Revista Colombiana de Materiales

ISSN 2256-1013, No 12, pp. 70-80, 2018.

EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA Y EL TIEMPO DE FUSIÓN EN LAS PROPIEDADES FISICAS DEL VIDRIO OBTENIDO A PARTIR DE MATERIAL RECICLADO DE BOTELLA

Leidy Johanna Suárez[1], David Franco[2], Esperanza López[3], Santiago Gil Durán[4]*

1: Estudiante Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.

2: Magister en Ingeniería de Materiales. Grupo de Investigación en Materiales y Recubrimientos Cerámicos (GIMACYR) – Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

3: Ph.D. Ingeniería y Ciencia de Materiales. Grupo de Investigación en Materiales y Recubrimientos Cerámicos (GIMACYR) – Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

4: Magister en Ingeniería. Departamento de Ingeniería de Producción, Escuela de Ingeniería, Universidad Eafit, Medellín, Colombia

* E-mail: leidyjohannafac@gmail.com

RESUMEN

Este estudio presenta la influencia de la composición química y el tiempo de fusión del vidrio reciclado de botella empleado como materia prima en el proceso de soplado a boca. Se planteó el diseño de experimentos empleando el método Taguchi considerando tres factores: Na_2CO_3, Na_2SO_4 y tiempo de permanencia del vidrio dentro del horno, para analizar el efecto sobre el diámetro y cantidad de burbujas, densidad, dureza, viscosidad y color. La formulación que presentó mejor desempeño son 10% Na_2CO_3, 0.5% Na_2SO_4 y un tiempo de fusión de 6 horas.

Palabras claves: Vidrio reciclado, método Taguchi, burbujas, desempeño.

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE CHEMICAL COMPOSITION AND THE TIME OF FUSION ON THE PHYSICAL PROPERTIES OF THE GLASS OBTAINED FROM RECYCLED BOTTLE MATERIAL

ABSTRACT

This study presents the influence of the chemical composition and fusing time of recycled bottle glass used as raw material in the mouth-blowing process. The design of experiments was proposed using the Taguchi method considering three factors: Na_2CO_3, Na_2SO_4 and fusing time of the glass inside the furnace, to analyze the effect on the diameter and amount of bubbles, density, hardness, viscosity and color. The formulation that presented the best results are 10% Na_2CO_3, 0.5% Na_2SO_4, and a fusing time of 6 hours.

Keywords: Recycled glass, Taguchi method, bubbles, performance.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Vidrio reciclado como materia prima

La industria del vidrio en Colombia ha crecido de manera considerable, especialmente en la producción de envases, generando grandes cantidades de residuo pos-consumo [1]. El vidrio es un material que se recicla fácilmente y al ser refundido se obtiene un material con

características similares a la inicial. Se ha reconocido que el reciclado del vidrio es de gran importancia en aspectos ambientales y económicos por su gran viabilidad para sustituir materiales de primera mano. Remplazar las materias primas naturales por vidrio reciclado reduce la demanda de energía, disminuyendo los costos de manufactura [2].

Los vidrios utilizados para la producción de botellas son por lo general de sodio – cal – sílice. Dentro de la composición del vidrio se pueden incluir algunos otros elementos como fundentes, pigmentos, afinantes, que contribuyen a mejorar sus características [3]. El carbonato de sodio (Na_2CO_3) es uno de los fundentes más utilizados en la industria, aporta fluidez, lo cual favorece el control de las burbujas [4]. Los envases de vidrio poseen de un 13 a 16% en peso Na_2CO_3 también conocido como Soda ASH. Cuando el vidrio es refundido se volatiliza aproximadamente un 2% en peso de este y otros compuestos presentes [2].

Existen diversos procesos para dar forma al vidrio, desde el soplado y prensado industrial, hasta procesos manuales como el soplado a boca. Teniendo en cuenta que este material es 100% reciclable y al conocer la cantidad de vidrio que es dispuesto en la basura en el día a día, se ha encontrado en la literatura [2] que la conversión de vidrio reciclado de botella a materia prima es técnicamente posible, es interesante reutilizarlo en aplicaciones alternativas a las industriales y producir diferentes productos con un nuevo valor agregado. Sin embargo, durante la elaboración de artículos con las mismas características que el material reciclado pueden presentarse algunos inconvenientes, ya que el vidrio puede tener muchas reacciones químicas diferentes que producen gases, lo que influye constantemente en los orígenes de las burbujas, en consecuencia de ello, aumenta la necesidad reformular el vidrio para brindar mayor eficiencia al proceso de fusión, calidad y manufactura.

Este trabajo evalúa la influencia del carbonato de sodio (Na_2CO_3), el sulfato sódico (Na_2SO_4) y el tiempo de permanencia dentro del horno sobre propiedades como: viscosidad, densidad, dureza, color, cantidad y diámetro medio de las burbujas en vidrio, a través de un diseño de experimento empleando el método Taguchi [5].

