

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Química

Establecimiento de especificaciones de humedad del polvo atomizado y presión de prensado a usar, en relación a rangos determinados de propiedades físicas de las baldosas cerámicas para conseguir estabilidad dimensional y aplicación de control estadístico


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

Autor:

Pablo Mateo Escobar Miranda

Director:

Sandra Catalina Peñaherrera Palacios

ORCID:  0000-0002-1054-4605

Cuenca, Ecuador

2024-04-09

Resumen

La estabilidad dimensional de las baldosas cerámicas es fundamental, ya que garantiza la calidad del producto. Esta estabilidad está relacionada con el calibre, que determina las dimensiones de las baldosas. Para la empresa, es crucial aumentar la cantidad de baldosas con calibres centrales, ya que esto proporciona un mayor porcentaje de baldosas de primera calidad. Este estudio se centra en varios elementos que influyen en la estabilidad dimensional: humedad del polvo atomizado, presión de prensado y densidad aparente. Se ha llevado a cabo en el formato de 45 cm x 45 cm utilizando tecnología de gres. En la primera fase del estudio, realizada a nivel de laboratorio, se analizó la relación entre las propiedades de la barbotina y el polvo atomizado, así como la conexión entre las características del polvo atomizado, la presión de prensado y la densidad inicial de la pieza. Además, se generaron gráficos de isocompactación para identificar la correlación entre la presión aplicada en la prensa y la humedad presente en el polvo. En la segunda etapa, se analizaron datos de producción, como la humedad del polvo atomizado, la densidad aparente en verde, la densidad aparente en seco y el porcentaje de contracción en las baldosas cerámicas formadas, para crear una tabla que relacionara los rangos de humedad con la presión. Finalmente, se realizó un levantamiento masivo de datos para elaborar la fase de ajuste del control estadístico observándose una diferencia entre los límites de especificación y los límites de control calculados. Como resultado, la empresa logró un aumento del 7,84% en el calibre central, evidenciado en una mejora significativa en la estabilidad dimensional de las baldosas cerámicas.

Palabras clave del autor: calidad de producto, datos de producción, estabilidad dimensional



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

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

Abstract

The dimensional stability of ceramic tiles is crucial as it ensures product quality. This stability is related to the caliber, which determines the dimensions of the tiles (length, width, and thickness). For the company, it is crucial to increase the quantity of tiles with central calibers, as this provides a higher percentage of top-quality tiles. This study focuses on several elements that influence dimensional stability: atomized powder humidity, pressing pressure, and apparent density. It has been carried out in the 45 cm x 45 cm format using gres technology. In the first phase of the study, conducted at the laboratory level, the relationship between slip and atomized powder properties was analyzed, as well as the connection between atomized powder characteristics, pressing pressure, and initial piece density. Additionally, isocompaction graphs were generated to identify the correlation between the pressure applied in the press and the humidity present in the powder. In the second stage, production data such as atomized powder humidity, apparent density in green, apparent density in dry, and contraction percentage in the formed ceramic tiles were analyzed to create a table that relates humidity ranges to pressure. In the final stage, a massive data collection was carried out to develop the statistical control adjustment phase, observing a difference between specification limits and calculated control limits. As a result, the company achieved a 7.84% increase in central caliber, leading to a significant improvement in the dimensional stability of ceramic tiles.

Author Keywords: product quality, production data, dimensional stability



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

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

Índice de contenido

Dedicatoria.....	10
Agradecimiento.....	11
Objetivos.....	14
Objetivo general:.....	14
Objetivos específicos:	14
CAPÍTULO I.....	15
1. Marco teórico	15
1.1 Definición de Baldosas cerámicas	15
1.2 Tipos de baldosas cerámicas.....	15
1.2.1 Clasificación general (Oier, 2023):	15
1.2.2 Por el color de su soporte:	15
1.2.3 Por el uso al que va destinado:	15
1.3 Proceso de producción de la baldosa cerámica	16
1.3.1 Selección y dosificación de la materia prima	16
1.3.2 Molienda	16
1.3.3 Atomizado.....	17
1.3.4 Prensado	17
1.3.5 Engobado, esmaltado y decoración	18
1.3.5.1 Engobado	18
1.3.5.2 Esmaltado.....	18
1.3.5.3 Decorado	18
1.3.6 Cocción.....	19
1.4 Definición e importancia de la estabilidad dimensional.....	21
1.5 Factores que influyen la estabilidad dimensional	22
1.6 Propiedades de las baldosas cerámicas conformadas.....	23
1.6.1 Propiedades que afectan el grado de compactación:.....	23
1.6.2 Propiedades mecánicas de los productos crudos:	24
1.7 Compacidad.....	25
1.7.1 Influencia de la compacidad en las propiedades de los productos crudos.....	25
1.7.2 Influencia de la compacidad en el proceso de producción de las baldosas cerámicas	25
1.7.3 Influencia de la compacidad en las propiedades del producto acabado	26

1.8 Relación humedad del polvo – densidad aparente.....	26
1.9 Control estadístico (CE).....	26
1.9.1 Definición de control estadístico.....	26
1.9.2 Importancia del control estadístico.....	27
1.9.3 Límites de control.....	27
1.9.3.1 Cálculo de los límites de control.....	28
1.9.4 Herramientas del Control Estadístico.....	28
1.9.4.1 Gráficos de control por variables.....	29
1.9.4.2 Gráficos de control por atributos.....	29
1.9.5 Análisis de las cartas de control.....	30
1.9.5.1 Reglas de aleatoriedad.....	30
1.9.6 Fases para implementar el Control Estadístico.....	31
1.9.6.1 Fase de ajuste del proceso.....	31
1.9.6.2 Fase de control.....	31
CAPÍTULO II.....	33
2 Metodología.....	33
2.1 Etapa 1.....	33
2.1.1 Pruebas a nivel de laboratorio con muestra de barbotina que alimenta al atomizador y del polvo atomizado.....	33
2.1.1.1 Medida del residuo.....	33
Se siguió el procedimiento de la empresa:.....	333
2.1.1.2 Tiempo de escurrido.....	34
2.1.1.3 Densidad de la barbotina.....	34
2.1.2 Pruebas de diagnóstico del polvo atomizado.....	35
2.1.2.1 Humedad del polvo atomizado.....	35
2.1.2.2 Granulometría del polvo atomizado.....	35
2.1.3.1 Ajuste de humedad del polvo.....	36
2.1.3.2 Prensado de la muestra del polvo atomizado a nivel de laboratorio.....	36
2.1.3.3 Contracción del botón.....	37
2.1.3.4 Densidad aparente en verde y seco.....	37
2.1.3.5 Porcentaje de absorción de agua.....	37
2.2 Etapa 2.....	38
2.2.1 Humedad del polvo atomizado.....	38
2.2.2 Densidad aparente en verde y seco por rayos x.....	39
2.2.3 Porcentaje de contracción.....	39
2.3 Etapa 3.....	39

CAPÍTULO III.....	41
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
3.1 Etapa 1	41
3.1.1 Control de residuo, tiempo de escurrido y densidad de la barbotina.	41
3.1.2 Control de humedad y granulometría del polvo atomizado.....	43
3.1.3 Análisis inicial de relación entre humedad, presión y densidades aparentes a nivel de laboratorio.....	44
3.2 Etapa 2	48
3.2.1 Análisis de datos de: humedad de polvo, presión de prensa y densidades aparentes en verde y en seco, porcentaje de contracción y porcentaje de absorción de agua de baldosas de formato 45 x 45 cm.....	48
3.2.2 Relación de las medidas de la baldosa cerámica con la presión y la humedad	51
3.2.3 Determinación de especificaciones de humedad vs presión de trabajo para mejorar estabilidad dimensional.....	55
3.2.4 Monitoreo de resultados de aplicación de límites obtenidos.....	56
3.3 Etapa 3	57
CAPÍTULO IV	60
4 Conclusiones y recomendaciones.....	60
4.1 Conclusiones	60
4.2 Recomendaciones	61
Referencias.....	62
Anexos.....	69

Índice de figuras

<i>Figura 1: Proceso de fabricación de la baldosa cerámica por vía húmeda</i>	21
Figura 2: Diagrama de flujo y variables de fabricación de piezas cerámicas.	22
Figura 3: Polvo atomizado compactado.....	24
Figura 4: Ensayo de resistencia mecánica a una baldosa cerámica.....	24
Figura 5: Diagrama de flujo para el análisis de la etapa de ajuste.....	32
Figura 6: Gráfico de Isocompactación.....	47
Figura 7 : Relación densidad en seco, presión y humedad.....	50
Figura 8: Especificaciones de calibre según la Empresa	52
Figura 9: Densidad aparente en seco vs contracción lineal	75
Figura 10: Gráfico de control en la etapa de ajuste	76
Figura 11: Gráfico de control ajustado.	77
Figura 12: Gráfico de control ajustado y bajo CE.	78
Figura 13: Gráfico de control en blanco para la etapa de control.....	79
Figura 14: Gráfico de comparación de límites.	80

Índice de tablas

Tabla 1: Variables a controlar durante el proceso de fabricación de baldosas cerámicas ...	20
Tabla 2: Fórmulas para el cálculo de los límites de control.	28
Tabla 3: Datos de la barbotina de la tecnología gres.	42
Tabla 4: Datos de humedad y granulometría del polvo atomizado de gres.	43
Tabla 5: Datos de pruebas a una humedad de 5%.	44
Tabla 6: Datos de pruebas a una humedad de 6%.	45
Tabla 7: Datos de pruebas a una humedad de 7%.	45
Tabla 8: <i>Resultados de promedios de densidades aparentes en verde (DAP verde).</i>	48
Tabla 9: <i>Resultados de promedios de densidades aparentes en seco (DAP seco).</i>	48
Tabla 10: <i>Resultados de los promedios de contracción lineal (C.L) después de la quema.</i> ..	49
Tabla 11: <i>Resultados de promedios de absorción de agua (A.A).</i>	50
Tabla 12: Datos de las dimensiones de la pieza quemada T1.	52
Tabla 13: Datos de las dimensiones de la pieza quemada T2.	52
Tabla 14: Datos de las dimensiones de la pieza quemada T3.	53
Tabla 15: <i>Promedios de dimensiones (Lcr), contracción lineal (CL) y densidad aparente en seco.</i>	54
Tabla 16: Datos de DAP seco y contracción.	55
Tabla 17: Tabla de humedades y presión para un formato 45 x 45 (cm).	56
Tabla 18: <i>Conteo de baldosas.</i>	57
Tabla 19: Datos de límites de control.	58
Tabla 20: Datos de límites de control.	58
Tabla 21: Rangos de barbotina y polvo atomizado.	69
Tabla 22: Resultados de pruebas duplicadas con humedad del 5%.	69
Tabla 23: Resultados de pruebas duplicadas con humedad del 6%.	70
Tabla 24: Resultados de pruebas duplicadas con humedad del 7%.	70
Tabla 25: Datos de densidad aparente (DAP) en verde.	71
Tabla 26: Datos de densidad aparente (DAP) en seco.	71
Tabla 27: Datos del porcentaje de contracción lineal (C.L) tras la quema.	72
Tabla 28: Datos del porcentaje de absorción de agua (A.A).	73
Tabla 29: Datos de las medidas de las tres baldosas cerámicas.	73
Tabla 30: Datos de los calibres de las tres baldosas cerámicas.	74

Índice de anexos

Anexo A.....	69
Anexo B.....	69
Anexo C.....	70
Anexo D.....	72
Anexo E.....	73
Anexo F.....	73
Anexo G.....	74
Anexo H.....	75
Anexo I.....	76
Anexo J.....	77
Anexo K.....	78
Anexo L.....	79
Anexo M.....	80

Dedicatoria

Dedico esta tesis primero que nada a mis papás Pablo y Carla por inculcarme que nada es imposible, por demostrarme con acciones todo lo que son capaces de llegar a hacer por el bienestar mío.

A mi hermano Juan Francisco que sin su inspiración, cariño y carisma no fuera la persona que soy hoy en día, además porque él sin saberlo muchísimas veces me dio ánimos y fuerzas para seguir adelante.

A mi tío Juan Carlos (†) por su importante presencia en mi vida académica, por darme el empujón cuando era necesario, por demostrarme que en base a esfuerzos y sacrificios cualquier sueño es alcanzable.

A mi abuelito Carlos, por todos sus mimos y actos de amor mientras estudiaba, por su preocupación siempre hacia mí y por todo el interés que siempre pone en mis cosas.

