



**Análisis de las causas de variación en las pruebas de fragmentación de vidrio templado en
la empresa Vitelsa S.A.**

Juliana Escobar Cadavid

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero de Materiales

Asesor Interno

Iván David Franco Correa, Doctor (PhD)

Asesor Externo

William Espinal López, Ing.

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería de Materiales

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Cita	Escobar Cadavid (2024) [1]
Referencia	[1] J. Escobar Cadavid, “Análisis de las causas de variación en las pruebas de fragmentación de vidrio templado en la empresa Vitelsa S.A.”, trabajo de grado profesional, Ingeniería de materiales, Universidad de Antioquia, Medellín, 2024.

Estilo IEEE (2020)



Centro de documentación de ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

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

Dedicatoria

A mis papas, hermanos y abuelos, este logro no habría sido posible sin su amor, paciencia, apoyo constante y sacrificios incansables. Cada paso que he dado en este camino ha sido guiado por sus consejos, palabras de aliento y motivación. A mi familia le dedico este trabajo de grado como expresión de mi agradecimiento, que este logro sea también suyo, pues han sido parte de mi viaje académico y personal. Gracias por creer en mí.

Agradecimientos

Agradezco a la empresa Vitelsa S.A por brindarme la oportunidad de realizar mi práctica académica en sus instalaciones. La oportunidad de colaborar con ustedes ha sido invaluable y su compromiso con la excelencia y la innovación ha sido una fuente constante de inspiración. Sin su apoyo y confianza, este proyecto no habría sido posible.

Agradezco a mi asesor externo William Espinal López por su orientación y su disposición para compartir su experiencia y conocimientos, junto con la confianza depositada en mí. Su guía ha sido fundamental para el desarrollo y la finalización de este proyecto.

De la misma manera quiero expresar mi gratitud al profesor Iván David Franco Correa, quien fue mi asesor interno y me orientó con su experiencia y conocimiento durante todo el proceso. Su paciencia, dedicación y disposición para atender mis consultas fueron fundamentales para el desarrollo exitoso de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	9
ABSTRACT	10
I. INTRODUCCIÓN	11
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
IV. OBJETIVOS	16
A. Objetivo general	16
B. Objetivos específicos	16
V. MARCO TEÓRICO	17
A. Vidrio	17
B. Vidrio templado	19
C. Temple	20
- Temple químico	20
- Temple térmico	21
- Defectos del vidrio templado	22
- Descripción del proceso de templado:	23
D. Prueba de fragmentación	26
VI. METODOLOGÍA	27
A. Revisión de literatura	27
B. Condiciones iniciales y análisis de influencia de los parámetros	27
C. Verificación de uniformidad del horno de temple según ubicación	30
D. Ensayo de fragmentación	32
E. Propuestas de mejora:	35
F. Implementación y seguimiento:	35
VII. RESULTADOS y DISCUSIÓN	36

A. Resultados	36
B. Discusión	42
C. Propuesta	46
IX. CONCLUSIONES	53
REFERENCIAS	56

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Combinación de parámetros usados inicialmente.</i>	27
Tabla 2. <i>Diseño de Experimentos DOE.</i>	28
Tabla 3. <i>Valores mínimos en el conteo de partículas. [16]</i>	35
Tabla 4. <i>Temperaturas registradas por el scanner y fragmentación por vidrio.</i>	36
Tabla 5. <i>Resultados del DOE.</i>	37
Tabla 6. <i>Propuesta receta.</i>	47
Tabla 7. <i>Resultados fragmentación receta propuesta para 6 mm.</i>	47
Tabla 8. <i>Resultados fragmentación receta propuesta para 8 mm.</i>	48
Tabla 9. <i>Comparación del consumo de energía de receta original y receta propuesta para una hora de trabajo continuo en espesores de 6mm.</i>	49
Tabla 10. <i>Comparación del consumo de energía de receta original y receta propuesta para una hora de trabajo continuo para espesores de 8mm.</i>	50
Tabla 11. <i>Resumen ahorro energético obtenido</i>	50

LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1. Media obtenida de las pruebas de fragmentación realizadas durante seis meses para espesores de 5 mm, 6mm, 8mm y 10 mm. _____	14
Ilustración 2. Desviación estándar de las pruebas de fragmentación realizadas durante seis meses para espesores de 5 mm, 6mm, 8mm y 10 mm. _____	14
Ilustración 3. Esfuerzos típicos de un vidrio templado. [1] _____	19
Ilustración 4. Representación del intercambio iónico entre los iones de sodio de la superficie de un vidrio de silicato sódico con los iones de potasio procedentes de una sal fundida en la que está inmerso el vidrio. [4] _____	21
Ilustración 5. Comparación de rotura de un vidrio crudo y un vidrio templado. [9] _____	22
Ilustración 6. Mesa de corte. [12] _____	23
Ilustración 7. Canteadora de vidrio. [13] _____	24
Ilustración 8. Lavadora de vidrio vertical. [14] _____	25
Ilustración 9. Horno de temple de vidrio. [15] _____	25
Ilustración 10. Distribución de probetas de vidrio en rodillos de entrada. _____	30
Ilustración 11. Esquema de la distribución de probetas de vidrio en el horno. _____	31
Ilustración 12. Antes y después de la prueba de fragmentación. _____	32
Ilustración 13. Posición del punto de impacto. [16] _____	33
Ilustración 14. Área excluida. [16] _____	34
Ilustración 15. Esquema de valoración de fragmentos. _____	34
Ilustración 16. ANOVA del DOE para la identificación de factores e interacciones que influyen sobre la fragmentación. _____	39
Ilustración 17. Regresión lineal y análisis ANOVA del modelo de regresión lineal para la fragmentación. _____	40
Ilustración 18. Análisis de residuales del modelo de regresión lineal para la fragmentación. _____	41
Ilustración 19. Análisis de optimización de la superficie de respuesta para la fragmentación. _____	41
Ilustración 20. Análisis de capacidad para la fragmentación. _____	42
Ilustración 21. Composición para vidrio de proveedor Vitro obtenido mediante FRX. _____	43
Ilustración 22. Composición para vidrio de proveedor Andino obtenido mediante FRX. _____	44
Ilustración 23. Resultados de consumo energético para receta original y propuesta para espesor de 6 mm. _____	51
Ilustración 24. Resultados de consumo energético para receta original y propuesta para espesor de 8 mm. _____	51

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

UdeA	Universidad de Antioquia
DOE	Desing of Experiments
ANOVA	Análisis de la varianza
FRX	Fluorescencia de Rayos X

RESUMEN

Este trabajo de grado analiza la fluctuación de los resultados del ensayo de fragmentación en la empresa Vitelsa S.A., evaluando los parámetros del proceso de temple del vidrio. El objetivo principal fue determinar la influencia de variables como el proveedor del vidrio, la temperatura, el tiempo de calentamiento y la velocidad de los sopladores en la fragmentación del vidrio templado. Para ello se diseñó un experimento DOE factorial con 64 ensayos, verificando la uniformidad del horno de temple y su influencia en los resultados de fragmentación. Los resultados indicaron que factores como el espesor, la temperatura, el tiempo de calentamiento y la velocidad de los sopladores mostraron ser significativos en el resultado de fragmentación, mientras que el proveedor y las interacciones de mayor orden no tuvieron un efecto notable. Los resultados se modelaron mediante regresión, destacando las interacciones más relevantes para el comportamiento del vidrio templado. Estas conclusiones proporcionan una base sólida para la optimización del proceso de temple del vidrio en la empresa, mejorando la calidad y consistencia del producto final. A partir de la información recolectada y con el fin de mejorar la calidad del vidrio y reducir el gasto energético, se propuso disminuir la fragmentación del vidrio a un rango de 60-70 partículas, evitando una fragmentación excesiva que se relaciona con el uso de temperaturas de calentamiento demasiado altas. Se estableció que una temperatura de calentamiento de 650°C es adecuada para lograr una fragmentación deseada y reducir el consumo energético del horno de temple, el cual representa el 70% del gasto energético total de la empresa. La nueva receta resultó en una reducción del consumo energético de un promedio de 3.67 kwh/m² a 3.11 kwh/m² para vidrios de espesor de 6mm y de 4.44 kwh/m² a 3.96 kwh/m² para vidrios con 8 mm de espesor. Además, se observó una mejora significativa en la calidad del vidrio, especialmente en la reducción de defectos ópticos como las ondulaciones. Esta propuesta optimiza tanto la eficiencia energética como la calidad del vidrio, ofreciendo una solución viable y beneficiosa para la empresa.

***Palabras clave* — Vidrio templado, Fragmentación, Proceso de temple, DOE factorial, Calidad del vidrio, Ensayo de fragmentación, Temperatura de calentamiento**

ABSTRACT

This degree work analyzes the fluctuation of the results of the fragmentation test in the company Vitelsa S.A., evaluating the parameters of the glass tempering process. The main objective was to determine the influence of variables such as glass supplier, temperature, heating time and blower speed on the fragmentation of tempered glass. For this purpose, a factorial DOE experiment with 64 tests was designed, verifying the uniformity of the tempering furnace and its influence on the fragmentation results. The results indicated that factors such as thickness, temperature, heating time and speed of blowers were shown to be significant in the fragmentation result, while supplier and higher order interactions did not have a notable effect. The results were modeled using regression, highlighting the interactions most relevant to the behavior of the tempered glass. These conclusions provide a solid basis for optimizing the glass tempering process in the company, improving the quality and consistency of the final product. Based on the information collected and in order to improve the quality of the glass and reduce energy expenditure, it was proposed to reduce the fragmentation of the glass to a range of 60-70 particles, avoiding excessive fragmentation that is related to the use of temperatures . heating too high. It was established that a heating temperature of 650°C is adequate to achieve the desired fragmentation and reduce the energy consumption of the tempering furnace, which represents 70% of the company's total energy expenditure. The new recipe resulted in a reduction in energy consumption from an average of 2.86 kwh/m² to 2.40 kwh/m². Additionally, a significant improvement will be seen in the quality of the glass, especially in the reduction of optical defects such as ripples. This proposal optimizes both energy efficiency and glass quality, offering a viable and beneficial solution for the company.

***Keywords* — Tempered glass, Fragmentation, Tempering process, Factorial DOE, Glass quality, Fragmentation test, Heating temperatura.**

I. INTRODUCCIÓN

El vidrio templado se ha convertido en un material esencial en diversos campos de la industria debido a sus propiedades superiores de resistencia y seguridad en comparación con el vidrio común. También conocido como vidrio endurecido, el vidrio templado es un tipo especial de vidrio que pasa por un proceso de tratamiento térmico. Este proceso implica someter el vidrio a altas temperaturas, generalmente alrededor de 600-700 °C, seguido de un enfriamiento rápido y controlado, conocido como temple [1]. Durante este tratamiento térmico, el vidrio se calienta a una temperatura próxima a su punto de reblandecimiento y luego se enfría abruptamente mediante aire frío, este enfriamiento rápido provoca que las superficies externas del vidrio se enfríen y se contraigan más rápidamente que su interior, como resultado se generan tensiones de compresión en las superficies externas y tensiones de tracción en el núcleo. Esta distribución de tensiones es lo que confiere al vidrio templado sus propiedades excepcionales.[2]

En general el vidrio templado destaca al igual que el vidrio común en propiedades tales como su alta transparencia, elevada resistencia a la abrasión y buena resistencia química frente a ácidos y productos químicos [1]. Presenta una excelente durabilidad y estabilidad frente a condiciones ambientales normales y bajos costos de fabricación. Las propiedades que hacen que el vidrio templado sea mejor que el vidrio común principalmente es su resistencia mecánica y mayor seguridad en caso de rotura. En el caso de la resistencia mecánica el vidrio templado es aproximadamente cinco veces más fuerte que el vidrio común, otorgándole una mayor durabilidad y permitiéndole resistir eficazmente fuerzas externas y presiones superiores. En caso de rotura el vidrio templado tiende a fragmentarse en pequeños trozos redondeados más seguros, en lugar de producir grandes fragmentos afilados. Esto reduce significativamente el riesgo de lesiones, lo que hace del vidrio templado una opción más segura y duradera en comparación con el vidrio convencional. [2]

La calidad y seguridad del vidrio templado están estrechamente relacionadas con la prueba de fragmentación. Esta prueba se realiza para verificar la calidad del temple y establecer si el vidrio cumple con los estándares de seguridad establecidos, asegurando que en caso de rotura el vidrio se

fragmente en pedazos pequeños. La prueba de fragmentación implica someter una muestra del vidrio templado a fuerzas de impacto mediante un golpe con un objeto específico, observando cómo se rompe el vidrio y si cumple con los estándares de seguridad. [2]

En este contexto, la empresa Vitelsa S.A., especializada en la producción de vidrio templado, se encuentra inmersa en la búsqueda constante de excelencia en la calidad de sus productos. No obstante, a pesar de los estándares y normativas que rigen las pruebas de fragmentación para el vidrio templado, Vitelsa S.A. ha experimentado desafíos relacionados con variaciones notables en los resultados de estas pruebas. Estas variaciones muestran desviaciones significativamente grandes en el número de partículas resultantes del ensayo para vidrios de igual espesor, lo cual subraya la necesidad crítica de garantizar la uniformidad y consistencia en la calidad del vidrio templado. La relevancia de este problema radica en el hecho de que podría indicar inconsistencias en el proceso de fabricación que comprometerían la integridad estructural y la seguridad del producto final. Por ello, se pretende identificar y comprender las causas subyacentes a dichas fluctuaciones, estableciendo una relación directa con los parámetros de producción del vidrio templado. El objetivo es garantizar que el vidrio se fragmente de manera uniforme y predecible, lo cual sería indicativo de un proceso de templado controlado y consistente.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el ámbito industrial la calidad de los productos son elementos cruciales que impactan directamente en la confiabilidad y satisfacción del cliente. Particularmente en la industria del vidrio la prueba de fragmentación es un indicador de la calidad general, reflejando la eficacia del proceso de templado y la integridad del material. Un vidrio de alta calidad debería fragmentarse de manera controlada y predecible para poder garantizar la seguridad del usuario final.