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Preparación de muestras

Las botellas fueron lavadas en una solución jabonosa, para retirar etiquetas y residuos; y se desinfectaron con una solución de agua y cloro al 0.1% de concentración. El material fue fragmentado y luego molido durante periodos de 5, 10, 15 y 20 minutos para trazar una curva de moliendabilidad y obtener la mayor fracción de material retenido en el tamiz de malla 20 a 40 Tyler. La composición química del material de partida se caracterizó con la técnica de espectrometría de fluorescencia de rayos X utilizando un espectrómetro WD-XRF ARL Optim'X.

Utilizando el método Taguchi, se planteó un diseño de experimentos con un arreglo ortogonal de tres factores y tres niveles con el software Minitab 17 como se indica en la Tabla 1. Se consideró el factor Na_2CO_3, ya que es conveniente para trabajar temperaturas ligeramente más bajas cumpliendo con las características de calidad del vidrio, por otro lado, el factor Na_2SO_4 posee un poder afinante, debido a que sus reacciones liberan gases que causan burbujas grandes que emergen rápidamente a la superficie. El último factor fue el tiempo de permanencia del vidrio dentro del horno. Es importante evaluar estos tiempos para atenuar la formación de burbujas por gases residuales que queden sin disolverse, pues el éxito del afinado depende de la velocidad de disolución de los gases.

La formulación de las muestras a partir del diseño de experimentos se muestra en la Tabla 2. Cada mezcla se realizó por duplicado para un total de 18 muestras. Estas se fundieron a 1200 °C en un horno de combustión de gas propano. Una vez alcanzado el tiempo de permanencia en el horno, el vidrio fundido fue vaciado en moldes rectangulares metálicos con medidas de 6 cm de largo, 5 cm de ancho y 0.5 cm de espesor, los cuales se son previamente calentados a ± 550°C. Una vez conformadas las probetas fueron llevadas a un horno de recocido para un enfriamiento controlado durante 12 horas desde 500°C hasta temperatura ambiente.

Tabla 1. *Diseño de experimentos con un arreglo ortogonal de tres factores y tres niveles con el método Taguchi.*

Factor	Unidades	Nivel		
Na_2SO_4	% en peso de la muestra	0.1	0.5	1
Na_2CO_3		1.5	5.5	10
Tiempo	min	30	60	90

Tabla 2. *Porcentaje de los componentes utilizados en la formulación de cada muestra de vidrio.*

Materias primas	Muestra [wt%]								
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
Na_2SO_4	0.5	0.1	1.0	0.5	0.5	0.1	1.0	1.0	0.1
Na_2CO_3	1.5	10	5.5	10	5.5	1.5	1.5	10	5.5
Vidrio reciclado	98	89.9	93.5	89.5	94	98.4	97.5	89	94.4
Tiempo (min)	60	90	30	30	90	30	90	60	60

2.2 Caracterización de las muestras

Las muestras fueron preparadas mediante técnicas de pulido tradicionales, comenzando con desbaste grueso, desbaste fino, empleando una serie de papeles abrasivos hasta alcanzar un número de grano de 1200, en el acabado final se emplea paño y una suspensión de diamante de 1 μm. Se tomaron imágenes de cada muestra con un estereoscopio de referencia AmScope SM-1TS-144S-10M, y se utilizó el software Image J para el conteo de burbujas en un área fija de 25 mm^2. Los tamaños medios de burbujas se determinaron midiendo el diámetro de las burbujas en un área de 1 cm^2.

La densidad se determinó mediante la técnica de Arquímedes utilizando una balanza analítica marca Sartorius referencia CP324S. Se calculó la dureza Knoop con un microdurómetro Shimadzu HMV-G20DT siguiendo la norma ASTM C730 – 98 [6]. La caracterización colorimétrica de las muestras se hizo con un Xpetro colorímetro -Rite-SPS62. La viscosidad del vidrio η se determinó en forma experimental mediante la técnica de plano inclinado utilizando la Ecuación 1, donde ϑ_s corresponde a velocidad del flujo, h es altura de deslizamiento, ρ densidad del flujo, g aceleración de la gravedad y θ es la pendiente del plano con un valor de 45° [7,8]. Las muestras fueron calentadas en un horno eléctrico a una temperatura de 1200 °C durante 3 h.

$$\eta = \frac{\rho g h^2 \sin\theta}{3\vartheta_s} \quad (1)$$

Todos los datos de los ensayos fueron comparados con un análisis de varianza (ANOVA), donde la significancia se definió como 0.05.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La caracterización química del material de partida está resumida en la Tabla 3, en esta tabla se puede apreciar que esta composición es característica de un vidrio sódico cálcico, donde sus principales componentes son el óxido de silicio (SiO_2), óxido de sodio (Na_2O) y oxido de calcio (CaO) con adiciones de otros óxidos, como por ejemplo la alúmina (Al_2O_3) y el óxido de magnesio (MgO), los cuales le proporcionan al vidrio propiedades como resistencia química entre otras [9]. Los resultados de la curva de moliendabilidad, se muestran en la Figura 1. El tamaño de partícula de la materia prima es importante, ya que puede afectar el proceso de fusión del vidrio y la homogenización de la mezcla. Las partículas finas se funden más rápidamente, sin embargo, pueden aglomerarse formando partículas más grandes que retarda el proceso de disolución. Del mismo modo, el uso de partículas finas puede obstruir el escape de gases ya que reduce considerablemente el espacio entre las partículas que puede suprimir las reacciones de descomposición [10]. Por otra parte, desde el punto de vista de las partículas de grano grueso, éstas dificultan la homogenización de las mezclas. El vidrio reciclado se obtiene de esta manera con una granulometría que tiene un d80 de 2.25 mm con un tiempo de molienda de 20 minutos, y así se obtiene la mayor cantidad de partículas con el tamaño requerido entre 0.80 y 0.425 mm [2,4,11].