Por último, pero no menos importante, a mi futura esposa Sofía por ser mi más grande soporte en épocas difíciles, por siempre tener las palabras correctas en el momento adecuado y por inspirarme a cada día ser mejor persona.

Pablo Escobar

Agradecimiento

Primero que nada, a Dios por bendecirme siempre en mi camino estudiantil, a mis tíos Fabiola, Olmedo, Rocío, René y Mónica por siempre brindarme sus consejos y apoyo en cada etapa de mi vida. A mi abuelita Carmela por cuidarme y consentirme siempre, a mi otra abuelita que en paz descanse Amable porque desde pequeño siempre me inculcó la importancia del estudio, a mi abuelito Humberto por su siempre preocupación con que acabe la universidad y me gradúe.

A Mami Vida, Ñaño Dado, Ñaña, René por siempre estar para mí en el momento en el que los necesito a cualquier hora y lugar.

A mis amigos y compañeros gracias por ayudarme y acompañarme todos estos años.

A mis profesores, de manera especial a Ing, Catalina Peñaherrera y a Ing. Isabel León por su paciencia y dedicación para poder culminar con este trabajo.

Pablo Escobar.

Introducción

La ciudad de Cuenca alberga un notable número de empresas especializadas en la fabricación de baldosas cerámicas, las cuales están en una búsqueda constante de soluciones para abordar los desafíos que surgen en sus plantas de producción.

En la actualidad, la clasificación del producto final se lleva a cabo considerando cuatro criterios esenciales: aspecto superficial, planaridad, tonalidad y tamaño. En caso de que no se cumplan estos requisitos las piezas son consideradas rechazo. La estabilidad dimensional tiene relación directa con planaridad y tamaño. (Poyatos et al., 2010).

La estabilidad dimensional se refiere a la capacidad del material de mantener sus dimensiones en largo, ancho, espesor y su forma original a pesar de las condiciones ambientales o el procesamiento al que se someten (Boix et al., 2021). En el contexto de las baldosas cerámicas, la estabilidad dimensional es esencial para garantizar que estas mantengan sus medidas y su forma dentro de los parámetros establecidos en las diferentes fases de su fabricación para tener certeza de unas buenas condiciones en el producto final (Huffer, 2015).

El calibre según (García, 2017) es definido como el rango de medidas permitido o aceptable para una baldosa específica, y generalmente se establece de acuerdo con las normas o especificaciones del fabricante. Cumplir con un buen calibre significa que las dimensiones de una baldosa se encuentran dentro de los límites establecidos por dichas normas, lo que está relacionado con su estabilidad dimensional. Sin embargo, es importante destacar que, aunque están relacionados, el calibre se refiere específicamente a las medidas precisas de una baldosa según las normas, mientras que la estabilidad dimensional se relaciona con la capacidad del material para mantener esas medidas a lo largo del tiempo y bajo diversas condiciones (García, 2017). Debido a que las baldosas son de tipo modular, garantizar la estabilidad dimensional y un mismo calibre es de vital importancia para reducir al mínimo cualquier variabilidad en sus dimensiones (largo, ancho y espesor) al momento de instalarlas en el pavimento (suelo) o revestimiento (pared). Esto es esencial para prevenir defectos visuales evidentes y accidentes debidos a desniveles imperceptibles en niños pequeños y adultos mayores. (Medina et al., 2022)

La producción de baldosas cerámicas es un proceso en serie que exige una atención especial a la estabilidad dimensional en todas sus etapas: atomizado, prensado, secado, engobado,

esmaltado y cocción. Esta atención meticulosa es permite garantizar la calidad y el rendimiento final del producto (Formigine, 2015).

Aunque la regulación automatizada de la densidad aparente de las baldosas mediante la presión de prensado, ajustada según las variaciones de la humedad del polvo atomizado, ha avanzado considerablemente; el control de la distribución de las densidades aparentes promedio de las piezas producidas en un solo ciclo de prensado aún se realiza de manera manual y no continua. Esta metodología actual no garantiza la uniformidad de la densidad aparente en todos los soportes obtenidos, lo que afecta la estabilidad dimensional y el calibre de las baldosas. En consecuencia, la forma actual de operar no permite asegurar la constancia de la densidad aparente de todos los soportes obtenidos en cada prensada (Mallol et al., 2010)

Este trabajo de titulación está direccionado particularmente a la humedad de la barbotina, a la humedad del polvo atomizado, a la presión de trabajo durante la etapa de prensado y en la densidad aparente en seco de la pieza cruda, ya que forman parte de los factores de mayor influencia en la estabilidad dimensional antes de la cocción. (Nebot et al., 2015^a).

El análisis de los datos se llevó a cabo en tres fases distintas. En la primera etapa, se realizó un diagnóstico integral de la pasta barbotina y del polvo atomizado de la tecnología de gres a nivel de laboratorio. Las pruebas aplicadas a la barbotina en esta etapa incluyeron residuo, tiempo de escurrido y densidad, mientras que para el polvo atomizado se evaluaron la humedad y la granulometría en mallas ASTM 10, 40, 100, 200 y 325.

En la segunda etapa, se llevó a cabo un análisis de datos a nivel de producción con el objetivo de establecer los rangos óptimos de humedad y presión que condujeran a una mayor estabilidad dimensional; se analizó también la densidad aparente en verde y en seco, el porcentaje de contracción y la absorción de agua en las baldosas de gres de formato 45 cm x 45 cm y se realizó un monitoreo después de la aplicación de los límites obtenidos.

Finalmente, en la tercera etapa, se llevó a cabo un análisis estadístico con la ayuda de herramientas como las cartas de control para un manejo más preciso de la variable de humedad. De manera específica se logró realizar la carta de control de la fase de ajuste haciendo el levantamiento de datos pertinente y el respectivo cálculo de los límites de control.

Objetivos

Objetivo general:

Establecer los límites de especificación de la humedad de polvo atomizado y presión de prensado utilizados en relación a los valores determinados por la empresa de: densidad, absorción de agua y contracción de las baldosas cerámicas para conseguir estabilidad dimensional y aplicar control estadístico a la variable de entrada (humedad) y a las baldosas cerámicas en función a la estabilidad dimensional.

Objetivos específicos:

- Establecer una matriz que relacione los rangos de humedad del polvo atomizado y la presión a aplicar en la prensa, parámetros que permitan cumplir la especificación de densidad aparente en seco determinada por la empresa.
- Establecer el gráfico de isocompactación que relacionen presión, humedad, densidad aparente en seco, absorción de agua y contracción lineal.
- Realizar el control estadístico en la variable de entrada (humedad) y del atributo de salida de acuerdo a la estabilidad dimensional que presenten las baldosas cerámicas.

CAPÍTULO I

1. Marco teórico

1.1 Definición de Baldosas cerámicas

Son piezas planas con un límite máximo de espesor, que resultan de la dosificación de diferentes materias primas como: arcillas, sílice, fundentes, etc., y que pasan por diferentes fases hasta llegar a la formación final durante la cocción. La unión de todos los procesos de formación da lugar a productos con distintas características (Oier, 2023).

Una de las mayores diferencias entre los distintos tipos de baldosas existentes (monoquema, gres, porcelanato, biquema, etc.), es la porosidad que, dependiendo del tipo de producto puede dar lugar a mayor o menor nivel de absorción de agua (Effting et al., s. f.).

1.2 Tipos de baldosas cerámicas

Se pueden clasificar considerando diversos factores

1.2.1 Clasificación general (Oier, 2023):

- “Su acabado: esmaltadas o no esmaltadas.
- Por su ubicación: pavimento, revestimiento, para afuera y para adentro.
- Proceso de fabricación: prensado o extrusión.
- Capacidad de absorción de agua: alta, media o baja.”

1.2.2 Por el color de su soporte:

- Soporte de color rojo conocido también como productos de pasta roja.
- Soporte de color blanco conocido también como productos de pasta blanca (Naxa, 2021).

Cabe recalcar que el color de la pasta no va a influir en otras características del producto, sino más bien, las características que determinan a cada producto están presentadas por otros factores como las materias primas a usarse. La principal diferencia del color es debido al contenido de óxidos colorantes, en particular el de hierro (Cotino, 2009).

1.2.3 Por el uso al que va destinado:

- **Gres monoquema y porcelánico:** Usado como pavimento en centros comerciales, restaurantes y oficinas, las baldosas cerámicas son altamente apreciadas por su durabilidad y versatilidad en el diseño. Además, su resistencia

al agua y a las manchas las hace ideales para su uso en áreas húmedas y en lugares con un alto contacto con líquidos. En la industria, las baldosas cerámicas se utilizan en entornos de producción y procesamiento que requieren superficies fáciles de mantener y resistentes al desgaste. Su alta resistencia mecánica y reducción de porosidad, especialmente en el gres porcelánico, las convierten en una opción sobresaliente. (Tortajada et al., 2006).

- **Azulejo:** usados normalmente para revestimientos de pared, este tipo de producto exige una alta estabilidad dimensional y una alta porosidad, características que se consiguen con una pasta de baja contracción lineal al momento de la cocción (Shihua, 2018). Las materias primas para este tipo de producto deben contener óxidos alcalinotérreos (óxidos de calcio y magnesio) ya que los mismos reaccionan con las fases amorfas y forman silicatos estables frente a la acción de la humedad (Jérez, 2021).

1.3 Proceso de producción de la baldosa cerámica

El proceso de fabricación de la baldosa cerámica es en serie, es decir, de varias etapas conectadas entre sí que transforman la materia prima en el producto final. A continuación se detalla los pasos que para esta transformación y las variables involucradas que se debería controlar en cada paso (Gromaz, 2019).

1.3.1 Selección y dosificación de la materia prima

El proceso cerámico se inicia con la selección de las materias primas que se utilizarán en la composición, seguido de la determinación de las proporciones adecuadas de cada una. Estas materias primas principales comprenden arcillas, feldespatos, arenas, carbonatos y caolines. En la cerámica tradicional, es común emplear elementos naturales extraídos de minas o canteras, lo que implica la necesidad de homogeneizarlos para asegurar la uniformidad y la consistencia de sus propiedades a lo largo del proceso (Noem, 2021).

1.3.2 Molienda

El proceso se lleva a cabo en un molino de bolas de trabajo continuo, utilizando generalmente el método de vía húmeda para producir una pasta líquida conocida como barbotina. El molino tiene una estructura cilíndrica protegida con material resistente al impacto y gira alrededor de un eje horizontal (Cevallos Villavicencio & Caiza López, 2019). Para lograr la óptima molienda de la materia prima, se carga el molino con bolas de alúmina de diversos tamaños, incluyendo bolas grandes, medianas y pequeñas. Las bolas caen en cascada debido a la rotación del molino (Moreno Quintero et al., 2019).

Es esencial añadir agua y defloculante al incorporar la carga de materia prima para controlar eficazmente la viscosidad de la barbotina. La barbotina resultante contiene partículas de diferentes tamaños o residuos variables, dependiendo del tiempo de molienda y la velocidad de rotación del molino (Nebot et al., 2015a).

El tamaño de partículas o residuo granulométrico de la barbotina resultante va a depender del tiempo de molienda y de la velocidad de rotación del molino (Molina, 2017).

1.3.3 Atomizado

La barbotina se alimenta en una torre de atomización, donde se pulveriza en pequeñas gotas que caen a través de un espacio de aire caliente. Este proceso convierte la barbotina en partículas sólidas, de diferentes diámetros dentro de un rango específico, conocidas como polvo cerámico, el cual servirá como materia prima para la fabricación de las baldosas. La temperatura y la velocidad de caída de las partículas se controlan minuciosamente durante la atomización para garantizar la uniformidad y calidad del material.

El agua contenida en la barbotina, que constituye aproximadamente entre el 30% y el 40%, se evapora en el atomizador a una temperatura de alrededor de 600 grados Celsius, dejando solo los polvos con un tamaño de partícula y humedad adecuados para el prensado. Los valores de humedad varían según el tipo de producto que se está elaborando, pero, por lo general, la humedad del polvo atomizado se sitúa entre el 5% y el 7% (Barreno Robalino, 2010).

En esta etapa, el polvo atomizado se transporta mediante bandas hacia silos de almacenamiento, donde se guarda hasta su uso posterior en el moldeado por prensado (Kerv, 2017).