En la empresa Vitelsa S.A, específicamente en el proceso de templado, se ha observado una disparidad notable en los resultados obtenidos durante las pruebas de fragmentación de vidrios con el mismo espesor. Esta discrepancia es particularmente preocupante, dado que los registros históricos de la empresa sugieren que tales números son elevados en comparación con los estándares establecidos. Por ejemplo, con vidrios de 10 mm de espesor, la prueba de fragmentación puede dar valores entre 46 y 92 partículas, lo cual es un rango de valores con variación estadísticamente significativa. Dichos valores de fragmentación podrían estar influenciados por variables del proceso tales como las temperaturas y disposiciones de los vidrios al interior del horno, así como por los diferentes conjuntos de parámetros (fórmula) que se utilizan para los 2 tipos de vidrios no templados que se reciben por parte de los proveedores (Vitromexico y Andino), por lo que se propone estudiar a partir de un Diseño de Experimentos (DOE), la influencia de dichas variables sobre la prueba de fragmentación de los vidrios templados, esto en aras de mejorar la variación en los datos arrojados por dicha prueba, y por ende mejorar el proceso de temple junto con los parámetros usados. En la Ilustración 1, se presenta la media obtenida del número de partículas que arrojó la prueba de fragmentación para un rango de 6 meses y en la Ilustración 2 se muestra la desviación estándar de los datos de fragmentación en el mismo rango de tiempo, donde se puede observar la variación de los mismos.

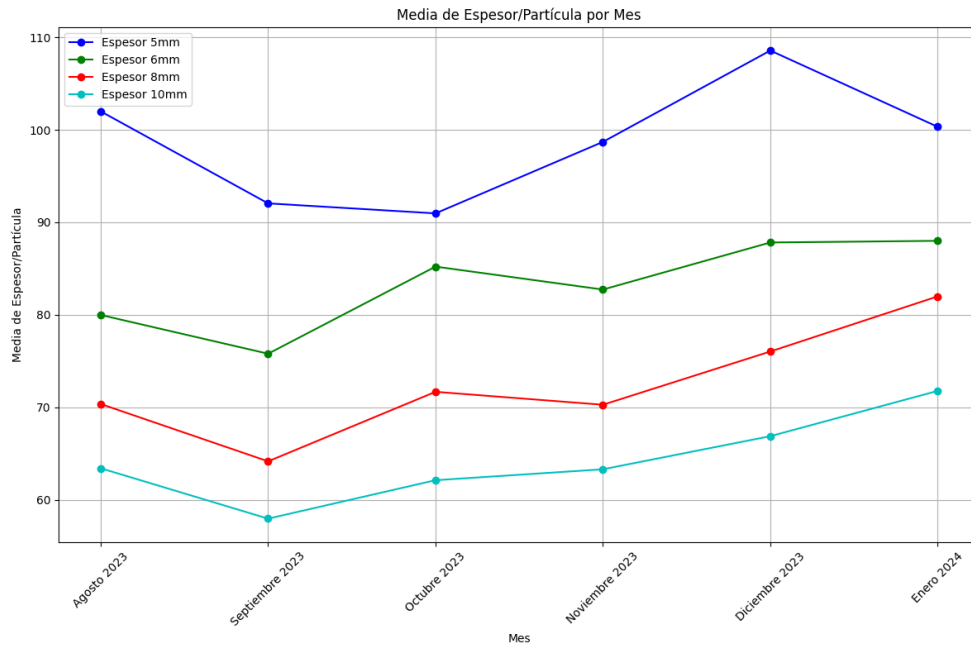


Ilustración 1. Media obtenida de las pruebas de fragmentación realizadas durante seis meses para espesores de 5 mm, 6mm, 8mm y 10 mm.

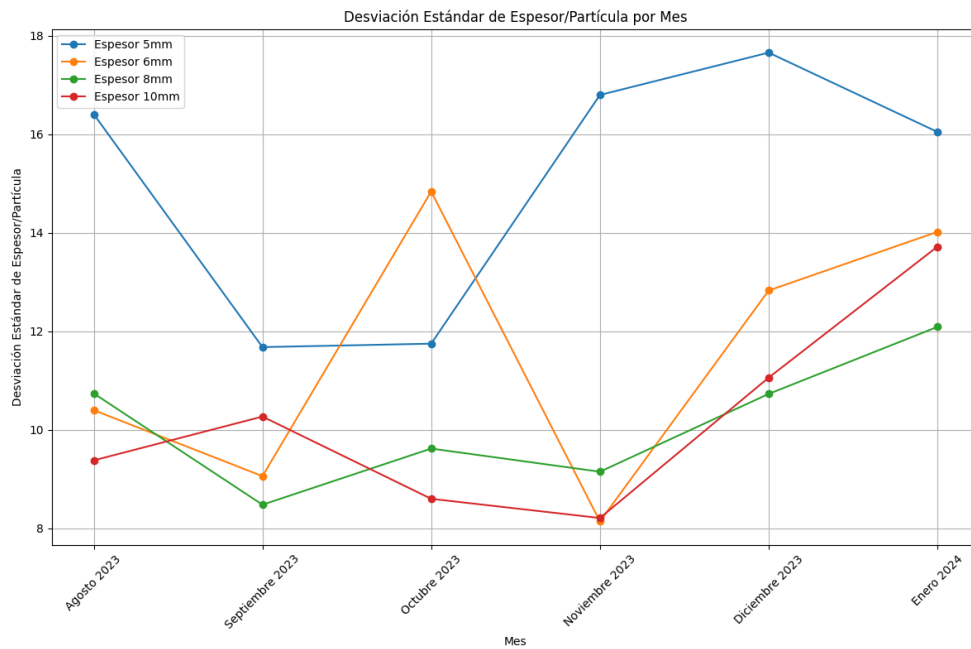


Ilustración 2. Desviación estándar de las pruebas de fragmentación realizadas durante seis meses para espesores de 5 mm, 6mm, 8mm y 10 mm.

El análisis de las desviaciones estándar de los diferentes espesores de partículas a lo largo de varios meses mostrados en la Ilustración 2, revela patrones significativos en la variabilidad de los resultados. Se observa que la desviación estándar fluctúa notablemente, lo que indica variaciones en la calidad del proceso de templado. La variabilidad es más alta en ciertos meses, particularmente en diciembre de 2023 y enero de 2024, lo que sugiere que hay factores específicos en estos períodos que están afectando la consistencia del proceso. Por otro lado meses como septiembre y octubre de 2023 muestran una menor variabilidad, lo que indica condiciones de producción más estables.

La comprensión de estos patrones es crucial para identificar y corregir las causas de variabilidad. Factores como la temperatura del horno, la disposición de los vidrios dentro del horno y los parámetros específicos utilizados en el templado deben ser cuidadosamente analizados. La implementación de un Diseño de Experimentos (DOE) permitirá evaluar sistemáticamente la influencia de estas variables y optimizar el proceso para reducir la variabilidad en los resultados de las pruebas de fragmentación. Esto no solo mejorará la calidad del vidrio templado, sino que también aumentará la confiabilidad del producto final asegurando una mayor satisfacción del cliente y cumplimiento con los estándares de seguridad.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Analizar a través de un estudio estadístico, las causas subyacentes de la variación en las pruebas de fragmentación del vidrio templado fabricado por la empresa Vitelsa S.A, con el fin de mejorar la consistencia y calidad del producto.

B. Objetivos específicos

- Identificar mediante un DOE, la relación entre la variabilidad en las pruebas de fragmentación y diversas variables críticas, tales como: los proveedores de vidrio, las temperaturas, las velocidades y los espesores, entre otras, empleadas durante el proceso de templado del vidrio.
- Determinar a partir del DOE, los parámetros de las variables que arrojan los mejores valores para la prueba de fragmentación.
- Obtener mediante pirometría la estabilidad térmica del horno de temple según su carga en aras de garantizar un temple adecuado.
- Proponer recomendaciones específicas y mejoras en los procesos de producción en planta, basadas en los hallazgos obtenidos, con el objetivo de minimizar las variaciones y obtener los mejores resultados posibles en las pruebas de fragmentación.
- Realizar un proceso de seguimiento y control del proceso ya mejorado, a través de herramientas de control estadístico de proceso, que permitan determinar el real impacto de las modificaciones realizadas a partir del DOE.

V. MARCO TEÓRICO

A. Vidrio

El vidrio es uno de los materiales más antiguos y versátiles, este ha desempeñado un papel importante en la historia de la humanidad y sigue siendo una parte integral de nuestra vida diaria. El vidrio ha evolucionado y adaptado a muchas aplicaciones desde la antigüedad hasta su uso en la tecnología moderna, demostrando su valor incomparable en muchos campos. [3]

La aparición de los primeros objetos de vidrio fabricados por el hombre no ha sido identificada ni geográfica ni cronológicamente. Se cree que los primeros ejemplos de vidrio proceden de Mesopotamia, alrededor del año 3000 a. C., donde se fabricaban cuentas de vidrio y pequeños objetos decorativos. Con el tiempo el conocimiento y la tecnología de la fabricación de vidrio se extendieron por el mundo antiguo, desde Egipto hasta Roma, influyendo en el desarrollo de la civilización y la cultura. Durante la Edad Media, la fabricación de vidrio experimentó un renacimiento en Europa, creando obras de arte, como ventanas de iglesias y jarrones decorativos. Además en esta misma época se introduce el soplado de vidrio, una técnica innovadora que permitía la creación de formas y patrones más complejos [3]. En los tiempos modernos, la Revolución Industrial trajo avances significativos en la producción de vidrio con la introducción de la producción en masa, tecnologías y creación de vidrio de alta calidad para diversas aplicaciones industriales y comerciales, la producción a gran escala requirió el uso de grandes hornos capaces de fundir cientos de toneladas de vidrio, así como la mecanización de los métodos de producción. Hoy en día el vidrio se encuentra en todo, desde ventanas y embalajes hasta dispositivos electrónicos y médicos. [3]

Los vidrios a pesar de parecer sólidos a temperatura ambiente no encajan perfectamente en la descripción de los sólidos, esto debido a la ausencia de una estructura cristalina definida, una característica fundamental de los sólidos. En términos de su organización estructural desordenada, los vidrios muestran mayor similitud con los líquidos que con los sólidos. Esta peculiaridad ha

llevado a algunos a describirlos como líquidos con viscosidad infinita [3]. Los vidrios se caracterizan por una serie de propiedades comunes a los líquidos y a los sólidos cristalinos. Por ejemplo, como los sólidos cristalinos presentan elasticidad y como los líquidos fluyen (a elevadas tensiones de cizalla). Son además isotrópicos como los líquidos, propiedad que les confiere un especial interés. Por lo cual la mejor definición que se le puede dar al vidrio es la de un material amorfo el cual es generado mediante la fusión de sílice y otros aditivos a elevadas temperaturas. Al experimentar el proceso de enfriamiento, éste se comporta como un material sólido y lustroso, desprovisto de una estructura de grano, característica que influye en algunas de sus propiedades distintivas. [4]

Las propiedades mecánicas del vidrio son especiales debido a su gran variedad de aplicaciones, sin embargo éstas aplicaciones se encuentran limitadas debido a los diferentes tipos de esfuerzos mecánicos a los que puede ser sometido durante su uso, como los son esfuerzos de tracción, compresión, torsión, impacto e indentación. Por otro lado la dureza y la resistencia al rayado le otorgan cierta ventaja frente a otros materiales, pero su fragilidad y su baja tenacidad a la fractura no le permiten competir con muchos de ellos. [5] [6]