Tabla 3. *Composición química del vidrio reciclado utilizado como materia prima, determinada a partir de FRX.*

Óxidos	**% peso**
Óxido de silicio (SiO_2)	76.50
Óxido de sodio (Na_2O)	14.10
Óxido de calcio (CaO)	5.90
Alúmina (Al_2O_3)	2.58
Óxido de magnesio (MgO)	0.40
Óxido de potasio (K_2O)	0.17
Sulfito (SO_3)	0.13
Óxido férrico (F_2O_3)	0.05
Óxido de circonio (ZrO_2)	0.01
Trióxido de wolframio (WO3)	0.01
Otros	0.15

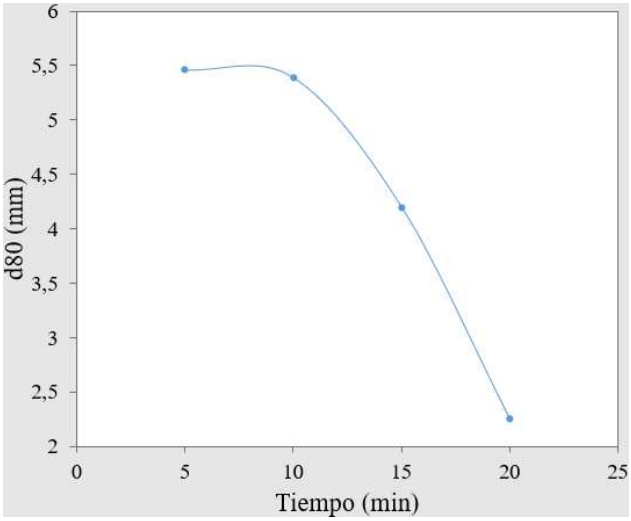
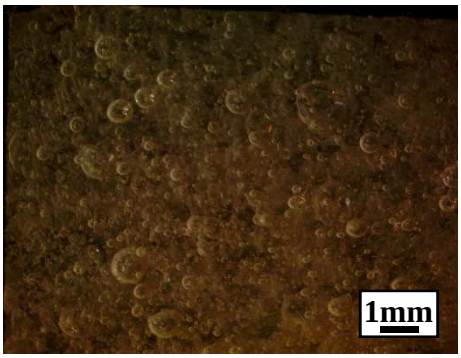
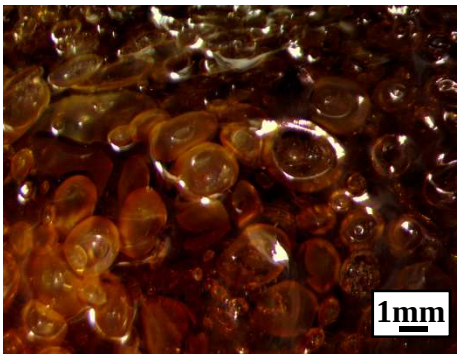


Figura 1. *Curva de moliendabilidad para el vidrio reciclado.*

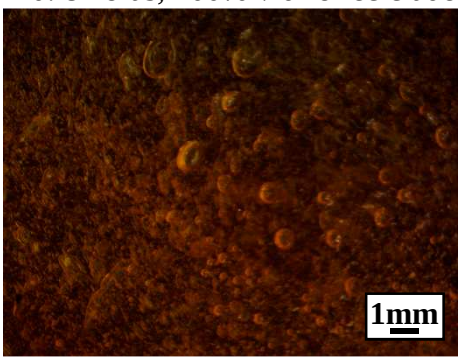
Las imágenes ópticas, Figura 2, muestran las distintas características de las muestras en términos de color y distribución del tamaño de las burbujas. Experimentalmente se encontró una sobresaturación de burbujas en las muestras M1, M3, M5, M6, M7 y M9. De acuerdo con las distintas formulaciones de vidrio, este se puede volver más viscoso o no y la tensión superficial puede tener un cambio en la interfaz vidrio-gas, por ende, se retarda el escape de gases de la masa fundida [12]. Además, con lo experimentado y como consecuencia de etapas posteriores del proceso como el conformado por soplado a boca, quedan en el vidrio pequeñas burbujas de gases.



