión del bloque. A su vez, un ligero incremento de la dosificación ideal causa una densificación, que provoca una mayor compactación de la espuma, debido a que la velocidad de reacción de gelificación es alta con respecto a la velocidad de reacción de expansión (Herrington, 1997; Huaraca, 2018). Debido a la gran importancia de este reactivo, la dosificación debe determinarse experimentalmente para cada formulación

Los catalizadores más usados a nivel industrial se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3

Catalizadores más usados en la industria del PU

Nombre	Características	Nombres comerciales
Octoacto de Estaño	Espumado en bloque.	Jeffcat T9
	Organometálico	Dabco T9
Trietilendiamina	Catalizador en gel, de propósito general	Jeffcat TD-33 ^a
		Dabco 33LV

Fuente: Ocampo (2012).

1.6.5. Agentes de actividad superficial

La función principal de estos agentes, también llamados surfactantes, es mejorar la miscibilidad de los ingredientes o reactivos durante la fase de mezclado. Además, permite regular la estructura de las celdas de la espuma porque su adición regula las dimensiones del aire nucleante y de las burbujas de gas generadas durante la fase de expansión de la espuma. Para las espumas flexibles en bloque se requiere un nivel mínimo de este reactivo para cada formulación, y mediante esto, evitar la presencia de inconformidades en el producto final (Huaraca, 2018).

Actualmente, la mayoría de las industrias del PUF utilizan surfactantes basados en silicona o aceites de silicona, siendo la dimetilsilicona, la más utilizada. Dependiendo de la dosificación de silicona en la masa reactiva influirá directamente en el producto final, ya que una mayor cantidad genera una menor tensión superficial, lo que ayuda a aumentar el número de burbujas de aire introducidas durante la mezcla, y supone la presencia de tamaños de celda más pequeñas, aunque un exceso puede generar espumas compactas con bajas propiedades de carga y compresión. Mientras que, la insuficiencia del reactivo puede provocar la presencia de fisuras, colapso y celdas muy grandes en el bloque de espuma (Pérez, 2015).

1.6.6. Retardantes a la llama

Son reactivos que tienen como función principal modificar la combustión, inhibir la ignición y retardar la reacción dinámica que ocurre al estar en contacto con el fuego, por lo que aumenta su acción retardante a la llama. Así, los productos que contienen estos compuestos en su estructura pueden exhibir propiedades finales diferentes, así como también, alguna influencia en la degradación térmica, ya que en este producto pueden presentarse procesos de combustión del polímero como el calentamiento, pirólisis, propagación de la llama y la velocidad de degradación térmica (Andrade, 2015; Valderrama, 2004).

1.6.7. Agentes entrecruzantes y extensores de cadena

Son compuestos químicos de cadena corta, que poseen un bajo peso molecular. Se pueden definir como precursores del alargamiento de las unidades macromoleculares durante la síntesis de PUF. Los reactivos más utilizados son los glicoles difuncionales y diaminas, por lo que, si este extensor es un diol, estos compuestos reaccionan con los isocianatos generando segmentos de uretano dentro de la matriz polimérica. En cambio, si el extensor es una diamina y reacciona con los isocianatos, se genera la presencia de segmentos de urea dentro de la matriz polimérica. A partir de esto, la introducción de estos compuestos en la mezcla reactiva toma un papel importante en el grado de ordenamiento de la arquitectura final del PUF, la cual a su vez se relaciona con la cristalinidad del mismo. Los agentes más utilizados son el etilenglicol, 1,4-butanodiol, 1,6-hexanodiol, etilendiamina, entre otros (Amin, 2016; Taguado, 2020).

1.7. Propiedades de las espumas de poliuretano

1.7.1. Densidad aparente

La densidad aparente es un factor importante que representa la estabilidad de la espuma de PU. Este se puede usar como un indicador importante con respecto a la comodidad, el apoyo y la durabilidad (Imran et al., 2021). Al cambiar la composición de polioli e isocianato las espumas pueden clasificarse como rígidas o flexibles (Suhailuddin et al., 2022). En nuevas investigaciones, se ha tratado de aumentar la densidad mediante la introducción de cargas inorgánicas como BaSO_4 o CaCO_3 . Estas cargas actúan como agentes nucleantes durante el proceso de formación de la espuma y ayudan en la apertura de las celdas al final del proceso de elevación, provocando un cambio en el tamaño promedio de las celdas de la estructura del PU (Izarra et al., 2021).

1.7.2. Dureza de indentación

Según la NTE INEN-ISO 2439, define a la dureza de indentación como la “Fuerza total requerida para producir, en las condiciones especificadas, una indentación determinada en una probeta de ensayo normalizada”. Es decir, mide la resistencia de las espumas PUF a la deformación bajo una carga específica. Se utiliza un penetrador con geometría y dureza específicas para aplicar una carga controlada sobre la espuma. Este ensayo es importante para evaluar y comparar diferentes espumas de PU en términos de su resistencia, en donde, la densidad, estructura celular y formulación de los materiales pueden afectar los resultados del ensayo (Chen et al., 2018).

Izarra et al., (2021), expone que por el aumento de 1 kg/m^3 de densidad de la espuma implica un aumento de alrededor de $0,1 \text{ kPa}$ en la dureza. Esto podría explicarse por la existencia de poros en las espumas de celda abierta que están conectados entre sí formando una red suave interconectada. Las espumas de celda cerrada no tienen poros interconectados. La resistencia a la compresión es generalmente mayor en las espumas de celda cerrada debido a su estructura. Sin embargo, las espumas de celda cerrada son más compactas, requieren más material y son más caras de fabricar. En este tipo de celdas es posible el aislamiento con la ayuda de un gas. Las espumas de celda cerrada tienen bajos coeficientes de absorción de humedad en comparación con las espumas de estructura de celda abierta (Imran et al., 2021).

1.7.3. Resiliencia por bola rebotante

La resiliencia es una propiedad importante de los PUF que se refiere a su capacidad de recuperar su forma original después de ser sometidos a deformación. Esta propiedad es relevante en diversas aplicaciones donde se requiere resistencia al impacto, absorción de energía y capacidad de rebote (Jia et al., 2022). La resiliencia se mide mediante la prueba de resiliencia o rebote, que implica deformar el material y medir la cantidad de energía recuperada cuando vuelve a su forma original. Un mayor valor de resiliencia indica una mayor capacidad del PUF para recuperar su forma y absorber y devolver energía (Nabipour et al., 2020).

Tener una resiliencia más elevada en los PUF implica una serie de ventajas:

1. Resistencia al impacto: Los PUF con alta resiliencia son capaces de absorber y disipar energía durante impactos, lo que los hace más resistentes a golpes y choques.
2. Amortiguación de vibraciones: La resiliencia permite que los PUF absorban y disipen vibraciones, reduciendo la transmisión de energía y mejorando la comodidad y estabilidad en aplicaciones como colchones, asientos de automóviles o suelas de calzado.

3. Durabilidad: Un PUF con mayor resiliencia tiende a ser más duradero, ya que puede soportar mejor el estrés y la deformación repetida sin perder sus propiedades mecánicas. Es importante destacar que la resiliencia puede estar influenciada por otras propiedades del PUF, como la densidad, la estructura celular, la dureza y la elasticidad. Por ejemplo, una mayor densidad generalmente se correlaciona con una resiliencia más baja, mientras que una estructura celular abierta y una mayor elasticidad pueden aumentar la resiliencia (Yin et al., 2016).

1.7.4. Resistencia a la tracción y alargamiento a la rotura

La resistencia a la rotura se refiere a la capacidad del material para soportar una carga antes de romperse, mientras que el alargamiento antes de la rotura indica la capacidad de deformarse antes de fracturarse. Estas propiedades se evalúan mediante pruebas de tracción donde se aplica una fuerza gradualmente a una muestra hasta su ruptura. Estas propiedades son importantes para comprender la capacidad de carga y la flexibilidad de los PUF en aplicaciones donde se requiere resistencia y capacidad de deformación (Ako & Kennedy, 1989).

Wen et al., (2023) determinaron que espumas de PUR de alta densidad obtenida partir de poliéster e isocianato puede soportar grandes deformaciones en compresión, pero es propenso a la fractura por tracción. La resistencia mecánica de las espumas disminuye al introducirse nanopartículas como los nanotubos porque aumentan la porosidad del mismo. Izarra et al., (2021) afirma que en la introducción de cargas inorgánicas con el objetivo de aumentar la densidad en un 5% se obtiene una disminución del 62% de la resistencia a la tracción y un 76% menos de elongación.

1.7.5. Comportamiento al fuego

El comportamiento al fuego tiene como objetivo comprender y analizar la respuesta de los PUF frente al fuego, incluyendo su inflamabilidad, propagación de llama, emisión de humos y gases tóxicos, generación de calor y resistencia al fuego. En un estudio realizado por Wang et al., (2018), se encontró que las diferentes densidades de PU tienen un impacto significativo en las propiedades de la combustión como el tiempo de establecimiento, la velocidad de combustión y la temperatura alcanzada durante el proceso de combustión. De la misma forma, Lefebvre et al., (2004), plantea que la inflamabilidad de los PUF depende en gran medida de sus propiedades físicas, como la densidad, el contenido de segmentos duros (contenido de urea) y la porosidad. Las espumas altamente porosas tienden a tener una alta tasa de propagación de la llama y una emisión térmica elevada. Los PUF, en general, son propensas a la inflamabilidad, lo que puede

representar un peligro para los usuarios debido a su rápida combustión y los gases emanados durante este proceso. Entre los gases liberados, se incluye el cianuro de hidrógeno (HCN) debido al alto contenido de nitrógeno (N_2) presente en las espumas (Jia et al., 2022). La estabilidad térmica de las espumas PUF está influenciada principalmente por el equilibrio entre la polimerización y la despolimerización en los grupos funcionales.

Según Suhailuddin et al., (2022), aumentar la cantidad de polioli en el sistema manteniendo la misma cantidad de isocianato puede resultar en polímeros más seguros ante el fuego. Además, numerosas investigaciones se centran en encontrar compuestos retardantes de llama efectivos y menos perjudiciales para el medio ambiente (Hamidov et al., 2021).

2. Materiales y métodos

En esta sección se describirán los materiales y metodologías utilizados para lograr los objetivos establecidos. El objeto de estudio fue la espuma de menor densidad producida por la empresa, cuya densidad es de 10 kg/m^3 , porque este tipo de PUF presenta una alta demanda, y una mayor cantidad de problemas relacionado a una alta presencia de defectos. Es importante destacar que, tanto la recopilación de información como el diseño experimental se realizaron en las instalaciones de la empresa, ya que contaban con los materiales, equipos y reactivos requeridos. Por otro lado, el análisis químico del polioli e isocianato se llevó a cabo en los laboratorios del Centro de Estudios Ambientales (CEA) de la Universidad de Cuenca.

2.1. Materiales y equipos

Se empleó un molde de madera para dar forma a los productos en estudio. Para realizar las mediciones, se emplearon equipos como una balanza de precisión para pesar los componentes, un higrómetro con termómetro para medir la humedad y la temperatura del entorno, un agitador para mezclar los reactivos, una sierra de corte vertical, un flexómetro y un cronómetro para medir el tiempo de reacción. En cuanto a los reactivos, se utilizaron el polioli poliéter, diisocianato de tolueno (TDI), catalizador amínico (AM), catalizador organometálico (OE), silicona (SI), cloruro de metileno y agua. En la Tabla 4 se presentan todos los equipos utilizados para determinar las propiedades físico-mecánicas.

Tabla 4

Equipos de laboratorio para la determinación de las propiedades mecánicas

Equipo	Detalle
Balanza analítica	Modelo HD-A838-1, precisión de 0,01 g
Equipo de Resiliencia	Modelo HD-F754
Equipo de dureza y tracción	Modelo HD-F781
Equipo de determinador de velocidad de combustión	Modelo HD-F7550A, precisión $\pm 0,5\%$
Acondicionador	Modelo HD-E702-100B40

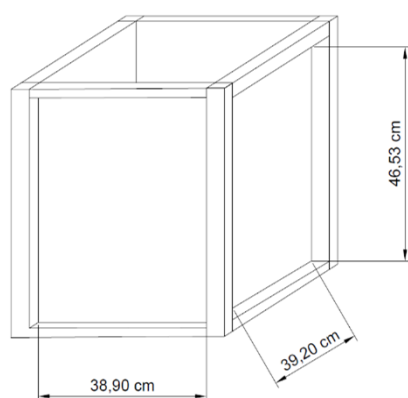
Calibrador y regla metálica

Nota: Todos los equipos son de la marca Hanna y cada uno de ellos cumple con la norma ecuatoriana NTE-INEN 5999-2013.

En la Figura 3, se presenta un bosquejo acotado del molde y en el lado derecho una imagen del mismo durante una corrida experimental.

Figura 3

Molde de madera recubierto en su interior de plástico para la realización de los experimentos



Para determinar el índice de hidroxilo (OH) del polioli poliéter y el contenido de NCO del TDI se usaron dibutlamina 99%, tolueno G.R., acetona G.R., azul bromofenol 0,04%, ácido clorhídrico 1M, isopropanol G.R., anhídrido acético, piridina 99%, imidazol G.R., ftalato ácido de potasio G.R., fenolftaleína 0.05%, hidróxido de sodio 0,5 M.

En cuanto a los materiales y equipos usados para el análisis químico se encuentran: potenciómetro para realizar mediciones de pH, jeringas dosificadoras, agitador magnético para mezclar las sustancias, balanza analítica, pipetas volumétricas, probetas, matraz erlenmeyer, condensador tipo West y matraz de yodo esmerilado.

2.2. Métodos

2.2.1. Levantamiento de información preliminar

Se consideró un margen de tiempo de estudio de 20 días laborales, correspondientes a un mes, para obtener los datos necesarios. La información se recopiló directamente en el lugar de trabajo, mediante la observación, registro e identificación de los operadores que manipulaban la materia prima, así como de los instrumentos utilizados en el proceso de medición y dosificación. Además, se tomaron notas sobre el modo de empleo y las pautas de seguridad seguidas en el proceso de producción de cada lote. En lo que respecta al manejo de las formulaciones y control de reacción química, se analizaron los cambios en las dosificaciones de agua, polioliol, catalizador amínico (AM), catalizador organometálico (OE) y silicona (SI). Además, se determinó el tiempo de reacción para cada lote, y se registraron tanto la temperatura como la humedad del entorno en un mismo punto para todos los lotes.

2.2.2. Análisis químico de Polioliol y Diisocianato

2.2.2.1. Análisis químico del Polioliol

Se llevaron a cabo análisis químicos de los monómeros correspondientes para determinar si el índice de isocianato (NCO/OH) utilizado en la empresa se encontraba dentro de los valores recomendados en la bibliografía. Para evaluar el índice de hidroxilo en el polioliol, se utilizó el procedimiento del método A de la norma ISO 14900-2001 "*Plastics-Polyols for use in the production of polyurethane- Determination of hydroxyl number*", el cual consistió en someter 10 gramos de polioliol a reflujo durante 45 minutos a 250°C en una solución de anhídrido acético en piridina para acetilar los grupos hidroxilo presentes; la reacción fue catalizada por imidazol. El exceso de reactivo se hidrolizó con agua y el ácido acético resultante se tituló con hidróxido de sodio con solución estandarizada. El contenido de hidroxilo se calculó a partir de la diferencia en la titulación de la porción de prueba y una solución en blanco.

De manera similar, se determinó la humedad del polioliol utilizando el método Karl Fischer, el cual fue ejecutado por la Universidad de Cuenca a través de sus servicios de laboratorio disponibles para el público. Los resultados correspondientes se encuentran anexados.

2.2.2.2. Análisis químico del Diisocianato

Por otro lado, para determinar el contenido de grupos isocianato (%NCO) en el TDI, se empleó el método A de la norma ISO 14896-2009 "*Plastics-Polyurethane raw materials- Determination of isocyanate content*", en el que se preparó una muestra del monómero, asegurándose de que

estuviera completamente líquida y homogénea mediante calentamiento. Posteriormente, se permitió que la reacción entre la muestra y la solución de di-n-butilamina se completara a temperatura ambiente. Luego, la mezcla se diluyó con acetona para facilitar la titulación y se tituló el exceso de di-n-butilamina utilizando solución de HCl acuoso 1 M, con azul de bromofenol como indicador. El punto final se determinó cuando el color cambió de azul a amarillo.

2.2.3. Planteamiento del diseño experimental

Con el objetivo de evaluar la influencia de diferentes fórmulas químicas en las propiedades mecánicas de las espumas, se llevó a cabo un diseño factorial 2^3 , lo que implica 3 factores con 2 niveles cada uno, que se presentan en la Tabla 5 y Tabla 6. Se seleccionaron como factores la cantidad en masa de catalizador organometálico, catalizador amínico y silicona, lo que resultó en un total de 8 tratamientos. Estos factores se seleccionaron de acuerdo a las necesidades de la empresa y en base a los cambios observados en el levantamiento de datos iniciales. Por otro lado, con el fin de realizar comparaciones, se llevó a cabo un noveno tratamiento que correspondió a los niveles de reactivos de la fórmula utilizada por la empresa. Los diferentes niveles para cada factor se determinaron según los requisitos de la empresa, y a través del análisis de los datos recopilados en la fase inicial.

Tabla 5

Diseño experimental general

Factor	Materia prima	Nivel bajo	Nivel medio	Nivel alto
Factor 1	Catalizador amínico (AM)	-	0	+
Factor 2	Catalizador organometálico (OE)	-	0	+
Factor 3	Silicona (SI)	-	0	+

Nota. El nivel medio (0) es de referencia y corresponde a la fórmula que se usa en la empresa.

Utilizando un software estadístico como MINITAB®, se realizó un análisis de varianza ANOVA para determinar la existencia de diferencia significativa de la influencia de diferentes factores en las propiedades de los PUF, con un intervalo de confianza de 95% ($p \leq 0,05$). Asimismo, se graficó de superficies de respuesta para analizar las relaciones entre las variables. Además, se

elaboraron diagramas de dispersión para visualizar la relación entre los factores medioambientales.

Tabla 6

Diseño experimental

Factor	Materia prima	Nivel bajo	Nivel medio	Nivel alto
Factor 1	Catalizador amínico (AM)	0,2	0,4	0,6
Factor 2	Catalizador organometálico (OE)	0,9	1,2	1,5
Factor 3	Silicona (SI)	5,1	5,6	6,1

Nota: El nivel medio es de referencia y corresponde a la fórmula usada en la empresa

Las variables de respuesta para los tratamientos del diseño experimental incluyeron la densidad aparente, resistencia a la tracción, alargamiento de rotura, dureza de indentación, comportamiento al fuego y resiliencia.