Una de las propiedades más importantes del vidrio es la transparencia, permitiendo que la luz pase a través de él sin una distorsión significativa, lo cual lo hace ideal para aplicaciones como envases y ventanas. El vidrio es muy duro y resistente a presión, sin embargo puede agrietarse fácilmente y romperse por impacto o flexión excesiva. Es inerte a la mayoría de químicos, lo que lo hace ideal para contener sustancias corrosivas o ácidas, tiene baja conductividad térmica y es un material altamente reciclable, lo que lo convierte en una opción amigable con el medio ambiente. [4]

El vidrio sódico cálcico es el más utilizado dentro del mercado de vidrios, debido a la disponibilidad y economía de las materias primas que lo constituye, lo que hace que la producción de este tipo de vidrio sea rentable y ampliamente comercializado a nivel global mayormente como vidrio plano, especialmente para aplicaciones en la industria automotriz y de construcción. Además es altamente versátil y se puede fabricar en una variedad de formas, tamaños y espesores para adaptarse a una amplia gama de aplicaciones. Su proceso de fabricación inicia con la fusión de

sílice a una elevada temperatura, próxima a 1700°C, donde la sílice constituye el 71 – 75 % en peso de la materia prima y se agrega soda en una proporción de 12-16 % en peso , la cual aporta óxido de sodio, esto con el fin de fundir más fácilmente la mezcla [2]. Finalmente, para mejorar las propiedades mecánicas y la resistencia química, se incorpora caliza, la cual aporta óxido de calcio, en una proporción de 10-15 % en peso, resultando todo este proceso en un vidrio sódico cálcico, versátil y ampliamente utilizado en diversas aplicaciones industriales. [2]

B. Vidrio templado

El vidrio templado ha venido revolucionado la industria moderna con su combinación de resistencia, seguridad y versatilidad. Este material, el cual es sometido a un proceso de tratamiento térmico, ha encontrado lugar en una amplia gama de aplicaciones, desde la construcción hasta la tecnología de consumo, brindando soluciones confiables y seguras para diversas necesidades. [2]

El vidrio templado es un tipo de vidrio que ha sido tratado térmicamente para aumentar su resistencia y durabilidad. El temple del vidrio es un proceso de tratamiento térmico que se realiza para mejorar las propiedades mecánicas y de seguridad del vidrio. Se considera un vidrio de seguridad porque consigue más resistencia mecánica y asegura que en caso de rotura, su fractura sea en fragmentos pequeños y redondeados que no pueden producir daños de importancia al ser humano, en vez de fragmentos grandes y angulosos que si pueden producir daño al ser humano. Esto se consigue mediante la propagación de tensiones de compresión en las superficies del vidrio, mientras que el núcleo se mantiene en estado de tracción. En la **Ilustración 3** se muestran los esfuerzos a través del espesor de un vidrio templado, donde se observa que las superficies están a compresión máxima y que ésta disminuye hasta convertirse en una tensión máxima en el centro del espesor. [7]

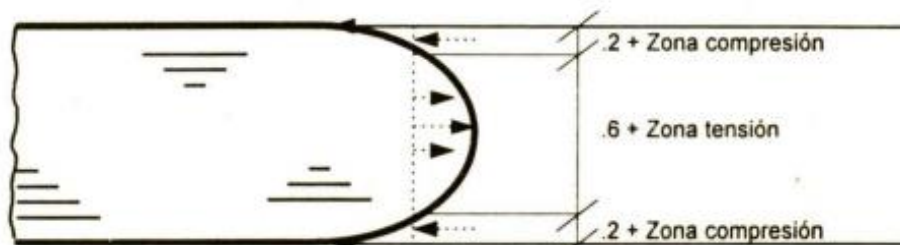


Ilustración 3. Esfuerzos típicos de un vidrio templado. [1]

El desarrollo del vidrio templado, se remonta al siglo XVII, cuando los científicos de la época habían estado muy impresionado por las notables propiedades de las gotas del príncipe Rupert, quien realizó un experimento en el que dejó caer gotas de vidrio fundido en agua fría y descubrió que en lugar de romperse en fragmentos, las gotas se solidificaban en una forma esférica y se volvían extremadamente resistentes [8]. Desde su desarrollo inicial el vidrio templado ha experimentado una serie de avances tecnológicos revolucionado la industria moderna con su combinación de resistencia, seguridad y versatilidad que lo han convertido en ideal para diversas aplicaciones en una variedad de industrias. Hoy en día el vidrio templado se utiliza ampliamente en arquitectura y construcción en la industria automotriz, dispositivos electrónicos, equipamiento industrial y una variedad de otras aplicaciones donde se requiere resistencia y seguridad.

C. Temple

El temple de vidrio es un proceso térmico específico, el cual se realiza para mejorar las propiedades mecánicas del vidrio, haciéndolo más resistente a impactos y cambios de temperatura. Este fenómeno puede lograrse mediante dos métodos, el templado químico y el templado térmico. [3]

- Temple químico

El templado químico del vidrio consiste en la generación de tensiones de compresión producidas por una modificación superficial de la composición química del vidrio, donde se forman capas superficiales por diferentes técnicas, que tienen menor coeficiente de dilatación que el vidrio base. Así, durante el enfriamiento el interior se contrae en mayor medida que la superficie y esta queda sometida a compresión. En el temple químico la pieza de vidrio se sumerge en una solución salina con una alta concentración de iones de potasio. Este proceso, llevado a cabo a elevadas temperaturas provoca una reacción entre los iones de potasio y los de sodio generando compresión en la superficie sumergida. Aunque este método proporciona una resistencia mecánica significativamente mayor, la rotura resulta similar a la de un vidrio no templado, lo que no lo clasifica como vidrio de seguridad. [4]

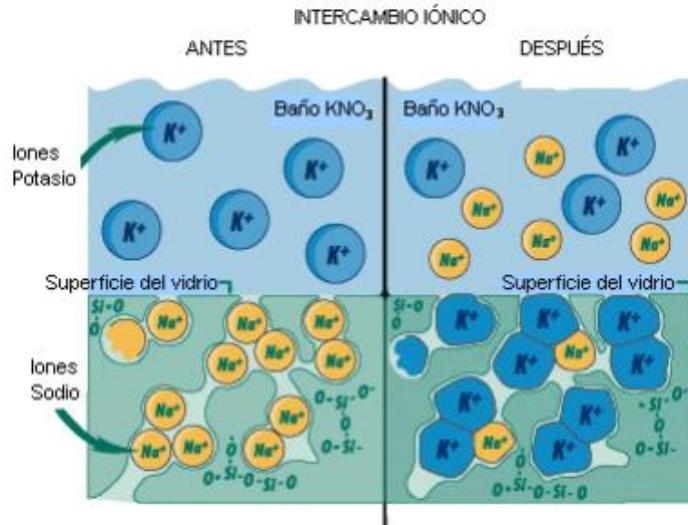


Ilustración 4. Representación del intercambio iónico entre los iones de sodio de la superficie de un vidrio de silicato sódico con los iones de potasio procedentes de una sal fundida en la que está inmerso el vidrio. [4]

- *Temple térmico*

Este proceso implica calentar el vidrio a altas temperaturas y luego enfriarlo rápidamente mediante un sistema de aire forzado, lo cual endurece la superficie y como resultado, el vidrio adquiere una mayor resistencia a la tensión y compresión, así como una mayor resistencia al impacto [2].

Durante el proceso de templeado por enfriamiento por aire, el vidrio ordinario primero se calienta cerca de su temperatura de reblandecimiento y luego se enfría rápidamente con aire a alta presión. Este tratamiento térmico crea un gradiente de temperatura entre las capas interior y exterior del vidrio, lo que da como resultado una tensión de tracción dentro del interior del vidrio y una tensión de compresión en su superficie. Este proceso de calentamiento y enfriamiento rápido hace que la superficie del vidrio se endurezca y se contraiga más rápido que el interior, y como resultado el vidrio templado tiene tensiones internas y una superficie más dura, lo que le confiere su elevada resistencia [2]. Cuando el vidrio templado se fractura estas tensiones hacen que se fragmente en pequeños trozos redondeados, en lugar de grandes trozos afilados (**Ilustración 5**). Aunque el vidrio templado es más resistente que el vidrio común, es importante destacar que no puede ser cortado o perforado después del temple sin comprometer su integridad estructural. [7]

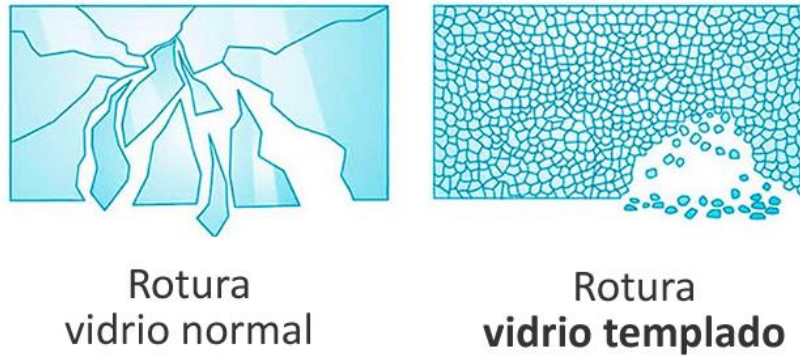


Ilustración 5. Comparación de rotura de un vidrio crudo y un vidrio templado. [9]

El proceso de temple tiene como objetivo principal fortalecer el vidrio y reducir su vulnerabilidad a fracturas. El vidrio templado adquiere una serie de propiedades mejoradas en comparación con el vidrio común, esto incluye una mayor resistencia a la tensión y compresión, lo que lo hace más capaz de resistir cargas mecánicas externas y reducir el riesgo de rotura. Además, el vidrio templado exhibe una mayor resistencia al impacto, lo que significa que es menos probable que se rompa o astille cuando se somete a fuerzas repentinas o golpes, por ejemplo, la resistencia de vidrio plano recocido puede considerarse de 300 kg/cm², en cambio la resistencia de un vidrio templado por el contrario es típicamente de 1000 kg/cm², lo que corresponde a una mejora de resistencia de cuatro a cinco veces. Este tipo de vidrio se utiliza comúnmente en aplicaciones donde la seguridad es una preocupación, como ventanas de automóviles, puertas de vidrio, mesas y otros elementos arquitectónicos. [7]

- *Defectos del vidrio templado*

Los principales defectos que se dan debido al temple del vidrio son los defectos ópticos, estos se manifiestan principalmente en forma de ondulaciones, efectos de lente y variaciones en la claridad visual. Un fenómeno óptico que generalmente se nota en reflexión es el conocido como “corrugado” u “ondulación”, este es causado por el hundimiento del vidrio entre los rodillos en el proceso de templado. Durante el proceso de temple el vidrio se calienta hasta alcanzar el punto de ablandamiento y durante este proceso de calentamiento el vidrio es transportado oscilatoriamente hacia adelante y atrás sobre rodillos de sílice. A medida que la temperatura del

vidrio aumenta, este se vuelve maleable y tiende a hundirse levemente entre los rodillos a su paso por el horno. El resultado es una reducción en la planicidad de la superficie que se conoce como “ondulación del rodillo”, o “roller wave” y es una repetición periódica de la ondulación que se observa en la dirección del recorrido del vidrio. [10]

- *Descripción del proceso de templado:*

Corte: Primero se corta el vidrio plano (generalmente en láminas) en la forma y tamaño deseados. Esto se hace utilizando herramientas especializadas como mesas de corte, las cuales están equipadas de corta vidrios que funcionan para marcar una línea en el vidrio siguiendo las dimensiones requeridas. El corta vidrios consiste en una punta de carburo de tungsteno que se utiliza para rayar la superficie del vidrio creando una línea de rotura. Una vez que se ha realizado la línea de rotura en el vidrio se aplica una presión controlada en el borde opuesto de la línea de corte, lo que provoca que el vidrio se separe a lo largo de la línea marcada. Este proceso también llamado despiece se hace generalmente colocando el borde del vidrio sobre un borde recto o un borde de mesa y aplicando una presión manual para romper el vidrio a lo largo de la línea de corte.[11]



Ilustración 6. Mesa de corte. [12]

Desbaste de bordes: Después de cortar el vidrio en la forma y tamaño deseados y antes del proceso de templado se realiza el pulido de los bordes mediante una maquina canteadora o biseladora de vidrio. Esto implica un desbaste de bordes inicial, el cual se realiza mediante una máquina especializada equipada con discos abrasivos para desbastar los bordes del vidrio. Esto elimina cualquier imperfección y aspereza dejando los bordes más uniformes y suaves. Este proceso implica el uso de herramientas de biselado que cortan y pulen los bordes del vidrio en un ángulo específico. Después del desbaste inicial los bordes del vidrio se someten a un proceso de pulido final. Esto se realiza utilizando discos abrasivos de menor tamaño y mayor finura para lograr un acabado suave y si se desea que tenga un acabado brillante o mate en los bordes del vidrio. [11]



Ilustración 7. Canteadora de vidrio. [13]

Lavado: Antes de templar el vidrio este se limpia para eliminar cualquier suciedad, grasa o residuos que puedan afectar el proceso de templado mediante lavadoras de vidrio vertical u horizontal. Después de limpiar y secar el vidrio se realiza una inspección visual para asegurarse de que no queden manchas ni residuos.