M0: 8 horas; 100% vidrio reciclado



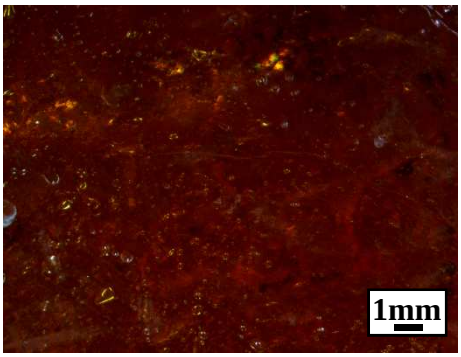
M1: 5h:60min; 1.5% Na_2CO_3; 0.5% Na_2SO_4



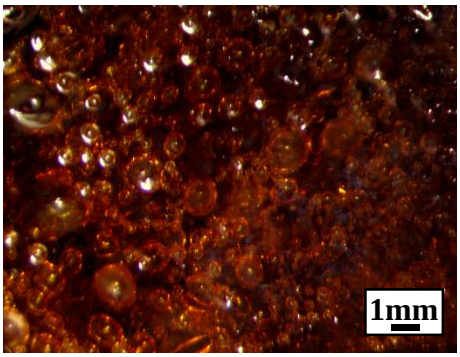
M2: 5h:90min; 10% Na_2CO_3; 0.1% Na_2SO_4



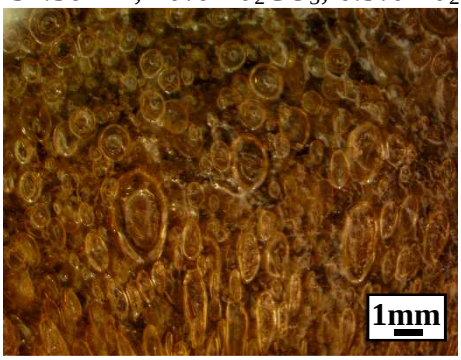
M3: 5h:30min; 5.5% Na_2CO_3; 1% Na_2SO_4



M4: 5h:30min; 10% Na_2CO_3; 0.5% Na_2SO_4



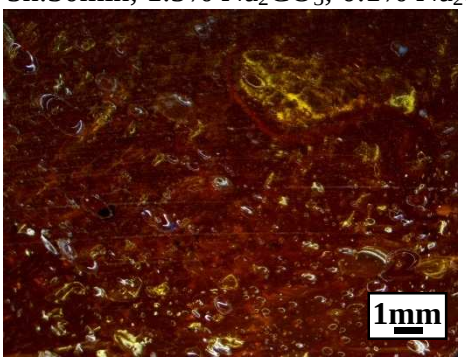
M5: 5h:90min; 5.5% Na_2CO_3; 0.5% Na_2SO_4



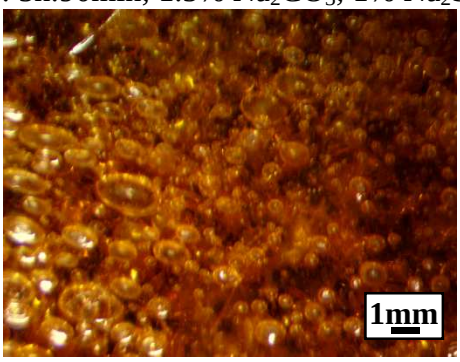
M6: 5h:30min; 1.5% Na_2CO_3; 0.1% Na_2SO_4



M7: 5h:90min; 1.5% Na_2CO_3; 1% Na_2SO_4



M8: 5h:60min; 10% Na_2CO_3; 1% Na_2SO_4



M9: 5h:60min; 5.5% Na_2CO_3; 0.1% Na_2SO_4

Figura 2. *Imágenes de burbujas en la superficie para un determinado tiempo de fusión y para una temperatura de fusión de 1200 °C. (Fuente: propia).*

En la Tabla 4 se muestra un resumen de los valores P asociados a las diferencias estadísticas entre los niveles de cada factor. En particular se muestra que Na_2CO_3 tiene una diferencia estadísticamente significativa (valor-P<0.05) en el diámetro de las burbujas, viscosidad y colorimetría (coordenadas a y b), por otra parte, el Na_2SO_4 tiene un efecto significativo en el diámetro de las burbujas y colorimetría (coordenadas b) y finalmente el tiempo en ninguno de los factores evaluados.

La Figura 3 muestra los efectos principales para medias de los factores y sus niveles. La Figura 3a ilustra los efectos principales para medias de diámetro de las burbujas. En esta se evidencia una mayor reducción del diámetro medio con el aumento del Na_2CO_3 entre el 1.5% al 10% en peso y con el aumento en el Na_2SO_4 entre 0.5% al 1.0% en peso. Así mismo, en la Tabla 4 se observa que el tamaño inicial está influenciado por estos mismos factores, la Na_2CO_3 (p = 0.04) y Na_2SO_4 (p = 0.03). Cabe mencionar que el resultado del efecto principal para el factor tiempo no es estadísticamente significativo. El análisis del experimento indica que a mayor concentración de Na_2SO_4 se evidencia más el efecto del afinado, igualmente una mayor concentración de Na_2CO_3 acelera la

disminución en el diámetro de las burbujas, ya que estas alteraciones de composición pueden disminuir la viscosidad lo suficiente para favorecer la difusión de los gases en el fundido, disminuyendo así progresivamente el contenido gaseoso.