Además, se registraron los datos de humedad y temperatura mediante el uso de un higrómetro/termómetro portátil de la marca Sndway® modelo SW-572. Cabe recalcar que también se registró el tiempo reacción, la altura final de la espuma y aspectos visuales de los mismos como la presencia de celdas cerradas y rugosidades en la superficie.

En la Tabla 7, se presenta la matriz de experimentos donde se describen las diferentes combinaciones de los niveles de los factores para cada tratamiento. Es importante destacar que se utilizó un sistema de codificación para facilitar la comprensión, organización y representación de los datos. Se empleó la nomenclatura especificada anteriormente para los factores (AM, OE y SI). Además, se utilizó el símbolo "-" para indicar el nivel bajo y el símbolo "+" para representar el nivel alto de cada factor. Al combinar estos factores con sus respectivos niveles, se generaron los códigos que representan los ocho experimentos llevados a cabo. Para garantizar la trazabilidad de los experimentos, se implementó una codificación más simple que consiste en combinar la letra "P" con el número correspondiente al experimento ejecutado. De esta manera, se asignó un código único a cada experimento para facilitar su seguimiento y referenciación.

Tabla 7

Matriz de experimentos

Experimento #	Código de experimento	Código de trazabilidad	AM (g)	OE (g)	SI (g)
1	AM OE SI	P1	0,4	1,2	5,6
2	AM-OE+SI+	P2	0,2	1,5	6,1
3	AM-OE-SI-	P3	0,2	0,9	5,1
4	AM+OE-SI-	P4	0,6	0,9	5,1
5	AM-OE+SI-	P5	0,2	1,5	5,1
6	AM+OE+SI-	P6	0,6	1,5	5,1
7	AM-OE-SI+	P7	0,2	0,9	6,1
8	AM+OE-SI+	P8	0,6	0,9	6,1
9	AM+OE+SI+	P9	0,6	1,5	6,1

Nota: El experimento “1” corresponde a los niveles de reactivos de la fórmula usada en la empresa.

2.2.4. Procedimiento para la fabricación de los PUF

Para la síntesis del PUF a escala laboratorio, se siguió el siguiente procedimiento:

1. Recolección de reactivos: Se recolectan los reactivos de los tanques de almacenamiento, en recipientes plásticos adecuados para facilitar la manipulación y posterior pesado de los mismos.
2. Pesado de reactivos: Los reactivos recolectados se pesaron en dos recipientes diferentes, designados como recipiente A y recipiente B. En el recipiente A, se pesaron el polioliol, el catalizador amínico, el catalizador organometálico, la silicona y el agua. Por otro lado, en el recipiente B, se pesaron el isocianato y el cloruro de metileno.
3. Mezclado de reactivos: Antes de proceder con el mezclado, el contenido del recipiente A se sometió de forma independiente a una agitación constante durante 30 segundos, para asegurar una adecuada mezcla de los reactivos presentes. Posteriormente, se añadió el contenido del recipiente B al recipiente A, y se mantuvo en agitación durante 8 segundos.
4. Vertimiento en el molde: Una vez completado el proceso de mezclado, la mezcla reactiva se vertió cuidadosamente en el molde de madera cubierta de plástico. Mediante esto, se permitió que la reacción continuara en el molde para lograr la formación del producto deseado.

5. Control de parámetros: Durante el proceso de mezclado y reacción, se llevó a cabo mediciones y controles de diversos parámetros. Se utilizó un cronómetro para registrar el tiempo de reacción, iniciando desde el momento en que se añadió el contenido del recipiente B al recipiente A, y finalizando cuando se observó que el crecimiento de la espuma se detuvo. Además, se registraron humedad relativa y temperatura ambiente a lo largo de todo el proceso.
6. Desmoldado y curado: Una vez finalizada la reacción, se mantuvo un tiempo de enfriamiento de 10 minutos antes de proceder al desmoldado del producto. El producto final obtenido se colocó en un lugar adecuado para el proceso de curado, y se dejó reposar durante un período de 24 horas.

2.2.5. Determinación de las propiedades mecánicas

La determinación de las propiedades mecánicas de los PUF se rigió bajo la norma NTE-ISO 5999-2013 “*Flexible cellular polymeric materials - Polyurethane foam for load-bearing applications excluding carpet underlay - Specification*”, la cual describe los requisitos y procedimientos que se deben cumplir. Como proceso previo a cualquier ensayo, las probetas de las espumas flexibles se sometieron a un acondicionamiento basado en la norma ISO 23529–2010 “*Caucho. Procedimientos generales para preparar y acondicionar probetas para métodos de ensayos físicos*”, la cual dispone una temperatura de 27 °C, con una tolerancia de ± 2 °C, y una humedad relativa de 65 %, con una tolerancia de ± 5 %.

- Densidad

La densidad de la espuma se determinó calculando el promedio de las densidades de 5 probetas de forma cúbica con dimensiones de 100 mm de largo, 100 mm de ancho y 50 mm de espesor. Para medir las dimensiones de las probetas se utilizaron un pie de rey, un flexómetro y una regla metálica. La masa se obtuvo utilizando una balanza analítica de la marca HAIDA, modelo HD-A838-1, con un rango de medición de 0.01g a 2000g. El volumen de cada probeta se calculó multiplicando las dimensiones del largo, ancho y espesor. Se realizaron al menos tres mediciones en diferentes puntos equidistantes de cada dimensión del cubo para obtener un valor representativo. Para el cálculo de la densidad se usó la ecuación 1.

$$\text{Densidad} = M/V \text{ (ecuación 1)}$$

Donde:

M es la masa de la probeta, en kilogramos;

V es el volumen de la probeta, en metros cúbicos.

- Dureza de indentación

Para el ensayo de dureza de indentación, se utilizaron 3 probetas con dimensiones de 380 mm de largo, 380 mm de ancho y 50 mm de espesor. El equipo utilizado fue el HAIDA HD-F750A, capaz de aplicar fuerzas superiores a 5 kN, y se emplearon cargas constantes e intermitentes.

El método B de acuerdo con la norma NTE-ISO 2439-2014 “Materiales *poliméricos celulares flexibles. Determinación de la dureza (Técnica de indentación) (ISO 2439:2008, IDT)*”, implica analizar la dureza de indentación en tres etapas: 25%, 40% y 65%, durante un tiempo de 30 segundos. Por otro lado, el método A analiza la dureza de indentación únicamente al 40% durante el mismo período de tiempo. El equipo proporciona automáticamente los valores de dureza para cada probeta. Para reportar los resultados, se determinó la mediana de los 3 valores obtenidos de las probetas.

- Comportamiento al fuego

Para llevar a cabo el ensayo, se utilizaron 10 probetas con dimensiones de 125 mm de largo, 50 mm de ancho y un espesor de 10 mm. Las probetas fueron sometidas a la quema según los parámetros establecidos en la norma NTE-ISO 3582-2014 “Materiales *poliméricos celulares flexibles. Evaluación en el laboratorio de las características de comportamiento al fuego de probetas pequeñas sometidas a una llama pequeña (ISO 3582:2000, IDT)*”, y como resultado se obtuvo el tiempo y la longitud de quemado, con ello se determinó la velocidad de combustión de la espuma según la ecuación 2. El ensayo se realizó utilizando el equipo HAIDA HD-F781 que contaba con una cámara de combustión y cronómetros incorporados.

$$v = d/t \text{ (ecuación 2)}$$

Donde:

v es la velocidad de combustión, en mm/s;

d es la longitud horizontal de la probeta, en milímetros;

t es el tiempo de extinción del fuego, en segundos.

A partir del cálculo de estas velocidades, se reportó el promedio de las mismas.

- Resiliencia por bola rebotante

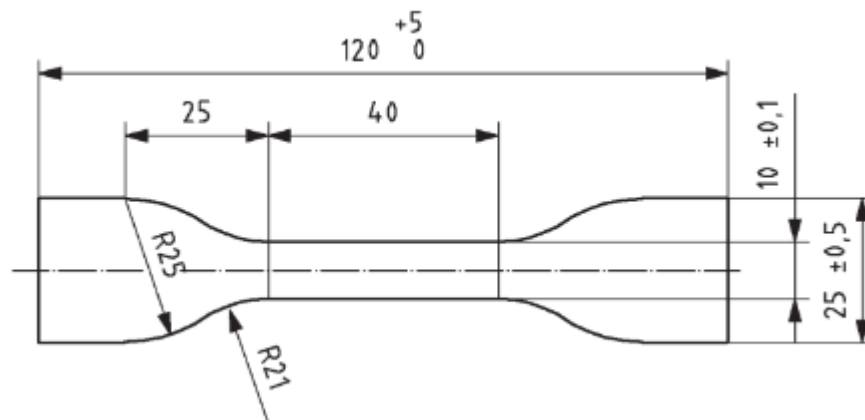
En el ensayo de resiliencia se emplearon 3 probetas con dimensiones similares al ensayo de densidad aparente. Para llevar a cabo el ensayo, se utilizó el equipo HD-F754, diseñado específicamente para determinar la resiliencia. El procedimiento del ensayo consistió en dejar caer una esfera metálica desde una altura de 500 mm sobre la superficie de la espuma. La esfera rebotó y alcanzó una altura determinada, la cual fue detectada por un sensor. Este valor se expresó como un porcentaje en relación a la altura inicial de la caída. Para cada probeta, se realizaron 3 mediciones de rebote y se obtuvo la mediana de dichos valores. Posteriormente, se calculó la mediana global utilizando las 3 medianas obtenidas, lo cual representa la resiliencia de la espuma. De esta manera, el resultado final del ensayo de resiliencia es la mediana global, que proporciona una medida representativa de la capacidad de rebote de la espuma.

- Resistencia a la tracción y alargamiento de rotura

En esta etapa del proceso, se utilizó la misma probeta para realizar dos tipos de ensayos. Las dimensiones de la probeta se establecen en la norma NTE INEN-ISO 1798, donde se especifica el uso de la probeta tipo 1A, representada en la Figura 4. Según la norma, el espesor de la probeta debe estar comprendido entre 10 mm y 15 mm. Para asegurar que las probetas cumplieran con las dimensiones requeridas por la norma, se utilizó un troquel neumático. Este dispositivo garantiza que se obtengan probetas con las dimensiones precisas establecidas por la norma.

Figura 4

Dimensiones de la probeta tipo 1A



Además, se aplicaron límites de longitud de referencia a las probetas. Estos límites consisten en una distancia de 20 mm hacia la izquierda y hacia la derecha, a partir del punto central de la probeta. Si la rotura de la probeta se produjo dentro de estos límites de referencia, se consideró que el ensayo era válido. Sin embargo, si la rotura fue fuera de estos límites, el ensayo se debió repetir hasta 3 veces en algunos casos.

Se usó la ecuación 3 para obtener la resistencia a la tracción, cuya información fue otorgada por el equipo.

$$RT = (F/A) * 1000 \text{ (ecuación 3)}$$

Donde:

RT es resistencia a la tracción, en kilopascales;

F es fuerza máxima, en newtons;

A es área transversal inicial promedio, en milímetros cuadrados.

Mientras que, para los cálculos del alargamiento a la rotura se utilizó la ecuación 4.

$$E_b = (L - L_0/L_0) * 100 \text{ (ecuación 4)}$$

Donde:

E_b es alargamiento antes de la rotura, %;

L es la longitud de referencia a la rotura, en milímetros;

L_0 es la longitud de referencia inicial, en milímetros.

2.2.6. Prueba a nivel de producción industrial

De acuerdo con los resultados obtenidos en la fase experimental se procedió a seleccionar el experimento que exhibió una mejora en las propiedades en comparación con la fórmula original. Esta formulación seleccionada se llevó a cabo a nivel industrial con el propósito de verificar los resultados obtenidos a nivel de laboratorio, cuyo formato se presenta en la Tabla 8. Se espera que esta elección no solo conlleve una reducción en los defectos, sino también genere un impacto positivo en el aspecto económico para la empresa.

Tabla 8

Formato de reporte para la prueba industrial

Experimento	Densidad (kg/m ³)	Resiliencia (%)	Dureza B (65 %)	Res. Tracción (kPa)	Elongación (%)	Inflamabilidad (mm/s)
LAB	—	—	—	—	—	—
IND	—	—	—	—	—	—
% Cambio						

Nota: “LAB” hace referencia a las propiedades obtenidas a escala laboratorio y “IND” a las obtenidas a escala industrial. El porcentaje de cambio de la propiedad se va a determinar mediante la fórmula $|L_i - I_i/L_i| * 100$.

Los criterios utilizados para seleccionar la fórmula de la espuma se basaron en buscar mejoras significativas en las propiedades físico-mecánicas, manteniendo una densidad y dureza cercana a la original debido a consideraciones económicas. Se buscó aumentar la resiliencia para lograr una mayor durabilidad de la espuma, de igual forma, se buscó aumentar la resistencia a la tracción y el porcentaje de elongación para resistir las acciones mecánicas durante los procesos de corte, transporte, manufactura y su uso posterior. Además, se buscó disminuir la velocidad de combustión para proporcionar una mayor seguridad en caso de incendios.

3. Resultados y discusiones

3.1. Levantamiento de información

3.1.1. Manipulación de reactivos

La trazabilidad de los reactivos comienza con la recepción de los suministros provenientes de distintos proveedores y en diferentes fechas, donde un grupo de tres personas se encarga regularmente de descargar estos reactivos en los tanques de almacenamiento correspondientes. De la misma forma, se ha observado que los contenedores de TDI sellados quedan expuestos a la intemperie durante varias horas en cada descarga antes de ser trasladados a la bodega, aunque esto no supone un problema. Asimismo, el polioliol llega en bolsas de plástico dispuestas a lo largo del contenedor, cuya recepción se realiza a través de una manguera hacia los silos y depósitos, que son destinados al almacenamiento de este reactivo.

Cabe recalcar que no se realiza ningún control de calidad a ningún reactivo en ninguna fase del proceso. La recepción y presentación de los reactivos se puede observar en el Anexo A.

Durante la recepción y almacenamiento, el polioliol representa un posible desafío. Este reactivo se descarga directamente en tanques plásticos de aproximadamente 1000 L con la asistencia de dos trabajadores encargados de la recepción. En particular, la forma de recepción de este reactivo plantea un inconveniente debido a que el polioliol es un compuesto higroscópico, lo que significa que tienen una alta afinidad por absorber la humedad del ambiente circundante. Como resultado, el contenido de agua del reactivo puede variar según las condiciones ambientales del día de recepción. Esta pequeña variación puede generar problemas, ya que puede afectar las formulaciones en términos de la cantidad de agua requerida para cada formulación.

En relación a la manipulación de los reactivos, a excepción del polioliol y TDI, se encontró que los mismos operarios, el operario principal y el auxiliar, manipularon y dosificaron todos los reactivos en los 34 lotes producidos en el periodo establecido para el estudio. Es importante destacar que los reactivos se transfirieron directamente al mezclador desde los contenedores a través de un sistema de bombeo, lo que limitó su manipulación.

La instrumentación utilizada para la dosificación fue rudimentaria, empleando vasos de polipropileno y recipientes metálicos comunes sin graduación para contener, pesar y dosificar los catalizadores, surfactantes, agentes soplantes y otros compuestos. La balanza analítica estaba impregnada de impurezas, pero contaba con certificado de calibración actualizada. Además, se ha constatado que en el área de producción se dispone de la instrumentación necesaria para la producción de PUF, aunque sería beneficioso contar con un laboratorio de calidad que esté

adecuadamente equipado para garantizar una formulación idónea. En este laboratorio, se podrían llevar a cabo análisis de propiedades reológicas, parámetros ambientales, concentración, y otros factores de los reactivos, lo que contribuiría a mejorar aún más la calidad del proceso y del producto final.

Según los resultados obtenidos en esta fase, se evidenció la necesidad de adaptar una certificación ISO 9001:2015, estándar internacional para sistemas de gestión de calidad, dado que establece principios clave para el análisis de la calidad de las materias primas en el proceso de producción de PUF. A través del establecimiento de un sistema de control de calidad efectivo, se puede garantizar que las materias primas cumplan con los requisitos especificados. Además, la norma promueve la mejora continua en todos los aspectos del proceso, y enfatiza la importancia de establecer y mantener relaciones mutuamente beneficiosas con los proveedores. Mancheno M. (2010) presenta en su investigación, los principales problemas que se presentan durante la producción de espumas PUF, donde se destacan los errores en la formulación, error en el pesado de componentes, variación en la temperatura de los componentes, variación de la temperatura ambiente, contaminación de la materia prima y mezcla ineficiente de los componentes, que a su vez, están relacionados con los problemas que se presentaron durante la fase del levantamiento de información de esta investigación.

3.1.2. Manejo de formulaciones

Durante la producción de espumas PUF de densidad 10 kg/m³ en la línea de cajón, se identificó que se utilizaron ocho fórmulas diferentes en los 34 lotes analizados. Estas fórmulas presentaron cambios, que se mantuvieron en la siguiente fórmula junto con las modificaciones adicionales realizadas en cada nuevo lote. En la Tabla 9 se detallan los cambios realizados en las fórmulas a lo largo de los lotes de producción.

Tabla 9

Cambios realizados en la formula durante los 34 lotes

Fórmula	Lotes producidos	Cambio realizado
1	1	Lote 1 de estudio: sin cambios que reportar
2	2 a 4	Disminuye AM, OE y aumenta SI
3	5 a 9	Aumenta OE
4	10	Aumenta OE
5	11	Aumenta OE
6	12 a 16	Disminuye Agua
7	17 a 22	Disminuye OE
8	23 a 34	Disminuye OE

Nota: El registro de las modificaciones de las fórmulas se puede ver en el Anexo B.

Además, se observó que, en tres lotes, específicamente en el lote 19, 21 y 22; no ocurrió un adecuado proceso de polimerización dado que la altura final del bloque fue más baja de lo normal. Los reactivos que sufrieron las modificaciones más significativas fueron el AM, OE y agua, siendo esta última en mayor proporción que los dos catalizadores.