1.3.4 Prensado

La etapa de prensado desempeña un papel crucial en la creación de las baldosas cerámicas, ya que además de dar forma a las piezas, determina la densidad aparente de las mismas, un factor esencial que influye en su calidad y estabilidad dimensional a lo largo del tiempo. Además, esta fase prepara las baldosas para las fases posteriores del proceso, como el secado y la cocción, que culminarán en el producto final deseado (Leroy, 2023).

En esta sección del proceso de fabricación de baldosas cerámicas, el polvo atomizado, con un contenido de humedad generalmente situado entre el 5% y el 7%, se descarga en los compartimentos de la prensa, conocidos como alveolos. Una vez allí, el polvo es sometido a una alta presión, que oscila entre 350 y 500 Kg/cm², mediante la compresión entre dos

cuerpos (Amorós et al., 2014). Esta acción provoca un reordenamiento de las partículas del polvo, optimizando el grado de compactación y minimizando la fracción de espacio vacío (aire) en la mezcla. Es importante destacar que este proceso de compactación no conlleva deformación plástica de las partículas, manteniendo la integridad del material durante la compactación (Cordero & Leon, 2011).

1.3.5 Engobado, esmaltado y decoración

El proceso de engobado, esmaltado y decoración de piezas cerámicas es una fase fundamental en la fabricación de productos cerámicos, ya que agrega propiedades estéticas, protectivas y funcionales a las baldosas. A continuación, se detalla brevemente cada uno de estos procesos: (Noem, 2021).

1.3.5.1 Engobado

El engobe es una capa cerámica compuesta principalmente de arcilla, que proporciona un acabado mate en la superficie de la baldosa. Dependiendo de su formulación, el engobe puede presentar propiedades de permeabilidad o impermeabilidad. Además de su función decorativa, el engobe desempeña un papel funcional crucial al brindar protección a la superficie de la baldosa contra manchas, abrasión y otros posibles daños (Caprino, 2009).

En entornos de alto tráfico o con requisitos de higiene específicos, la selección cuidadosa del tipo de engobe adecuado puede contribuir de manera significativa a mejorar la durabilidad y el rendimiento de las baldosas cerámicas. De esta manera, el engobe no solo añade un aspecto estético, sino que también realza la funcionalidad de las baldosas, haciéndolas aptas para diversas aplicaciones, tanto en hogares como en espacios comerciales (Díez, 2021).

1.3.5.2 Esmaltado

El esmaltado es una etapa posterior al engobado y se refiere a la aplicación de una capa de esmalte cerámico sobre la superficie de la baldosa. El esmalte es una suspensión de minerales vítreos que, cuando se cuece, forma una capa dura, lisa y brillante. Esta capa no solo agrega una apariencia atractiva a la baldosa, sino que también la protege de la humedad, manchas y desgaste. El esmalte puede ser transparente o de colores, y su aplicación suele ser uniforme para lograr una superficie lisa y brillante en la baldosa (Díez, 2021).

1.3.5.3 Decorado

La decoración de baldosas cerámicas puede ser un proceso artístico que implica la aplicación de diseños, patrones o ilustraciones en la superficie de las baldosas. Esto se logra utilizando

diferentes técnicas, como serigrafía, impresión digital, pintura a mano o aplicación de transferencias cerámicas. La elección de la técnica de decoración depende del diseño y la complejidad requeridos. La decoración no solo agrega valor estético a las baldosas, sino que también puede ser una forma de personalizarlas para satisfacer las necesidades y preferencias del cliente (Díez, 2021).

Los procesos de engobado, esmaltado y decorado permiten la creación de baldosas atractivas y personalizadas que son apreciadas tanto en entornos residenciales como comerciales (Quintuña et al., 2004).

1.3.6 Cocción

La etapa de cocción representa la fase final y crítica del proceso de fabricación cerámica, ya que en este punto se determinan muchas de las características esenciales del producto cerámico. Algunas de estas características clave incluyen:

- Resistencia mecánica: La cocción afecta la resistencia y durabilidad de la cerámica.
- Resistencia a agentes químicos: La exposición a temperaturas extremas y sustancias químicas puede influir en la capacidad de la cerámica para resistir daños.
- Facilidad de limpieza: La cocción puede afectar la porosidad de la superficie, lo que influye en la facilidad de limpiar la cerámica.
- Absorción de agua: La temperatura y el ciclo de cocción pueden determinar la cantidad de agua que la cerámica puede absorber.
- Estabilidad dimensional: La cocción asegura que las dimensiones de las piezas cerámicas se mantengan constantes y dentro de los estándares específicos (Sacmi, 2004).

Además, la cocción sigue un ciclo controlado que comprende etapas de precalentamiento, calentamiento, cocción y enfriamiento, cada una con su temperatura y duración específicas, lo que influye en las propiedades finales de la cerámica.

Las variables a controlar en estos pasos se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1: Variables a controlar durante el proceso de fabricación de baldosas cerámicas

Proceso	Variables a controlar	Variables claves
Molienda	Densidad de la barbotina. Viscosidad. Granulometría de la barbotina.	Caudales de sólidos, agua y defloculante. Velocidad de giro del molino.
Atomizado	Humedad del polvo. Granulometría del polvo.	Temperatura del aire soplado. Caudal de aire seco. Caudal de la barbotina.
Prensado	Densidad aparente. Espesor de la pieza.	Presión máxima. Altura de la carga.
Engobado, esmaltado y decorado	Densidad del engobe y esmalte. Viscosidad. Residuo.	Peso que cae sobre la baldosa.
Cocción	Calibres. Descuadres.	Temperatura máxima. Tiempo de permanencia en la temperatura máxima. Velocidades de calentamiento/enfriamiento

Fuente: Sacmi, 2004

Figura 1: Proceso de fabricación de la baldosa cerámica por vía húmeda



. Fuente: Instituto de tecnología cerámica, 2019

1.4 Definición e importancia de la estabilidad dimensional

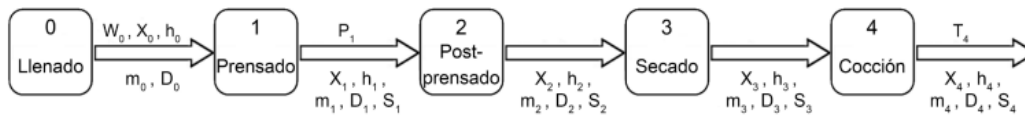
La estabilidad dimensional en el contexto de las baldosas cerámicas se refiere a la capacidad de estas piezas para mantener sus dimensiones (largo, ancho, espesor) y su forma original de manera constante a lo largo del tiempo y bajo diversas condiciones ambientales o de uso. En otras palabras, una baldosa cerámica se considera dimensionalmente estable si sus medidas y forma no experimentan cambios significativos con el tiempo ni se ven afectadas por factores como la humedad, la temperatura, el desgaste o el estrés mecánico (Carces, 2019).

El calibre es un parámetro fundamental que se rige por las normas del fabricante y se refiere a un intervalo de tolerancia que agrupa las baldosas de una misma medida nominal en términos de largo, ancho y espesor. Este intervalo garantiza que las baldosas mantengan una uniformidad específica en sus dimensiones, asegurando así la consistencia y calidad del producto final (García, 2017)

La importancia de la estabilidad dimensional en las baldosas cerámicas es aún mayor debido a su naturaleza modular (Albuja, 2016). En este contexto, es fundamental garantizar la menor variabilidad posible en las dimensiones, que incluyen el largo, ancho y espesor de las baldosas. Cualquier desviación significativa en estas dimensiones al momento de ensamblar pavimentos o revestimientos puede resultar en defectos visuales notables.

Como se muestra en la figura 2, en el proceso de fabricación de las piezas cerámicas, éstas sufren cambios dimensionales en las diferentes etapas del proceso.

Figura 2: Diagrama de flujo y variables de fabricación de piezas cerámicas.



Fuente: Albuja 2016.

Donde las variables del proceso son:

- W0: Humedad (%).
- X: dimensión (mm).
- h: espesor (mm).
- m: masa (g).
- D: densidad aparente (kg/m³).
- P1: presión de compactación (MPa).
- S: cambio dimensional lineal basado en la longitud (%).
- T4: temperatura máxima de cocción (°C)

Así, en este contexto, la etapa 0 es el momento en el que el molde de la prensa es llenado con el polvo atomizado proveniente de los silos. Aquí las dimensiones hacen referencia al volumen de la matriz de prensado. En la etapa consiguiente, de prensado, se da propiamente la compactación del polvo atomizado. Posterior al prensado, viene la etapa 2 conocida como expansión post-prensada y luego se produce contracción en las etapas de secado y de cocción. (Boix et al., 2014).

1.5 Factores que influyen la estabilidad dimensional

Tanto la compactación como la gresificación de monococción son aspectos críticos que dependen de la elección adecuada de las materias primas y la distribución granulométrica obtenida durante la molienda. Esto es fundamental para facilitar la sinterización del material durante la cocción. Los factores que influyen en la compactación durante la etapa de prensado pueden agruparse en dos categorías bien definidas:

Factores que se originan en etapas previas al prensado y tienen un impacto significativo, como la composición y preparación del atomizado, el contenido de humedad en el mismo y la temperatura de atomización.

Factores críticos que provienen directamente de la operación de prensado e incluyen la distribución de la carga, la magnitud de la presión máxima aplicada y el ciclo de prensado (Albaro & Fuentes, 2010)

Durante la etapa de prensado, se requiere optimizar el proceso de compresión, dicho esto, propiedades como la fluidez, compacidad, humedad del polvo y la presión de prensado cobran mayor importancia, ya que de estas características dependerá directamente la densidad de la pieza prensada (Boix, 2014). Entre estas cualidades, la presión de prensado reviste una relevancia particular, ya que es uno de los factores más determinantes para lograr la estabilidad en la densidad aparente. Además con el fin de alcanzar un único calibre, resulta fundamental mantener constante la densidad aparente en todas las piezas prensadas, dado que cualquier disparidad en esta provoca variaciones en la contracción durante la cocción, generando diferencias en el tamaño de las piezas («Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio», 2010).

1.6 Propiedades de las baldosas cerámicas conformadas

Las propiedades de las baldosas cerámicas luego de formadas por prensado que influyen en la calidad del producto final y que, además, condicionan el proceso de fabricación de las piezas, se pueden dividir en dos grupos distintos:

- Propiedades que afectan el grado de compactación.
- Propiedades mecánicas de los productos crudos (Parker, 2022).

1.6.1 Propiedades que afectan el grado de compactación:

Las propiedades mencionadas, relacionadas con la granulometría de las partículas sólidas (polvo atomizado) y la porosidad generada por el empaquetamiento de partículas, son fácilmente medibles a escala de laboratorio. Esta presencia de sólidos y poros en el producto cerámico están vinculadas al grado de compactación de la pieza, el cual suele depender de las características físicas de la pasta y de las variables asociadas con el proceso de formado.

Son:

- Porosidad.
- Compacidad.
- Densidad aparente en verde y densidad aparente en seco (Sandoval & Ibáñez Rodríguez, 2000).

Figura 3: Polvo atomizado compactado.



Fuente: Sandoval & Ibáñez Rodríguez, 2000.

1.6.2 Propiedades mecánicas de los productos crudos:

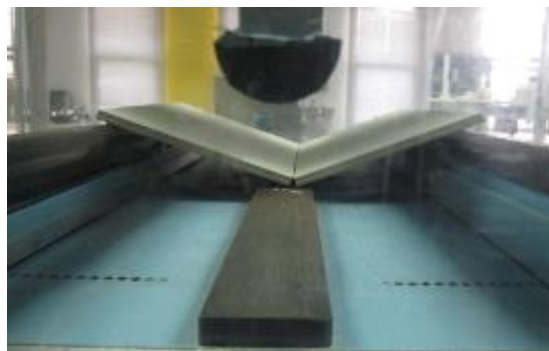
Durante todo el proceso de fabricación, las baldosas cerámicas experimentan manipulaciones, transporte y procesos de engobado, esmaltado y decoración. Por lo tanto, es fundamental que estas baldosas posean propiedades mecánicas adecuadas que las hagan capaces de resistir las tensiones y esfuerzos a los que serán sometidas en cada una de estas etapas antes de la cocción (Terjam, 2018).

Las principales son:

- Resistencia mecánica en verde (pieza cruda sin secar) y resistencia mecánica en seco.
- Módulo de elasticidad.
- Tenacidad.