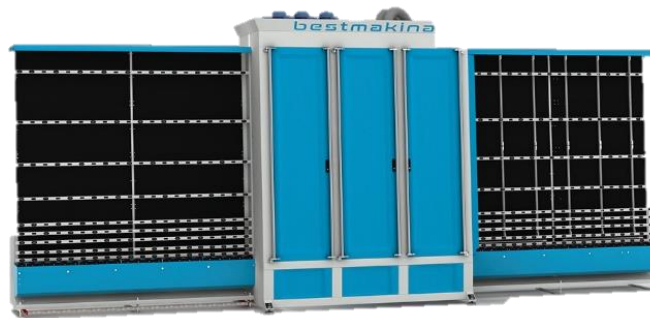


Ilustración 8. Lavadora de vidrio vertical. [14]

Templado: El vidrio se coloca en un horno especializado y se calienta a una temperatura de aproximadamente 600-700°C [1]. Inicialmente las láminas de vidrio primero entran en el pre horno a través de rodillos transportadores, donde las láminas de vidrio se mueven lentamente, calentándose gradualmente a una temperatura cercana al punto de reblandecimiento del vidrio. Este proceso permite que el vidrio se caliente de manera uniforme y evita el riesgo de tensiones internas. Después de alcanzar la temperatura deseada en el pre horno, las láminas de vidrio se transfieren al horno de templado principal. Una vez que el vidrio sale del horno de templado pasan al área de enfriamiento donde por medio de unos sopladores se suministra aire a alta presión sobre la superficie del vidrio. Este enfriamiento rápido crea tensiones de compresión en la capa exterior del vidrio mientras que el interior permanece en tensión, dando como resultado un vidrio mucho más resistente y duradero. [11]



Ilustración 9. Horno de temple de vidrio. [15]

D. Prueba de fragmentación

La prueba de fragmentación es un procedimiento utilizado para evaluar la resistencia y seguridad de un vidrio templado, consiste en golpear el vidrio templado con un objeto y observar la calidad de rotura de este. La prueba de fragmentación se realiza para asegurar de que, en caso de rotura, el vidrio templado se fragmente en pequeños trozos no afilados en lugar de romperse en fragmentos grandes y filosos. [16]

Para realizar la prueba de fragmentación se selecciona una probeta del vidrio templado que se va a probar. Esta muestra puede ser una pieza completa o un fragmento de tamaño específico, dependiendo de los requisitos de la prueba. La probeta se coloca en una posición fija, generalmente en un soporte o sujeción y se utiliza un objeto contundente como una bola de acero o un martillo para impactar el vidrio con una fuerza predefinida y controlada. El impacto se aplica en un área específica del vidrio, normalmente en el centro de la muestra. Después del impacto se observa y evalúa visualmente la forma en que el vidrio se rompe. Se busca la presencia de pequeños fragmentos no afilados que son característicos de un vidrio templado de calidad. Se registran y analizan los resultados de la prueba incluyendo la cantidad y tamaño de los fragmentos generados, los resultados de la prueba de fragmentación deben cumplir con ciertos criterios para considerarse satisfactorios, según la norma a cumplir. [16]

VI. METODOLOGÍA

Esta propuesta se basa en analizar la fluctuación del resultado del ensayo de fragmentación en la empresa Vitelsa S.A. Donde se pretende evaluar los parámetros establecidos en el proceso de temple.

A. *Revisión de literatura*

Realizar una revisión de literatura relacionada con la fabricación de vidrio templado, sus propiedades y sus ensayos de fragmentación, identificando metodologías y mejores prácticas utilizadas en la industria.

B. *Condiciones iniciales y análisis de influencia de los parámetros*

Los parámetros que se utilizan al momento de templar el vidrio se seleccionan según dos variables, primero el proveedor del vidrio (Andino, Vitro) y segundo según el espesor del vidrio que se vaya a templar, los cambios que hay entre proveedores y espesores a estudiar son los mostrados en la tabla 1.

Tabla 1. Combinación de parámetros usados inicialmente.

Espesor	6		8	
Proveedor	Vitro	Andino	Vitro	Andino
Temperatura (°C)	670	680	670	680
Tiempo Calentamiento (s)	190	200	250	260
Velocidad Sopladores (RPM)	820	750	680	670

Se realizará un diseño de experimentos DOE factorial con 4 factores y 2 bloques para determinar la influencia de las variables sobre la prueba de fragmentación. El DOE consta de 16 ensayos para cada espesor a usar, los cuales son 1) 6 mm y 2) 8 mm con 2 réplica para un total de 64 ensayos. Los factores son: A) Tipo de Vidrio (Proveedor), cuyos niveles son: 1) Vitromexico

y 2) Andino, B) Temperatura de temple (Temperatura), cuyos niveles son: 1) 670°C y 2) 680°C, C) Velocidad de los sopladores (Velocidad), cuyos niveles dependen del proveedor y del espesor. Para 6 mm 1) 820 rpm y 2) 750 rpm, para 8 mm 1) 600 rpm y 2) 630 rpm, D) Tiempo de calentamiento en el horno (Tiempo Calentamiento), cuyos niveles también dependen del proveedor y del espesor. Para 6 mm 1) 200 s y 2) 190 s, para 8 mm 1) 260 s y 2) 250 s. En la Tabla 2, se puede observar el procedimiento experimental:

Tabla 2. Diseño de Experimentos DOE.

Bloque Espesor [mm]	Proveedor	Temperatura [°C]	Tiempo de Calentamiento [min]	Velocidad Sopladores [RPM]
6	Vitro	670	200	820
6	Andino	670	200	820
6	Vitro	670	200	750
6	Andino	670	200	750
6	Vitro	670	190	820
6	Andino	670	190	820
6	Vitro	670	190	750
6	Andino	670	190	750
6	Vitro	680	200	820
6	Andino	680	200	820
6	Vitro	680	200	750
6	Andino	680	200	750
6	Vitro	680	190	820
6	Andino	680	190	820
6	Vitro	680	190	750
6	Andino	680	190	750
6	Vitro	670	200	820
6	Andino	670	200	820
6	Vitro	670	200	750
6	Andino	670	200	750
6	Vitro	670	190	820
6	Andino	670	190	820
6	Vitro	670	190	750
6	Andino	670	190	750
6	Vitro	680	200	820
6	Andino	680	200	820
6	Vitro	680	200	750
6	Andino	680	200	750

6	Vitro	680	190	820
6	Andino	680	190	820
6	Vitro	680	190	750
6	Andino	680	190	750
8	Vitro	670	260	630
8	Andino	670	260	630
8	Vitro	670	260	600
8	Andino	670	260	600
8	Vitro	670	250	630
8	Andino	670	250	630
8	Vitro	670	250	600
8	Andino	670	250	600
8	Vitro	680	260	630
8	Andino	680	260	630
8	Vitro	680	260	600
8	Andino	680	260	600
8	Vitro	680	250	630
8	Andino	680	250	630
8	Vitro	680	250	600
8	Andino	680	250	600
8	Vitro	670	260	630
8	Andino	670	260	630
8	Vitro	670	260	600
8	Andino	670	260	600
8	Vitro	670	250	630
8	Andino	670	250	630
8	Vitro	670	250	600
8	Andino	670	250	600
8	Vitro	680	260	630
8	Andino	680	260	630
8	Vitro	680	260	600
8	Andino	680	260	600
8	Vitro	680	250	630
8	Andino	680	250	630
8	Vitro	680	250	600
8	Andino	680	250	600

C. Verificación de uniformidad del horno de temple según ubicación

Se llevó a cabo una evaluación para verificar la uniformidad de calentamiento dentro del horno de temple. En otras palabras, se examina si al utilizar la máxima capacidad de carga en el horno, existen fluctuaciones significativas en las temperaturas registradas por el escáner para cada pieza de vidrio ubicado en una zona diferente del horno. El objetivo es asegurarse de que el proceso de temple mantenga una distribución homogénea de temperaturas, incluso cuando se utilice la carga máxima, para garantizar la calidad y uniformidad en el tratamiento térmico de cada vidrio, además de verificar si se obtendrán datos sin variaciones asociadas al horno para próximos ensayos y hallar una correlación entre las temperaturas registradas y los resultados de las pruebas de fragmentación.

La medición de las temperaturas dentro del horno de temple se llevó a cabo de la siguiente manera: Se aseguró que el horno estuviera en condiciones operativas óptimas, se seleccionaron 15 vidrios de 8 mm de espesor con dimensiones de 360 x 1100 mm, los cuales fueron dispuestos en tres filas de cinco vidrios cada una, cubriendo toda la mesa de carga del horno. Estas muestras representan la máxima capacidad de carga del horno (**Ilustración 10**).

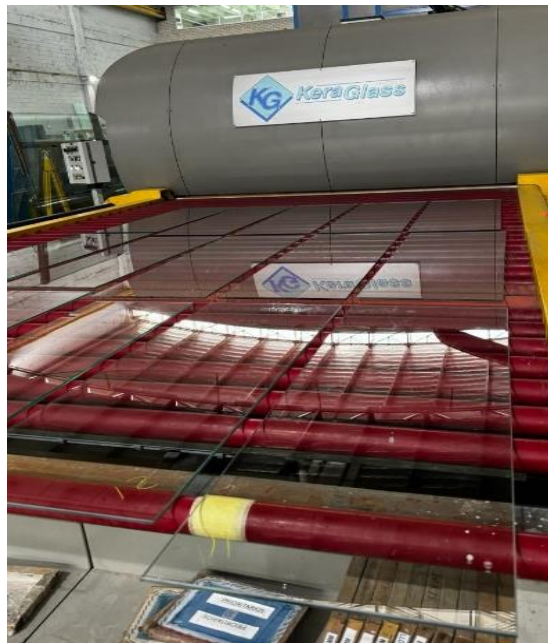


Ilustración 10. Distribución de probetas de vidrio en rodillos de entrada.

- Especificaciones de probeta :

Cantidad: 15 probetas

Espesor: 8 mm

Dimensiones: 360x1100 mm

Proveedor: Andino

- Parámetros del horno

Temperatura: 680 °C

RPM: 600 Rpm

Tiempo precalentamiento: 268 s

Tiempo calentamiento: 258 s

Tiempo enfriamiento: 250 s

- Distribución de probeta en el horno:

#5	#4	#3	#2	#1
#10	#9	#8	#7	#6
#15	#14	#13	#12	#11

Ilustración 11. Esquema de la distribución de probetas de vidrio en el horno.

Se sometió la carga completa de vidrios al proceso de temple. Según las especificaciones antes mencionadas. Se registró las temperaturas utilizando el escáner de temperatura para cada vidrio y se analizaron los datos registrados para verificar si existían fluctuaciones significativas en las temperaturas de cada vidrio. Se compararon las temperaturas registradas para cada vidrio y se evaluó la uniformidad de la distribución de temperaturas dentro del horno.

Una vez completado el proceso de temple se realizó la prueba de fragmentación para cada vidrio. Se evaluó la calidad del vidrio templado, observando si cumplía con los estándares de seguridad establecidos, es decir, si se fragmentaba en pequeños trozos no afilados en caso de rotura y se compararon los resultados de temperatura registrados con los datos de la prueba de fragmentación para cada vidrio. Se evaluó si la uniformidad de las temperaturas dentro del horno se correlacionaba con la calidad del vidrio templado.

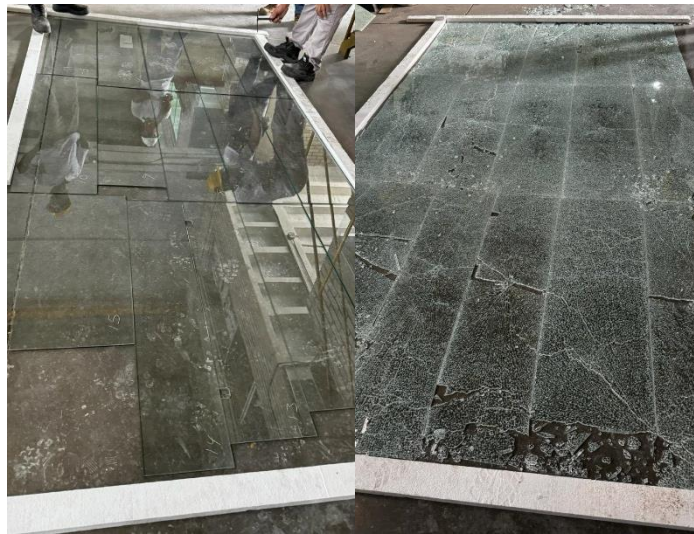


Ilustración 12. Antes y después de la prueba de fragmentación.