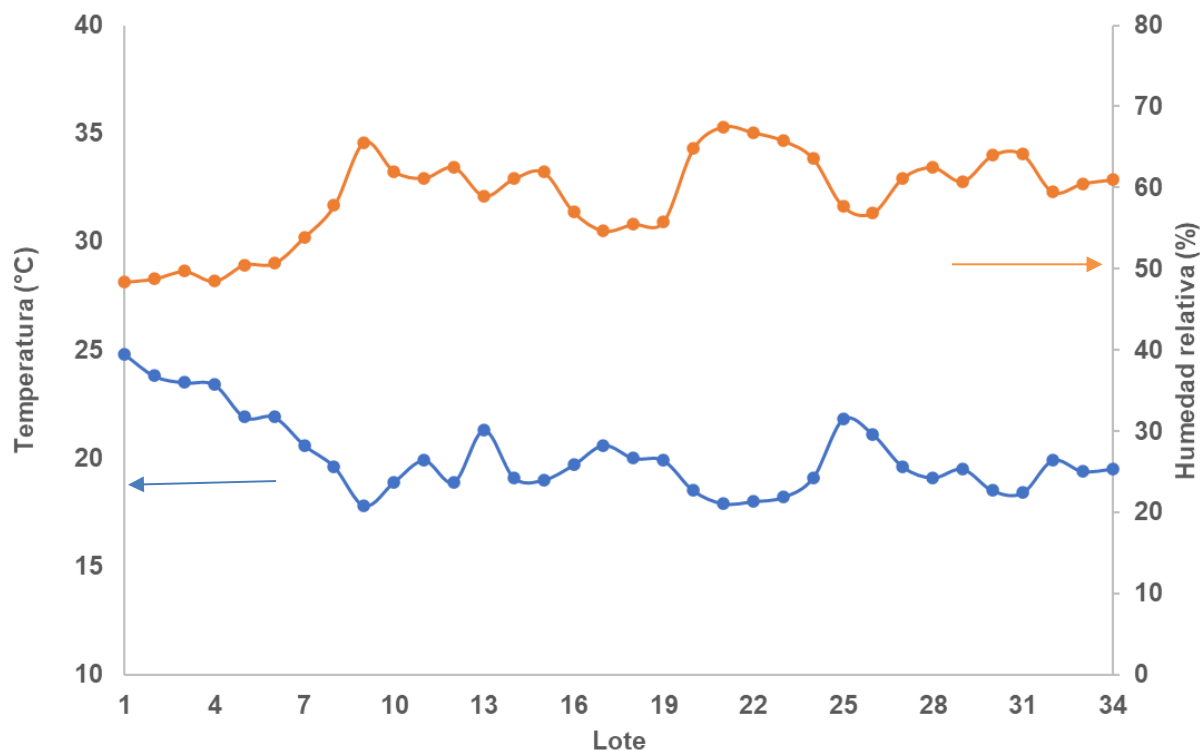
En un estudio previo de Quintero et al., (2007) y Mancheno M. (2010), señalan que las formulaciones deben desarrollarse teniendo en cuenta las condiciones ambientales, como la presión atmosférica, la temperatura y la humedad, y deben utilizarse de acuerdo con estos parámetros durante la producción. Sin embargo, también indicaron que los métodos de aplicación y cualquier cambio en el procedimiento pueden tener un impacto significativo en el producto final. En consonancia con los autores, se requiere el establecimiento y la estandarización de las fórmulas de las espumas PU en función de la temperatura y humedad además el desarrollo y ejecución de procedimientos operativos estándar (POE) con la finalidad de obtener un producto con propiedades y características definidas independientemente del lote.

3.1.3. Control de reacciones

Durante la producción de espumas PUF en la línea de cajón, se observó la ausencia de instrumentos de medición para evaluar las condiciones ambientales del entorno. El único método utilizado para contrarrestar el impacto de las condiciones ambientales, basado en el conocimiento empírico de los operarios, consistía en ajustar la dosificación de ciertos reactivos. Sin embargo, mediante el uso de un higrómetro/termómetro portátil, fue posible medir las condiciones ambientales en el lugar de producción de cada uno de los 34 lotes. Las mediciones correspondientes a cada lote se representan gráficamente en la Figura 5. Además, se determinó el tiempo de reacción de cada lote, un parámetro crítico que influye en el control y la velocidad de las reacciones químicas. Es importante destacar que, debido a limitaciones de tiempo y costos asociados a la empresa, no fue posible evaluar las propiedades físico-mecánicas de cada lote de manera exhaustiva. Esto se debe a la necesidad de evitar el desperdicio de una cantidad significativa de producto final.

Figura 5

Mediciones de la humedad relativa y la temperatura ambiente dentro del área de producción de la línea discontinua



Durante el período analizado, la Figura 5 muestra la tendencia de la humedad relativa y la temperatura ambiente, revelando una estabilidad entre los 16 y 20 °C de temperatura y entre 50 y 70% de humedad. Sin embargo, es importante destacar que el período de estudio no fue lo suficientemente largo, lo que posiblemente afecta la comprensión completa de los factores ambientales.

Es importante destacar que la producción de PUF genera una considerable cantidad de gases a alta temperatura. Este calor se emite al entorno, lo que puede aumentar la temperatura y alterar la humedad del ambiente. Sin embargo, existe un sistema de extracción de gases en el área de producción el mismo que ayuda a mantener las condiciones del entorno estables.

Según Brydson, (1999) en su libro "*Plastic Materials*", la temperatura de reacción en el PU está influenciada por el tipo, calidad y cantidad de los reactivos, principalmente los monómeros y catalizadores. Esta temperatura determina, según el caso, la necesidad de seleccionar

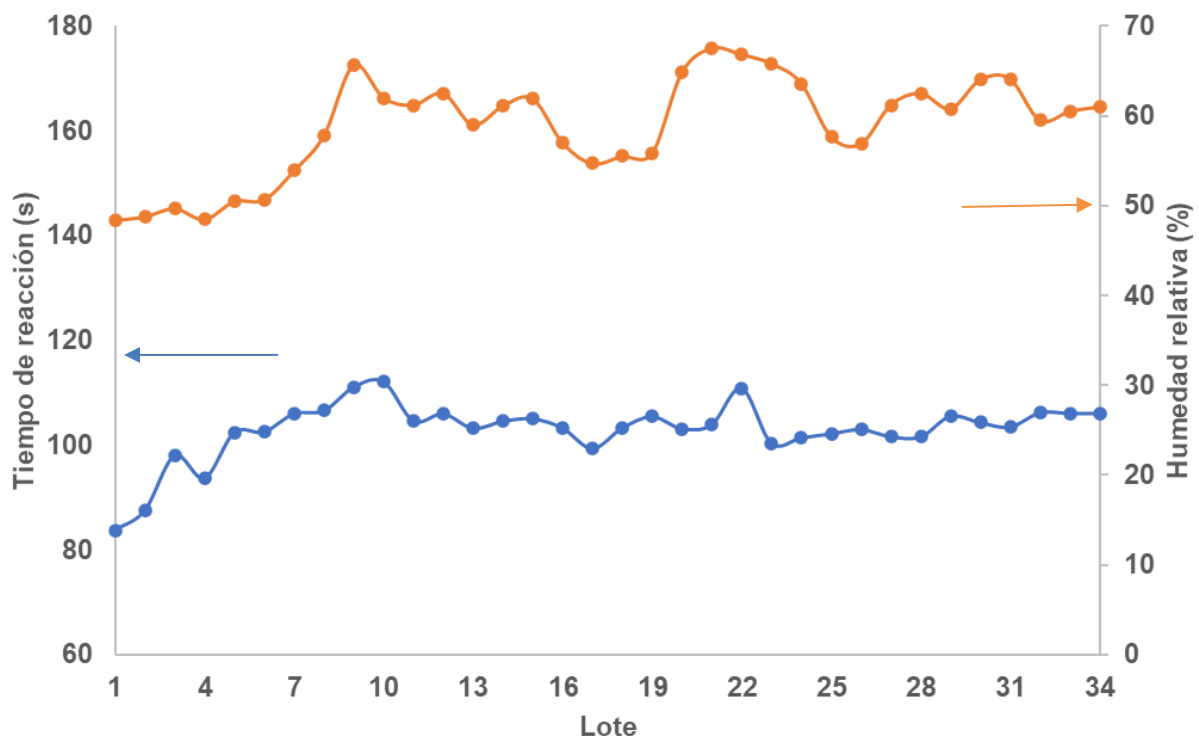
atmósferas saturadas de gases inertes, como N_2 , ya que en algunos casos puede superar los $200^\circ C$ y dar lugar a la formación de compuestos indeseables (p. 783-784).

Los estudios realizados por Nofar et al., (2019) y Wang et al., (2019) concluyen que es recomendable mantener una atmósfera con temperatura y humedad controladas para obtener propiedades mecánicas consistentes en el producto final. Además, sugieren que es posible producir las espumas en atmósferas saturadas de gases inertes con el objetivo de optimizar la microestructura de las celdas.

La Figura 6 y Figura 7, presentan graficas de la evaluación de las condiciones ambientales, como la temperatura y humedad ambiental en la planta de producción, la cual se relacionan principalmente con el tiempo de reacción, que es un parámetro esencial para verificar la influencia de estos factores ambientales, así como también, por su facilidad de medida.

Figura 6

Tendencia del tiempo de reacción y humedad relativa del ambiente en cada lote producido

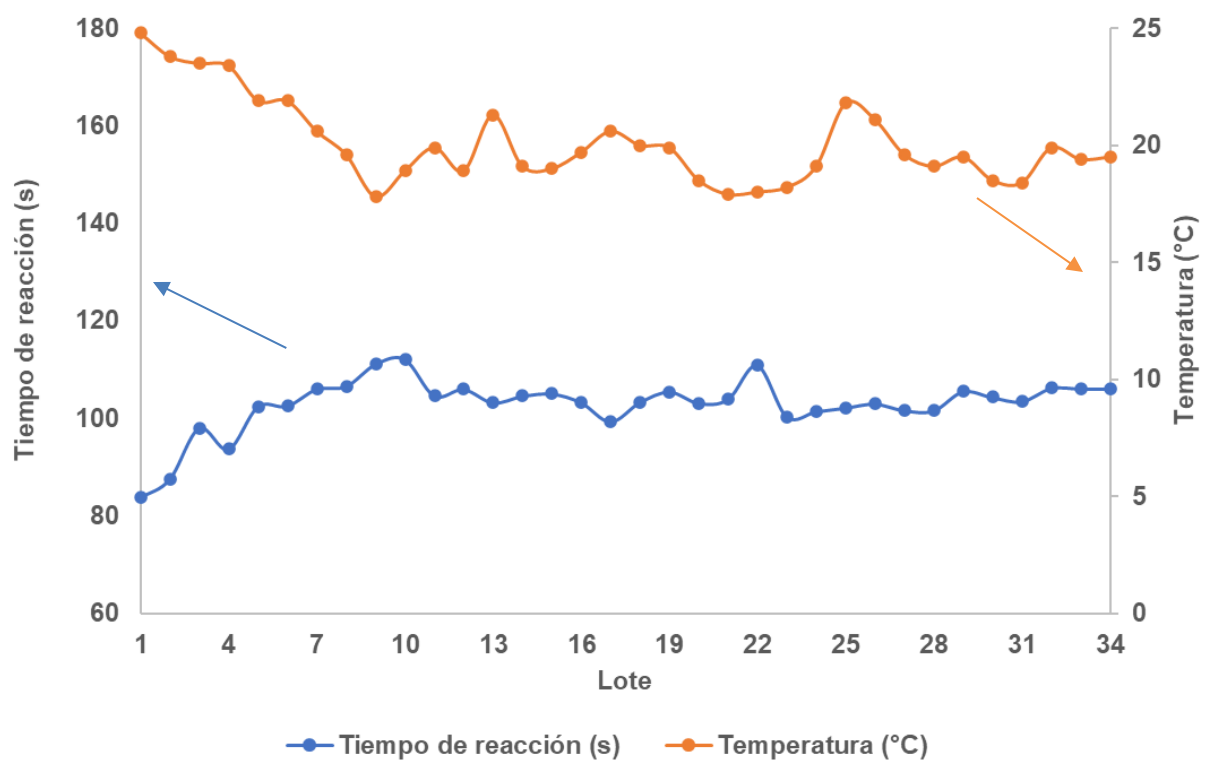


De acuerdo a la Figura 6, se pudo verificar que en la mayoría de lotes existe una relación directa entre el tiempo de reacción y la humedad relativa, es decir, si la humedad relativa aumenta, entonces también aumenta el tiempo de reacción. Esto se puede verificar en los primeros lotes

de producción, del primero al décimo lote, donde el rango de variación de la humedad relativa va desde 50 a 65 %, lo que provoca una variación de 80 a 110 s en el tiempo de reacción, aproximadamente, lo que supone una gran variación. A partir de estos lotes, el rango de variación es baja, y a su vez, también existen lotes donde se presentó una relación inversa entre estas variables analizadas, por lo que es muy difícil determinar la verdadera relación entre estos factores.

Figura 7

Tendencia del tiempo de reacción en relación a la humedad relativa del ambiente



De acuerdo a la Figura 7, se pudo observar que existe una relación inversa entre la temperatura ambiental con el tiempo de reacción, cuya relación puede verificarse principalmente en los primeros lotes de producción, que van del primero al décimo lote de producción, donde existe un claro descenso de temperatura ambiente de 23 a 18 °C, y se promueve el aumento del tiempo de reacción de 80 a 110 s, aproximadamente. A partir de estos lotes, la variación es relativamente baja, lo cual está relacionado con los resultados obtenidos al analizar la Figura 6.

De manera general, al analizar las variaciones de tiempo de reacción con las condiciones ambientales, se identificó que la variación del tiempo de reacción es relativamente baja en la

mayoría de lotes, aunque existen lotes donde presentan grandes variaciones, principalmente en los lotes iniciales, que pueden estar asociados a que en estos primeros lotes es donde se produjo la variación de algunos reactivos, como la disminución de 1 g del catalizador amínico, que corresponde a una variación de 2.7 % en relación a la formulación estándar; aumento y disminución en 1 g del catalizador organometálico, variación del 1 %; disminución en 5 g de silicona, variación del 1 %; y nula variación en la cantidad de agua. Y posterior a estos lotes, no se produjo variación en el catalizador amínico ni silicona, solo la disminución de 1 g de catalizador organometálico, variación de 1 %; y disminución de 5 g de agua, variación del 0.3 %.

Entonces a partir de esto, se puede suponer que no existe una gran influencia de las condiciones ambientales durante el proceso de producción, ya que estas variaciones pueden haber sido reducidas por el manejo de formulaciones y control de las reacciones efectuadas por el encargado de producción en los diferentes lotes debido a su percepción de las condiciones ambientales del área de producción, por lo que se puede destacar que el manejo de formulaciones resulta efectivo en cuanto a mantener el tiempo de reacción sin mucha variación, sin embargo, no se considera la variación que pueden existir en las propiedades físico-mecánicas ni la presencia de imperfecciones en el producto final.

Sin embargo, en el estudio de Zammarano M et al. (2012) en sus diferentes experimentos realiza un ajuste de la formulación debido a la temperatura ambiental relativamente baja, aunque no presenta en su estudio ningún seguimiento a los valores de las condiciones ambientales. Estos ajustes los realiza rutinariamente durante la fabricación de las espumas flexibles de poliuretano para compensar las variaciones morfológicas causadas por las condiciones climáticas, y disponer productos con especificaciones consistentes durante todo el tiempo.

También, hay que destacar que, a nivel experimental los tiempos de reacción de los experimentos son muy importantes para el estudio de modelos teóricos cinéticos, los cuales se basan en la determinación de las variaciones de las temperaturas de polimerización con respecto al tiempo, así como también la variación del porcentaje de conversión. A partir de esto, se pueden determinar parámetros cinéticos de la reacción de polimerización entre los grupos hidroxilo del polioliol y los grupos isocianato, y la reacción de los grupos isocianato con el agua. En el estudio de Van Thuyne & Zeegers (1978) se desarrolló correlaciones entre las propiedades físicas de la espuma y las medidas básicas, como altura de la espuma, temperatura y la presión de la espuma, donde se demostró que la velocidad de reacción afecta directamente en el proceso de formación de espuma y las propiedades físicas de las espumas. Asimismo, Rojas et al. (1982) en su estudio

presenta un modelo para predecir la extensión del tiempo de reacción y de crecimiento de la espuma, y también, para predecir la cantidad de agente de soplado necesario para obtener una espuma de determinada densidad, a partir de datos de temperatura frente al tiempo. Por ende, se puede considerar como un parámetro importante al tiempo de reacción para relacionar con las diferentes variables presentes durante el proceso de producción, así como también, en las propiedades del producto final.

3.1.4. Análisis químico de polioliol e Isocianato

Al analizar los reactivos principales en la producción de los PUF, cuyos resultados se presentaron en la Tabla 10, donde se presenta el índice de hidroxilo expresado en mg KOH/g y porcentaje de humedad para el polioliol, mientras que, para el TDI, se determinó el contenido de NCO expresado en porcentaje.

Tabla 10

Parámetros químicos analizados en los monómeros

Criterio	Polioliol	TDI
Contenido de grupo funcional	55,54 mg KOH/g	44,18%
Humedad	0,07%	-

Con respecto al análisis de calidad del polioliol, la cantidad de hidroxilos en mg KOH/g determinada en la muestra, su valor se encuentra dentro del rango establecido de la ficha técnica. Además, este valor se encuentra dentro del rango dispuesto en el contenido teórico para los PUF, cuyo valor va desde 28 mg KOH/g hasta 160 mg KOH/g.

En su estudio, Członka et al., (2020) llevó a cabo la síntesis de poliuretano rígido (PUR) utilizando biopolímeros con índices de hidroxilo significativamente más altos que los utilizados en las espumas flexibles, alcanzando valores alrededor de 250 mg KOH/g. Por otro lado, Polaczek et al., (2022) utilizó biopolímeros con diferentes índices de hidroxilo, aproximadamente 200 mg KOH/g, para producir espumas de PU de celda abierta con bajas densidades, y destacó que este índice, junto con la funcionalidad, viscosidad, peso molecular y estructura química del polioliol, tiene un impacto importante en las propiedades de las espumas de PU (Simón et al., 2014).

Prociak et al., (2016) informa sobre la influencia del contenido de NCO en la generación de segmentos blandos y duros durante la polimerización que modifican las propiedades de

resiliencia y resistencia a la compresión sin embargo destaca que un contenido alto de NCO puede elevar significativamente la temperatura de polimerización corriendo el riesgo de autoignición.

Por otro lado, el Comité de Análisis de Materias Primas de Poliuretano (PURMAC) del *American Plastic Council*, durante la evaluación de métodos para la determinación del contenido de NCO en isocianatos aromáticos, recalca la enorme importancia que tiene este parámetro en la industria del PU, encontró que el TDI 80/20 contiene un 48,30% de NCO. Es importante mencionar que no se ha encontrado suficiente información actualizada que indique claramente la influencia de este parámetro en el producto final, así como las principales causas de variación en el contenido de NCO (PURMAC, 1991).

Específicamente, la utilización de un polioliol con un índice de hidroxilo de 55,54 mg KOH/g resulta apropiada para alcanzar las propiedades deseadas en la espuma de 10 kg/m³, tales como baja densidad, estructura de celdas abiertas, flexibilidad y una adecuada resistencia mecánica. En cuanto al TDI, se obtuvo un contenido de NCO del 44,18%, el mismo no se pudo verificar mediante la ficha técnica debido a su ausencia. Sin embargo, se debería considerar este valor para futuras evaluaciones y como parámetro de calidad del reactivo.