Además, estas propiedades también influirán en las características del producto final, como su capacidad de soportar cargas.

Figura 4: Ensayo de resistencia mecánica a una baldosa cerámica



Fuente: Empresa cerámica.

1.7 Compacidad

Según explica (Bresciani & Ricci, 2020), la compacidad hace referencia a la relación entre el volumen real ocupado por el sólido (V_s) y el volumen total aparente (V_a). Viene definida por la siguiente fórmula (1.1):

$$\emptyset = \frac{V_s}{V_a} * 100 \quad (1.1)$$

Parámetro usado para medir la proporción entre sólido y huecos de un material.

La compacidad durante la elaboración de productos cerámicos influye de manera directa en las propiedades de los productos crudos, en su comportamiento durante su fabricación y en las propiedades del producto una vez cocido (Arias et al., 2004)

1.7.1 Influencia de la compacidad en las propiedades de los productos crudos

Se relaciona directamente con la propiedad de la resistencia mecánica, sea para productos en verde (recién prensados) o productos secos (después de su ciclo en el secadero), siendo directamente proporcional, a mayor compacidad, mayor será la resistencia a la flexión (Albaro & Fuentes, 2010).

1.7.2 Influencia de la compacidad en el proceso de producción de las baldosas cerámicas

Durante la etapa del secado la compacidad se relaciona directamente con la difusión del agua a través del sólido poroso, a medida que aumenta la compacidad disminuye la permeabilidad, lo que puede dificultar el proceso de secado, también afecta la contracción al secado, en este caso a mayor compacidad menor contracción al secado, lo que es favorable ya que una excesiva contracción puede dar lugar a tensiones que conlleve a fisuras (Penuela, 2013)

La compacidad tiene un impacto directo en la absorción de agua durante la aplicación de engobe y esmalte por vía húmeda en las baldosas cerámicas (Salamanca, 2016). A medida que la pieza absorbe agua durante este proceso, su resistencia se ve afectada, disminuyendo a lo largo del tiempo. Por otro lado, la compacidad también influye en la etapa final del proceso de fabricación de baldosas cerámicas: la cocción, condiciona la velocidad de formación de la fase vítrea. En el caso de compacidades muy bajas, existe una mayor tendencia a sufrir deformaciones pirolásticas (Buenaño, 2019).

1.7.3 Influencia de la compacidad en las propiedades del producto acabado

La compacidad, en la fabricación de piezas cerámicas, influye directamente en la contracción lineal de las mismas y, en consecuencia, en sus dimensiones finales, lo que se traduce en la variación de los calibres de las piezas (Tortajada et al., 2006).

Esta influencia se debe a varios factores, como la composición de la pasta, las materias primas utilizadas y su granulometría. En general, una mayor compacidad se asocia a una contracción lineal más reducida tanto en el proceso de secado como en el de cocción (Quintuña et al., 2018).

1.8 Relación humedad del polvo – densidad aparente

En el proceso de prensado, es fundamental destacar la importancia de controlar la humedad debido a las variaciones que puede experimentar el polvo atomizado y cómo esto afecta la compacidad final de las baldosas después del prensado (Sacmi, 2004).

Además, la humedad también influye en la contracción, ya sea durante el secado o la cocción. Por otro lado, la densidad aparente de los soportes prensados está estrechamente relacionada con factores como la composición química del polvo atomizado, la distribución de tamaños de partícula, la presión máxima aplicada y la humedad del polvo. Estos elementos desempeñan un papel clave en la obtención de baldosas cerámicas con las propiedades deseadas (Mallol et al., 2012).

A medida que la humedad del polvo atomizado aumenta, la densidad aparente en verde y en seco disminuirá, es una relación inversamente proporcional. Por lo tanto, se deben realizar ajustes en la presión de formación para compensar un resultado de una baja o alta densidad aparente (Nebot et al., 2015b).

1.9 Control estadístico (CE)

El CE en baldosas cerámicas es un proceso que garantiza la calidad y consistencia del producto. Este tipo de control implica el monitoreo continuo de variables consideradas importantes durante el proceso de fabricación para asegurar que los resultados estén dentro de límites aceptables y predefinidos.

1.9.1 Definición de control estadístico

Se refiere a un conjunto de técnicas estadísticas utilizadas para monitorear y controlar un proceso o sistema con el objetivo de mantenerlo dentro de límites predefinidos. Este enfoque implica el uso de datos y análisis estadístico para evaluar el rendimiento del proceso,

identificar variaciones y tomar medidas correctivas cuando sea necesario (Nebot et al., 2015a).

1.9.2 Importancia del control estadístico

Su importancia radica en la gestión y mejora de procesos en diversos campos, desde la producción industrial hasta los servicios y la investigación científica. Es una herramienta esencial que tiene la capacidad de monitorizar, garantizar la calidad y consistencia de un proceso, identificar desviaciones tempranas y tomar acciones correctivas basadas en datos estadísticos. Esto no solo contribuye a la eficiencia y eficacia de las operaciones, sino que también tiene un impacto directo en la satisfacción del cliente, la reducción de costos y la optimización continua de los procesos. En un entorno empresarial cada vez más competitivo, el CE emerge como una herramienta esencial para impulsar la calidad, la productividad y la competitividad a largo plazo (Mayén González, 2015).

1.9.3 Límites de control

Los límites de control son valores que se usan en un gráfico de control que ayudan a identificar variaciones normales (aleatorias) y anormales (no aleatorias) en un proceso es decir, si el proceso está dentro o fuera de control (Peyato, 2023).

Existen tres tipos de límites de control:

- Límite de control superior (LCS): es la línea que indica el valor máximo permitido dentro del proceso.
- Límite de control inferior (LCI): es la línea que indica el valor mínimo permitido dentro del proceso.
- Límite central de control (LC): es la línea que representa el valor medio del proceso. Mientras los valores estén más cercanos a esta línea, el proceso estará más controlado (Peyato, 2023).

Los límites de advertencia, presentes en el gráfico de control, sirven como señales tempranas que indican posibles problemas en el proceso. El gráfico de control se divide en dos zonas, superior e inferior, y los límites de advertencia subdividen estas zonas en tres partes. Su función es alertar al equipo de control de calidad sobre patrones o tendencias no aleatorias en los datos, incluso antes de que crucen los límites de control. Esta anticipación permite al equipo tomar medidas proactivas para investigar y abordar posibles causas de variación antes de que impacten la calidad del producto. Los límites de advertencia se aplican de manera

específica, siguiendo las reglas de aleatoriedad para identificar los comportamientos no aleatorios (Toscana, 2014).

1.9.3.1 Cálculo de los límites de control

El cálculo de los límites de control van a depender del tipo de gráfico, ya que varían si se trata de una gráfica de variables o de atributos; así mismo, cada fórmula contiene una constante estadística que se encuentran en función del tamaño de la muestra (GREGORIOASUAREZ, 2018).

En la Tabla 2, se proporciona las fórmulas correspondientes para calcular los límites de control para el gráfico de control de individuales.

Tabla 2: Fórmulas para el cálculo de los límites de control.

	Gráfico de Individuales
LCS	Media del proceso + 3*Desviación estándar
LC	Media del proceso
LCI	Media del proceso - 3*Desviación estándar

Fuente: (GREGORIOASUAREZ, 2018)

1.9.4 Herramientas del Control Estadístico

El CE emplea herramientas como las gráficas de control para discernir entre las causas especiales (no aleatorias) y las causas comunes (aleatorias) de variación (Carro Paz, 2011). Se define la variación como los cambios que ocurren en el valor de la característica medida, siendo esta característica la respuesta de un proceso específico (Kozikova, 2013).

Una vez identificada la presencia de causas especiales mediante el gráfico, el siguiente paso consiste en eliminarlas, ya que son externas al desarrollo natural del proceso. Este procedimiento busca lograr un estado de proceso bajo control estadístico; es decir, un proceso predecible y afectado únicamente por causas aleatorias de variación, lo que garantiza la estabilidad y la consistencia del proceso, mejorando así su capacidad de ser gestionado eficientemente.

Los mencionados gráficos de control se pueden clasificar en dos grandes grupos en función de la característica de la calidad que se quiera controlar:

1.9.4.1 Gráficos de control por variables

En un gráfico de control por variables, se registran mediciones de una muestra tomada a intervalos regulares durante la producción. Estos datos se representan gráficamente, con límites de control que indican la variabilidad esperada del proceso. Si alguna medición cae fuera de estos límites, podría indicar una variación no controlada en el proceso y señalar la necesidad de investigar y corregir la causa (Bravo Saldaña, 2016).

Este tipo de gráfico en específico es comúnmente usado cuando la variable que se está queriendo medir es continua, como la humedad, longitud, peso, entre otros.

Dentro de este grupo de gráficos de control, se encuentra el gráfico de control de individuales que proporciona información valiosa sobre la estabilidad y el rendimiento del proceso, además de ser aplicable para procesos masivos continuos (Flores, 2022).

El uso eficiente de gráficos de control por variables habilita a las organizaciones a mantener la estabilidad de los procesos, prevenir defectos y mejorar de forma continua la calidad de los productos o servicios. Estos gráficos constituyen una herramienta visual potente para respaldar la toma de decisiones fundamentada y la gestión activa de la variabilidad en los sectores industriales y comerciales (Tabel, 2018)

1.9.4.1.1 Gráfico de control de individuales

El gráfico de control de individuales es una herramienta utilizada en el control estadístico de procesos para monitorear la variabilidad de un proceso a través de mediciones individuales. A diferencia de otros tipos de gráficos de control que se basan en medias de subgrupos, el gráfico de control de individuales utiliza datos individuales de cada unidad producida o medición tomada en el proceso (Rodríguez & Franco, 2009).

El uso adecuado del gráfico de control de individuales permite a las organizaciones monitorear la estabilidad y la variabilidad de sus procesos de manera continua, identificar problemas potenciales y tomar medidas correctivas antes de que afecten la calidad del producto o servicio (Rodríguez & Franco, 2009).

1.9.4.2 Gráficos de control por atributos

Estos gráficos de control por atributos representan herramientas invaluableles en la gestión de la calidad, permitiendo a las organizaciones mantener la uniformidad y prevenir defectos en

procesos que generan productos o servicios con características discretas (Argoti Morales, 2019).

A diferencia de los gráficos de control por variables, diseñados para características continuas, los gráficos por atributos se aplican a datos que pueden contarse, clasificarse o categorizarse (Bernabeu et al., 2012).

1.9.5 Análisis de las cartas de control

La identificación de una causa especial de variación, que sugiere un cambio significativo en el proceso, se produce al observar que un punto se encuentra por fuera de los límites de control o cuando los puntos en el gráfico exhiben un comportamiento sistemático (como una tendencia ascendente o un patrón cíclico). En contraste, se considera que el proceso está estable (bajo control estadístico) cuando los puntos caen dentro de los límites de control y muestran variaciones aleatorias a lo largo del gráfico, presentando una apariencia errática y sin un patrón evidente, generalmente tendiendo a acercarse a la línea central (Tellez, 2016).

Para agilizar la identificación de patrones no aleatorios, se divide a la carta de control en seis zonas iguales, con una amplitud similar a la desviación estándar (Contreras, 2016)

1.9.5.1 Reglas de aleatoriedad

Estas reglas se utilizan en el contexto de control estadístico de procesos para identificar posibles problemas en un proceso de producción basado en la observación de los datos de un gráfico de control. Las reglas de Pulido (2010) son especialmente útiles cuando se trabaja con cartas de control para variables, como la carta X-barra y la carta R.

Las reglas son las siguientes:

- Regla 1: Un punto que está fuera de los límites de control superior o inferior.
- Regla 2: Dos de tres puntos consecutivos que están en la zona de advertencia (cerca del límite de control).
- Regla 3: Cuatro de cinco puntos consecutivos que están más allá de 1 desviación estándar de la media.
- Regla 4: Siete puntos consecutivos que están en la misma dirección (todos por encima o por debajo de la media).
- Regla 5: Quince puntos consecutivos que están en la misma dirección (todos por encima o por debajo de la media) sin puntos en la zona de advertencia.

Estas reglas son útiles para detectar patrones y comportamientos inusuales (no aleatorios) en los datos del proceso, lo que puede indicar la presencia de causas especiales o problemas que deben ser investigados y corregidos (Rodríguez & Franco, 2009).