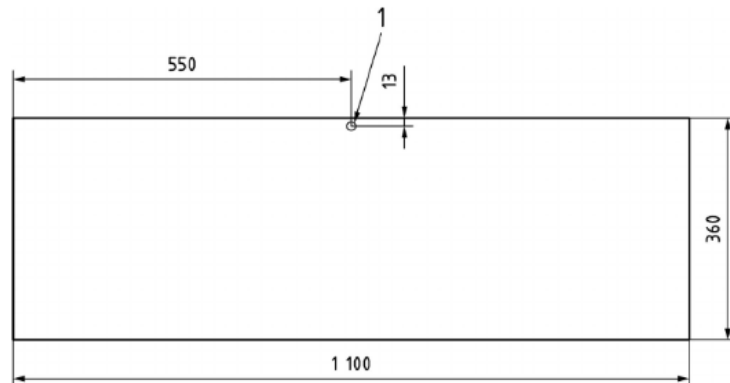
D. Ensayo de fragmentación

Realizar ensayos de fragmentación según la norma UNE EN 12150-1:2000 “Vidrio para edificación. Vidrio silicatado sodocálcico de seguridad templado térmicamente” [16], registrando el número de partículas resultantes para diferentes espesores de vidrio templado y tipo de materia prima. Teniendo en cuenta que en el horno se hace uso de dos fórmulas (Vitromexico y Andino), se estudiará como afecta cada una de las fórmulas al ensayo de fragmentación de ambos tipos de vidrio según el diseño de experimentos. Posterior analizar la coherencia de los resultados y la influencia de las variables identificadas en el paso anterior.

General: El ensayo de fragmentación es una prueba esencial para evaluar la seguridad y el comportamiento del vidrio templado en caso de rotura. Determina si el vidrio se rompe en la manera prescrita para un vidrio de seguridad templado térmicamente de silicato sodocálcico.

Dimensiones y número de especímenes para el ensayo: Las dimensiones de las probetas para el ensayo deben ser 360 mm x 1100 mm, sin orificios, entalladuras o cortes. Se deben ensayar cinco probetas.

Procedimiento de ensayo: Cada probeta para ensayo se debe impactar, usando un instrumento de acero puntiagudo, posicionado a 13 mm medidos hacia adentro y desde el borde más largo del espécimen para ensayo, en el punto medio de este borde, hasta que ocurra la rotura.

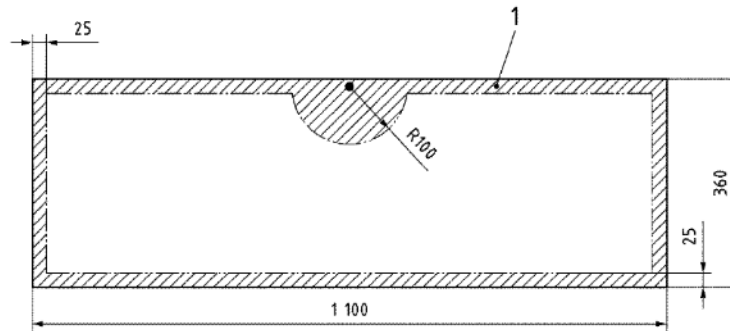


Leyenda

1. Punto de impacto

Ilustración 13. Posición del punto de impacto. [16]

Valoración de la fragmentación: El conteo de partículas y la medición de las dimensiones de la partícula más grande deben hacerse entre 4 min y 5 min después de la fractura. Se debe de excluir de la valoración un área de radio 100 mm, con centro en el punto de impacto, y una franja de 25 mm.



Leyenda

1. Área excluida

Ilustración 14. Área excluida. [16]

El conteo de partículas se debe hacer en la región donde los fragmentos tengan el mayor tamaño (con el objeto de obtener el valor mínimo). El conteo de partículas se debe hacer localizando una plantilla de 50 mm x 50 mm sobre la porción para ensayo. En el conteo de partículas, todas las partículas totalmente contenidas en la plantilla se deben contar como una unidad y todas las partículas parcialmente contenidas en la plantilla se deben contar como 1/2 de unidad.

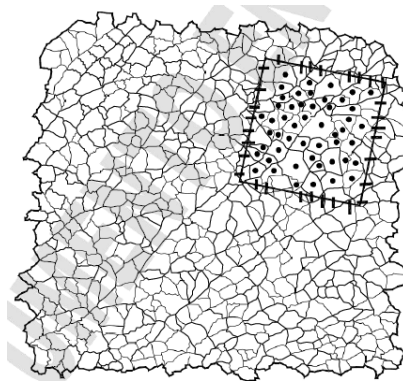


Ilustración 15. Esquema de valoración de fragmentos.

Valores mínimos en el conteo de partículas: para clasificar un vidrio sódico-cálcico como térmicamente templado con aplicaciones de seguridad, el número de partículas contadas de cada espécimen para ensayo no deben ser menor que los valores dados en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores mínimos en el conteo de partículas. [16]

Tipo de vidrio	Espesor nominal (d) en mm	Mínimo de partículas contadas
Vidrio Tipo I (Vidrio plano transparente) y Tipo III (Vidrio plano estirado transparente)	3	15
	4 a 12	40
	15 a 19	30
Vidrio Tipo II (Vidrio plano impreso y armado), Forma 3 (Vidrio impreso)	4 a 10	30

E. Propuestas de mejora:

Basándose en los resultados obtenidos del DOE y del estudio de uniformidad en el horno, se propone ajustar los parámetros de producción en el horno para reducir la variabilidad y obtener los mejores resultados de para la prueba de fragmentación.

F. Implementación y seguimiento:

A partir de las mejoras Implementa los cambios propuestos en el proceso de producción. Realizar un seguimiento continuo de las pruebas para evaluar la eficacia de las mejoras implementadas y realizar ajustes adicionales si es necesario.

VII. RESULTADOS y DISCUSIÓN

A. Resultados

En lo que respecta a la verificación de uniformidad del horno, los resultados obtenidos de las temperaturas registradas por el scanner del horno se presentan en las Tabla 4 mostradas a continuación:

Tabla 4. Temperaturas registradas por el scanner y fragmentación por vidrio.

No. Vidrio	#5 676 °C 80	#4 671 °C 73	#3 665 °C 78	#2 669 °C 72	#1 671 °C 75
Temperatura	#10 672 °C 79	#9 670 °C 78	#8 669 °C 80	#7 670 °C 70	#6 667 °C 70
Fragmentación	#15 670 °C 81	#14 671 °C 76	#13 666 °C 73	#12 668 °C 78	#11 668 °C 67

Durante el proceso de prueba de fragmentación del vidrio, se observó que el vidrio #6 y el vidrio #11 sufrieron fracturas cuando el vidrio #1 fue impactado, debido a su proximidad entre sí. Por lo tanto, estos dos vidrios quedaron excluidos del ensayo. Teniendo en cuenta los datos registrados en las **Tablas 4** se puede observar que se tiene un rango de temperatura de 665 °C a 672 °C y una fragmentación de 73 a 81 números de partículas, dando una desviación de 3,2 lo que significa que los valores individuales en un conjunto de datos están cercanos a la media, indicando que los datos tienden a agruparse alrededor de un punto central, demostrando que se tienen temperaturas uniformes dentro del horno, por lo que se puede tener en cuenta para futuros ensayos que la variación del número de fragmentación del vidrio no está asociado con la posición en la que se ubique el vidrio dentro del horno.

En lo que respecta a las condiciones iniciales y el análisis de influencia de los parámetros, los resultados obtenidos a partir del desarrollo del DOE se resumen en la Tabla 5 presentada a continuación:

Tabla 5. Resultados del DOE.

Espesor [mm]	Proveedor	Temperatura [°C]	Tiempo de Calentamiento [min]	Velocidad Sopladores [RPM]	Fragmentación
6	Vitro	670	200	820	89
6	Andino	670	200	820	89
6	Vitro	670	200	750	76
6	Andino	670	200	750	78
6	Vitro	670	190	820	92
6	Andino	670	190	820	84
6	Vitro	670	190	750	68
6	Andino	670	190	750	66
6	Vitro	680	200	820	98
6	Andino	680	200	820	88
6	Vitro	680	200	750	84
6	Andino	680	200	750	81
6	Vitro	680	190	820	90
6	Andino	680	190	820	87
6	Vitro	680	190	750	80
6	Andino	680	190	750	76
6	Vitro	670	200	820	95
6	Andino	670	200	820	92
6	Vitro	670	200	750	76
6	Andino	670	200	750	81
6	Vitro	670	190	820	95
6	Andino	670	190	820	92
6	Vitro	670	190	750	70
6	Andino	670	190	750	64
6	Vitro	680	200	820	92
6	Andino	680	200	820	95
6	Vitro	680	200	750	84
6	Andino	680	200	750	70
6	Vitro	680	190	820	85
6	Andino	680	190	820	88
6	Vitro	680	190	750	82
6	Andino	680	190	750	80
8	Vitro	670	260	630	74
8	Andino	670	260	630	70
8	Vitro	670	260	600	70
8	Andino	670	260	600	71
8	Vitro	670	250	630	63
8	Andino	670	250	630	63

8	Vitro	670	250	600	56
8	Andino	670	250	600	60
8	Vitro	680	260	630	84
8	Andino	680	260	630	80
8	Vitro	680	260	600	81
8	Andino	680	260	600	76
8	Vitro	680	250	630	71
8	Andino	680	250	630	64
8	Vitro	680	250	600	64
8	Andino	680	250	600	64
8	Vitro	670	260	630	69
8	Andino	670	260	630	78
8	Vitro	670	260	600	72
8	Andino	670	260	600	66
8	Vitro	670	250	630	60
8	Andino	670	250	630	71
8	Vitro	670	250	600	58
8	Andino	670	250	600	51
8	Vitro	680	260	630	86
8	Andino	680	260	630	83
8	Vitro	680	260	600	80
8	Andino	680	260	600	72
8	Vitro	680	250	630	66
8	Andino	680	250	630	68
8	Vitro	680	250	600	70
8	Andino	680	250	600	68

Del ANOVA (Ilustración 16), se pueden inferir los factores de interacciones que son relevantes para los resultados de fragmentación, cuando se obtiene un p-valor menor que 0.05 para un factor o una interacción en un ANOVA, se concluye que dicho factor o interacción es estadísticamente significativo en relación con la variable dependiente (resultado de fragmentación, en este caso). Esto implica que dicho factor o interacción tiene un efecto significativo en los resultados observados y no se puede atribuir simplemente a variaciones aleatorias o al azar, es decir, los factores e interacciones que son significativos son los que mostraron un p-valor <0.05, los cuales son: 1) Espesor, 2) Temperatura, 3) Tiempo de Calentamiento, 4) Velocidad de los Solapadores y 5) La interacción de segundo orden: Tiempo de Calentamiento*Velocidad de los Solapadores.

Término	Efecto	Coef	SE Coef	T	P
Constante		88,26	3,65964	24,12	0,000
Espesor (Bloque)		-18,61	3,65964	-5,08	0,000
Proveedor	-1,35	-0,68	0,70965	-0,95	0,345
Temperatura	7,92	3,96	0,70965	5,58	0,000
Tiempo Calen.	10,20	5,10	0,58233	8,76	0,000
Vel. Sopladores	2,52	1,26	0,59212	2,13	0,039
Proveedor*Temperatura	-2,32	-1,16	0,70965	-1,63	0,110
Proveedor*Tiempo Calen.	-0,02	-0,01	0,27599	-0,03	0,974
Proveedor*Vel. Sopladores	0,96	0,48	0,51404	0,94	0,354
Temperatura*Tiempo Calen.	-1,01	-0,50	0,27599	-1,82	0,075
Temperatura*Vel. Sopladores	-0,91	-0,45	0,51404	-0,88	0,381
Tiempo Calen.*Vel. Sopladores	-0,34	-0,17	0,05142	-3,35	0,002
Proveedor*Temperatura*Tiempo Calen.	0,43	0,22	0,27599	0,78	0,437
Proveedor*Temperatura*Vel. Sopladores	-1,75	-0,87	0,51404	-1,70	0,096
Proveedor*Tiempo Calen.* Vel. Sopladores	0,09	0,05	0,04855	0,94	0,352
Temperatura*Tiempo Calen.* Vel. Sopladores	0,05	0,02	0,04855	0,49	0,625
Proveedor*Temperatura*Tiempo Calen.* Vel. Sopladores	-0,19	-0,10	0,04855	-2,01	0,050

Ilustración 16. ANOVA del DOE para la identificación de factores e interacciones que influyen sobre la fragmentación.