En cuanto a la relación de NCO/OH, el valor determinado se encuentra dentro del rango establecido en la literatura de 0.8 a 1.5, cabe recalcar que los cálculos y resultados correspondientes no se presentan para evitar comprometer el secreto empresarial.

3.2. Evaluación de las propiedades mecánicas

Con el fin de determinar la influencia de los factores sobre las propiedades físico-mecánicas, se realizó un análisis de varianza ANOVA para investigar cómo los factores seleccionados, que son catalizador amínico, catalizador organometálico y silicón, influyen en las propiedades de las PUF, y a partir de esto, determinar si existen diferencias significativas en las propiedades cuando se varían dichos factores.

Tabla 11

Resumen de resultados de las pruebas físico-mecánicas realizadas

Experimento	Prueba	Densidad (kg/m ³)	Resiliencia (%)	Dureza B-65 % (N)	Res. Tracción (kPa)	Elongación (%)	Comp. al fuego (mm/s)
AM OE SI (A)	P1	11,53	30,25	144	51,07	71,98	3,55
AM+OE+SI+	P2	11,57	25,49	241	51,22	60,26	3,37
AM-OE-SI-	P3	10,62	20,90	230	48,43	55,58	3,18
AM+OE-SI-	P4	12,30	31,04	210	46,23	47,05	3,52
AM-OE+SI-	P5	10,69	27,66	171	54,12	82,74	3,45
AM+OE+SI-	P6	11,71	24,96	155	49,15	56,87	3,18
AM-OE-SI+	P7	10,53	28,02	156	49,06	61,18	3,31
AM+OE-SI+	P8	12,18	30,67	155	49,62	59,59	3,80
AM-OE+SI+	P9	10,75	28,70	215	52,81	76,73	3,43

Nota: (A) Experimento que corresponde con la fórmula utilizada en la empresa.

En la Tabla 11 se presentan los experimentos realizados junto con las propiedades que fueron determinadas en laboratorio de calidad de la empresa.

Existen numerosos tipos y clasificaciones de defectos que pueden ocurrir y afectar al PUF, en la Tabla 12 se describen las características que se pudo determinar mediante una inspección visual de las espumas obtenidas de los diferentes experimentos.

Tabla 12

Observaciones realizadas a las espumas del diseño experimental

Experimento	Prueba	Celdas	Apariencia
AM OE SI (A)	P1	Abiertas	Suave, sin rugosidades
AM+OE+SI+	P2	Cerradas	Regular
AM-OE-SI-	P3	Abiertas con una fracción de celdas cerradas	Suave, sin rugosidades
AM+OE-SI-	P4	Totalmente cerrada	Áspera, con rugosidades
AM-OE+SI-	P5	Abiertas	Suave, sin rugosidades
AM+OE+SI-	P6	Cerrada con una fracción de celdas abiertas	Con rugosidades
AM-OE-SI+	P7	Cerradas	Suave, sin rugosidades, muy buena
AM+OE-SI+	P8	Abiertas	Suave, sin rugosidades
AM-OE+SI+	P9	Cerradas y Abiertas	Rugosa, áspera, con burbujas

Las espumas de PU pueden presentar celdas abiertas o cerradas. Sin embargo, no es aconsejable que una espuma flexible de baja densidad tenga celdas cerradas, ya que esto podría provocar contracción y defectos en la estructura celular de la espuma (Polaczek et al., 2022).

En el trabajo realizado por Abdul-Rani, (2006) se examina la textura de la superficie de las espumas de PU, y se identifican varias causas que pueden dar lugar a dicha textura. Entre ellas se encuentran la microestructura del material, la acción de la herramienta de corte utilizada durante el proceso de fabricación y la deformación debida a los patrones de tensión presentes en el material.

Uno de los hallazgos destacados por Abdul-Rani fue que un gradiente de temperaturas en el molde durante el proceso de reacción puede tener un impacto significativo en la generación de burbujas de gas dentro de la espuma de PU. Estas burbujas de gas pueden formarse de manera desigual en la estructura, lo que a su vez puede resultar en superficies rugosas y gradientes de

densidad y propiedades diferenciadas en toda la espuma. De igual forma, si el calor es liberado de forma inapropiada puede generar grietas (Li et al., 2022)

De acuerdo con los resultados, se observa que cuando el factor AM se encuentra en niveles bajos, la espuma producida carece de rugosidades. Esto se atribuye al papel del catalizador amínico en la generación de burbujas y la liberación de calor, lo que incrementa la presencia de gradientes al aumentar su concentración. Para los experimentos P9 y P8, sus rugosidades se podrían atribuir a la interacción sinérgica de los tres factores, sin embargo, no se descartan otros factores.

En experimentos con celdas cerradas, se utilizó un nivel alto de silicona. Sin embargo, debido a la baja presencia de amina, no se generó la cantidad adecuada de burbujas para producir la presión de gas necesaria para romper las celdas. Esta falta de presión de gas podría explicar la formación de rugosidades en dichos experimentos. Cabe recalcar que los resultados de esta sección se obtuvieron mediante observación y, para determinar la estructura celular, se requerirá el uso de métodos como el microscopio electrónico de barrido (SEM) y de modelación 3D con láser para analizar la textura de la espuma.

3.3. Análisis estadístico

3.3.1. Estadística descriptiva

En la Tabla 12 se presentó el análisis descriptivo de los resultados obtenidos al evaluar las propiedades físico-mecánicas de cada experimento, donde se destacan los valores mínimos y máximos, rango de variación, promedio y la desviación estándar. El promedio y desviación estándar para la densidad son 11.32 y 0.69; para la resiliencia son 27.52 y 3.28; para la dureza son 186.33 y 37.40; para la resistencia a la tracción son 50.19 y 2.39; para el porcentaje de elongación son 63.55 y 11.32; y para el comportamiento al fuego son 3.42 y 0.20, respectivamente. A partir de esto se identificó las propiedades con mayor desviación estándar, que son: Dureza B, elongación y resiliencia; lo que nos indica que existe una alta variación o dispersión con respecto a la media de todos los resultados de cada propiedad, además, se verificó que es debido por la alta diferencia existente entre el valor máximo y valor mínimo de la propiedad, la cual se presenta como el rango de variación, donde para las propiedades descritas anteriormente, se presentó los valores de 97 N, 35.69 % y 10,14 kPa, respectivamente. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la variación o dispersión encontrada en los resultados de estas propiedades no siempre significa que los factores seleccionados del diseño experimental

provocan una diferencia significativa. En la Tabla 13 se presenta un resumen de la estadística descriptiva de los experimentos.

Tabla 13

Estadística descriptiva de los experimentos

Criterio	Densidad (kg/m³)	Resiliencia (%)	Dureza B -65 % (N)	Res. Tracción (kPa)	Elongación (%)	Comp. al fuego (mm/s)
Máximo	12,30	31,04	241,00	54,12	82,74	3,80
Mínimo	10,53	20,90	144,00	46,23	47,05	3,18
Rango	1,77	10,14	97,00	7,89	35,69	0,62
Promedio	11,32	27,52	186,33	50,19	63,55	3,42
Desviación estándar	0,69	3,28	37,40	2,39	11,32	0,20

3.3.2. Análisis de varianza (ANOVA)

En esta parte del estudio, se reporta los resultados respectivos del análisis de varianza (ANOVA) para la densidad, resistencia a la tracción, porcentaje de elongación y comportamiento al fuego, que son las propiedades físico-mecánicas en las que se encontró efectos significativos. En cuanto, a las demás propiedades, se reporta su análisis de varianza en anexos.

En la Tabla 14 se presenta el análisis de varianza (ANOVA) para la densidad, donde se verificó la existencia de un factor que influye de manera significativa en esta propiedad, que es el catalizador amínico debido a que presentó un valor de p-Value <0.05. Asimismo, eso se comprobó mediante la interpretación de la Figura 8, donde el catalizador amínico sobrepasa la marca de referencia de los efectos estandarizados, por lo que se consideró estadísticamente significativo, además, al presentar un valor positivo, la variación de este factor aumenta la respuesta, es decir, la densidad.

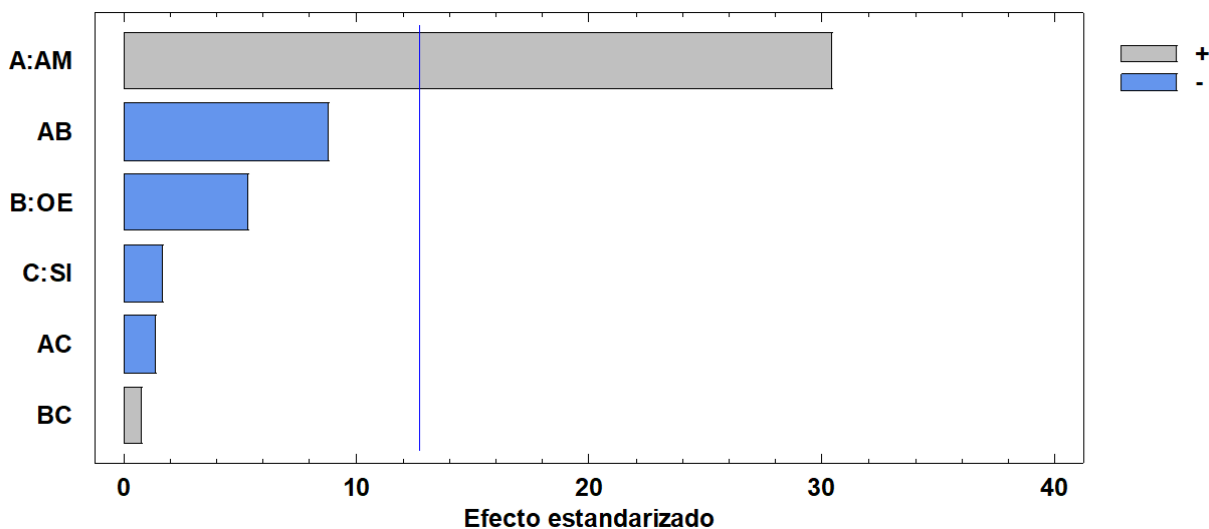
Tabla 14

Análisis de varianza (ANOVA) de la densidad

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
AM	1	3,34111	3,34111	924,88	0,021*
OE	1	0,10351	0,10351	28,65	0,118
SI	1	0,01051	0,01051	2,91	0,338
AM*OE	1	0,27751	0,27751	76,82	0,072
AM*SI	1	0,00661	0,00661	1,83	0,405
OE*SI	1	0,00211	0,00211	0,58	0,584
Error	1	0,00361	0,00361		
Total	7	3,74499			

Figura 8

Diagrama de Pareto estandarizada para la densidad.



Este resultado concuerda con el estudio de Wright et al. (2022), en el cual se presentó un diseño experimental teniendo como factor del estudio al catalizador amínico en las experimentaciones, en

un rango de 0 a 2.1 pphp (partes por 100 partes de polioliol), obteniendo como resultado un incremento de forma lineal de la altura normalizada, que es un parámetro donde se divide la altura máxima alcanzada con respecto a la masa de la espuma, asimismo, el tiempo máximo para alcanzar la altura máxima decrece de forma exponencial con el aumento del catalizador amínico. A partir de esta premisa, los cambios que se presentaron de la altura normalizada indican la influencia del catalizador amínico en las propiedades físicas de las espumas flexibles de poliuretano, particularmente en la densidad de la espuma.

De igual forma, Suzuki & Takahashi, (2011) obtuvo resultados semejantes a los expuestos en la comparación de dos catalizadores amínicos, que son TEDA (L33) y RTEDA, disueltas con dipropilenglicol al 33% en distintos niveles. Se encontró que el catalizador amínico TEDA L33, con una alta capacidad catalítica de gelificado, produjo una disminución en la densidad del producto final a medida que aumentaba la concentración. Por otro lado, para el catalizador RTEDA, que mostraba menor reactividad, se observó un aumento de 0.2 kg/m^3 en la densidad de la espuma al aumentar la concentración del catalizador del 0.15% a 0.20%.

Gattuso et al., (1990), informaron que el aumento en la cantidad de catalizador amínico en la formulación de poliuretano resultaba en un incremento en la formación de enlaces urea, lo que a su vez aumentaba el contenido de segmento rígido en el polímero. Según los resultados obtenidos, se pudo observar que, a pesar de una ligera disminución en la densidad debido a la presencia de la amina, se producía una mejora en propiedades como la resistencia a la tracción y al desgarre. Sin embargo, también se notó una reducción en el porcentaje de elongación.

En la Tabla 15 se presenta el análisis de varianza (ANOVA) para la resistencia a la tracción, donde se verifica la existencia de dos factores que influyen de manera significativa en esta propiedad, que es el catalizador amínico y el catalizador organometálico, porque presentan un valor de p-Value <0.05 . Asimismo, esta premisa se comprueba mediante la interpretación de Figura 9, donde el catalizador organometálico sobrepasa la línea de referencia de los efectos estandarizados con una gran diferencia, y a su vez, presenta un valor positivo, por lo que su variación aumenta la resistencia a la tracción. Mientras que el catalizador amínico sobrepasa la marca de referencia con una mínima diferencia, sin embargo, también es un factor estadísticamente significativo, pero este presenta un valor negativo, por lo que su variación disminuye la resistencia a la tracción.

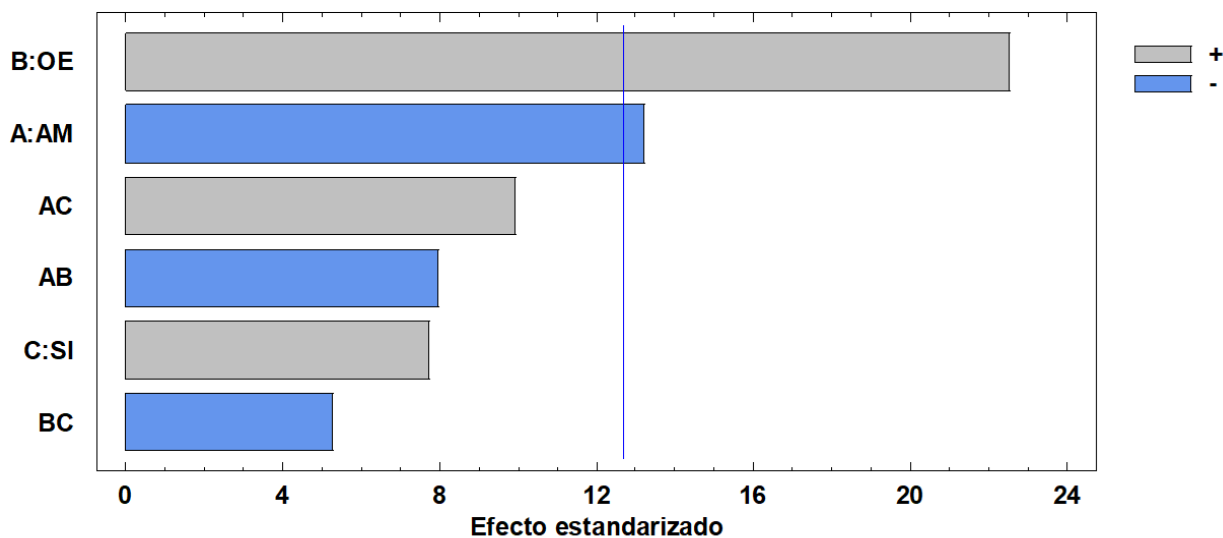
Tabla 15

Análisis de varianza (ANOVA) de la resistencia a la tracción

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
AM	1	8,405	8,405	174,92	0,048*
OE	1	24,3602	24,3602	506,98	0,028*
SI	1	2,8561	2,8561	59,44	0,082
AM*OE	1	3,0258	3,0258	62,97	0,080
AM*SI	1	4,7124	4,7124	98,07	0,064
OE*SI	1	1,3285	1,3285	27,65	0,120
Error	1	0,048	0,048		
Total	7	44,736			

Figura 9

Diagrama de Pareto estandarizado para la resistencia a la tracción.



Cabe recalcar que niveles bajos de catalizador amínico significó una disminución en la densidad y por ende una disminución en la resistencia a la tracción, por lo que se ajustaría a la bibliografía. En

diferentes investigaciones se ha analizado cómo los catalizadores de amina y organometálico afectan las propiedades de las espumas de PU. Por ejemplo, Luo et al., (2018) estudiaron el efecto de la trietanolamina y encontraron que cuando se aumenta la cantidad de este catalizador mejoraba la resistencia a la tracción y al desgarro de las espumas, posiblemente debido a un engrosamiento de las paredes celulares. Sin embargo, se observó que la elongación antes de la ruptura disminuía, ya que esto resultaba en una mayor densidad de reticulación en la espuma, limitando la flexibilidad de sus cadenas y reduciendo su capacidad de estiramiento. Mendelsohn et al., (1965) informaron resultados similares en su estudio, donde un aumento en el contenido de Octoacto de Estaño también resultó en una mayor densidad en las espumas y, como resultado, en una mejor resistencia a la tracción. Por otro lado, (Dhaliwal et al., 2019) examinaron las propiedades de las espumas de poliuretano utilizando un polioli de soya y ajustando la cantidad de agente soplante y catalizador organometálico. Descubrieron que al aumentar el tamaño de las celdas de espuma mediante una mayor cantidad de agente soplante y una menor cantidad de catalizador organometálico, disminuía la resistencia a la tracción de las espumas.

En la Tabla 16 se presenta el análisis de varianza (ANOVA) para el porcentaje de elongación, donde se verifica la existencia de tres factores que influyen de manera significativa en esta propiedad, que son el catalizador organometálico, catalizado amínico y la interacción de estos dos factores, porque presentan un valor de p-Value <0.05 . Asimismo, esta premisa se comprueba mediante la interpretación de la Figura 10, donde el catalizador organometálico sobrepasa la línea de referencia de los efectos estandarizados con una gran diferencia, y a su vez, presenta un valor positivo, por lo que su variación aumenta el porcentaje de elongación. También, el catalizador amínico sobrepasa la línea de referencia con la misma diferencia que el factor descrito anteriormente, por lo que el efecto de su variación si genera un gran cambio en la respuesta final, asimismo, presenta un valor negativo, por lo que su variación disminuye la propiedad en cuestión. Y, por último, la interacción entre los factores significativos descritos anteriormente, sobrepasa con una mínima diferencia la línea de referencia, por lo que se puede intuir que como los dos factores descritos son estadísticamente significativos, entonces su interacción también será significativa, y presenta un valor negativo, por lo que la variación de esta interacción disminuye la propiedad.