1.9.6 Fases para implementar el Control Estadístico

La puesta en marcha de un CE para un proceso en particular va a depender de dos fases:

1.9.6.1 Fase de ajuste del proceso

En esta fase del CE, se verifica si el proceso está ajustado realizando un levantamiento masivo de datos o mediciones y se realiza un gráfico de control calculando el promedio y la desviación estándar de los mismos (Drew, 2015). En esta fase pueden ocurrir tres casos:

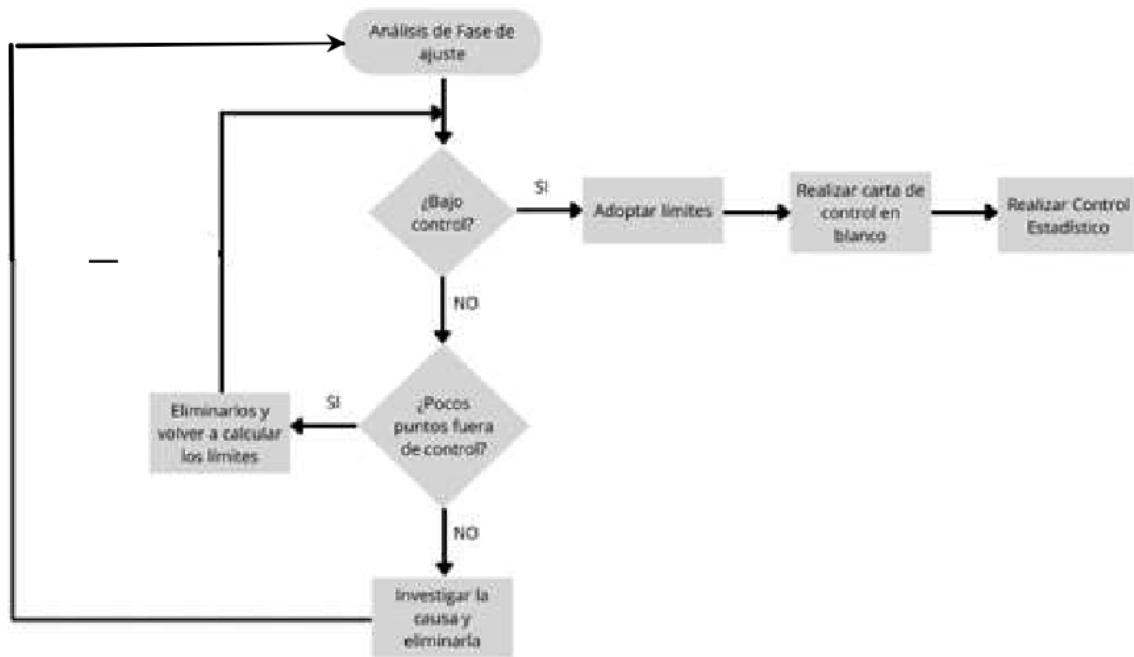
- Si el proceso se encuentra bajo control, se adoptan los límites de control.
- En el caso de encontrarse pocos puntos fuera de control, se eliminan y se vuelven a calcular los límites.
- Si al momento de análisis las mediciones no siguen un patrón aleatorio, se debe investigar la razón y eliminar las causas asignables y volver a realizar el proceso de ajuste (Drew, 2015).

1.9.6.2 Fase de control

Los límites calculados en la fase anterior se utilizan como referencia al iniciar el registro de nuevas mediciones en el gráfico actualizado. En caso de que el proceso se salga de control, se procede a detener la producción para investigar la causa subyacente. Una vez identificada y eliminada la causa, se reanuda la producción normal.

Para realizar las fases anteriormente mencionadas es aconsejable seguir el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 5.

Figura 5: Diagrama de flujo para el análisis de la etapa de ajuste.



Fuente: Propia

CAPÍTULO II

2 Metodología

Con el fin de alcanzar los objetivos propuestos en este trabajo de titulación, se dividió el proceso en tres etapas distintas. En la primera fase, se llevaron a cabo pruebas a nivel de laboratorio, proporcionando así indicadores iniciales para abordar los objetivos planteados al inicio de este trabajo. Posteriormente, en la segunda etapa, se llevaron a cabo pruebas dentro del proceso productivo de las variables que afectan a la estabilidad dimensional, especialmente en las secciones de polvo atomizado y prensado de las baldosas. Finalmente, en la tercera etapa, se aplicó control estadístico para obtener una comprensión más profunda del comportamiento de la variable de humedad del polvo atomizado. Las pruebas que se realizaron se llevaron a cabo en la pasta de tecnología de gres, además para las realizadas a nivel de planta se usó el formato de 45 cm x 45 cm.

2.1 Etapa 1

En esta fase, se realizaron pruebas de diagnóstico inicial de las propiedades de la barbotina y del polvo atomizado; además se efectuaron pruebas de laboratorio para análisis inicial de la relación entre humedad, presión y densidades aparentes.

Para las pruebas de diagnóstico, la empresa consideró suficiente un periodo de monitoreo y recolección de datos de cinco días.

2.1.1 Pruebas a nivel de laboratorio con muestra de barbotina que alimenta al atomizador y del polvo atomizado.

Estas pruebas permiten analizar las propiedades de la materia prima que alimenta la prensa, desde su estado como barbotina hasta su estado en polvo atomizado. En la mayoría de casos se siguieron los procedimientos establecidos por la empresa.

2.1.1.1 Medida del residuo

Se siguió el procedimiento de la empresa:

- a. Medir 100 ml de barbotina en una probeta.
- b. Verter la barbotina en un tamiz malla 230 ASTM y lavar cuidadosamente hasta que el agua que pasa salga transparente.
- c. Pasar todo el residuo que queda en la malla a un recipiente metálico.
- d. Secar en una estufa por aproximadamente 7-8 minutos.
- e. Enfriar el recipiente con el residuo.

- f. Tarar la balanza con el recipiente que tiene residuo y luego se pesa el recipiente vacío.

2.1.1.2 Tiempo de escurrido

Para la realización de esta prueba se usó la copa Ford #4, siguiendo los pasos determinados por la empresa:

- a. Llenar la copa Ford#4 con la muestra de la barbotina hasta el borde, tapando el orificio de salida.
- b. Destapar el orificio y tomar el tiempo simultáneamente.

Es importante destacar que el tiempo se registra hasta que la copa esté completamente vacía. En el escenario en el que el flujo se interrumpa y aún quede muestra en la copa, se considerará un tiempo indeterminado.

2.1.1.3 Densidad de la barbotina

Se usó el método del picnómetro y siguiendo los parámetros de la empresa se mantuvo una densidad dentro del rango, los pasos aplicados para hallar la densidad fueron:

- a. Tarar la balanza con el picnómetro y la tapa completamente limpios y secos.
- b. Llenar el picnómetro con la barbotina, tapar y liberar el exceso por el orificio de la tapa. Lavar y secar la parte externa del picnómetro.
- c. Pesar el picnómetro y ese peso es el resultado de la densidad debido a que el picnómetro tiene un volumen constante de 100 cc.

2.1.2 Pruebas de diagnóstico del polvo atomizado

El análisis del polvo atomizado a nivel de laboratorio, da indicios acerca de su comportamiento a nivel de producción, por lo que se realizaron distintas pruebas para conocer y entender su comportamiento.

2.1.2.1 Humedad del polvo atomizado

A nivel de laboratorio, la determinación de la humedad del polvo atomizado es importante para caracterizar y medir las propiedades del polvo atomizado con el cual se van a llevar a cabo pruebas de prensado y evaluar la densidad de los botones prensados, determinar la contracción y absorción de agua. Las pruebas de laboratorio se ejecutaron utilizando el polvo atomizado extraído de la prensa industrial, manteniendo una humedad específica en rangos de entre 5,9% y 7,6%.

La empresa sigue el siguiente procedimiento estandarizado para medir la humedad, llevándolo a cabo de la siguiente manera:

- a. Colocar un recipiente metálico en la balanza y tarar.
- b. Pesar diez gramos del polvo atomizado en el recipiente metálico.
- c. Secar el recipiente metálico con el polvo atomizado en la estufa por un tiempo aproximado de entre diez a doce minutos.
- d. Retirar y dejar enfriar de tres a cinco minutos.
- e. Colocar el recipiente en la balanza y tarar.
- f. Una vez tarada la balanza, se pesa el recipiente vacío (A).
- g. Calcular el porcentaje de humedad con la fórmula (2.1):

$$\%Humedad\ del\ polvo = (10 - A) * 10 \quad (2.1)$$

2.1.2.2 Granulometría del polvo atomizado

Es importante medir la granulometría del polvo debido a que puede tener una influencia significativa en diversas propiedades, especialmente en el proceso de compactación.

Para determinar la granulometría la empresa sigue el siguiente procedimiento:

- a. Colocar las mallas en el equipo de agitación.
- b. Pesar 100 gramos de muestra del polvo y colocar en el tamiz superior.
- c. Agitar durante un tiempo de 10 minutos y luego dejar reposar durante 2 minutos.
- d. Retirar con cuidado cada malla y pesar su contenido.

2.1.3 Pruebas a nivel de laboratorio de análisis inicial de relación entre humedad, presión y densidades aparentes

En la elaboración de baldosas cerámicas, estas tres variables están interrelacionadas entre sí, es decir, al variar el valor de una de ellas implica cambios en las otras, razón por la cual es importante encontrar la relación entre estos parámetros.

2.1.3.1 Ajuste de humedad del polvo

Se realizaron pruebas en tres humedades diferentes: 5%, 6% y 7%; se consideraron estos valores debido a que cubre el rango de humedad en el que trabaja la empresa. Cuando la humedad del polvo atomizado se encuentra fuera del valor que se está probando, se requiere realizar un ajuste.

Cuando la humedad está por debajo del valor requerido el procedimiento que efectúa la empresa es el siguiente:

- a. Calcular la cantidad de agua necesaria con la fórmula 2 para llegar a la humedad deseada.

$$\text{Cantidad de agua} = \frac{\text{peso de la muestra} - \%H_2O}{100 - \%H_2O} \quad (2.2)$$

- b. Esparcir la muestra en la mesa de trabajo.
- c. Colocar el atomizador de agua en la balanza y tarar la misma.
- d. Añadir la cantidad de agua necesaria poco a poco mientras se va pesando el atomizador para no excederse con el agua.
- e. Mezclar el polvo y corroborar si la cantidad de agua aplicada fue la correcta con los pasos mencionados en el inciso 2.1.1.2.

En el caso de que el valor de la humedad sea superior al buscado, se procedió a secar la muestra de polvo en la estufa por el tiempo necesario y corregir la humedad hasta alcanzar el valor deseado.

2.1.3.2 Prensado de la muestra del polvo atomizado a nivel de laboratorio

Una vez que el polvo tiene la humedad dentro del rango establecido o del valor específico necesario, se procedió a prensarlo para obtener un botón que servirá para distintas pruebas. El procedimiento que se siguió fue:

- a. Pesar 25 gramos de la muestra del polvo una vez que esté bien mezclado.
- b. Ajustar la prensa de laboratorio al diámetro necesario.
- c. Ajustar la prensa de laboratorio con la presión deseada.

d. Prensar.

2.1.3.3 Contracción del botón

Posterior al prensado, se midió el diámetro del botón con la ayuda de un calibrador. Este procedimiento se llevó a cabo después del prensado, posterior al tiempo de secado y tras la fase de quema. La fórmula (2.3) se usa para calcular la contracción:

$$\text{Contracción} = \frac{\text{diámetro inicial} - \text{diámetro final}}{\text{diámetro inicial}} * 100 \quad (2.3)$$

2.1.3.4 Densidad aparente en verde y seco

Después de prensar, se calculó la densidad aparente en verde para lo cual se siguieron los siguientes pasos:

- a. Retirar el botón de la prensa, pesar y registrar el peso (A).
- b. Sumergir el botón en mercurio con la ayuda de una garra metálica y anotar el peso de empuje (B).
- c. Realizar el cálculo con la fórmula (2.4):

$$\text{Densidad} = \frac{A * \text{densidad del mercurio}}{B} \quad (2.4)$$

Nota: para la ejecución del paso (b), la empresa cuenta con una balanza adaptada con un recipiente que contiene mercurio, cuyo peso ya está tarado y es usada únicamente para este propósito, de tal forma que al sumergir el botón en el mercurio registra el peso de empuje del mismo.