Es de notar que en este caso, el factor Proveedor y la mayoría de interacciones de segundo grado, así como todas las interacciones de tercer y cuarto grado, resultaron no tener efecto sobre la fragmentación.

En lo que respecta al modelo de regresión, utilizando los factores e interacciones que fueron relevantes en el ANOVA de la **Ilustración 16**, el software de análisis estadístico MINITAB, arrojó la ecuación y el análisis ANOVA presentados en la **Ilustración 17**:

$$\text{Fragmentacion} = -1014,42 + 12,4058 \text{ Espesor} + 0,55625 \text{ Temperatura} + 2,43039 \text{ Tiempo Calen.} + 0,668783 \text{ Vel. Sopladores} - 0,00229341 \text{ Tiempo Calen.*Vel. Sopladores}$$

Coefficientes - ANOVA

Término	Coef	EE del coef.	T	P
Constante	-1014,42	142,649	-7,11129	0,000
Espesor	12,41	2,717	4,56600	0,000
Temperatura	0,56	0,112	4,95333	0,000
Tiempo Calen.	2,43	0,546	4,45054	0,000
Vel. Sopladores	0,67	0,157	4,24977	0,000
Tiempo Calen.*Vel. Sopladores	-0,00	0,001	-3,00399	0,004

Resumen del modelo

S = 4,49193 R-cuad. = 84,98% R-cuad. (ajustado) = 83,69%
 PRESS = 1427,18 R-cuad. (pred.) = 81,69%

Ilustración 17. Regresión lineal y análisis ANOVA del modelo de regresión lineal para la fragmentación.

Como se puede observar en la **Ilustración 17**, la ecuación mostró un R^2 alto (84.98%), así como unos errores es sus residuales que cumplen con las condiciones de normalidad, aleatoriedad y uniformidad, tal y como se presenta en la **Ilustración 18**:

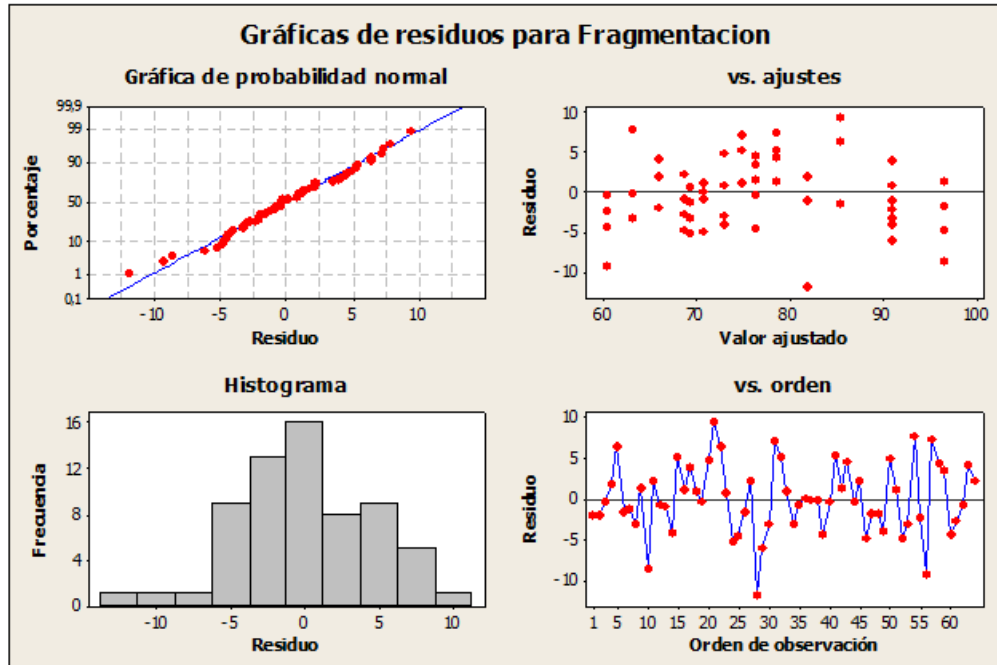


Ilustración 18. Análisis de residuales del modelo de regresión lineal para la fragmentación.

Por otra parte, de en la **Ilustración 19**, se presenta una simulación con la herramienta de optimización de la superficie de respuesta de Minitab. En dicha herramienta, se puede observar que las condiciones de producción que minimizan la fragmentación son: Temperatura: 670°C, Tiempo: 250 s y Velocidad: 600 rpm para obtener una fragmentación de 77 partículas.

Nuevo D	Alto Act	Proveedor	Temperat	Tiempo C	Vel. Sop
0,00000	Bajo	Andino	680,0	260,0	630,0
		Vitro	[670,0]	[250,0]	[600,0]
		Vitro	670,0	250,0	600,0
Compuesto Deseabilidad	0,00000				
Fragment	Obj: 65,0				
	y = 77,2962				
	d = 0,00000				

Ilustración 19. Análisis de optimización de la superficie de respuesta para la fragmentación.

Es importante resaltar que la empresa desea tener una fragmentación en promedio de 70 partículas, razón por la cual, se decidió hacer un análisis de capacidad de proceso en aras de determinar si el proceso actual de producción es capaz de producir la fragmentación en el rango deseado. Dicho análisis de capacidad se muestra en la **Ilustración 20** presentada a continuación:

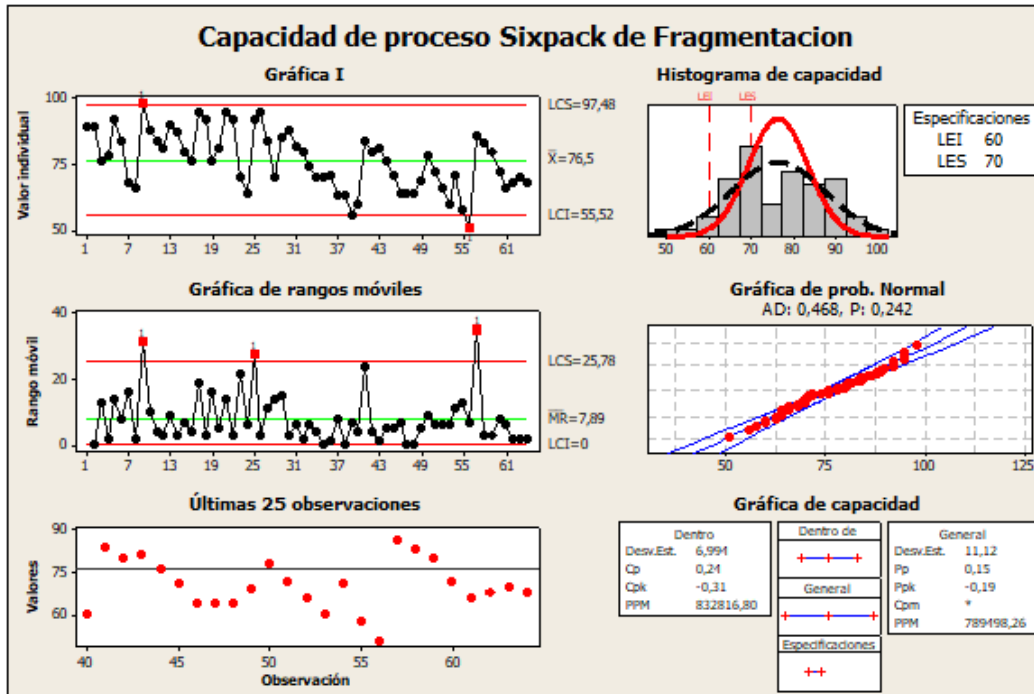


Ilustración 20. Análisis de capacidad para la fragmentación.

Como se puede ver en la **Ilustración 20**, los indicadores Cp, Cpk, Pp y Ppk deberían ser cercanos a 1 para afirmar que el proceso tiene la capacidad de producir la fragmentación en el rango deseado por la empresa, sin embargo están muy por debajo (Cp=0.24, Cpk=-0.31, Pp=0.15 y Ppk=-0.19), luego el proceso tal y como está NO es capaz de producir la fragmentación deseada.

B. Discusión

Es posible que los vidrios suministrados por los diferentes proveedores (Vitro y Andino) presenten una calidad y composición química muy similares, lo cual podría deberse a los estándares industriales que aseguran propiedades mecánicas y térmicas equivalentes. Esto explica la fragmentación comparable bajo las mismas condiciones experimentales. Los procesos de manufactura del vidrio están normalmente muy estandarizados y controlados, lo que reduce las

variaciones en las propiedades físicas y químicas del vidrio entre proveedores. Para respaldar esta información se realizó un análisis de fluorescencia de rayos X (FRX) a muestras de vidrio de cada proveedor, verificando que la composición química fuera efectivamente similar. Esto refuerza los resultados obtenidos en el análisis ANOVA, donde se determinó que el factor "Proveedor" no tiene un efecto significativo sobre la fragmentación, lo que indica consistencia en las características que influyen en el comportamiento del vidrio, como la homogeneidad y la pureza.

ARL OPT-2241 Rh 50kV LiF200 InSb AX06			Measured on : 9/10/2024 10:45:46AM		
Method	: X_UQ		X-ray Path:	: Vacuum	
Kappa List	: AnySample		Film Type	: None	
Shapes & ImpFc	: Teflon		Collimator Mask	: 29 mm	
Calculated as	: Oxides		Viewed Diameter	=	29.00 mm
Case Number	: 0 = All known		Viewed Area	=	660.52 mm ²
			Viewed Mass	=	18000.00 mg
			Sample Height	=	0.00 mm
Reporting Level	> 10 ppm and wt% > 1 Est.Err.				
Compound	Wt%	Est.Error	Element	Wt%	Est.Error
SiO ₂	68.79	0.23	Si	32.16	0.11
Na ₂ O	14.84	0.18	Na	11.01	0.13
CaO	10.79	0.16	Ca	7.71	0.11
MgO	3.95	0.10	Mg	2.38	0.06
Al ₂ O ₃	0.961	0.048	Al	0.508	0.025
K ₂ O	0.375	0.019	K	0.311	0.016
S	0.0787	0.0039	S	0.0787	0.0039
Fe ₂ O ₃	0.0670	0.0033	Fe	0.0469	0.0023
Ag ₂ O	0.0621	0.030	Ag	0.0578	0.028
TiO ₂	0.0254	0.0019	Ti	0.0152	0.0011
ZrO ₂	0.0129	0.0010	Zr	0.0095	0.0007
P	0.0105	0.0015	P	0.0105	0.0015
Au	0.0096	0.0025	Au	0.0096	0.0025
SrO	0.0053	0.0008	Sr	0.0045	0.0007
Pt	0.0051	0.0019	Pt	0.0051	0.0019
MnO	0.0037	0.0008	Mn	0.0029	0.0006
NiO	0.0029	0.0007	Ni	0.0023	0.0006
PbO	0.0021	0.0019	Pb	0.0019	0.0018
Cr ₂ O ₃	0.0019	0.0010	Cr	0.0013	0.0007

Sum Weight% before normalization to 100% = 95.3 %
 Total Weight% Oxygen = 45.66

Ilustración 21. Composición para vidrio de proveedor Vitro obtenido mediante FRX.

ARL OPT-2241 Rh 50kV LIF200 InSb AX06			Measured on	: 9/10/2024 11:15:09AM	
Method	: X_UQ		X-ray Path:	: Vacuum	
Kappa List	: AnySample		Film Type	: None	
Shapes & ImpFc	: Teflon		Collimator Mask	: 29 mm	
Calculated as	: Oxides		Viewed Diameter	=	29.00 mm
Case Number	: 0 = All known		Viewed Area	=	660.52 mm ²
			Viewed Mass	=	18000.00 mg
Reporting Level	>	10 ppm and wt% > 1 Est.Err.	Sample Height	=	0.00 mm

Compound	Wt%	Est.Error	Element	Wt%	Est.Error
SiO ₂	70.32	0.23	Si	32.87	0.11
CaO	14.13	0.17	Ca	10.11	0.12
Na ₂ O	13.15	0.17	Na	9.76	0.13
Al ₂ O ₃	1.47	0.06	Al	0.777	0.03
K ₂ O	0.474	0.024	K	0.393	0.020
MgO	0.212	0.011	Mg	0.128	0.0064
Fe ₂ O ₃	0.0720	0.0036	Fe	0.0504	0.0025
S	0.0695	0.0035	S	0.0695	0.0035
TiO ₂	0.0383	0.0019	Ti	0.0230	0.0011
P ₂ O ₅	0.0210	0.0023	Px	0.0091	0.0010
Au	0.0083	0.0023	Au	0.0083	0.0023
Pt	0.0076	0.0016	Pt	0.0076	0.0016
ZrO ₂	0.0071	0.0009	Zr	0.0053	0.0007
WO ₃	0.0055	0.0022	W	0.0043	0.0018
SrO	0.0044	0.0007	Sr	0.0037	0.0006
NiO	0.0038	0.0006	Ni	0.0030	0.0005
Cr ₂ O ₃	0.0031	0.0009	Cr	0.0021	0.0006
MnO	0.0024	0.0007	Mn	0.0019	0.0005

Sum Weight% before normalization to 100% = 109.4 %
 Total Weight% Oxygen = 45.78

Ilustración 22. Composición para vidrio de proveedor Andino obtenido mediante FRX.