Esta propiedad está íntimamente relacionada con el porcentaje de elongación porque son propiedades que dependen directamente del grado de entrecruzamiento, esto se puede verificar mediante la correlación de Pearson entre las propiedades con un valor de 0.95, lo que representa una correlación fuerte entre las propiedades. Debido a esto, se verifica que los mismos factores que

afectan a la resistencia a la tracción, también afectan al porcentaje de elongación, con la adición de la interacción de estos dos factores.

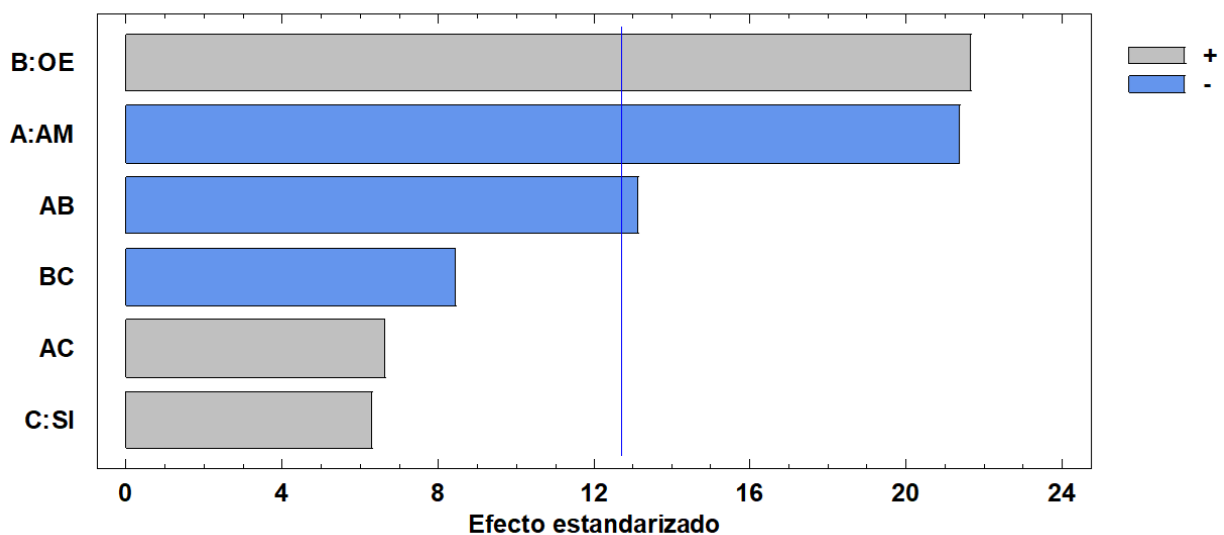
Tabla 16

Análisis de varianza (ANOVA) del porcentaje de elongación

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
AM	1	344,006	344,006	454,76	0,030*
OE	1	353,78	353,78	467,68	0,029*
SI	1	30,109	30,109	39,8	0,100
AM*OE	1	129,766	129,766	171,55	0,049*
AM*SI	1	33,374	33,374	44,12	0,095
OE*SI	1	53,872	53,872	71,22	0,075
Error	1	0,756	0,756		
Total	7	945,664			

Figura 10

Diagrama de Pareto estandarizada para el porcentaje de elongación.



La resistencia a la tracción está estrechamente relacionada con el porcentaje de elongación, como se explicó anteriormente. Esto se debe a que un aumento en la densidad mejora la resistencia a la tracción debido a la presencia de una mayor cantidad de segmentos rígidos, entre otros factores, que limitan la capacidad de estiramiento del producto. Por ejemplo, el estudio realizado por (Mendelsohn et al., 1965), se investigó el impacto del octoato de estaño en las propiedades físicas de las espumas de poliuretano. En este caso, se observó que un aumento en la cantidad de este catalizador aceleraba la reacción química, lo que resultaba en la formación de celdas cerradas más pequeñas que atrapaban el gas generado. Esto, a su vez, mejoraba significativamente la densidad, así como la resistencia a la compresión y a la tensión. Sin embargo, este aumento en la densidad también implicaba una reducción en el porcentaje de elongación del material.

Del mismo modo, en el estudio realizado por Mazo P. & Ríos L. (2009), se investigó la densidad y la resistencia a la tracción en función de las variaciones en la cantidad de agua, el catalizador amínico y el catalizador organometálico, todos ellos mantenidos en un cambio constante de 0.5 g en tres experimentos. En la primera experimentación, se obtuvo un valor de resistencia a la tracción del 91.5%, mientras que, en la segunda experimentación, este valor disminuyó a 82.6%. Sin embargo, en la tercera experimentación, se registró un aumento en la resistencia a la tracción, alcanzando un valor del 85.6%. Estos resultados ponen de manifiesto que el porcentaje de elongación no depende únicamente de un factor aislado, sino de la interacción de varios elementos, en este caso, de los catalizadores con el agente soplante.

En la Tabla 17 se presenta el análisis de varianza (ANOVA) para el comportamiento al fuego, donde se verifica la existencia de un factor que influye de manera significativa en esta propiedad, que es la interacción entre el catalizador organometálico y el catalizador amínico dado que presenta un valor de p-Value <0.05. Asimismo, esta premisa se puede comprobar mediante la interpretación de la Figura 11, donde la interacción de estos dos catalizadores sobrepasa la marca de referencia de los efectos estandarizados con una gran diferencia, y presenta un valor negativo, por lo que su disminución aumenta la velocidad de combustión.

Es importante recalcar que no existe información suficiente acerca de esta interacción de catalizadores con esta propiedad. Lenz et al., (2020) llevaron a cabo un estudio para evaluar el impacto de la concentración de catalizadores en la formación de espumas de poliisocianurato (PIR). En este caso, se introdujo acetato de potasio en la formulación con un índice de NCO de 3.2. Los resultados mostraron que esta adición de catalizador condujo a una notable mejora en la resistencia

al fuego de los productos. Esto se debió a que el exceso de isocianato, en presencia del catalizador, dio lugar a la formación de polisocianurato, un polímero con enlaces más robustos en comparación con los enlaces uretano. Además, el aumento en la concentración de catalizadores resultó en una mayor densidad y en la formación de células cerradas en la espuma. Esto limitó la disponibilidad de oxígeno para sostener la propagación de la llama. También, se observó que el aumento en la concentración de catalizadores generó cadenas poliméricas más largas, lo que redujo la liberación de productos volátiles inflamables durante la combustión

Cabe recalcar que usar índices de NCO elevados puede afectar las demás propiedades que caracterizan a una espuma de baja densidad por lo que se debe evaluar la introducción de aditivos. Visakh et al., (2019) recopilaron los estudios clave sobre retardantes de llama en poliuretanos en donde destacaron que para conferir resistencia al fuego a los productos de poliuretano flexible (PUF), es esencial incorporar agentes retardantes de la llama. Estos agentes pueden incluir nanomateriales, polielectrolitos y compuestos halogenados, entre otros.

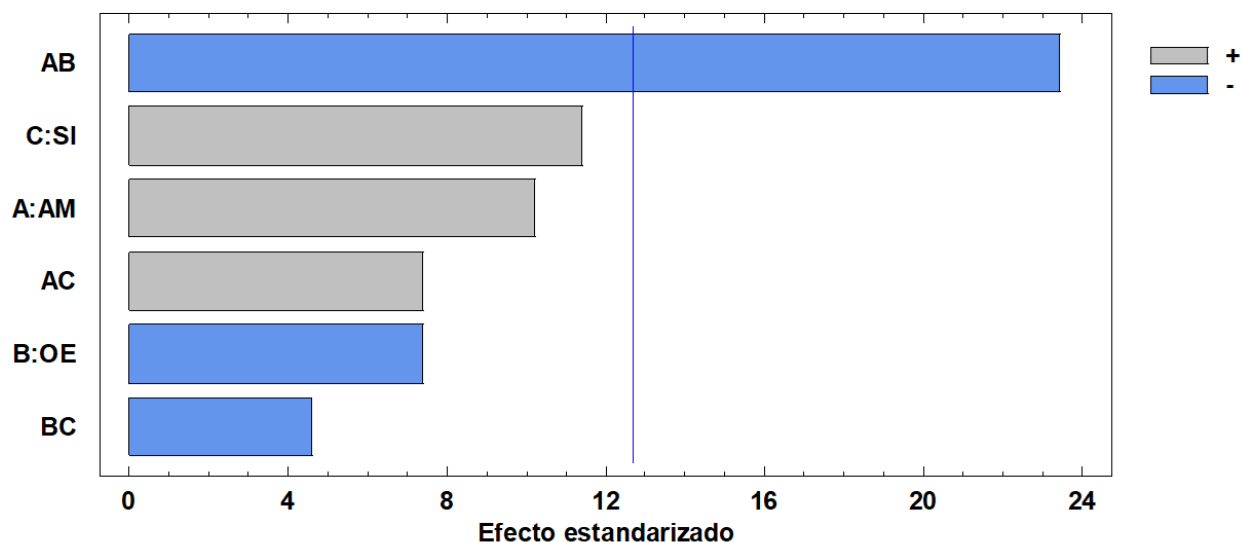
Tabla 17

Análisis de varianza (ANOVA) del comportamiento al fuego

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
AM	1	0,032512	0,032512	104,04	0,062
OE	1	0,017112	0,017112	54,76	0,086
SI	1	0,040612	0,040612	129,96	0,056
AM*OE	1	0,171113	0,171113	547,56	0,027*
AM*SI	1	0,017113	0,017113	54,76	0,086
OE*SI	1	0,006612	0,006612	21,16	0,136
Error	1	0,000312	0,000312		
Total	7	0,285387			

Figura 11

Diagrama de Pareto estandarizada para el comportamiento al fuego.



3.4. Análisis de gráficos de superficie

En esta parte del estudio, se presentan gráficas de superficie de respuesta para cada propiedad, en las cuáles se encontró que los factores escogidos en el diseño experimental presentan diferencias significativas en las respuestas, debido a la variación del mismo. En la mayoría de propiedades se encontró que el catalizador amínico, catalizador organometálico y su interacción, son los principales factores que presentaron diferencias significativas en las propiedades, entonces mediante esto se determinó como la variación de cada nivel de los catalizadores puede afectar a la respuesta.

3.4.1. Gráfico de superficie de respuesta para la densidad

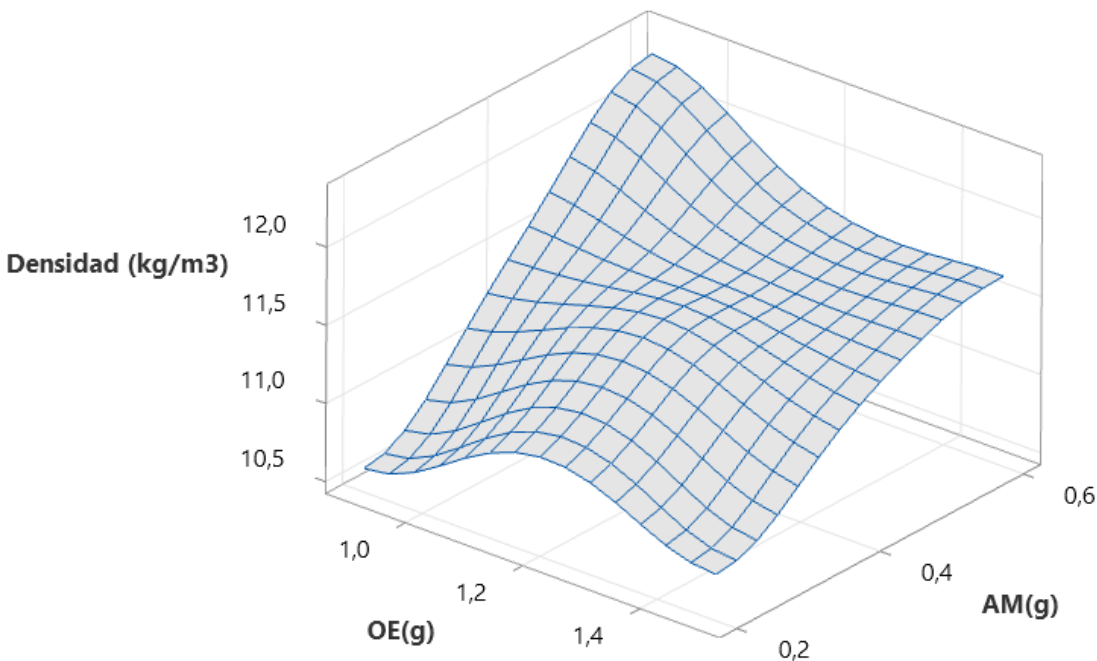
En la Figura 12 se presenta el gráfico de superficie de respuesta para la densidad, donde se recuerda que el factor de catalizador amínico provoca una variación significativa en la respuesta, sin embargo, la interacción entre los dos catalizadores está muy próximo a ser significativa, según la Figura 8. Por ende, se grafica la densidad en función de estos dos catalizadores, y se encontró que, al aumentar a 0.6 g de catalizador amínico y disminuir a 1 g el catalizador organometálico, se obtuvo la densidad más alta. Sin embargo, el objetivo para esta propiedad es

mantener su valor según la especificación de este tipo de espuma, en este caso, que el valor de la densidad sea igual o más cercano a 10 kg/m^3 , sin que este cambio pueda afectar a los costos asociados a la formulación estándar.

A partir de esto, se encuentra que al disminuir la cantidad de catalizador amínico a 0.2 g y la cantidad de catalizador organometálico a 1 g , y manteniendo la cantidad de silicona de la formulación estándar, que es 5.6 g , se obtiene la más baja densidad, con un valor de 10.6 , cuyo valor es muy cercano a la especificación de este tipo de PUF.

Figura 12

Gráfico de superficie de respuesta que representa la relación entre el catalizador amínico (AM), el catalizador organometálico (OE) y la densidad de la espuma PU.



3.4.2. Gráfico de superficie de respuesta para la resistencia a la tracción

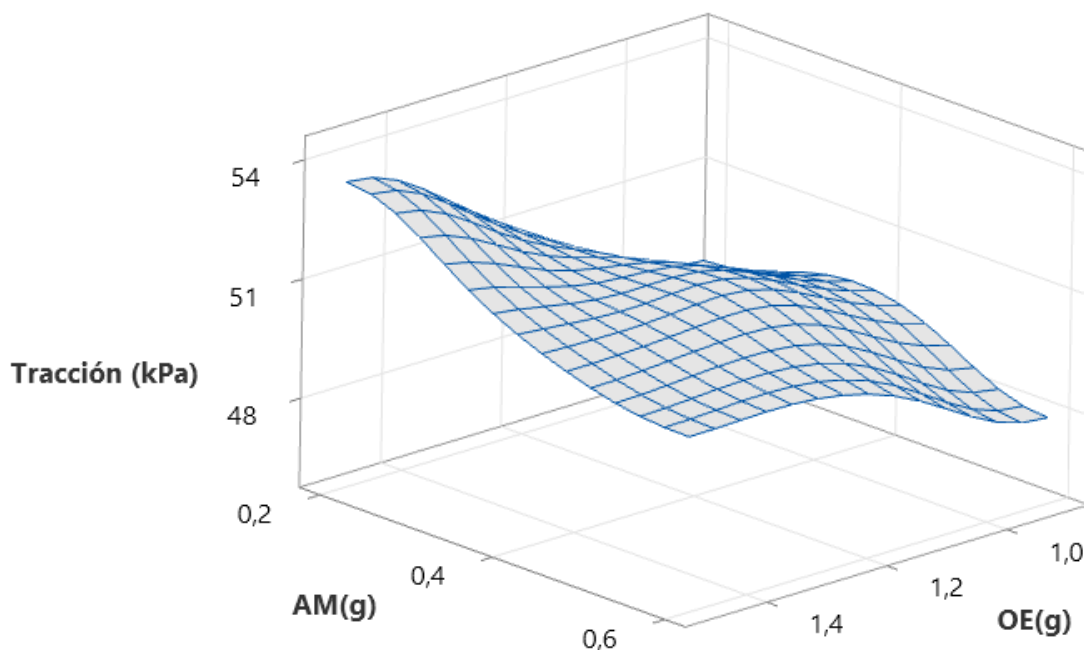
En la Figura 13 se presenta el gráfico de superficie de respuesta para la resistencia a la tracción, donde se recuerda que los factores de cantidad catalizador amínico y catalizador organometálico, generan una variación significativa en la respuesta, según el análisis de varianza presentado en la Tabla 15. Por ende, se grafica la resistencia a la tracción en función de estos dos catalizadores,

y se encontró que, al aumentar a 1.4 g de catalizador organometálico y disminuir a 0.2 g el catalizador amínico, se obtuvo la resistencia a la tracción más alta. Sin embargo, el objetivo para esta propiedad es mantener su valor alrededor de los resultados de la formulación estándar, o en el mejor de los casos, aumentar su resistencia sin que esta mejora influya en el aumento de los costos asociados de la formulación estándar.

A partir de esto se encuentra que, para la misma variación óptima de los factores encontrada para la densidad, obtenemos la resistencia a la tracción más baja. Entonces, se puede recurrir a mantener la cantidad de catalizador amínico, e identificar la mejor cantidad de catalizador organometálico para mejorar esta propiedad, y también mantener la densidad según las especificaciones para este tipo de PUF.

Figura 13

Gráfico de superficie de respuesta que representa la relación entre el catalizador amínico (AM), el catalizador organometálico (OE) y la resistencia a la tracción de la espuma PU.