Para determinar la densidad aparente en seco, se sigue el mismo procedimiento con la excepción de que antes del primer pesaje, se coloca la placa en la estufa durante aproximadamente 24 horas para asegurar que esté completamente seca.

Tras realizar las pruebas en crudo del botón, este se somete a la quema en el horno. Una vez completada la quema, se calcula su contracción final mediante la fórmula (2.3), detallada en el inciso 2.1.1.8.

2.1.3.5 Porcentaje de absorción de agua

Una vez que los botones hayan pasado por el proceso de cocción, se realizó la última prueba a nivel de laboratorio que es la de absorción de agua, siguiendo el procedimiento dado por la empresa:

- a. Pesar los botones uno por uno y anotar su peso (A).
- b. Calentar agua a una temperatura constante cerca de la ebullición.
- c. Sumergir las placas en el agua caliente y mantenerlas ahí durante un tiempo de dos horas.
- d. Sacar los botones del agua y enfriar añadiendo agua fría poco a poco.
- e. Sacar del agua fría de uno en uno los botones, con un paño apenas húmedo retirar el exceso de humedad de su superficie.
- f. Pesar cada botón y anotar su peso (B).

Es importante aclarar que los botones sumergidos en el agua no se deben tocar entre si ya que este roce va a interferir con el resultado. El cálculo se detalla en la fórmula (2.5).

$$\% \text{ absorción} = \frac{B-A}{A} * 100 \quad (2.5)$$

Los botones resultantes de las distintas pruebas de la Etapa 1, fueron quemados en el horno de producción de la empresa.

Las pruebas de esta etapa se realizaron por duplicado, los resultados se presentan en el Anexo B.

2.2 Etapa 2

En esta etapa se realizaron todas las pruebas a nivel de planta, se determinó la densidad aparente en verde y en seco y la presión de prensado.

Para el formato de 45 cm x 45 cm, la prensa admite tres piezas por ciclo de prensado, por lo que se realizan las distintas pruebas en estas tres piezas. No obstante, en la sección de análisis, se emplean exclusivamente los promedios de estas mediciones, los resultados individuales de las tres piezas se encuentran detallados en el Anexo C, D, E y F.

2.2.1 Humedad del polvo atomizado

En primera instancia, se determinó la humedad del polvo atomizado que llega al alveolo de la prensa usando el procedimiento que se detalla en el inciso 2.1.1.4, ya que se realiza de la misma manera que la prueba de laboratorio.

2.2.2 Densidad aparente en verde y seco por rayos x

La densidad aparente en verde se va a realizar en las baldosas cerámicas recién formadas sin secar y, de la misma manera, en las baldosas cerámicas que salen de la operación de secado.

La empresa dispone de un equipo de rayos x de marca MultiScan Densexplorer 750 para determinar la densidad de la baldosa, sin necesidad de romperla por lo que se puede usar la misma para otras pruebas, ni de que el operario esté expuesto al mercurio.

Para esta prueba, de la línea de producción, se extrajeron tres baldosas cerámicas prensadas simultáneamente antes de que entren al secadero y se llevaron al equipo de rayos x, previamente configurado para el formato de 45 cm x 45 cm, para la determinación de sus respectivas densidades aparentes.

2.2.3 Porcentaje de contracción

Este proceso se aplicó a las baldosas en verde (antes del secado), a las secas y a las quemadas, usando la fórmula (2.3) se calculó la contracción de la pieza en el secado y en la quema.

Se usaron las baldosas cerámicas que se retiraron de la prensa y con las que se realizó la medición de la densidad en el inciso 2.2.2, se midió los cuatro lados de las baldosas con la ayuda de un calibrador; se repitió este procedimiento luego de secar estas baldosas y posterior a la quema de las mismas piezas.

2.3 Etapa 3

Se aplicó control estadístico (CE) a la variable "humedad del polvo atomizado", con el fin de explorar, controlar e identificar posibles perturbaciones en el proceso, buscando asegurar que la humedad se mantenga dentro del rango establecido por la empresa.

Para llevar a cabo esta tercera etapa de análisis, se aplicó la fase de ajuste del CE utilizando datos recopilados en el proceso de prensado de la Línea 1 de monoquema con el formato de 45 cm x 45 cm, desde el 1 hasta el 24 de octubre de 2023, medidos y registrados cada hora durante las 24 horas del día.

Se usó una carta de control de individuales, ya que el tamaño de la muestra utilizado en la recolección de datos fue $n = 1$.

En función de los límites calculados se generó la carta de control, se graficaron los datos recolectados, y se aplicó el análisis de la variabilidad del parámetro de calidad, utilizando las cinco reglas mencionadas en el apartado 1.9.5.1.

Para llevar a cabo la etapa de ajuste, se siguió el diagrama de flujo presentado en la Figura 5. Una vez que el gráfico se encuentre bajo control, se concluye la fase de ajuste y se debe dar inicio a la etapa de control. Durante la fase de control, se deben utilizar los mismos límites calculados (en el ajuste) y se crearía un nuevo gráfico en blanco para monitorear continuamente el proceso. Si algún punto graficado se encuentra fuera de los límites establecidos o sigue un patrón no aleatorio, se detiene la producción e investiga la razón detrás de ello.

Como un complemento a la investigación, se realizó una comparación visual de los límites de especificación (generados por la empresa) y los límites de control (calculados en la etapa de ajuste).

CAPÍTULO III

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La estabilidad dimensional es afectada por diversos factores, este trabajo se centra en el polvo atomizado que llega a la prensa, teniendo en cuenta su humedad, así como el proceso de prensado y la densidad alcanzada por la pieza en verde y en seco, además, se analizarán las contracciones de las piezas formadas; con esta información, se construirán gráficos de isocompactación con el objetivo de descubrir una relación entre la presión de la prensa y la humedad del polvo para lograr la estabilidad dimensional.

Nota: las Tablas 3 hasta la 30 fueron realizadas por el autor, pero se construyeron con datos de la empresa.

3.1 Etapa 1

Para iniciar el análisis del polvo atomizado, es necesario diagnosticar el material del cual se forma, que es la pasta barbotina que ingresa al atomizador, en esta se controló el tiempo de escurrido, el residuo y la densidad. Luego en el polvo atomizado se controlaron humedad y granulometría como parte de este proceso de evaluación.

3.1.1 Control de residuo, tiempo de escurrido y densidad de la barbotina.

Los rangos que dictamina la empresa de residuo, tiempo de escurrido, densidad de la barbotina y humedad y granulometría de polvo atomizado se encuentran en el Anexo A.

En la Tabla 3 se muestran los resultados de las pruebas realizadas en la barbotina que alimenta al atomizador.

Tabla 3: Datos de la barbotina de la tecnología gres.

Fecha/hora	Residuo (g)	Tiempo de escurrido (s)	Densidad (Kg/m³)
6/4/22 9:00	2,56	27	1639
6/4/22 11:00	2,61	27	1640
6/4/22 15:00	2,25	28	1642
7/4/22 9:00	2,79	32	1646
7/4/22 13:00	2,69	32	1646
11/4/22 11:00	2,75	32	1643
11/4/22 14:00	2,90	32	1643
11/4/22 16:00	2,66	34	1643
12/4/22 12:00	2,86	37	1642
12/4/22 17:00	2,81	37	1640
12/4/22 21:00	2,54	33	1633
13/4/22 7:00	2,48	34	1647
13/4/22 16:00	2,75	38	1652
13/4/22 21:00	2,40	39	1650
14/4/22 7:00	2,40	36	1649
14/4/22	2,36	35	1647

11:00

Al analizar la Tabla 3, se evidencia una correlación entre la densidad de la barbotina y su tiempo de escurrido, donde el aumento de la densidad conlleva a un incremento en el tiempo de escurrido.

3.1.2 Control de humedad y granulometría del polvo atomizado

Al igual que de la barbotina, para el polvo atomizado también se recopiló información de las características más significativas. Estos datos se encuentran recopilados en la Tabla 4.

Fecha/hora	Humedad (%)	Granulometría					Fondo (%)
		Malla ASTM 10 (%)	Malla ASTM 40 (%)	Malla ASTM 100 (%)	Malla ASTM 200 (%)	Malla ASTM 325 (%)	
6/4/2022 9:00	7	1,31	28,71	23,2	24,76	16,18	5,84
6/4/2022 11:00	6,7	1,03	28,04	23,15	25,27	17,37	5,14
6/4/2022 15:00	6,6	1,2	29,1	22,12	25,16	17,1	5,32
7/4/2022 9:00	7,5	1,51	31,25	22,62	24,24	15,48	4,91
7/4/2022 13:00	7,2	1,53	31,23	21,15	24,4	16,24	5,44
11/4/2022 11:00	7	1,02	29,75	23,45	25,31	16,32	4,15
11/4/2022 14:00	6,7	0,94	28,34	23,31	25,24	17,09	5,09
11/4/2022 16:00	6,7	0,83	29,58	22,4	25,03	16,89	5,28
12/4/2022 12:00	6,9	1,48	31,45	21,1	24,59	17,14	4,24
12/4/2022 17:00	6,9	1,04	31,61	24,67	21,59	16,08	5,02
12/4/2022 21:00	6,8	1,27	32,19	21,52	23,99	15,66	5,37
13/4/2022 7:00	7,5	2	35,08	22,08	23,47	13,57	3,8
13/4/2022 16:00	7,4	2,47	33,46	23,41	21,52	15,45	3,69
13/4/2022 21:00	7,5	2,12	34,79	21,56	22,06	14,04	5,43
14/4/2022 7:00	6,9	1,56	32,95	21,2	22,01	18,85	3,43
14/4/2022	7,3	1,53	34,07	21,85	23,06	15,44	4,04

11:00

Tabla 4: Datos de humedad y granulometría del polvo atomizado de gres.

La Tabla 4 presenta la relación entre la humedad del polvo atomizado y su granulometría. Se observa una relación directamente proporcional entre la humedad del polvo y el tamaño de las partículas. A mayor humedad, las partículas muestran un tamaño mayor como se ve indicado sobre todo en el incremento del retenido en la malla ASTM 40.

3.1.3 Análisis inicial de relación entre humedad, presión y densidades aparentes a nivel de laboratorio

Con las siguientes pruebas, se procuró establecer una conexión entre las variables bajo análisis: humedad de polvo atomizado, presión de prensado, densidades en crudo, contracción y absorción de agua tras cocción. Aunque la teoría indica la existencia de relaciones entre estas variables, se buscó respaldar esto con datos reales, proporcionando evidencia concreta de dicha relación.

En esta fase de pruebas, se trabajó con distintos porcentajes de humedad: 5%, 6% y 7%, a su vez en cada una se realizaron pruebas variando la presión de prensado. En estas pruebas se determinó: densidad aparente en verde, densidad aparente en seco, porcentaje de contracción y porcentaje de absorción de agua. La cocción de los botones para contracción y absorción se hizo con un ciclo constante de cocción de 40 minutos, con temperaturas comprendidas entre 1148°C y 1155°C. Los resultados se encuentran detallados en las Tablas 5, 6 y 7, respectivamente.

Cabe recalcar que estos resultados son los promedios de las pruebas realizadas por duplicado, los datos completos se encuentran en el Anexo B

Tabla 5: Datos de pruebas a una humedad de 5%.

HUMEDAD (%)	5.00				
PRESIÓN (Kg/cm²)	203	268	369	470	570
DAP. VERDE (Kg/m³)	1826	1877	1934	1977	1990
DAP. SECO (Kg/m³)	1762	1813	1867	1907	1932

CONTRACCIÓN (%)	8.32	7.87	7.50	7.12	6.86
ABSORCIÓN DE AGUA (%)	7.36	6.19	4.99	4.07	3.97

Tabla 6: Datos de pruebas a una humedad de 6%.

HUMEDAD (%)	6.00				
PRESIÓN (Kg/cm²)	203	268	369	470	570
DAP. VERDE (Kg/m³)	1864	1911	1971	2017	2038
DAP. SECO (Kg/m³)	1794	1842	1896	1932	1958
CONTRACCIÓN (%)	8.15	7.83	7.29	6.86	6.72
ABSORCIÓN DE AGUA (%)	3.54	2.73	2.07	1.65	1.13

Tabla 7: Datos de pruebas a una humedad de 7%.