Tabla 4. *Valores-P asociado a las diferencias estadísticas entre los niveles de cada factor del diseño de experimento.*

Factor		Valor-P		
		Na_2CO_3	Na_2SO_4	Tiempo
Burbujas/oz		0.20	0.74	0.61
Diámetro burbuja (mm)		0.04	0.03	0.16
Densidad (g/cm^3)		0.06	0.61	0.73
Dureza (HK)		0.06	0.18	0.43
Log Viscosidad (dPa.s)		0.00	0.27	0.08
Coordenadas CIELab (colorimetría)	**L**	0.50	0.08	0.48
	a	0.02	0.09	0.41
	b	0.00	0.04	0.27

Por otra parte, la Figura 3b presenta los resultados para el número de burbujas por unidad de masa, donde se observa que el Na_2CO_3, Na_2SO_4 y el tiempo no son estadísticamente significativos en un nivel de significancia del 5% para la cantidad de burbujas, esto a causa de que la temperatura de 1200 °C no es suficiente para descomponer completamente el Na_2SO_4, ya que tal descomposición se hace rápidamente a los 1350 °C [13] y como resultado se dificulta la liberación de gases hacia la superficie de la masa fundida. No obstante, el factor Na_2SO_4 es de gran importancia por su poder afinante y su interacción con el vidrio para formar burbujas de gran tamaño que se difundan en las burbujas existentes, provocando su crecimiento y su ascensión a la superficie del fundido. Es importante entonces compensar el incremento de la temperatura con el aumento del porcentaje de Na_2CO_3 para el decrecimiento en el número de burbujas.

En contraste con el análisis estadístico se ha visto que el factor tiempo no tiene un efecto tan marcado sobre los datos de respuesta, principalmente sobre el tamaño y cantidad de burbujas, ya que la magnitud de los tiempos trabajados es corta para que se evidencie un cambio significativo, por lo que es preciso dejar transcurrir un mayor tiempo para alcanzar el equilibrio en el fundido. De acuerdo con la Ecuación (2) de Stokes, la velocidad de eliminación de la burbuja aumenta con el incremento del radio, por lo tanto, un tamaño mayor favorecerá que la burbuja se eleve a la superficie del fundido, entonces, con un tiempo más prolongado en el horno, las burbujas de gran tamaño se eliminan con mayor facilidad [10]; por lo tanto se puede considerar que el diámetro de las burbujas es fuertemente dependiente del tiempo de fusión, aunque estadísticamente no se vea reflejado en los resultados anteriores.

$$V = \frac{\frac{1}{3}a^2 g(\rho_1 - \rho_2)}{\eta_2} \qquad (2)$$

De acuerdo con la ecuación anterior “V” es la velocidad de la burbuja, “a” es el radio de la burbuja, “g” es la constante de gravedad, “ρ1” es la densidad del gas dentro de la burbuja, “ρ2” es la densidad del fundido y “η” es la viscosidad del fundido.

Los resultados de la Figura 3c indican que existe un aumento de la densidad a medida que incrementa el porcentaje de Na_2CO_3 entre 5.5% al 10% en peso, principalmente debido a la composición del vidrio, ya que al aumentar la concentración de óxidos alcalinos como el Na_2O en las mezclas, el nuevo ion oxígeno produce una apertura del enlace Si-O-Si. La entrada de iones alcalinos y su acoplamiento en los espacios del retículo vítreo da lugar a un aumento en la densidad [4]. En cuanto a la viscosidad, se produce un efecto contrario que el caso anterior, ya que la Figura 3d muestra que hay un cambio continuo del logaritmo de la viscosidad con respecto a los niveles de Na_2CO_3. Esta disminución con respecto al contenido de Na_2CO_3 se debe a que los iones Na^+ rompen algunos de los enlaces Si-O-Si, distorsionando la estructura de la masa fundida y reduciendo la viscosidad [14]. Los valores de viscosidad hallados se encuentran entre 10^3 - 10^4 dPa.s son similares a los encontrados por Fontana, y Plummer [15] quienes midieron la viscosidad de algunos vidrios comerciales a una temperatura aproximadamente entre 843 °C y 1097 °C, obteniendo valores de viscosidad de $3x10^3$ a $1.7x10^5$ dPa.s.

En la Figura 3e, se muestra las medias para las durezas adquiridas en las muestras evaluadas, donde la máxima variación de dureza se obtiene con el aumento de Na_2CO_3 entre el 1.5% al 5.5% en peso, donde los valores disminuyen considerablemente. Aunque se observa una disminución en la dureza con la variación de Na_2SO_4, este factor no es significativo (Tabla 4). Esta disminución en HK también puede estar atribuida a que el vidrio es un material duro pero a la vez frágil y pueden presentarse microfisuras superficiales, que en algunos casos produce la dispersión en los resultados, de igual manera cierta variabilidad está relacionada con defectos como las burbujas [16]. En general los resultados de estas tres últimas propiedades están relacionados con la distorsión de la estructura del vidrio, por la modificación de la red vítrea con la acomodación de los iones modificadores alcalinos, como es el caso del sodio y con ello se manifiesta la dependencia de la composición en las propiedades físicas y mecánicas [17].