3.4.3. Gráfico de superficie de respuesta para el porcentaje de elongación

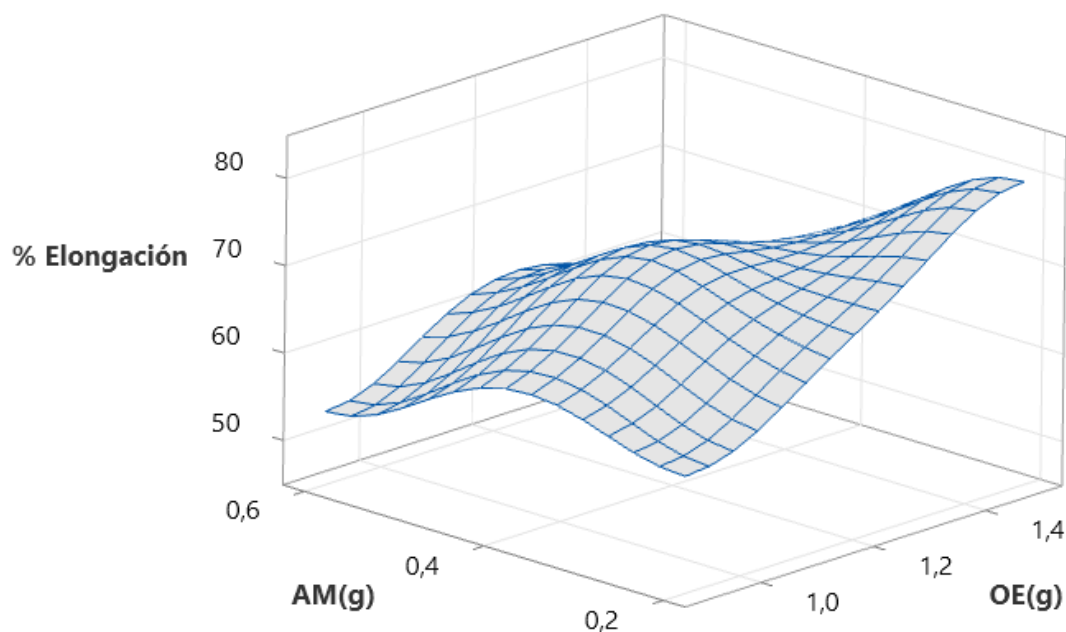
En la figura 14 se presenta el gráfico de superficie de respuesta para el porcentaje de elongación, donde se recuerda que los factores: cantidad de catalizador amínico, catalizador organometálico

y su interacción, provocan una variación significativa en la respuesta, según el análisis de varianza presentado en la Tabla 16. Por ende, se grafica el porcentaje de elongación en función de estos dos catalizadores, y se encontró que, al aumentar a 1.4 g de catalizador organometálico y disminuir a 0.2 g el catalizador amínico, se obtuvo el porcentaje de elongación más alta. Sin embargo, el objetivo para esta propiedad es mantener su valor alrededor de los resultados de la formulación estándar, o en el mejor de los casos, aumentar su resistencia sin que esta mejora influya en el aumento de los costos presentados de la formulación estándar.

A partir de esto se encuentra que, para la misma variación óptima de los factores encontrada para la densidad, obtenemos el porcentaje de elongación baja. Asimismo, al comparar con la variación óptima de los factores encontrada para la resistencia a la tracción, esta propiedad presenta el mismo comportamiento, por ende, se debe mantener la estrategia de mantener la cantidad de catalizador amínico, e identificar la mejor cantidad de catalizador organometálico para mejorar esta propiedad, y a su vez, mantener a la densidad según las especificaciones para este tipo de PUF.

Figura 14

Gráfico de superficie de respuesta que representa la relación entre el catalizador amínico (AM), el catalizador organometálico (OE) y el porcentaje de elongación de la espuma PU.

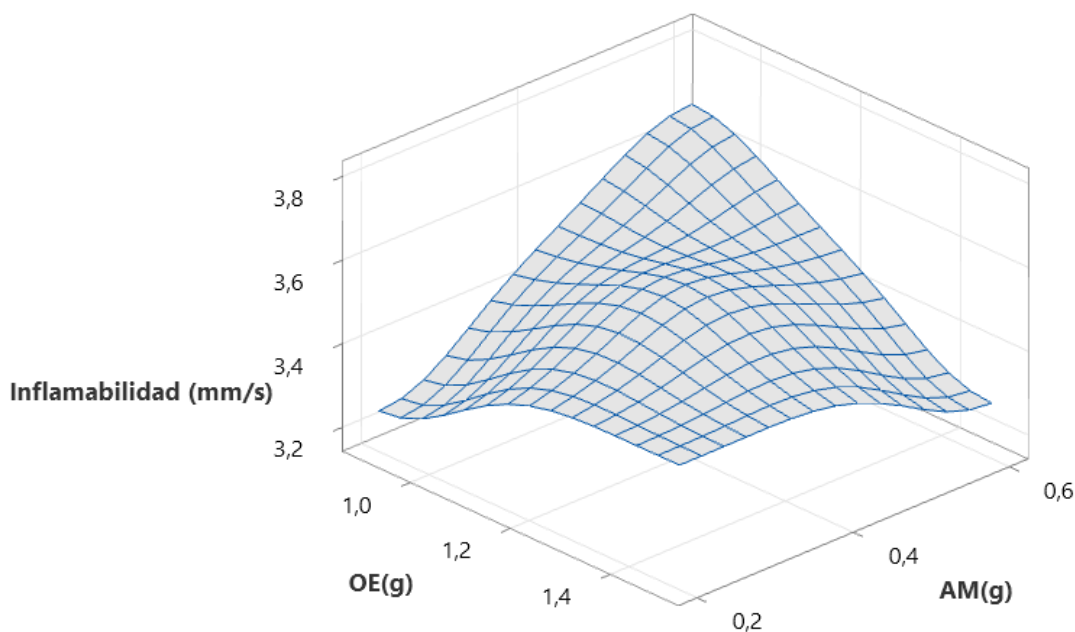


3.4.4. Gráfico de superficie de respuesta para el comportamiento al fuego

En la Figura 15 se presenta el gráfico de superficie de respuesta para el comportamiento al fuego, que está basada en la velocidad de combustión de la probeta, donde se recuerda que la interacción de los factores de cantidad de catalizador amínico y cantidad de catalizador organometálico, provocan una variación significativa en la respuesta, según el análisis de varianza presentado en la Tabla 17. Por ende, se grafica la velocidad de combustión en función de estos dos catalizadores, y se encontró que, al disminuir a 1 g la cantidad de catalizador organometálico y disminuir a 0.2 g la cantidad de catalizador amínico, se obtuvo que la velocidad de combustión es la más baja. A partir de esto, el objetivo para esta propiedad es disminuir la velocidad de combustión, aunque es una propiedad que no ha sido estudiada profundamente para tener especificaciones técnicas necesarias para garantizar su calidad. A partir de esto, se encuentra que, para la misma variación óptima de los factores experimentales encontrada para la densidad, obtenemos la velocidad de combustión más baja.

Figura 15

Gráfico de superficie de respuesta que representa la relación entre el catalizador amínico (AM), el catalizador organometálico (OE) y la inflamabilidad de la espuma PU.



Entonces, a partir del estudio e interpretación de todos los gráficos de superficie de respuesta para cada propiedad, se pudo encontrar que la variación óptima para la densidad es igual a la variación óptima para el comportamiento al fuego, que fue reducir la cantidad de catalizador organometálico a 1 g, y también reducir la cantidad de catalizador amínico a 0.2 g. Mientras que, para las demás propiedades estudiadas, se mantiene constante la reducción de cantidad de catalizador amínico, en un valor de 0.2 g, pero la cantidad de catalizador organometálico aumenta a 1.4 g. Por ende, se debe determinar la variación de factores óptima para garantizar que todas las propiedades se mantengan dentro de las especificaciones y, además, se pueden mejorar alguna de sus propiedades, sin que esta mejora aumente los costos actuales de la formulación estándar.

3.5. Correlación de variables

En la Tabla 18, se muestran los coeficientes de correlación de Pearson entre las diferentes propiedades físico-mecánicas determinadas. De manera general, a partir de la densidad aparente se relacionan o cambian las demás propiedades, donde se verifica una correlación moderada con la elongación, la cual tiende a disminuir con el aumento de la densidad, y el comportamiento al fuego, la cual tiende a aumentar con el aumento de la densidad. Asimismo, se podría considerar una correlación moderada, por su valor cercano a 0.5, con la resiliencia, cuyo valor aumenta con la densidad, y la resistencia a la tracción, cuyo valor disminuye con la densidad.

En el estudio de Mazo P. & Ríos L. (2009) se presenta resultados donde el aumento de la densidad no siempre representa un aumento de la resistencia a la tracción, por lo que el resultado de esta propiedad dependerá de la combinación, y de la variación de los factores más influyentes en esta propiedad. De la misma manera, estos resultados también se relacionan con la propiedad del porcentaje de elongación.

Entonces, a partir de la revisión de estos dos estudios se puede evidenciar que la correlación de la densidad con las diferentes propiedades no siempre representa relaciones significativas, sino que esto dependerá de las formulaciones utilizadas para la producción de espumas flexibles de poliuretano. Por otro lado, esta diferencia de resultados puede deberse a la falta de capacitación para un correcto desarrollo del ensayo o debido a la presencia de defectos en las probetas utilizadas, ya que según el estudio de Amarandei M. et al (2013) la presencia de defectos en las probetas para las pruebas de resistencia a la tracción y porcentaje de elongación, suponen una

reducción del valor real de la propiedad hasta un 24 % y 50 %, respectivamente. Esto puede justificar las incongruencias de nuestro estudio con los demás, debido a que se realizó un diseño experimental donde se varían varios factores, y se presentaron diferentes imperfecciones en las espumas obtenidas en cada experimentación.

En cuanto a la resiliencia se presenta una correlación moderada con el comportamiento al fuego, con un valor de 0.81, que es un valor cercano a 0.9, por lo que es una correlación que se debe tener en cuenta. En el estudio de Márquez (2007), la resiliencia está íntimamente relacionada con el tamaño, distribución de las celdas y porosidad, por lo que cuando aumenta la resiliencia disminuye el tamaño de celda, y posee una mayor homogeneidad de las celdas, por lo que aumentan la cantidad de redes poliméricas, así como también, su grado de entrecruzamiento. Por ende, con el aumento de la resiliencia también aumenta la densidad, lo que se puede relacionar con el Lefebvre et al. (2004), el mismo que además plantea que las espumas PUF altamente porosas tienden a tener una alta tasa de propagación de la llama y una emisión térmica elevada.

Tabla 18

Coefficientes de correlación Pearson entre las propiedades mecánicas.

	Densidad	Resiliencia	Dureza	R. tracción	Elongación
Resiliencia	0,48	-			
Dureza	-0,12	-0,44	-		
R. tracción	-0,47	0,03	-0,07	-	
Elongación	-0,54*	0,16	-0,23	0,95**	-
Comp. al fuego	0,54*	0,81*	-0,30	0,11	0,15

Nota. El símbolo (**) marca un coeficiente mayor a 0.9 indicando que existe una correlación fuerte entre las variables, y (*) marca un coeficiente mayor a 0.5 lo que manifiesta una correlación moderada.

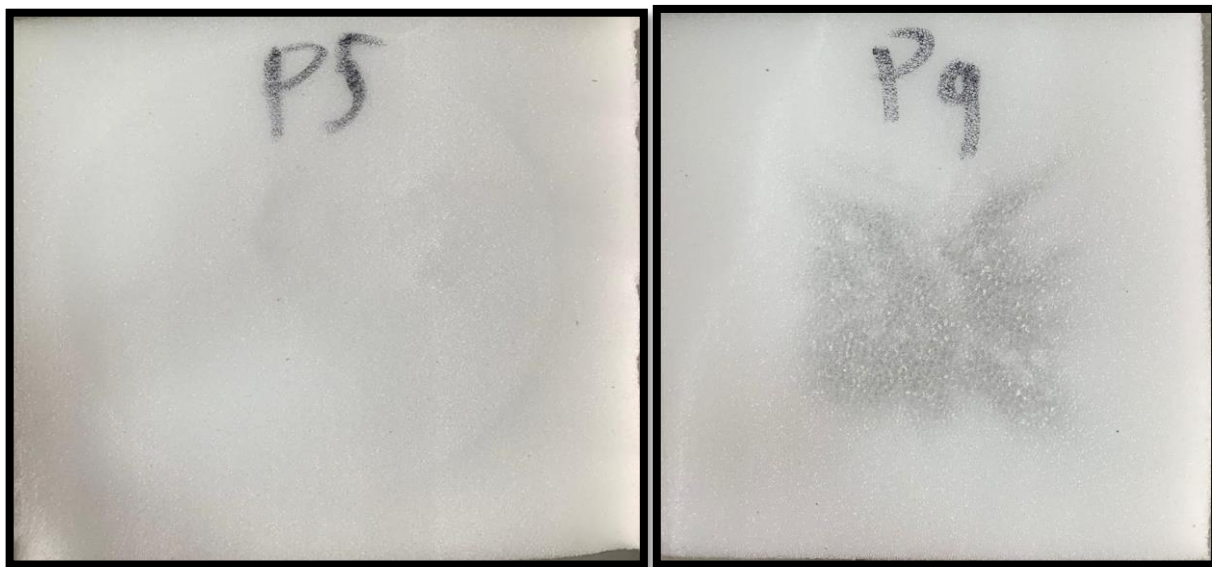
3.6. Corroboración de los experimentos

De acuerdo con las propiedades de cada experimento realizado se observó que el experimento P5 presenta las mejores condiciones técnicas, al mantener o mejorar las propiedades físico-mecánicas con respecto a la formulación estándar, y económicas, ya que permite reducir la

cantidad de los reactivos AM y SI en la formulación. Por ende, es factible que sea producido a escala industrial y, además, presenta las cantidades de los factores establecidos como ideales mediante la interpretación de los gráficos de superficie de respuesta. Por el contrario, el experimento P9 presenta unas pésimas propiedades y características por lo que se repitió los experimentos con la finalidad de reafirmar los resultados. La diferencia entre estos experimentos se presenta en la Figura 16.

Figura 16

Espumas de poliuretano correspondiente al experimento P5 y P9



En la Tabla 11 se presentan los resultados de las propiedades mecánicas de los experimentos P5 y P9, y se observa que los valores son similares a sus respectivas réplicas, que son presentadas en la Tabla 19. Es importante destacar que también se mantuvieron las características visuales de los experimentos P5 y P9. En el caso del experimento P5, se pudo apreciar una excelente apariencia, sin ningún tipo de defecto. Por otro lado, el experimento P9 presentó rugosidades, burbujas y defectos en la superficie, lo cual afectó su aspecto estético. Entonces, a partir de la realización de la réplica se pudo comprobar que las propiedades obtenidas son semejantes, y cuya formulación puede probarse a nivel industrial, en la siguiente etapa del estudio.

Tabla 19

Resultados de las pruebas mecánicas realizadas a los experimentos P5 y P9 con sus respectivas réplicas

Experimento	Prueba	Densidad (kg/m ³)	Resiliencia (%)	Dureza B (65 %)	Res. Tracción (kPa)	Elongación (%)	Comp. al fuego (mm/s)
AM-OE+SI-	P5	10,69	27,66	171	54,12	82,74	3,45
Réplica	P5	10,47	27,43	160	56,58	87,13	3,79
AM+OE+SI+	P9	11,57	25,49	241	51,22	60,26	3,37
Réplica	P9	11,01	22,28	231	58,70	70,23	3,77

Nota Las réplicas se realizaron con las mismas materias primas a condiciones medioambientales similares 18°C y humedad del ambiente 72%.

3.7. Comprobación en línea de producción

Debido a las características y resultados obtenidos, se optó por aplicar la formulación del experimento P5 en condiciones de temperatura y humedad similares a escala industrial. La Tabla 20 presenta una comparación de las propiedades obtenidas en el laboratorio (LAB) y a nivel industrial (IND). La prueba fue realizada a 19.5°C y humedad relativa del 62%

Tabla 20

Reporte de la prueba industrial aplicando la fórmula del experimento P5

Experimento	Densidad (kg/m ³)	Resiliencia (%)	Dureza B (65 %)	Res. Tracción (kPa)	Elongación (%)	Comp. al fuego (mm/s)
LAB	10,69	27,66	171	54,12	82,74	3,45
IND	10,42	25,20	175	60,48	72,14	3,55
Variación	2,52%	1,66%	2,33%	11,75%	12,81%	2,89%

Como se puede denotar las propiedades son semejantes, sin embargo, existe una diferencia significativa en la resistencia a la tracción y elongación los cuales se puede atribuir a factores como de procedimiento, tiempo de mezclado, entre otros.

4. Conclusiones

Se realizó una evaluación en el proceso de formulación de una espuma PUF de 10kg/m^3 , se observaron deficiencias en el control de calidad en todas las etapas del proceso de producción de PUF. Estas incluyeron la falta de precisión en la dosificación de reactivos y la influencia de condiciones ambientales en el contenido de agua del polioliol, que es higroscópico. Además, se identificó la falta de equipo adecuado en el área de producción y la falta de instrumentos de medición para evaluar y considerar las condiciones ambientales en las formulaciones.

Se confirmó que los reactivos cumplen con los requisitos de índice de NCO, número de hidroxilo y contenido de isocianato según lo establecido en la literatura para la producción de PUF. Se identificó una relación significativa entre el catalizador AM y la densidad, observándose en las fórmulas en el nivel alto de AM densidades de hasta $12,30\text{ kg/m}^3$. De manera similar, la resistencia a la tracción mejora con incrementos en AM y OE. En cuanto al porcentaje de elongación antes de la rotura, se observó un aumento en niveles bajos de catalizador amínico y altos niveles de catalizador organometálico.

En relación al comportamiento al fuego, se identificó que la interacción entre los catalizadores AM y OE influye directamente en esta propiedad. Sin embargo, no se encontró evidencia suficiente para evaluar los efectos de las variables en las propiedades de resiliencia y dureza por indentación. Por ende, se comprobó que la variación de estos factores sí afectan a las propiedades físico-mecánicas de las espumas PUF.

Mediante el análisis de gráficos de superficie, se determinaron los niveles óptimos de catalizador amínico y organometálico para algunas propiedades, destacando el experimento P5. Esta formulación optimizada se replicó a nivel de laboratorio e industrial, lo que resultó en variaciones de aproximadamente 2.52% en la densidad, 1.66% en la resiliencia, 2.33% en la dureza, 11.75% en la resistencia a la tracción, 12.81% en el alargamiento antes de la rotura y 2.89% en el comportamiento al fuego.

Al comparar la cantidad de reactivos de la formulación estándar y la formulación del experimento P5, se encontró la existencia de una disminución de la cantidad de catalizador amínico, un aumento de la cantidad de catalizador organometálico y una disminución de la cantidad de silicona. Esta variación de la cantidad de reactivos puede generar grandes beneficios económicos para la empresa.

5. Recomendaciones

Sería recomendable ampliar el rango de estudio a aproximadamente 12 meses para considerar todas las estaciones y fenómenos meteorológicos anuales que puedan influir en los resultados. Esta extensión permitiría una evaluación más completa y precisa de los efectos del medio ambiente en la polimerización de PU.

Se recomienda explorar mezclas de polioles con diferentes índices de hidroxilo y también considerar la incorporación de biopolioles con el objetivo de buscar mayor sostenibilidad y desarrollar productos más amigables con el medio ambiente.

Es importante resaltar que Baferani et al., (2018) han propuesto un método matemático para determinar las cantidades de los componentes en la fórmula de espuma de PU con el fin de lograr una densidad y otras propiedades cercanas a las deseada. Este enfoque incluso tiene en cuenta factores ambientales, lo que lo convierte en una herramienta recomendable para su aplicación interna en la creación y desarrollo de nuevos productos.