Las composiciones de SiO₂ y Na₂O son bastante similares, con una diferencia de 1.53% y 1.69% respectivamente. El contenido de CaO en la muestra del proveedor Andino es significativamente mayor que en la del proveedor Vitro (3.34% de diferencia). MgO presenta una diferencia considerable entre ambas muestras, con el vidrio del proveedor Vitro teniendo un contenido mucho mayor (3.95% frente a 0.212%). Los contenidos de Fe₂O₃, S, TiO₂ y varios de los otros elementos menores son bastante consistentes entre ambos proveedores. Si bien hay algunas diferencias en la composición de ciertos óxidos, especialmente en CaO y MgO, las composiciones generales de los dos vidrios son bastante similares en términos de los principales componentes como son SiO₂ y Na₂O que dominan la estructura del vidrio. Las diferencias menores en otros compuestos no parecen ser significativas en términos de la funcionalidad general del vidrio en el proceso de templado, lo que coincide con los resultados del análisis ANOVA donde el proveedor no tuvo un efecto considerable sobre la fragmentación del vidrio.

Ahora con respecto a las variables que afectan la fragmentación del vidrio se tiene que la temperatura es una de ellas debido a que esta afecta la distribución de tensiones térmicas dentro del vidrio, es decir que durante el proceso de calentamiento y enfriamiento, la temperatura influye en cómo se desarrollan estas tensiones afectando directamente el resultado de fragmentación, un mayor gradiente de temperatura puede provocar tensiones internas más altas, lo que afecta directamente la fragmentación, teniendo que a mayor temperatura mayor fragmentación. De esta misma manera un mayor tiempo de calentamiento permite que la temperatura se distribuya de manera más uniforme a través del espesor del vidrio, lo cual puede reducir las tensiones internas y afectar cómo el vidrio se fragmenta. Por otro lado la velocidad de los sopladores determina la rapidez con la que el vidrio se enfría después de ser calentado, una mayor velocidad de los sopladores aumenta la tasa de enfriamiento, lo que puede inducir tensiones térmicas más altas debido a la diferencia de contracción entre la superficie y el interior del vidrio, además una velocidad alta puede enfriar el vidrio de manera más uniforme, reduciendo la probabilidad de defectos y mejorando la consistencia de la fragmentación.

Las variables que afectan la fragmentación del vidrio incluyen la temperatura, el tiempo de calentamiento y la velocidad de los sopladores, ya que estas influyen en la distribución de tensiones térmicas dentro del vidrio, impactando directamente en el resultado de la fragmentación. La temperatura es un factor crucial debido a que esta afecta cómo se desarrolla las tensiones térmicas durante el proceso de calentamiento y enfriamiento. Un mayor gradiente de temperatura puede provocar tensiones internas más altas, lo que resulta en una mayor fragmentación del vidrio, en términos prácticos, a mayor temperatura, mayor es la fragmentación. A su vez el tiempo de calentamiento permite que la temperatura se distribuya de manera más uniforme a través del espesor del vidrio, un mayor tiempo de calentamiento puede reducir las tensiones internas, ya que el calor tiene más tiempo para penetrar y distribuirse uniformemente en el material afectando cómo el vidrio se fragmenta, generalmente haciendo que la fragmentación sea más controlada y uniforme.

Por otro lado la velocidad de los sopladores determina la rapidez con la que el vidrio se enfría después de ser calentado, una mayor velocidad de los sopladores aumenta la tasa de enfriamiento, lo que puede inducir tensiones térmicas más altas debido a la diferencia de

contracción entre la superficie y el interior del vidrio, dando como resultado una fragmentación más alta, además, una velocidad alta puede enfriar el vidrio de manera más uniforme, reduciendo la probabilidad de defectos y mejorando la consistencia de la fragmentación.

La interacción entre el tiempo de calentamiento y la velocidad de los sopladores es significativa porque estos factores juntos determinan la tasa de enfriamiento y la uniformidad de las tensiones térmicas. Por ejemplo, un tiempo de calentamiento más largo seguido de un enfriamiento rápido puede generar tensiones diferentes en comparación con un tiempo de calentamiento corto con la misma velocidad de enfriamiento. Cuando se combinan el tiempo de calentamiento y la velocidad de los sopladores puede crear un régimen térmico específico que optimiza o perjudica la distribución de tensiones en el vidrio, afectando la forma en que se fragmenta.

Ahora se puede decir que la variabilidad observada en los resultados de la prueba de fragmentación en la empresa Vitelsa S.A. puede atribuirse principalmente a la falta de un control adecuado y un seguimiento riguroso de las variables críticas que afectan el proceso de templado del vidrio. A partir del análisis, se ha determinado que el proveedor del vidrio no influye significativamente en los resultados de la prueba de fragmentación, lo que lleva a concluir que la variabilidad se debía principalmente a los cambios en las "recetas" utilizadas en el proceso de templado, basadas en la suposición de que cada proveedor requería una receta diferente.

C. Propuesta

La fragmentación del vidrio se pretende disminuir a un número promedio de 70 partículas de vidrios, teniendo en cuenta según la norma el número mínimo de partículas es de 40, tener una fragmentación tan elevada significa que la temperatura de calentamiento es demasiado alta, provocando un gradiente térmico más pronunciado, aumentando las tensiones internas y llevando a una fragmentación excesiva. Esto no solo afecta la calidad del vidrio, sino que también se relaciona con un mayor gasto energético debido al uso de temperaturas elevadas. Es importante destacar que el vidrio se puede templar desde 600°C (1). Sin embargo en la empresa se utilizan temperaturas entre 670°C y 680°C, lo que incrementa innecesariamente el consumo energético.

Reducir la fragmentación del vidrio no solo mejorará la calidad del producto, sino que también permitirá disminuir el gasto energético del horno de temple. Este horno representa el 70% del gasto energético total de la empresa. Al optimizar la temperatura de calentamiento, se puede lograr una fragmentación adecuada y al mismo tiempo reducir significativamente los costos de energía mejorando la calidad del vidrio.

Como se pudo observar en la Ilustración 20, el proceso actual no permite disminuir la fragmentación a los valores deseados. Por lo tanto, se propone una nueva receta que tenga como fin disminuir el número de fragmentación con el fin de disminuir el gasto energético. Esta nueva receta no solo busca optimizar la eficiencia energética, sino también mejorar la calidad del vidrio, ya que se vienen presentando vidrios con ondulaciones considerables. Teniendo en cuenta que se determinó que el proveedor del vidrio no es un factor que afecte la fragmentación del vidrio se propone la siguiente receta para ambos:

Tabla 6. Propuesta receta.

Espesor	6	8
Proveedor	Vitro, Andino	Vitro, Andino
Temperatura (°C)	650	650
Tiempo Calentamiento (s)	240	300
Velocidad Sopladores (RPM)	750	630

Tabla 7. Resultados fragmentación receta propuesta para 6 mm.

6 mm			
Temperatura (°C)	Tiempo Calen. (s)	Velocidad (Rpm)	Fragmentación
650	240	750	65
650	240	750	67
650	240	750	54
650	240	750	60
650	240	750	58
650	240	750	61
650	240	750	63
650	240	750	70
650	240	750	67
650	240	750	61
650	240	750	65

650	240	750	63
650	240	750	77
650	240	750	72
650	240	750	65
650	240	750	75
650	240	750	69
650	240	750	67
650	240	750	69
650	240	750	72
650	240	750	70

Tabla 8. Resultados fragmentación receta propuesta para 8 mm.

8 mm			
Temperatura (°C)	Tiempo Calen. (s)	Velocidad (Rpm)	Fragmentación
650	300	630	84
650	300	630	78
650	300	630	80
650	300	630	75
650	300	630	63
650	300	630	67
650	300	630	71
650	300	630	60
650	300	630	65
650	300	630	69
650	300	630	65
650	300	630	70
650	300	600	71
650	300	600	72
650	300	600	69
650	300	600	66
650	300	630	60
650	300	630	71
650	300	630	73

Se propuso reducir la temperatura a 650 °C con tiempos de calentamiento de 200 segundos para espesores de 6 mm y de 260 segundos para espesores de 8 mm, con el fin de observar cómo cambia el consumo energético del horno durante una hora continua de trabajo. Sin embargo, debido a que se estaban produciendo más roturas de las habituales por hora de trabajo, fue necesario aumentar el tiempo de calentamiento en 40 segundos para cada espesor de vidrio, justificado en

que revisando los datos arrojados por el escáner del horno, se observó que era necesario asegurar un calentamiento más uniforme en el horno antes de que el vidrio ingresara a los sopladores. Para solucionar este problema, se incrementó el tiempo de calentamiento a 240 segundos para espesores de 6 mm y a 300 segundos para espesores de 8 mm.

Los resultados mostrados en la tabla 7 indican que la receta que se propuso para espesores de 6 mm tiene la capacidad de reducir la fragmentación del vidrio a un nivel más cercano al deseado, con una media de 66.62 partículas y una variabilidad representada por una desviación estándar de 5.56. De la misma manera los resultados para espesores de 8 mm arrojan una media de fragmentación de 67.84 partículas y una desviación estándar de 6.54. Esto indica que los resultados de la fragmentación son más consistentes y predecibles, lo que es positivo para la calidad del vidrio. Además la disminución de la desviación estándar sugiere que la nueva receta es más efectiva para controlar el proceso de fragmentación. Menos variabilidad significa que el proceso es más estable y que se puede esperar un rendimiento más uniforme.

Con el fin de comparar el gasto energético entre la receta de templado normalmente utilizada y la propuesta, se realizaron lecturas en el contabilizador de energía del horno al comienzo del proceso de templado y al final. Se mantuvo una hora continua de trabajo con el mismo espesor, registrando el área de vidrio templado durante ese periodo y luego se volvió a tomar la lectura de energía consumida. Por cada espesor se tomaron 3 lecturas para ambas recetas. Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 9 y Tabla 10.

Tabla 9. Comparación del consumo de energía de receta original y receta propuesta para una hora de trabajo continuo en espesores de 6mm.

	Receta Original 6 mm			Receta Propuesta 6 mm		
	1	2	3	1	2	3
Consumo Energético (kWh)	225.22	226.78	203.98	207.65	194.77	209.18
Área templada (m ²)	61.18	62.75	54.70	68.44	63.38	64.80
Consumo Energético por Área templada (kWh / m ²)	3.68	3.61	3.73	3.03	3.07	3.23

Tabla 10. Comparación del consumo de energía de receta original y receta propuesta para una hora de trabajo continuo para espesores de 8mm.

	Receta Original 8 mm			Receta Propuesta 8 mm		
	1	2	3	1	2	3
Consumo Energético (kWh)	283.64	278.55	274.36	258.35	256.88	263.47
Área templada (m ²)	65.63	61.90	61.16	68.44	63.38	64.80
Consumo Energético por Área templada (kWh / m ²)	4.32	4.50	4.49	3.77	4.05	4.07

Tabla 11. Resumen ahorro energético obtenido

	6 mm		8 mm	
	Receta Original	Receta Propuesta	Receta Original	Receta Propuesta
Consumo Energético por Área templada Promedio (kWh)	3.67	3.11	4.44	3.96
Valor kWh (\$)	\$ 674.06			
Valor Consumo Energético Promedio (\$)	\$ 2,477.03	\$ 2,097.49	\$ 2,990.07	\$ 2,672.37
Consumo Energético cada 1000 m ² (kWh)	3,674.79	3,111.73	4,435.91	3,964.58
Valor Consumo Energético cada 1000 m ² (\$)	\$ 2,477,026.69	\$ 2,097,490.99	\$ 2,990,072.32	\$ 2,672,366.57
Valor Ahorro cada 1000 m ² (\$)	\$ 379,535.70		\$ 317,705.75	

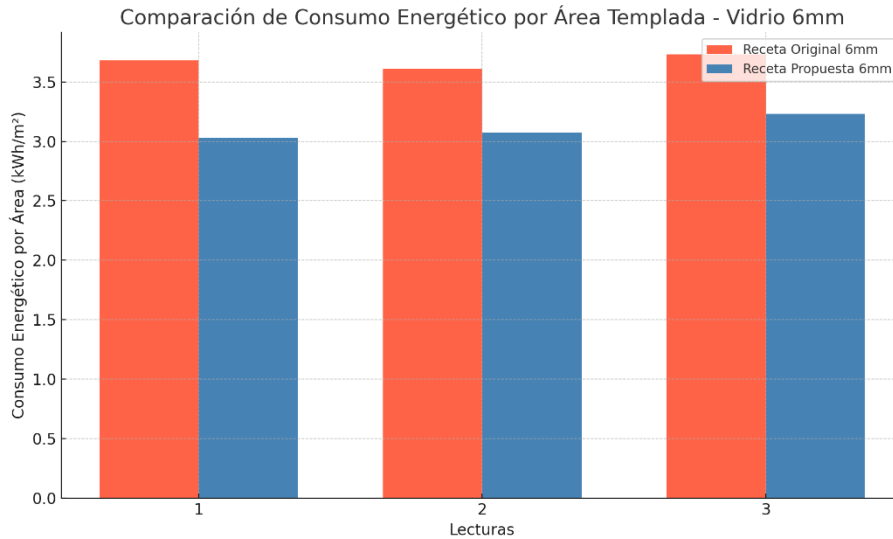


Ilustración 23. Resultados de consumo energético para receta original y propuesta para espesor de 6 mm.