HUMEDAD (%)	7.00				
PRESIÓN (Kg/cm²)	203	268	369	470	570
DAP. VERDE (Kg/m³)	1924	1972	2025	2064	2088
DAP. SECO (Kg/m³)	1826	1868	1926	1965	1978
CONTRACCIÓN (%)	7.87	7.40	6.91	6.86	6.39
ABSORCIÓN DE AGUA (%)	6.29	5.01	3.83	3.72	2.72

Tras analizar las Tablas 5, 6 y 7, se observa que, a un mismo nivel de humedad, tanto la densidad aparente en verde como en seco tiende a aumentar con el incremento de la presión. Este fenómeno se atribuye al acomodamiento de las partículas tras la aplicación de la fuerza de presión. Por otro lado, se observa que el porcentaje de contracción presenta una relación

inversamente proporcional con la presión, a medida que la presión aumenta el porcentaje de contracción tiende a disminuir, indicando que las partículas se encuentran más cercanas entre sí. Asimismo, se identifica una relación inversamente proporcional entre la presión y el porcentaje de absorción de agua porque mientras más compactadas están las partículas, existe menor porosidad y tienden a tener un mayor grado de reacción en la cocción, y por ende de vitrificación, lo que implica menos absorción.

Se verifica que a medida que el porcentaje de humedad aumenta, los valores de densidad aparente en verde también tienden a incrementarse lo que posiblemente indica que un mayor contenido de humedad ayuda a la compactación. Sin embargo, en el caso de la densidad aparente en seco se ve que, con el porcentaje de humedad más alto, 7%, se obtienen resultados inferiores en comparación con humedades del 5% y 6% debido a que a mayor humedad al momento de que se elimina esta queda mayor cantidad de poros.

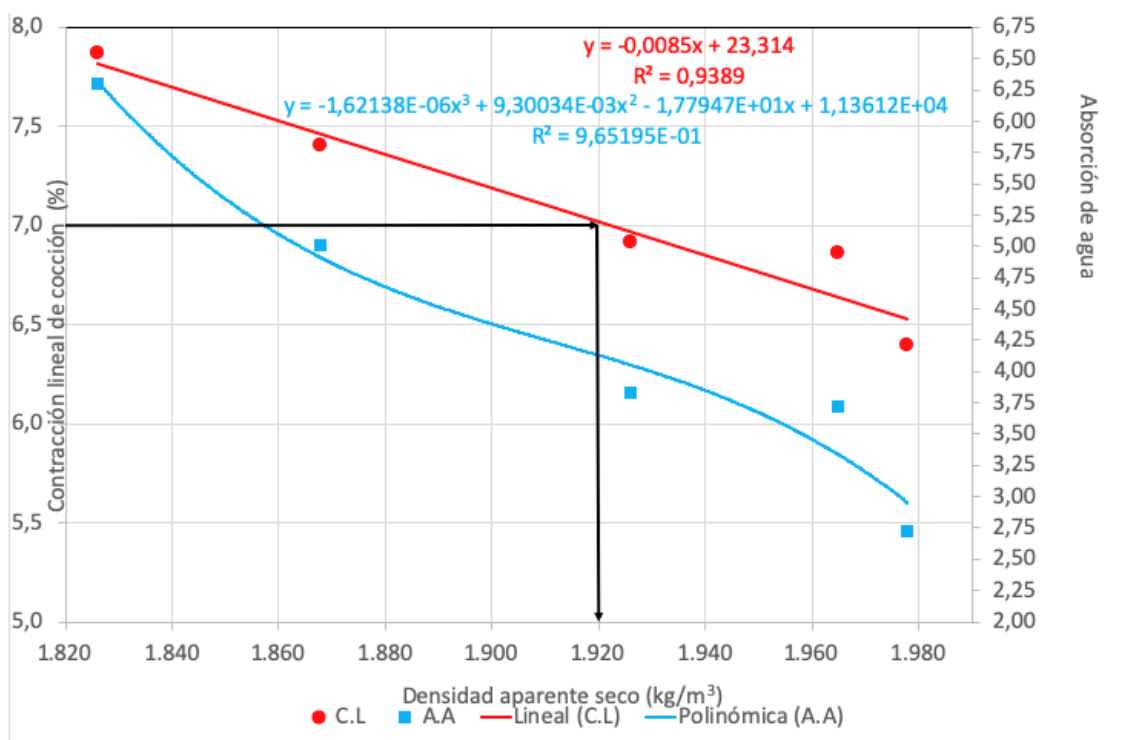
Al analizar el porcentaje de contracción y compararlo con distintos niveles de humedad, se nota que a medida que el contenido de humedad en el polvo se incrementa, el porcentaje de contracción disminuye. Este fenómeno se debe posiblemente a que, a mayores niveles de humedad, las partículas tienden a adherirse entre sí, favoreciendo la compactación.

Con respecto a la absorción de agua, se obtiene el menor valor con una humedad del polvo atomizado de 6%, razón por la cual la empresa decide usar un aproximado a este porcentaje en su polvo a nivel de producción.

Considerando los resultados obtenidos, se determinó que el rango del trabajo de la variable humedad para la empresa debe estar aproximadamente entre 6% y 7%.

Con los datos proporcionados en las Tablas 5, 6 y 7 se realizó un gráfico denominado de isocompactación para relacionar las variables de densidad aparente en seco, contracción lineal y absorción de agua, siendo estos los tres ejes para la Figura 6; este gráfico va a servir para, de alguna manera, predecir los valores de porcentajes de contracción y de absorción de agua que se van a tener para una densidad aparente en seco específica

Figura 6: Gráfico de Isocompactación



Fuente: Elaboración propia

Según lo mencionado anteriormente, en el ejemplo expuesto en la Figura 6, se podría deducir que a una densidad de 1920 Kg/m³, la pieza va a tener una contracción del 7% y un porcentaje de absorción del 4% aproximadamente.

La razón por la cual para el porcentaje de contracción se usó una relación lineal es porque durante el proceso de secado y cocción suele seguir un comportamiento lineal debido a la distribución uniforme de las partículas en la mezcla. A medida que el agua se elimina durante el proceso, las partículas cerámicas se acercan entre sí de manera homogénea, resultando en una contracción proporcional al contenido de humedad perdido. Este comportamiento lineal es típico cuando las fuerzas que influyen en la contracción actúan de manera constante y proporcional a la cantidad de agua que se elimina (Galindo, 2018).

Mientras que para el porcentaje de absorción de agua puede seguir un patrón logarítmico debido a la saturación gradual de los poros. Inicialmente, al sumergir las baldosas en agua, la absorción es más rápida, pero a medida que los poros se llenan y la superficie de la

cerámica se satura, la tasa de absorción disminuye. Este comportamiento logarítmico refleja cómo la absorción de agua se ralentiza a medida que la cerámica alcanza su capacidad máxima de retención de agua (Galindo, 2018).

3.2 Etapa 2

En esta etapa se llevó a cabo un seguimiento detallado a nivel de producción, en el cual se registraron diversas variables, como la humedad del polvo, presión de prensado, densidad aparente en verde y en seco, contracción al secado, contracción en la quema, absorción de agua y calibre. La recopilación y análisis de estos datos, junto con la aplicación de una fórmula, condujo a una relación entre humedad del polvo atomizado y la presión en la prensa.

3.2.1 Análisis de datos de: humedad de polvo, presión de prensa y densidades aparentes en verde y en seco, porcentaje de contracción y porcentaje de absorción de agua de baldosas de formato 45 x 45 cm

El objetivo de este seguimiento fue analizar cómo cada uno de estos parámetros afecta la estabilidad dimensional de las baldosas cerámicas. Los resultados de estas mediciones se presentan a continuación:

Los resultados completos están expuestos en el Anexo C.

Tabla 8. Resultados de promedios de densidades aparentes en verde (DAP verde).

PRESIÓN	PROMEDIO HUMEDAD (%)	PROMEDIO DAP VERDE (Kg/m ³)	% DESVEST HUMEDAD	% DESVEST DAP VERDE
335	6,5	1974,25	0,76	0,44
350	6,6	1977,00	1,51	0,74
365	6,7	1986,25	1,94	0,58

Tabla 9: Resultados de promedios de densidades aparentes en seco (DAP seco).

PRESIÓN	PROMEDIO HUMEDAD (%)	PROMEDIO DAP SECO (Kg/m ³)	% DESVEST HUMEDAD	% DESVEST DAP SECO
335	6,5	1870,50	0,76	0,36
350	6,6	1876,00	1,51	0,67
365	6,7	1887,75	1,94	0,56

En las tablas 8 y 9, se evidencia la relación entre la humedad, la presión aplicada y la densidad aparente, ya sea en estado verde o seco. A medida que la humedad y la presión aumentan,

se observa un incremento en el valor de la densidad, cambios mínimos en la humedad resultan en variaciones sustanciales en la densidad, lo que se ve al comparar los datos, donde un cambio del 0,1% en la humedad se traduce en un aumento notable de la densidad en estado verde o en seco.

Por otra parte, el porcentaje de contracción tras la quema es importante para el calibre final de la baldosa cerámica. En la Tabla 10 se muestra los porcentajes de contracción tras la etapa de cocción.

En el Anexo D se encuentran los datos completos de la contracción lineal de cada baldosa cerámica.

Tabla 10: Resultados de los promedios de contracción lineal (C.L) después de la quema.

PRESIÓN	PROMEDIO HUMEDAD (%)	PROMEDIO C.L (%)	% DESVEST HUMEDAD	% DESVEST C. L
335	6,5	7,19	0,76	2,50
350	6,6	7,24	1,51	1,65
365	6,7	7,13	1,94	2,10

Con los resultados de la Tabla 10, se concluye que la mejor relación entre presión y humedad se observa en el caso del 6,6% de humedad, ya que muestra un porcentaje de contracción, que implica mayor reacción durante la cocción. Esto sugiere que a esta humedad y presión las partículas están más cercanas y mejor compactadas, lo que conduce a un empaquetamiento más eficiente y, por ende, a una estructura más densa, esta mayor densidad contribuye a una contracción reducida durante el proceso de cocción que da mayor estabilidad dimensional.

Controlar cuidadosamente el contenido de humedad en el polvo cerámico es esencial para lograr una estabilidad dimensional adecuada. Variaciones en la humedad pueden dar lugar a contracciones no deseadas o a una falta de uniformidad en las propiedades finales de las piezas cerámicas.

En la Tabla 11 se presentan los resultados de absorción de agua.

Tabla 11. Resultados de promedios de absorción de agua (A.A).

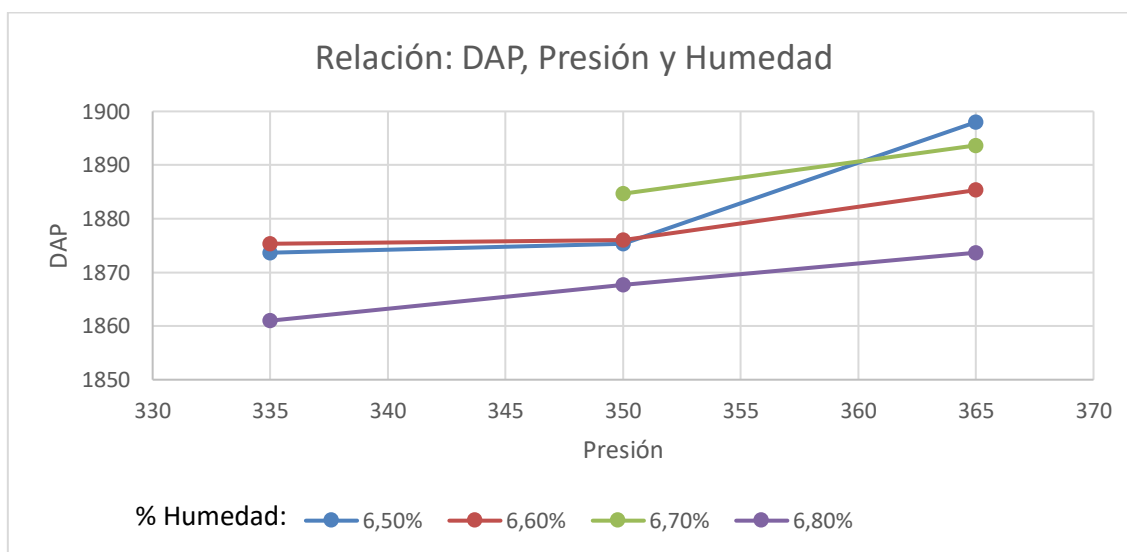
PRESIÓN	PROMEDIO HUMEDAD (%)	PROMEDIO A.A (%)	% DESV HUMEDAD	% DESVEST A. A
335	6,5	4,42	0,76	4,52
350	6,6	4,01	1,51	10,97
365	6,7	3,81	1,94	13,38

Con los datos presentados en la Tabla 11 se confirma que hay mucha dispersión de los datos posiblemente debido a que para determinar absorción de agua por el método de ebullición se requiere medir el volumen desplazado, y al tratarse de botones, que son pequeños, era necesario contar con una pipeta serológica que permita realizar mediciones más finas, con la cual no se disponía. Al no contar con datos confiables en la determinación de la absorción de agua, en las pruebas de laboratorio, se decidió que no se llevará a cabo esta evaluación en la producción debido a la dificultad de su control y a que la naturaleza logarítmica de esta variable dificulta su manejo.