Para posteriores estudios, se puede hacer un seguimiento de los lotes, mediante una determinación de las propiedades físico-mecánicas del producto final, sin realizar ningún cambio en la formulación, y mediante esto, verificar la verdadera influencia de las condiciones ambientales.

Referencias

- Abdul-Rani, A. M. (2006). *The effect of mould temperature on properties of flexible PU Foam* [Thesis, Loughborough University].
https://repository.lboro.ac.uk/articles/thesis/The_effect_of_mould_temperature_on_properties_of_flexible_PU_Foam/9540908/1
- Abdullah, M., Ramtani, S. & Yagoubi, N. (2023). Mechanical properties of polyurethane foam for potential application in the prevention and treatment of pressure ulcers. *Engineering*, 19, 101237. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101237>
- Akindoyo, J., Beg, M., Ghazali, S., Islam, M., Jeyaratnama, N., & Yuvarajc, A. (2016). Polyurethane types, synthesis and applications – a review. *Journal of RSC advances*.
<https://doi.org/10.1039/C6RA14525F>
- Ako, M., & Kennedy, J. P. (1989). Polyisobutylene-based urethane foams. II. Synthesis and properties of novel polyisobutylene-based flexible polyurethane foams. *Journal of Applied Polymer Science*, 37(5), 1351-1361. <https://doi.org/10.1002/app.1989.070370518>
- Amin, R. (2016). Procesos para la síntesis de poliuretanos en base acuosa: modelado, validación y simulación. Tesis Doctoral. Universidad Nacional del Sur.
<https://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/handle/123456789/2638/Tesis%20Doctoral%20RCA%20Amin%20Ferril.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Andrade, M. (2015). Estudo de retardantes de chama, isentos de halogéneos, em espumas de Poliuretano monocomponente. Tesis de Maestría. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
<https://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/5604/1/Disserta%c3%a7%c3%a3o.pdf>
- Baferani, A. H., Keshavarz, R., Asadi, M., & Ohadi, A. R. (2018). Effects of Silicone Surfactant on the Properties of Open-Cell Flexible Polyurethane Foams. *Advances in Polymer Technology*, 37(1), 71-83. <https://doi.org/10.1002/adv.21643>
- Brydson, J. A. (1999). *Plastics materials* (7th ed). Butterworth-Heinemann.
- Cáceres, E. (2018). Optimización del proceso de colado de piezas, en elastómero termoplástico
- Chen, Y., Yuan, F., Guo, Y., Hu, D., Zhu, Z., Zhang, K., & Zhu, S. (2018). A novel mattress filling material comprising of luffa fibers and EVA resin. *Industrial Crops and Products*, 124, 213-215. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.07.074>

- Członka, S., Strąkowska, A., & Kairyte, A. (2020). Application of Walnut Shells-Derived Biopolyol in the Synthesis of Rigid Polyurethane Foams. *Materials*, 13(12), 2687. <https://doi.org/10.3390/ma13122687>
- De Lucas Freile, A. (2018). Síntesis y formulación de nuevas espumas de poliuretano flexibles con propiedades mejoradas. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante.
- Dhaliwal, G. S., Anandan, S., Chandrashekhara, K., Dudenhoefter, N., & Nam, P. (2019). Fabrication and Testing of Soy-Based Polyurethane Foam for Insulation and Structural Applications. *Journal of Polymers and the Environment*, 27(9), 1897-1907. <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01477-0>
- Díaz, E. & Muñoz, O. (2014). Estudio de las variables de síntesis de poliuretano a partir de aceite de ricino y glicerol. Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander. <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2014/152151.pdf>
- Ebewele, R. O. (1996). *Polymer Science and Technology*. CRC Press. pg. 183-184
- García M. (2017). Síntesis y caracterización de poliuretanos derivados de la glucosa para aplicaciones como recubrimientos sostenibles. Tesis de Grado. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/109098/tfg-m-nica-garcia-mestre-finalcompleto.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gattuso, M. J., Scott, R. V., House, D. W., Baumann, W. M., Frisch, K. C., Klempner, D., Xiao, H. X., & Shah, S. (1990). Secondary Amine Extended Flexible Polyurethane-Urea Foams. *Journal of Cellular Plastics*, 26(1), 48-62. <https://doi.org/10.1177/0021955X9002600103>
- Gómez, J. (2003). Evaluación del agente soplante HFC-245fa para espuma rígida de poliuretano. Tesis de Grado. Universidad de los Andes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/15809/u239268.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Hamidov, M., Çakmakçi, E., & Kahraman, M. V. (2021). Autocatalytic reactive flame retardants for rigid polyurethane foams. *Materials Chemistry and Physics*, 267, 124636. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124636>
- Herrington, R. (1997). Flexible Polyurethane Foams. Freeport, Texas: Associate Development.

- Huaraca, E. (2018). Formulación y proceso productivo de espumas de poliuretano en la empresa Corporación Surymar S.A.C.-Lima. Tesis de Grado. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. http://repositorio.unsch.edu.pe/xmlui/bitstream/handle/UNSCH/3415/TESIS%20Q505_Hua.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Imran, M., Kanti Bandyopadhyay, A., Karan Singh Gandhi, T., Rahaman, A., & Rehaan Chandan, M. (2021). Mechanical property enhancement of flexible polyurethane foam using alumina particles. *Materials Today: Proceedings*, 45, 4040-4044. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.754>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (2008). Materiales poliméricos celulares flexibles. Determinación de la resistencia a la tracción y alargamiento a la rotura (ISO 1798:2008, IDT)
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (2014). Materiales poliméricos celulares flexibles. Determinación de la dureza (Técnica de indentación) (ISO 2439:2014, IDT)
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (2000). Materiales poliméricos celulares flexibles. Evaluación en el laboratorio de las características de comportamiento al fuego de probetas pequeñas sometidas a una llama pequeña (ISO 3582:2000, IDT)
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (2006). Materiales poliméricos celulares flexibles. Determinación de la densidad aparente (ISO 845:2006, IDT)
- Izarra, I., Borreguero, A. M., Garrido, I., Rodríguez, J. F., & Carmona, M. (2021). Comparison of flexible polyurethane foams properties from different polymer polyether polyols. *Polymer Testing*, 100, 107268. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107268>
- Jia, P., Ma, C., Lu, J., Yang, W., Jiang, X., Jiang, G., Yin, Z., Qiu, Y., Qian, L., Yu, X., Hu, Y., Hu, W., & Wang, B. (2022). Design of copper sal-tgraphene nanohybrids to accomplish excellent resilience and superior fire safety for flexible polyurethane foam. *Journal of Colloid and Interface Science*, 606, 1205-1218. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.08.139>
- Kizilkaya, D., Ghermezcheshme, H., Sabzevar, S. E., Makki, H., & Kacar, G. (2023). Modeling surface segregation of smart PU coatings at hydrophilic and hydrophobic interfaces via coarse-grained molecular dynamics and mesoscopic simulations. *Progress in Organic Coatings*, 174, 107279. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.107279>
- Kobold, H. (2002). Análisis del tipo de Polioli en espumas de Poliuretano para piel integral soplada con agua. Tesis de Grado. Universidad de los Andes.

- <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/15738/u236812.pdf?sequence=1>
- Lenz, J., Pospiech, D., Paven, M., Albach, R. W., & Voit, B. (2020). Influence of the catalyst concentration on the chemical structure, the physical properties and the fire behavior of rigid polyisocyanurate foams. *Polymer Degradation and Stability*, 177, 109168. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109168>
- Li, M., Fang, H., Zhang, C., Du, M., & Wang, F. (2022). Study on the new polyurethane material suitable for foaming in water. *Construction and Building Materials*, 354, 129163. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129163>
- Luo, Y., Zou, J., Li, J., Zou, H., & Liang, M. (2018). Effect of crosslinking agent on properties and morphology of water-blown semirigid polyurethane foam. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(42), 46753. <https://doi.org/10.1002/app.46753>
- Macedo, V., Zimmermann, M., Koester, L., Scienza, L., Zattera, A. (2017). Obtenção de espumas flexíveis de poliuretano com celulose de *Pinus elliottii*. *Polímeros: ciência e tecnologia*. São Carlos. Vol. 27, nesp. (2017), p. 27-34. <http://hdl.handle.net/10183/173021>
- Mahmoud, A. A., Ma'moun, A. A., Nasr, E. A., & Soliman, E. A. (2016). The role of amine catalyst on the mechanical properties and morphology of polyurethane foam mortar mixes. *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector*, 11(40), 965-976. <https://doi.org/10.21608/auej.2016.19419>
- Mazo, P., Yarce, O. & Ríos, L. (2011). Síntesis de Espumas Rígidas de Poliuretano Obtenidas a partir de Aceite de Castor y Poliglicerol Empleando Calentamiento por Microondas. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 21, núm. 1, 2011, pp. 59-66 Associação Brasileira de Polímeros São Paulo, Brasil. <https://www.redalyc.org/pdf/470/47018760004.pdf>
- Mendonça, G. & De Oliveira, Thales. (2015). Estudo comparativo dos agentes de expansão HFC e HFO para determinar a viabilidade de seus usos na produção de espumas de poliuretano. Tesis de Grado. Universidade de São Paulo. <https://sistemas.eel.usp.br/bibliotecas/monografias/2015/MEQ15032.pdf>

- Mendelsohn, M. A., Black, R. G., Runk, R. H., & Minter, H. F. (1965). Dependence of physical properties on composition in a series of high load-bearing polyurethane foams. *Journal of Applied Polymer Science*, 9(8), 2715-2728. <https://doi.org/10.1002/app.1965.070090808>
- Mordor Intelligence. (2022). *Informe de mercado de poliuretano: Tamaño, participación, crecimiento y tendencias (2023-28)*. <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/polyurethane-market>
- Nabipour, H., Wang, X., Song, L., & Hu, Y. (2020). A fully bio-based coating made from alginate, chitosan and hydroxyapatite for protecting flexible polyurethane foam from fire. *Carbohydrate Polymers*, 246, 116641. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116641>
- Nofar, M., Büşra Küçük, E., & Batı, B. (2019). Effect of hard segment content on the microcellular foaming behavior of TPU using supercritical CO₂. *The Journal of Supercritical Fluids*, 153, 104590. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2019.104590>
- Ocampo, J. (2012). Criterios de formulación de espumas flexibles de poliuretano MDI basados en la evaluación cualitativa de propiedades finales realizadas a nivel laboratorio. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/11135/293747.2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Oppon, C., Hackney, P., Shyha, I. & Birkett, M. (2015). Effect of varying mixing ratios and pre-heat temperature on the mechanical properties of polyurethane (PU) foam. *Procedia Engineering*, 123, Pages 701-708. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.550>
- Organización Internacional para la Normalización (2009). *Plastics — Polyurethane raw materials — Determination of isocyanate content* (ISO-14896-2009). Recuperado el 30 de diciembre, de <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/50601/361a765d09bc438bb6515f2ae96316c4/ISO-14896-2009.pdf>
- Organización Internacional para la Normalización (2001). *Plastics - Polyols for use in the production of polyurethane -Determination of hydroxyl number* (ISO-14900-2001). Recuperado el 30 de diciembre, de <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/25888/c2dfb57164e64fd1aff9f3c3afe01b1e/ISO-14900-2001.pdf>

- Organización Internacional para la Normalización (2013). *Materiales poliméricos celulares flexibles-Espuma de poliuretano para aplicaciones bajo carga excluyendo refuerzos de alfombra-Requisitos* (ISO 5999:2013). Primera edición
- Organización Internacional para la Normalización (2006). Caucho. Procedimientos generales para preparar y acondicionar probetas para métodos de ensayo físicos (ISO 23529:2006)
- Pérez, D. (2015). Estudio de factibilidad para la producción y comercialización de espumas flexibles de poliuretano en la ciudad de Ambato. Tesis de Grado. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/4181/1/85T00371.pdf>
- Polaczek, K., Kurańska, M., & Prociak, A. (2022). Open-cell bio-polyurethane foams based on bio-polyols from used cooking oil. *Journal of Cleaner Production*, 359, 132107.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132107>
- Porras, M., Muñoz, C., Gil, A. & Quintana, G. (2012). Obtención de espumas de poliuretano con materiales lignocelulósicos. *Revista Investigaciones Aplicadas*. ISSN 2011-0413.
<http://revistas.upb.edu.co/index.php/investigacionesaplicadas>
- Prociak, A., Malewska, E., & Bąk, S. (2016). Influence of Isocyanate Index on Selected Properties of Flexible Polyurethane Foams Modified with Various Bio-Components. *Journal of Renewable Materials*, 4(1), 78-85. <https://doi.org/10.7569/JRM.2015.634129>
- Rojas AJ, Marciano JH y Williams RJ. Espumas rígidas de poliuretano: un modelo del proceso de formación de espuma. *Ingeniería y ciencia de polímeros*. 1982; 22(13): 840-844.
- Sarkar, S., Mestry, S., & Mhaske, S. T. (2022). Developments in phase change material (PCM) doped energy efficient polyurethane (PU) foam for perishable food cold-storage applications: A review. *Journal of Energy Storage*, 50, 104620.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104620>
- Sarmiento, M., (2007). Producción de PUF con celda grande y abierta. Tesis de Grado. Universidad de los Andes.
<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/23572/u302925.pdf?sequence=1>
- Simón, D., Borreguero, A. M., de Lucas, A., & Rodríguez, J. F. (2014). Glycolysis of flexible polyurethane wastes containing polymeric polyols. *Polymer Degradation and Stability*, 109, 115-121. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.07.009>

- Suhailuddin, S. H., Aprajith, K., Sanjay, B., Shabeeruddin, S. H., & Shamshath Begum, S. (2022). Development and characterization of flame retardant property in flexible polyurethane foam. *Materials Today: Proceedings*, 59, 819-826. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.115>
- Superintendencia de Compañías, Valores y Seguros. (2023). *Informe mercado de valores en Ecuador*. <https://www.supercias.gob.ec/portalscv/index.htm>
- Suzuki, T., & Takahashi, Y. (2011). *Novel Gelling Catalyst for Non-Emission Flexible Polyurethane Foam*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Novel-Gelling-Catalyst-for-Non-Emission-Flexible-Suzuki-Takahashi/f8984f2f44e4b88a7d9bd744b89b00ed9a22790a>
- Taguado, M. (2008). Síntesis y caracterización de propiedades mecánicas de poliuretanos biocompatibles. Tesis de Grado. Universidad del País Vasco. https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/49106/TFG_Taguado_Guayara_Melanie.pdf?sequence=2
- The Polyurethanes Raw Materials Analysis Committee (PURMAC). (1991). Determination of NCO Content of Aromatic Isocyanates. *Journal of Cellular Plastics*, 27(5), 459-483. <https://doi.org/10.1177/0021955X9102700502>
- Valderrama, C. (2004). Efecto del poliol poliéster en espumas rígidas de poliuretano. Tesis de Grado. Universidad de los Andes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/21133/u246049.pdf?sequence=1>
- Van Thuyne A. y Zeegers B. Estudio cinético de la formación de espumas de poliuretano flexible. *Revista de Plásticos Celulares*. 1978; Mayo/Junio: 150-160.
- Vargas, X. (2019). Formulación de PUF basada en TDI resistente al envejecimiento a escala laboratorio. Grupo de Materiales y Manufactura CIPP-CIPEM. Universidad de los Andes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/44134/u827658.pdf?sequence=1>
- Wang, G., Wan, G., Chai, J., Li, B., Zhao, G., Mu, Y., & Park, C. B. (2019). Structure-tunable thermoplastic polyurethane foams fabricated by supercritical carbon dioxide foaming and their compressive mechanical properties. *The Journal of Supercritical Fluids*, 149, 127-137. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2019.04.004>

- Wang, S., You, F., Hu, S., Zhou, Y., & Sun, W. (2018). Effects of Bulk Densities and Inlet Airflow Velocities on Forward Smoldering Propagation Properties of Flexible Polyurethane Foam. *Procedia Engineering*, 211, 762-767. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.073>
- Wen, Y., Lai, Z., Ma, J., Liu, H., Wang, Y., Chi, H., & Huang, R. (2023). A dynamic constitutive model for high-density rigid polyurethane foam subjected to impact loading. *Construction and Building Materials*, 387, 131642. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131642>
- Wright, H.C.; Cameron, D.D.; Ryan, A.J. Rational Design of a Polyurethane Foam. *Polymers* 2022, 14, 5111. <https://doi.org/10.3390/polym14235111>
- Yin, Z., Chen, K., Wang, H., Wang, H., & Wei, Z. (2016). Mechanical properties, flame retardancy, and smoke suppression of lanthanum organic montmorillonite/poly(vinyl chloride) nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(39). <https://doi.org/10.1002/app.43951>
- Yuan, L., Zhang, C., Wang, C., Wei, N., Wan, J., Zhu, C., Fang, H., & Shi, M. (2022). Effect of the crosslinking degree on the microstructure and thermomechanical properties of a polymer grouting material. *Polymer*, 259, 125342. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2022.125342>
- Zhang, J., Hori, N., & Takemura, A. (2020). Influence of NCO/OH ratio on preparation of four agricultural wastes liquefied polyols based polyurethane foams. *Polymer Degradation and Stability*, 179, 109256. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109256>
- Zhang, Q., Huang, X., Wang, X., Jia, X., & Xi, K. (2014). Rheological study of the gelation of cross-linking polyhedral oligomeric silsesquioxanes (POSS)/PU composites. *Polymer*, 55(5), 1282-1291. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2014.01.040>

Anexos

Anexo A. Recepción de materia prima y procesamiento en la línea de cajón



A1. Recepción de tanques de TDI



A2. Recepción de polioli



A3. Bloque de espuma por línea discontinua



A4. Moldes usados



A3. Defecto por rajadura de la espuma



A4. Defecto en las esquinas

Anexo B. Registro de los cambios de las formulaciones

Tabla B1

Registro de cambios en la formulación estándar en la línea de producción de cajón

REGISTRO DE CAMBIOS DE LA FORMULACIÓN								
Fecha	Tiempo de reacción (s)	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Reactivos (g)				Observaciones
				Amina	Octoacto de estaño	Silicona	Δ Agua (g)	
08/02/2023	83,78	24,8	48,4	37	96	495	0	
08/02/2023	87,56	23,8	48,8	36	95	500	0	A, B
08/02/2023	98,03	23,5	49,7	36	95	500	0	A, B
09/02/2023	93,72	23,4	48,5	36	95	500	0	A, B
09/02/2023	102,45	21,9	50,5	36	96	500	0	A, B
10/02/2023	102,57	21,9	50,7	36	96	500	0	A, B
10/02/2023	106,04	20,6	53,9	36	96	500	0	A, B
13/02/2023	106,60	19,6	57,8	36	96	500	0	A, B
14/02/2023	111,13	17,8	65,6	36	97	500	0	A, B
15/02/2023	112,17	18,9	62,0	36	98	500	0	A, B
16/02/2023	104,68	19,9	61,2	36	98	500	-5	A, B
16/02/2023	106,01	18,9	62,5	36	98	500	0	A, B
16/02/2023	103,26	21,3	59,0	36	98	500	0	A, B
17/02/2023	104,58	19,1	61,1	36	98	500	0	A, B
20/02/2023	105,06	19,0	61,9	36	97	500	0	A, B
20/02/2023	103,29	19,7	57,0	36	97	500	0	A, B
21/02/2023	99,38	20,6	54,7	36	97	500	0	A, B
22/02/2023	103,30	20,0	55,5	36	97	500	0	A, B
23/02/2023	105,48	19,9	55,8	36	97	500	0	B, C
27/02/2023	103,16	18,5	64,8	36	96	500	0	B, C
27/02/2023	103,95	17,9	67,5	36	96	500	0	B, C
27/02/2023	110,91	18,0	66,8	36	96	500	0	B, C
28/02/2023	100,38	18,2	65,8	36	96	500	0	A, B
01/03/2023	101,42	19,1	63,6	36	96	500	0	A, B
01/03/2023	102,18	21,8	57,7	36	96	500	0	A, B
02/03/2023	130,24	21,1	56,9	36	96	500	0	A, B
03/03/2023	101,64	19,6	61,2	36	96	500	0	A, B
03/03/2023	101,61	19,1	62,5	36	96	500	0	A, B
06/03/2023	105,54	19,5	60,8	36	96	500	0	A, B
06/03/2023	104,33	18,5	64,0	36	96	500	0	A, B
07/03/2023	103,49	18,4	64,1	36	96	500	0	A, B
08/03/2023	106,21	19,9	59,5	36	96	500	0	A, B
08/03/2023	106,10	19,4	60,5	36	96	500	0	A, B
08/03/2023	106,10	19,5	61	36	96	500	0	A, B

A: No se encontró ningún cambio en el proceso de dosificación y mezclado de los reactivos.