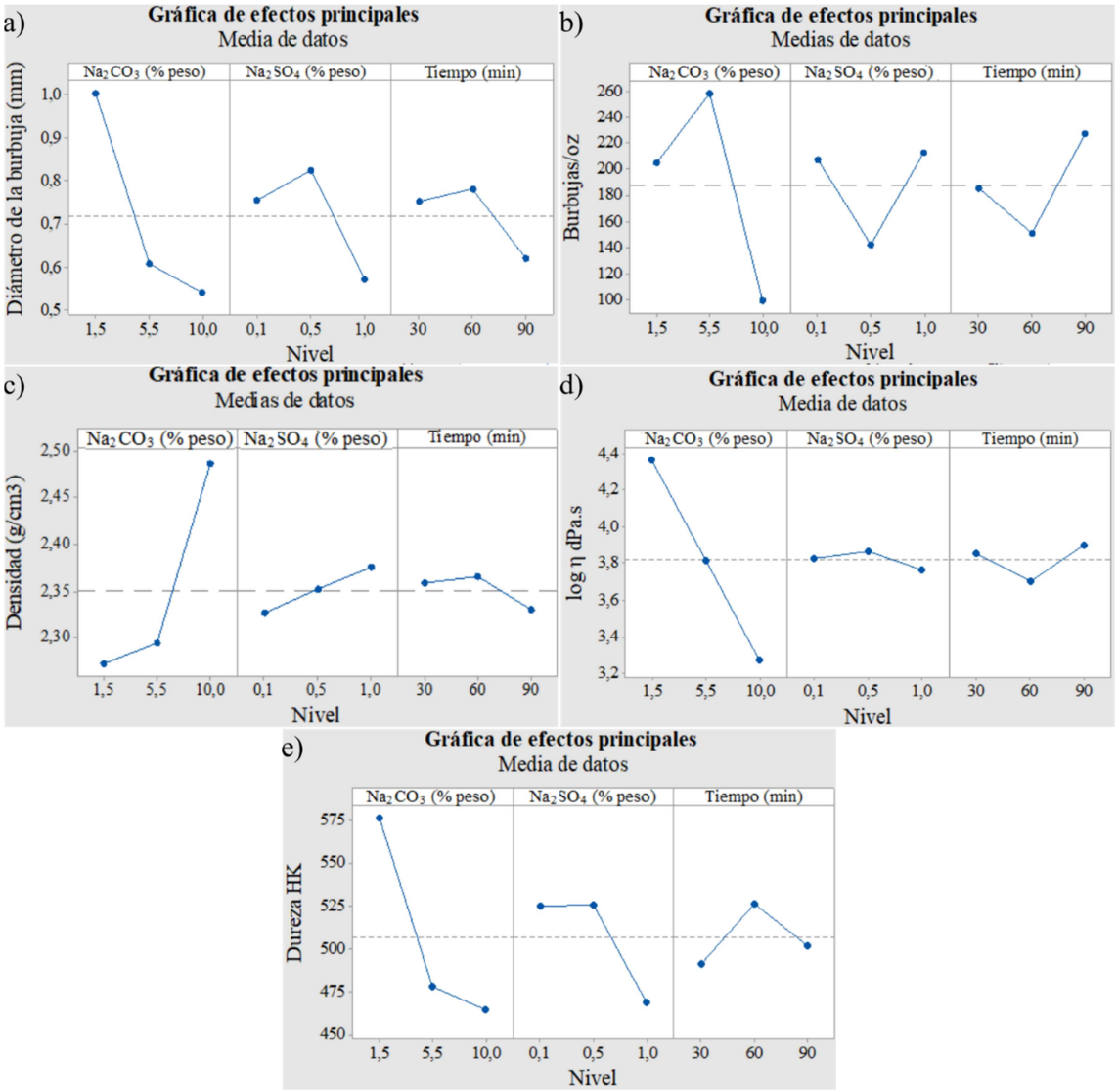


***Figura 3**. Resultados obtenidos del análisis estadístico Taguchi donde se muestra los efectos principales para medias de: a) Diámetro de la burbuja, b) Burbujas/oz. c) densidad d) viscosidad e) dureza.*

Ahora, considerando el estudio colorimétrico los resultados se muestran en la Figura 4. La Figura 4a indica que la coordenada **L** podría estar influenciada por los porcentajes de Na_2SO_4, lo que puede ser confirmado en la Tabla 4, ya que el factor Na_2SO_4 presenta un p-valor de 0.08 muy cercano al nivel de significancia del 0.05; además la pronunciada pendiente de la gráfica indica que las muestras presentan más brillo o luminosidad cuando hay bajos porcentajes de Na_2SO_4. Por otra parte, la Figura 4b muestra los valores de la coordenada **a**, los cuales indican la tonalidad de rojo que va a tomar el vidrio, mientras más alto sea este valor el vidrio presenta un color más opaco. Así mismo, se puede ver el efecto significativo que tiene la Na_2CO_3 y el Na_2SO_4, ya que la respuesta del parámetro **a** es mayor cuando aumenta el nivel de los factores, es decir, con el aumento de Na_2CO_3 entre el 1.5% al 10% en peso y con el aumento en el Na_2SO_4 entre 0.1% al 1.0% en peso, los vidrios tienden a adquirir una tonalidad ámbar. Para el parámetro **b**, Figura 4c, se muestra el cambio en las tonalidades de color amarillo, a partir de la gráfica se puede ver que tanto el Na_2CO_3 como el Na_2SO_4 tienen un efecto significativo y se puede confirmar con el p-valor en la Tabla 4, donde la Na_2CO_3 ($p = 0.00$) y el Na_2SO_4 ($p = 0.04$) tienen una significancia menor al 0.05. El parámetro **b**