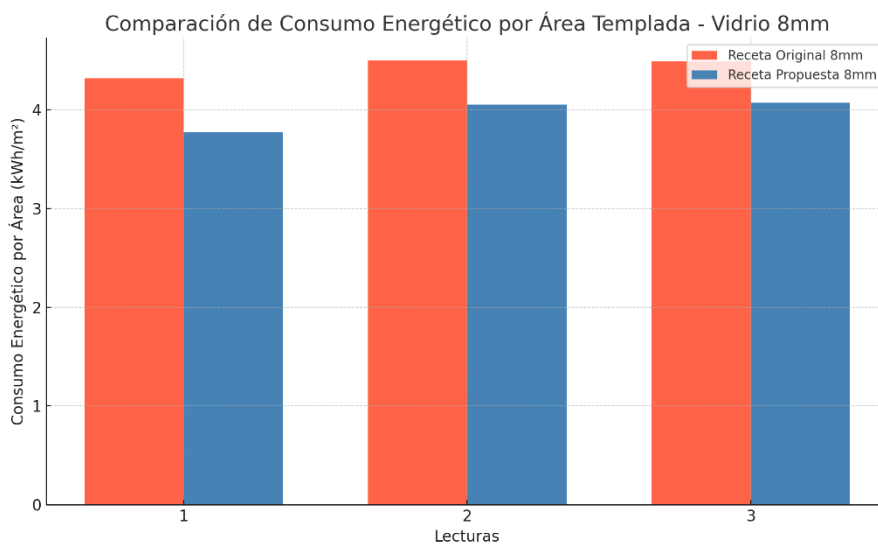


Ilustración 24. Resultados de consumo energético para receta original y propuesta para espesor de 8 mm.

Se puede evidenciar que al bajar la temperatura de 680°C a 650°C, es decir 30-40°C, para los vidrios de 6 mm, el consumo energético por área templada promedio se reduce de 3.67 kWh/m² a 3.11 kWh/m². Esto representa una disminución de aproximadamente el 15.26% en el consumo energético. Para los vidrios de 8 mm, el consumo energético por área templada promedio se reduce de 4.44 kWh/m² a 3.96 kWh/m². Esto representa una disminución de aproximadamente el 10.81% en el consumo energético. La reducción del consumo energético se traduce en un ahorro económico significativo. Para los vidrios de 6 mm, el valor del consumo energético promedio

disminuye de \$2,477.03 a \$2,097.49, generando un ahorro de \$379,535.70 por cada 1000 m². Para los vidrios de 8 mm, el valor del consumo energético promedio disminuye de \$2,990.07 a \$2,672.37, generando un ahorro de \$317,705.75 por cada 1000 m². Lo cual se relaciona con que a temperaturas más bajas, la diferencia de temperatura entre el material que se está calentando y el medio circundante es menor. Esto significa que hay menos pérdida de calor hacia el entorno y se requiere menos energía para mantener la temperatura del material, teniendo como resultado un ahorro energético considerable

Por otro lado al trabajar a una temperatura más baja se pudo observar que mejoro la calidad del vidrio significativamente, esto se debe a que cuando se trabaja a altas temperaturas en el horno de temple se tienden a generar mayores tensiones internas, variabilidad en la transferencia de calor, reacciones químicas adversas, mayor fluidez del vidrio, desgaste de los equipos, y el difícil control del proceso. Estos factores combinados hacen que el vidrio sea más propenso a desarrollar deformaciones, ondulaciones y otros defectos cuando se temple a temperaturas elevadas. La mejora mas notable fue con respecto a los defectos ópticos del vidrio también conocidos como ondulación, esto se debe a que a temperaturas más bajas, el vidrio tiene una mayor viscosidad, lo que significa que es menos fluido y más resistente a deformaciones, reduciendo la probabilidad de que se formen ondulaciones debido a movimientos o flujos descontrolados del material durante el proceso de calentamiento y enfriamiento.

IX. CONCLUSIONES

La verificación de la uniformidad de las temperaturas en el horno arrojó resultados consistentes, con un rango de temperaturas de 665 °C a 672 °C y fragmentación entre 73 y 81 partículas. La baja desviación en los valores indica una buena uniformidad de la temperatura dentro del horno. Esto sugiere que la variación en la fragmentación del vidrio no está asociada con la posición dentro del horno, sino con otros factores del proceso.

A través del análisis DOE y ANOVA, se identificaron como factores significativos para la fragmentación del vidrio: el espesor, la temperatura, el tiempo de calentamiento y la velocidad de los sopladores. Estos factores tienen un impacto directo en las tensiones térmicas internas del vidrio, lo que afecta su fragmentación.

La temperatura, el tiempo de calentamiento y la velocidad de los sopladores son factores críticos que afectan la fragmentación del vidrio. La temperatura influye directamente en el desarrollo de tensiones térmicas; el tiempo de calentamiento permite una distribución más uniforme de la temperatura, reduciendo las tensiones internas; y la velocidad de los sopladores determina la rapidez y uniformidad del enfriamiento, lo que también afecta las tensiones térmicas y, por ende, la fragmentación.

El análisis de regresión y las simulaciones de optimización muestran que para reducir la fragmentación a los niveles deseados (aproximadamente 70 partículas) es necesario ajustar las condiciones del proceso, como bajar la temperatura a 650 °C y ajustar el tiempo de calentamiento y la velocidad de los sopladores. Estas modificaciones no solo permitirán alcanzar la fragmentación objetivo, sino que también reducirán el consumo energético del proceso.

La propuesta de reducir la temperatura de templado a 650 °C busca disminuir el consumo energético del horno, que representa el 70% del gasto total de energía en la empresa. Además de mejorar la eficiencia energética, esta propuesta también pretende mejorar la calidad del vidrio, eliminando ondulaciones y defectos.

La variabilidad en los resultados de la prueba de fragmentación de vidrios templados en Vitelsa S.A. se debe principalmente a la combinación de factores relacionados con la temperatura del horno, la disposición de los vidrios, los parámetros específicos del proceso de templado, y potencialmente, aunque en menor medida, a las diferencias en los lotes de vidrio suministrados por los proveedores. La implementación de un Diseño de Experimentos (DOE) es una estrategia adecuada para identificar y controlar estas variables, optimizando el proceso de templado para reducir la variabilidad y mejorar la calidad y consistencia de los productos de vidrio templado.

X. RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos y la discusión del análisis, se propone para optimizar el proceso de templado del vidrio, aumentar la eficiencia energética y cumplir con los objetivos de calidad establecidos que se implemente la nueva receta incluye la reducción de la temperatura de calentamiento a 650°C tanto para vidrios de 6 mm como de 8 mm, lo que disminuirá el gasto energético del horno y reducirá el exceso de fragmentación sin comprometer los estándares de calidad. Asimismo se recomienda ajustar el tiempo de calentamiento a 240 segundos para vidrios de 6 mm y a 300 segundos para vidrios de 8 mm, lo cual permitirá una mejor distribución térmica, minimizando tensiones internas y asegurando una fragmentación más controlada. Por último, se sugiere ajustar la velocidad de los sopladores a 750 RPM para vidrios de 6 mm y a 630 RPM para vidrios de 8 mm, optimizando el proceso de enfriamiento, reduciendo tensiones térmicas excesivas y mejorando la uniformidad en la fragmentación.

Por otro lado se recomienda estandarizar las posibles soluciones ante problemas en el proceso de templado, ya que actualmente no existe un protocolo estandarizado para manejar defectos o problemas que ocurren durante el templado, lo que deja la toma de decisiones en manos del operario, lo cual puede llevar a variaciones en la calidad del producto y en la eficiencia del proceso. Por esto se recomienda desarrollar e implementar una guía de solución de problemas en el templado de vidrio, que incluya identificación de defectos comunes (burbujas, fracturas, distorsión óptica), causas probables de cada defecto (mal ajuste de temperatura, tiempo de calentamiento inadecuado, velocidad de enfriamiento ineficiente) y acciones correctivas recomendadas para cada tipo de problema. Esta guía servirá como referencia estándar para el personal operativo y técnico, permitiendo tomar decisiones más informadas ante cualquier problema, mejorando así la calidad y eficiencia del templado.

REFERENCIAS

- [1] G. Giner Márquez y C. E. Tangassi Westphal, «Estudio de productividad en un horno de templado de vidrio automotriz», bachelorThesis, San Pedro Garza García: UDEM, 1995. Accedido: 27 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.udem.edu.mx/handle/61000/3902>
- [2] Ó. D. Sandín Romano, «Fractología industrial del vidrio templado: caracterización y diagnóstico del estado tensional producido durante un tratamiento térmico de templado industrial en vidrio sodocálcico en función de los parámetros de fabricación y esfuerzos externos de uso, a partir del proceso de fractura», <http://purl.org/dc/dcmitype/Text>, Universidad de La Rioja, 2015. Accedido: 27 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://investigacion.unirioja.es/documentos/5c13b16ac8914b6ed377683c>
- [3] J. M. F. Navarro, *El vidrio*. Editorial CSIC - CSIC Press, 2003.
- [4] J. Diéguez Novoa, «Estudio del templado químico por intercambio iónico de vidrios sódico-cálcicos comerciales», <http://purl.org/dc/dcmitype/Text>, Universidade de Santiago de Compostela, 2010. Accedido: 27 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=109545>
- [5] A. Paul, *Chemistry of Glasses*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1982. doi: 10.1007/978-94-009-5918-7.
- [6] J. Á. Elizondo Alanís, «Estudio de las propiedades mecánicas de vidrios sodo-cálcicos en función de variaciones en su microestructura», masters, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2014. Accedido: 27 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/4164/>
- [7] R. Gardon, «CHAPTER 5 - Thermal Tempering of Glass», en *Glass Science and Technology*, vol. 5, D. R. Uhlmann y N. J. Kreidl, Eds., en *Elasticity and Strength in Glasses*, vol. 5. , Elsevier, 1980, pp. 145-216. doi: 10.1016/B978-0-12-706705-6.50010-2.
- [8] Guillemet, «Annealing and tempering of glass», *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 123, pp. 415-426, 1990.
- [9] «Vidrios Procesados». Accedido: 26 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://vidriosprocesados.com.ar/productos/vidrios-procesados/>
- [10] «Definición de tolerancia a la distorsión de la onda del rodillo», Guardian Glass. Accedido: 29 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.guardianglass.com/la/es/tools-and-resources/resources/glossary/roller-wave>
- [11] C. Urgiles y R. Andrés, «Propuesta de un plan de mantenimiento preventivo y diseño de un sistema de medición para el cortado de vidrios en la empresa de vidrio y aluminio Dekorvid».
- [12] «343 BCS - Máquina de corte de hoja rotativa by Bottero | DirectIndustry». Accedido: 29 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.directindustry.es/prod/bottero/product-111863-2447967.html>
- [13] Medigraf, «Cherokee», Cherokee. Accedido: 29 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cherokeemexico.com/>
- [14] «Lavadora De Vidrio Vertical | bestmakina.com». Accedido: 29 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.bestmakina.com/bw-lavadora-de-vidrio-vertical>

-
- [15] «HORNO DE TEMPLADO DE VIDRIO CURVADO -». Accedido: 29 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://sistemassitec.com/catalogo/horno_ag-22k1025/
- [16] «UNE-EN 12150-1:2000 Vidrio para la edificación. Vidrio de sili...» Accedido: 29 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=norma-une-en-12150-1-2000-n0023843>