B: Se uso los mismos instrumentos, equipos y materiales para la dosificación, mezclado y manejo de los reactivos.

C: No se dosifica completamente el molde.

Anexo C. Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego.

Tabla C1

Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación

Clasificación de los materiales de construcción por su reacción al fuego				
Clasificación según UNE-EN 13501-1				Clasificación sistema M
A1 No combustible. Sin contribución en grado máximo al fuego.	A1	-	-	M0
	A2	s1	d0	
A2 No combustible. Sin contribución en grado menor al fuego.	A2	s1	d1	
	A2	s2	d0	M1
		s3	d1	
B Combustible. Contribución muy limitada al fuego.	B	s1		
		s2	d0	
		s3	d1	
C Combustible. Contribución limitada al fuego.	C	s1		
		s2	d0	M2
		s3	d1	
D Combustible. Contribución media al fuego.	D			M3
		s1	d0	
		s2	d1	M4
		s3		(sin goteo)
E Combustible. Contribución alta al fuego.				
F Sin clasificar. Sin determinación de propiedades.	Resto de clasificación E-d2 y F	M4		

Tabla C2

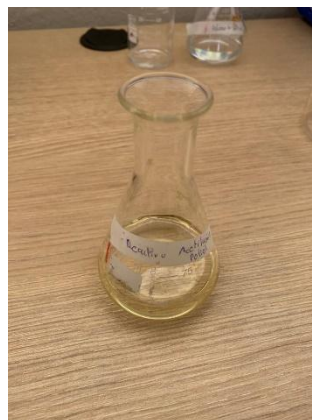
Definición de las variables de las clasificaciones según la norma UNE-EN 13501-1 y sistema M

Definición de las variables de las clasificaciones según la norma UNE-EN 13501-1 y Sistema M	
M0	Producto es incombustible, no alimenta al fuego.
M1	Producto es combustible pero no inflamable.
M2	Producto es apenas inflamable.
M3	Producto es moderadamente inflamable.
M4	Producto es fácilmente inflamable.
NP	No probados.
F	No probados.
Opacidad del humo	
s1	Baja cantidad y velocidad.
s2	Moderada cantidad y velocidad promedio.
s3	Gran cantidad y velocidad.
Gotas y escombros de llamas	
d0	Sin escombros.
d1	Sin residuos cuya ignición dura más de 10 segundos.
d2	Ni d0 ni d1.

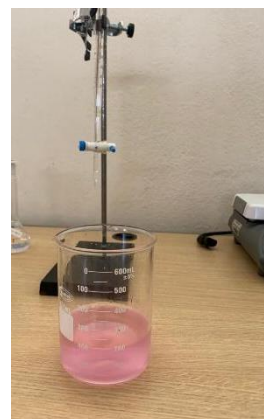
Anexo G. Análisis químico de TDI y polioliol



G1. Muestra de polioliol pesada



G2. Reactivo de acetilación



G3. Muestra de polioli después del reflujó



G4. Punto de viraje de la titulación de polioli



G5. Muestra de TDI a titular

G6. Punto de viraje de la titulación de TDI

G7. Cálculo de contenido de NCO libre en el TDI

- Volumen de HCl 1M consumido en el blanco (V_1) = 18,2 ml
- Volumen de HCl 1M consumido con la muestra (V_2) = 13,2 ml
- Muestra inicial de TDI (m_0) = 0,4755 g
- Concentración de HCl (c) = 1 M

$$\%NCO = \frac{4,202 \times (V_1 - V_2) \times c}{m_0}$$

$$\%NCO = \frac{4,202 \times (18,2 - 13,2) \times 1}{0,4755}$$

$$\%NCO = 44,18$$

G8. Determinación del índice de hidroxilo del polioli

Determinación de la cantidad de muestra a usar

$$muestra (g) = \frac{561 * 0.98}{indice\ de\ hidroxilo\ esperado}$$

$$muestra (g) = \frac{561 * 0.98}{54} \approx 10$$

Calculo

- Volumen de disolución de NaOH gastada para el blanco (V_1) = 87,5 ml.

- Volumen de disolución de NaOH gastada para la muestra (V_2) = 87,2 ml
- Concentración de la disolución de NaOH (N)= 1N
- Factor de corrección de la disolución de NaOH (adimensional) para tener en cuenta cualquier variación en la concentración real de la disolución (F)
- Masa de la muestra de poliol utilizada para la titulación (m) = 10,01 g

$$OH = \frac{(V_1 - V_2) * N * F}{m}$$

$$OH = \frac{(87,5 - 87,2) * 1 * 56,1}{10,01}$$

$$OH = 55,54 \text{ mg} \frac{KOH}{g}$$

G9. Resultados análisis de humedad poliol

RESULTADOS

Muestra: POLIOL
Identificación: Poliol
Tipo de muestra: Líquido Viscoso Transparente
Titulante: Reactivo de 2 componentes
Solvente : 40 ml Solvente KF

Parámetro	Método	Equipo	Muestra No.	Resultado [% H ₂ O]
% Agua	Valoración volumétrica Karl-Fischer	Titulador Karl Fischer	1	0,07
			2	0,07
			3	0,07
Promedio muestra: 0,07%				

Anexo E. Evidencia fotográfica del procedimiento experimental



E1. Preparación del molde



E2. Pesado de los reactivos



E3. Mezclado de reactivos



E4. Vertimiento en el molde



E5. Secado y desmoldado



E6. Experimentos después del curado

Anexo F. Evidencia fotográfica de la evaluación de propiedades



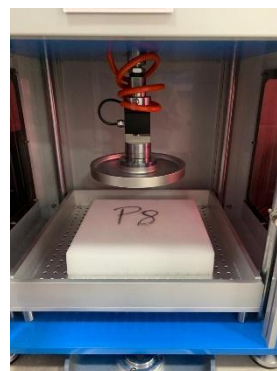
F1. Corte de las muestras



F2. Troquel para probetas



F3. Probetas para los distintos ensayos



F4. Ensayo de dureza



F5. Ensayo de comportamiento al fuego



F6. Ensayo de tracción y elongación

F7. Graficas Tiempo-Fuerza en los ensayos de resistencia a la tracción de los experimentos P2 y P5

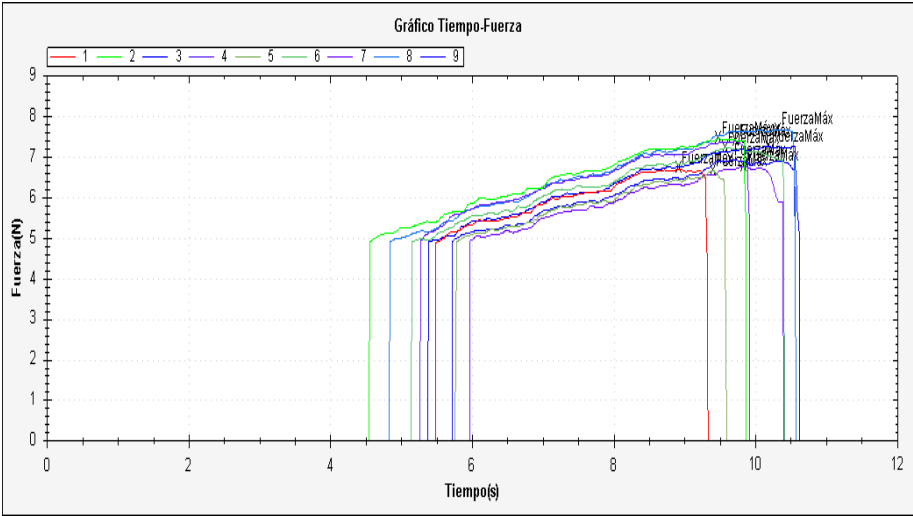
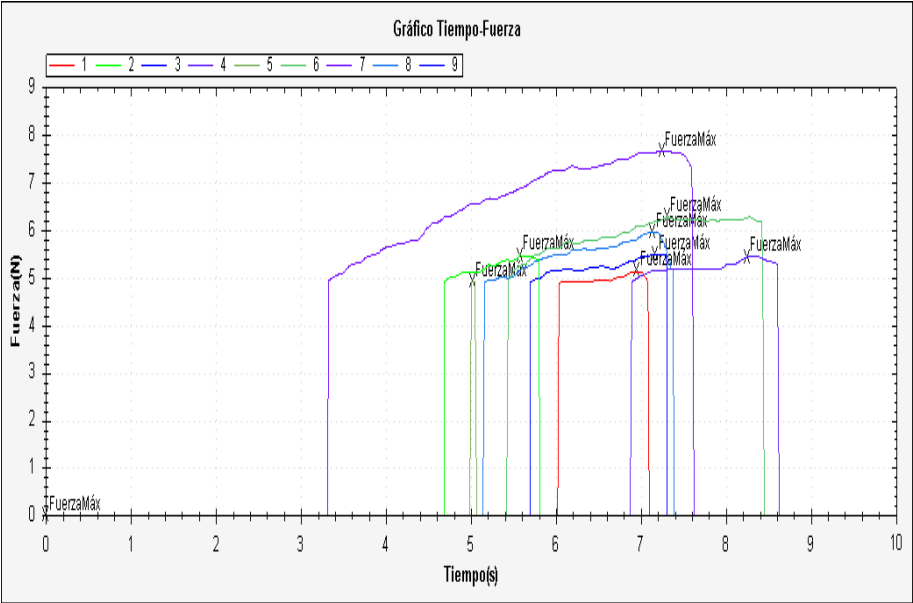


Tabla F8

Matriz de experimentos y resultados

Código	Amina (g)	Estaño (g)	Silicona (g)	Tiempo de reacción (s)	Temperatura ambiente (°C)	Humedad relativa (%)	Altura bloque (cm)	Densidad (kg/m ³)
P1	0,4	1,2	5,6	146	20,30	64,3	44,4	11,53
P2	0,2	0,9	5,1	112	20,90	56,2	48,9	10,62
P3	0,6	0,9	5,1	126	19,04	63,8	53,8	12,30
P4	0,2	1,5	5,1	107	19,02	70,9	48,3	10,69
P5	0,6	1,5	5,1	126	21,90	61,3	45,6	11,71
P6	0,2	0,9	6,1	116	19,90	67,7	53,3	10,53
P7	0,6	0,9	6,1	142	18,50	73,2	41,8	12,18
P8	0,2	1,5	6,1	123	18,30	74,9	53,4	10,75
P9	0,6	1,5	6,1	135	18,04	71,9	47,8	11,57

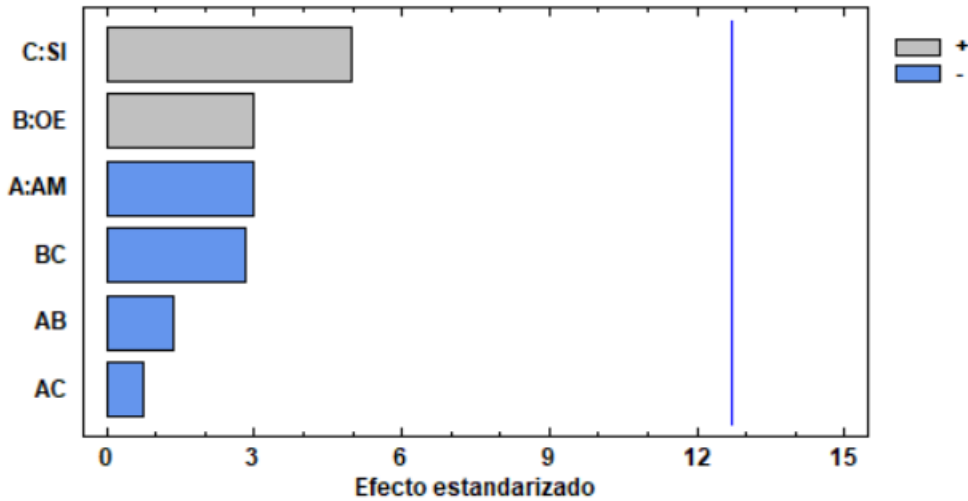
Tabla F9

Continuación de la tabla

Código	Resiliencia (%)	Dureza B (65 %) (N)	Res. Tracción (kPa)	% Elongación	Velocidad de combustión (mm/s)
P1	30,25	144	51,07	71,98	3,55
P2	20,9	230	48,43	55,58	3,18
P3	31,04	210	46,23	47,05	3,52
P4	27,66	171	54,12	82,74	3,45
P5	24,96	155	49,15	56,87	3,18
P6	28,02	156	49,06	61,18	3,31
P7	30,67	155	49,62	59,59	3,80
P8	31	215	52,81	76,73	3,43
P9	25,49	241	51,22	60,26	3,37

F10. Análisis de varianza del % de resiliencia

Diagrama de Pareto Estandarizada para Resiliencia

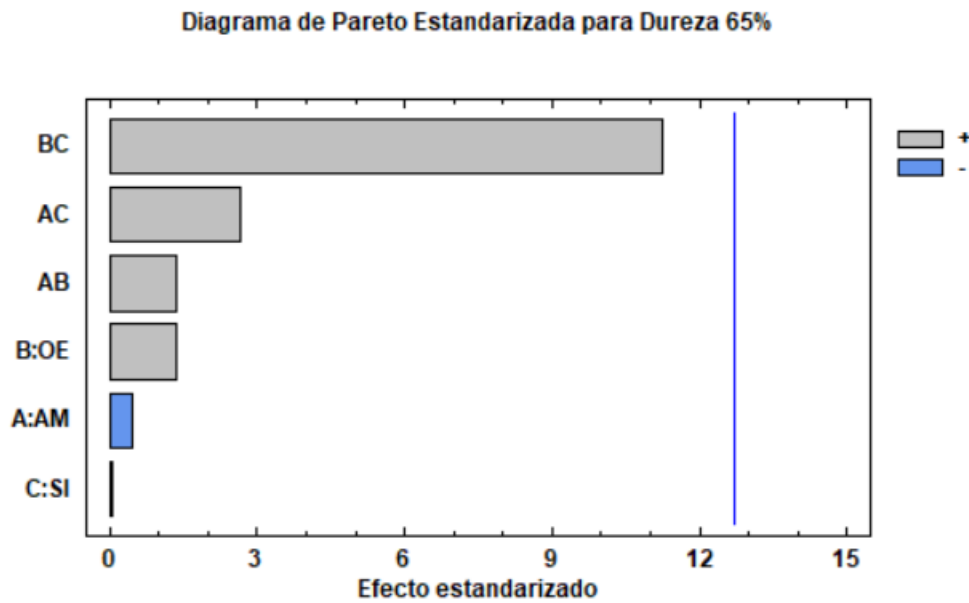


Análisis de Varianza para Resiliencia

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:AM	1,28801	1	1,28801	9,00	0,2048
B:OE	1,28801	1	1,28801	9,00	0,2048
C:SI	3,52451	1	3,52451	24,63	0,1266
AB	0,270112	1	0,270112	1,89	0,4006
AC	0,0820125	1	0,0820125	0,57	0,5875
BC	1,14761	1	1,14761	8,02	0,2161
Error total	0,143112	1	0,143112		
Total (corr.)	7,74339	7			

R-cuadrada = 98,1518 por ciento
 R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 87,0627 por ciento
 Error estándar del est. = 0,378302
 Error absoluto medio = 0,13375
 Estadístico Durbin-Watson = 0,5
 Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,625

F11. Análisis de varianza de dureza 65%



Análisis de Varianza para Resistencia tracción

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:AM	8,405	1	8,405	174,92	0,0480
B:OE	24,3602	1	24,3602	506,98	0,0283
C:SI	2,85605	1	2,85605	59,44	0,0821
AB	3,0258	1	3,0258	62,97	0,0798
AC	4,71245	1	4,71245	98,07	0,0641
BC	1,32845	1	1,32845	27,65	0,1196
Error total	0,04805	1	0,04805		
Total (corr.)	44,736	7			

R-cuadrada = 99,8926 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,2481 por ciento

Error estándar del est. = 0,219203

Error absoluto medio = 0,0775

Estadístico Durbin-Watson = 0,5

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,625

Tabla F12

Resultados de análisis visual de los experimentos

Código	Observaciones visuales y de textura de las espumas
P1	Presenta celdas abiertas, suaves sin rugosidades Totalmente cerrada, pero presenta buen aspecto en la
P2	textura
P3	Presenta pocas celdas cerradas de buen aspecto
P4	Totalmente cerrada y de mal aspecto
P5	Pocas celdas cerradas y de buen aspecto
P6	De celdas parcialmente cerradas además de mal aspecto
P7	Totalmente cerrada de muy mal aspecto
P8	De celdas abiertas y de buen aspecto
P9	Presenta celdas cerradas y un pésimo aspecto tanto de textura como visual