tiene un comportamiento similar al parámetro **a**, es decir que al aumentar el contenido de Na_2CO_3 y Na_2SO_4 en los vidrios sódico – cálcico se intensifica el color ámbar y mientras menor sea el parámetro **b**, las muestras consiguen un leve color amarillo, ya que el contenido de Na_2SO_4 es más bajo. Una consecuencia que se deduce de estos resultados, es que el Na_2SO_4 es un notable cromóforo del vidrio, además la alcalinidad juega un papel importante, ya que con el aumento del contenido en Na_2CO_3 se favorece la formación y estabilidad del color ámbar en el vidrio [4].

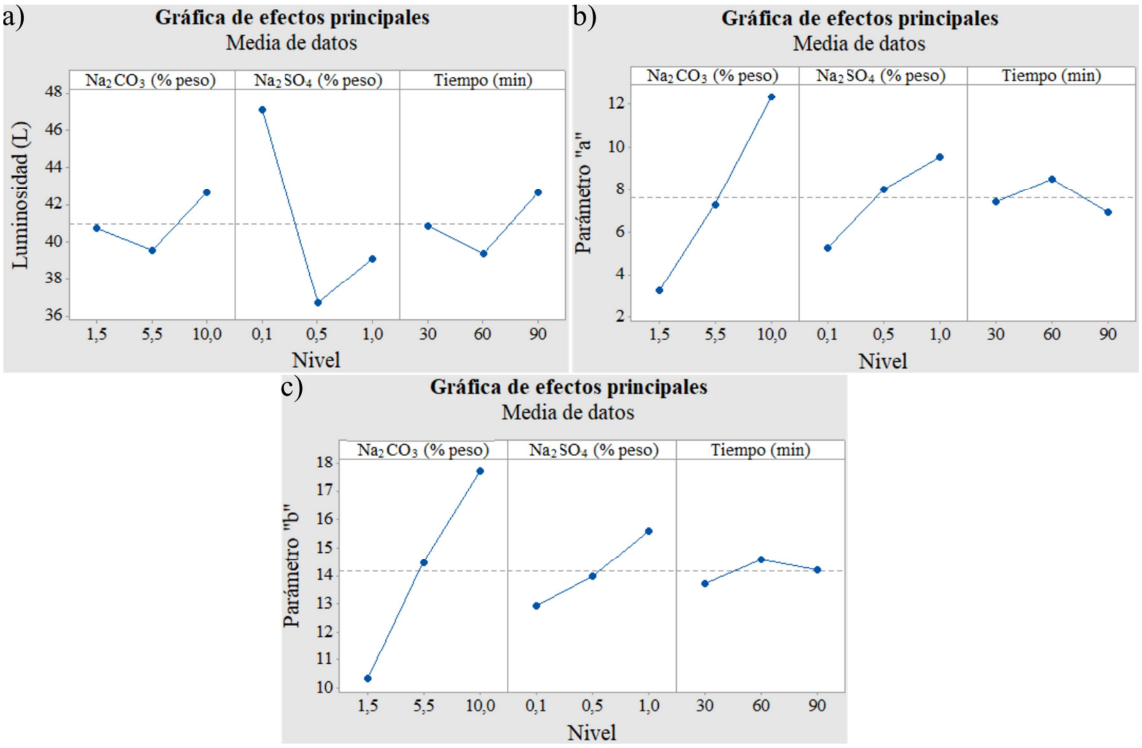


Figura 4*. Resultados obtenidos del análisis estadístico Taguchi donde se muestra los efectos principales para medias de: a) Luminosidad (L), b) Parámetro "a" y c) Parámetro "b".*

Finalmente, se ha visto que la composición tiene una incidencia apreciable sobre cada una de las propiedades estudiadas, especialmente en los diámetros y la cantidad de burbujas y la viscosidad del vidrio; como consecuencia de ello y los datos de respuesta evaluados, la formulación de mayor interés con un nivel satisfactorio que genere beneficio para el proceso y el producto final es la muestra M4 con 10% Na_2CO_3, 0.5% Na_2SO_4 y un tiempo de permanencia de la masa fundida dentro del horno de 6 horas.

4. CONCLUSIONES

La combinación de análisis estadísticos y métodos experimentales brindaron una forma para comprender como se afectan las propiedades del vidrio de acuerdo con los diferentes factores y niveles estudiados, con lo cual se ha evidenciado que la muestra con menor cantidad de burbujas es la M4 con 10% Na_2CO_3 y 0.5% Na_2SO_4 y un tiempo de fusión de 6 h.

El factor que más afecta las propiedades del vidrio reciclado es el Na_2CO_3. En particular se muestra que el Na_2CO_3 tiene un efecto estadísticamente significativo (valor-P<0.05) en el diámetro de las burbujas, viscosidad y colorimetría (coordenadas a y b). El diámetro de burbujas se redujo con el aumento de Na_2CO_3, la viscosidad de los vidrios

obtenidos disminuyó al aumentar el contenido de Na_2CO_3, igualmente la colorimetría cambia brindando distintas características visuales al vidrio.

Por otra parte, el Na_2SO_4 tiene un efecto significativo en el diámetro de las burbujas y colorimetría. Estadísticamente el tiempo de permanencia en el horno de las muestras no tuvo una influencia significativa en las propiedades evaluadas, ya que se requieren tiempos más largos para alcanzar el equilibrio en la masa fundida. Para futuros estudios se sugiere evaluar tiempos de permanencia en el horno mayores a 6 h ya que la interacción de la viscosidad, temperatura y tiempo es crucial para hacer crecer las burbujas y que estas alcancen el tamaño para que la fuerza de flotación pueda llevarlas a la superficie de la masa fundida y así obtener vidrios con mejores características.

Es importante también tener en cuenta que la temperatura juega un papel importante en la elaboración de vidrios con adiciones de Na_2SO_4, ya que, al aumentar la temperatura en la zona de reacción de las materias fundentes, conduce a aumentar la velocidad de descomposición de los granos de sílice, permitiendo disminuir la cantidad de Na_2SO_4 y con ello permite un afinado adecuado. Si se tienen en cuenta las condiciones desarrolladas en este trabajo se facilitarán los fundamentos para ajustar el proceso de afinado y las condiciones óptimas de procesamiento.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Antioquia por su financiación mediante el proyecto CODI PR18-1-01, igualmente agradecen al ingeniero Santiago Gil por facilitar las pruebas de campo en sus instalaciones. La caracterización de las muestras se realizó en los laboratorios de cerámicos y mineralurgia de la Universidad de Antioquia.

6. REFERENCIAS

[1] DESARROLLO EMPRESARIAL, “VIDRIO,” 2005. [Online]. Available: https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Desarrollo Empresarial/Vidrio.pdf. [Accessed: 04-Aug-2017].

[2] N. Courtney, “Post-consumer container glass remelting process assessment,” p. 32, 1997.

[3] M. Vellini and M. Savioli, “Energy and environmental analysis of glass container production and recycling,” *Energy*, vol. 34, no. 12, pp. 2137–2143, 2009.

[4] J. M. Fernández, *EL vidrio*, Tercera Ed. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 2003.

[5] U. Avila-López, J. M. Almanza-Robles, and J. I. Escalante-García, “Investigation of novel waste glass and limestone binders using statistical methods,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 82, pp. 296–303, 2015.

[6] ASTM C730-98, “Standard Test Method for Knoop Indentation Hardness of Glass,” 2013.

[7] A. P. Aranda Nuñez, “Desarrollo e implementación de una técnica experimental para determinar la altura de escurrimiento de un fluido no newtoniano,” Universidad de Santiago de Chile, 2015.

[8] R. P. Chhabra and J. F. Richardson, *Non-Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Applications*, Second Edi. 2008.

[9] E. Gutiérrez Padilla, “Formulación de vidrio sodo - cálcicos con bajo contenido de óxido de magnesio y estudio de propiedades físicas para su aplicación en procesos de prensa y soplo - prensa,” Universidad Autónoma de Nuevo León, 2014.

[10] J. E. Shelby, *Introduction to glass science and technology*, Second Edi. Cambridge, UK: The Royal Society of Chemistry, 2005.

[11] J. Melorose, R. Perroy, and S. Careas, “Estudio del efecto del tamaño de grano de la arena silica en la formación de inclusiones Gaseosas en la produccion de vidrio calizo,” *Statew. Agric. L. Use Baseline 2015*, vol. 1, 2000.

[12] R. A. Rahimi and S. K. Sadrnezhaad, “Generation and collapse of bubbles in lead silicate glass,” *Glas. Phys. Chem.*, vol. 41, no. 3, pp. 307–315, 2015.

[13] M. Vernerová, P. Cincibusová, J. Kloužek, T. Maehara, and L. Němec, “Method of examination of bubble nucleation in glass melts,” *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 411, pp. 59–67, 2015.

[14] X. Chen, Lingxue Kong, Jin Bai, Xin Dai, Huaizhu Li, Zongqing Bai, Wen Li, “The key for sodium-rich coal utilization in entrained flow gasifier: The role of sodium on slag viscosity-temperature behavior at high temperatures,” *Appl. Energy*, vol. 206, pp. 1241–1249, 2017.

[15] P. K. Gupta and A. Heuer, “Physics of the iso-structural viscosity,” *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 358, no. 24, pp. 3551–3558, 2012.

[16] A. Ramos, M. Muniz-Calvente, P. Fernández, A. F. Canteli, and M. J. Lamela, “Análisis probabilístico de elementos de vidrio recocido mediante una distribución triparamétrica Weibull,” *Bol. la Soc. Esp. Ceram. y Vidr.*, 2015.

[17] R. J. Hand and D. R. Tadjiev, “Mechanical properties of silicate glasses as a function of composition,” *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 356, no. 44–49, pp. 2417–2423, 2010.