En el Anexo E, se detallan los datos completos de la absorción de agua de cada botón de prueba.

Con los resultados expuestos anteriormente, se graficaron curvas de isocompactación para poder obtener información relevante en relación a las presiones, humedades y densidades.

Figura 7 : Relación densidad en seco, presión y humedad



Fuente: Propia

La Figura 7 proporciona información valiosa sobre cómo la humedad y la presión afectan la densidad aparente en seco. A partir de esta figura, se pueden deducir los siguientes puntos clave:

- **Importancia de la humedad y la presión:** Tanto la humedad como la presión son factores determinantes en la obtención de la densidad aparente en seco de las piezas cerámicas.
- **Variación con la humedad:** Para un mismo valor de presión, se observa que el valor de la densidad aparente varía en función de la humedad, de tal forma que, a medida que el polvo atomizado se vuelve más seco, la densidad aparente tiende a aumentar.

Dicha figura da una visión de cómo estos factores interactúan, mostrando cómo variaciones en la humedad y la presión conducen a cambios correspondientes en la densidad aparente en seco. Esta relación es esencial para ajustar el proceso de tal forma que lleven a obtener mayor estabilidad dimensional.

La influencia de la humedad del polvo atomizado en la distribución del mismo en la prensa es significativa, la cantidad de humedad presente en el polvo cerámico afecta la cohesión y la capacidad de compactación de las partículas durante el proceso de prensado, una humedad adecuada contribuye a una distribución más uniforme y homogénea del polvo en la matriz de la prensa. Por otro lado, niveles inadecuados de humedad pueden dar lugar a problemas de compactación desigual, afectando la calidad y las propiedades finales de las piezas cerámicas. Por lo tanto, controlar y ajustar la humedad del polvo atomizado es crucial para garantizar una distribución óptima y una calidad consistente en la producción de cerámica (Sánchez, 1994).

3.2.2 Relación de las medidas de la baldosa cerámica con la presión y la humedad

Es importante aclarar que la estabilidad dimensional está relacionada con la medida del calibre, para este cometido la empresa tiene sus propias medidas para clasificar cada baldosa cerámica en uno o en otro grupo de calibre, y tiene por objetivo estar siempre entre el calibre 3 y el calibre 4, que implican primera calidad.

Las medidas de los calibres se presentan en la Figura 8:

Figura 8: Especificaciones de calibre según la Empresa

450 X 450	1	447.0	448.0	449.0	450.0	451.0	452.0	453.0
		447.5	448.5	449.5	450.5	451.5	452.5	
		calibre 1	calibre 2	calibre 3	calibre 4	calibre 5	calibre 6	
		Standart	T...A	T...B	T...C	T...D	Standart	

Fuente: Empresa cerámica

Como se mencionó anteriormente, la capacidad de la prensa para este formato es de tres baldosas simultáneamente, por lo que para identificar cada una se las nombró como: T1, T2 y T3.

En la Tabla 12 se presentan los resultados del promedio de los cuatro lados de la placa cerámica T1.

Tabla 12: Datos de las dimensiones de la pieza quemada T1.

PRESIÓN (Kg/cm ²)	PROMEDIO HUMEDAD (%)	PROMEDIO MEDIDA T1 (mm)	% DESV HUMEDAD	% DESVEST MEDIDA T1
335	6,5	449,11	0,76	0,19
350	6,6	448,86	1,51	0,19
365	6,7	449,38	1,94	0,24

Según los resultados mostrados en la Tabla 12, con la presión de 365 Kg/cm² y a un porcentaje de humedad de 6,7% se logra las dimensiones requeridas, no logrando esto con la presión de 335 Kg/cm² a un porcentaje de humedad de 6,5% y con la presión de 350 Kg/cm² con una humedad de 6,6%.

En las Tabla 13 y 14 se presentan los resultados de las baldosas T2 y T3, respectivamente.

Tabla 13: Datos de las dimensiones de la pieza quemada T2.

PRESIÓN (Kg/cm ²)	PROMEDIO HUMEDAD (%)	PROMEDIO MEDIDA T2 (mm)	% DESV HUMEDAD	% DESVEST MEDIDA T2
335	6,5	449,18	0,05	0,18
350	6,6	449,07	0,10	0,13
365	6,6	449,31	0,13	0,16

Tabla 14: Datos de las dimensiones de la pieza quemada T3.

PRESIÓN (Kg/cm ²)	PROMEDIO HUMEDAD (%)	PROMEDIO MEDIDA T3 (mm)	% DESV HUMEDAD	% DESVEST MEDIDA T3
335	6,5	449,21	0,05	0,20
350	6,6	449,08	0,10	0,14
365	6,7	449,59	0,13	0,16

En las Tablas 13 y 14, muestran que la prensa trabaja de mejor manera con las matrices ubicadas en la mitad y a la derecha, debido a que con las tres presiones aplicadas y con los tres porcentajes de humedad da un promedio de medida correspondiente a calibre 3.

El análisis de las Tablas 12, 13 y 14 implica que la presión es aplicada de una manera distinta a cada pieza, sin embargo, esto no forma parte de los objetivos planteados para este trabajo ya que se considera un problema del equipo.

En el Anexo F se encuentran las medidas de cada baldosa cerámica y en el Anexo G están presentados los resultados de cada medición según su calibre.

La presión y la humedad del polvo van a influir directamente con el calibre debido a que son variables relevantes para lograr el objetivo de conseguir la estabilidad dimensional, entonces, con el objetivo de alcanzar una densidad aparente en seco constante, tratando así que el resultado final mantenga un calibre central, con base en los Anexos F, D, C y con cálculos que se muestran a continuación, se logró obtener la Tabla 15.

Las fórmulas para calcular la máxima variación permisible de la contracción lineal son:

$$d = L_0 - L_1 \quad (3.1)$$

$$\Delta CL = \frac{2*d}{L_c} * 100 \quad (3.2)$$

Donde:

- ΔCL : variación máxima permisible.
- d : tolerancia de calibre.
- L_0 : tamaño estándar que se desea obtener.
- L_1 : tamaño mínimo permisible.
- L_c : tamaño de la pieza cruda.

Tabla 15: Promedios de dimensiones (Lcr), contracción lineal (CL) y densidad aparente en seco.

PROMEDIO Lcr_C3 (mm)	PROMEDIO CL_3 (%)	PROMEDIO DAP SECO_C3 (kg/m ³)
482.85	7.08	1885.0
482.81	7.02	1893.0
482.74	7.03	1898.0
482.86	6.99	1875.0
482.70	7.06	1895.0
482.73	7.14	1877.0
482.99	7.09	1865.0
482.81	7.06	1883.9

Estos cálculos se han realizado con el objetivo de alcanzar una densidad aparente en seco constante, asegurando así que el resultado final mantenga un calibre central.

El promedio de contracción lineal necesario para un calibre central, considerando los valores de la Tabla 15, es de 7,06. Luego, al aplicar las fórmulas (3.1) y (3.2), se obtiene un valor permisible de variabilidad de 0.21. Este valor es fundamental para establecer un rango aceptable de contracciones y densidades.

Considerando estos valores y analizando la información de las Tablas 27 y 30 de los Anexos G y D, respectivamente, se vio que contracciones menores a 7.06% no conducían a calibres centrales, por lo tanto, se estableció que el valor mínimo de contracción para el calibre central debería ser de 7.06 y el valor de 7.27 como el máximo. Se deja un valor permitido de 0,06% por debajo de 7,06% como un margen de error.

En la Tabla 16 se presentan los datos de densidad aparente en seco y contracción lineal tomados de la Tabla 15, con los cuales se realizó el gráfico de isocompactación que está en la Figura 9 del Anexo H.

Tabla 16: Datos de DAP seco y contracción.

DAP SECO (Kg/m³)	CL (%)
1885	7,17
1894	6,98
1898	7,03
1885	7,31
1875	6,99
1893	7,09
1878	7,39
1857	7,34
1875	7,41
1875	7,16
1870	7,25
1861	7,12
1868	7,30
1874	7,20

En base a la Figura 9 del Anexo H, se observa el rango de densidades que permitirá alcanzar un resultado final de calibre central, el cual va desde 1865 kg/m³ hasta 1898 kg/m³. Este rango se obtiene utilizando los valores previamente calculados para la variación de contracción lineal y aplicando el margen permitido de 0.21.

3.2.3 Determinación de especificaciones de humedad vs presión de trabajo para mejorar estabilidad dimensional

Con los datos obtenidos de las distintas tablas, su análisis y aplicando una fórmula que es propiedad de la empresa, se obtuvo la Tabla 17 con los valores de humedad del polvo atomizado y la presión a la que se deberá prensar.

Tabla 17: *Tabla de humedades y presión para un formato 45 x 45 (cm).*

% Humedad	Presión (kg/cm²)
5,9 – 6,0	380
6,1 – 6,2	370
6,3 – 6,4	360
6,5 – 6,6	350
6,7 – 6,8	340
6,9 – 7,0	330
7,1 – 7,2	320
7,3 – 7,4	310
7,5 – 7,6	300

Esta Tabla 17 proporciona la información requerida que se entregó al personal encargado de la prensa para posteriores pruebas y producción.

3.2.4 Monitoreo de resultados de aplicación de límites obtenidos

Es importante destacar que la búsqueda de estabilidad dimensional tiene como objetivo obtener baldosas con calibres centrales, es decir, calibres 3 y 4. Las dimensiones requeridas para alcanzar estos calibres se detallan en la Figura 7.

Aplicando los resultados mostrados en la Tabla 17, el departamento de selección y empaque realizó el conteo de los calibres de las baldosas cerámicas, en la Tabla 18 se muestra los resultados:

Tabla 18: Conteo de baldosas.

Informe de calibres empacadora 1								
Fecha	Formato (cm)	Hora	Calibre 1 (%)	Calibre 2 (%)	Calibre 3 (%)	Calibre 4 (%)	Calibre 5 (%)	Calibre 6 (%)
28/7/22	45 x 45	9:00 a 10:00	0,07	7,63	55,34	34,82	2,14	0,00
		10:00 a 11:00	0,30	13,62	53,73	29,15	3,42	0,00
		11:00 a 12:00	0,00	5,97	49,19	40,69	4,16	0,00
29/7/22	45x45	9:00 a 10:00	0,00	0,46	36,33	53,80	9,34	0,06
		10:00 a 11:00	0,00	1,52	39,58	47,48	7,20	0,00
		11:00 a 12:00	0,00	0,95	49,32	44,52	5,22	0,00
1/8/22	45 x 45	9:00 a 10:00	8,13	15,59	37,98	36,32	1,82	0,17
		10:00 a 11:00	0,00	5,19	48,14	36,52	4,25	0,00
		11:00 a 12:00	0,46	23,31	51,93	23,88	0,41	0,00

Los resultados de la inspección de las piezas cerámicas producidas empleando las condiciones dadas en la Tabla 17, reflejaron mejoras en los calibres de producción, como se evidencia en la Tabla 18. En la fecha 1/08/22, se observa un aumento en el calibre 1 y calibre 2, atribuible a un arreglo en la prensa que causó una parada en la línea de producción y, como resultado, un vacío en el horno que afectó su estabilidad. Sin embargo, el resto de la tabla indica un aumento en el calibre central.

Como resultado de esta Tabla 18, se decidió aplicar en producción normal la Tabla 17 dando resultados favorables para la empresa, ya que un mes después de proporcionar dicha tabla al equipo responsable de la etapa de prensado, se observó un incremento del 7,84% en la producción del calibre central.

3.3 Etapa 3

Se recolectaron 456 datos de humedad del polvo atomizado durante el periodo definido, con estos datos se calculó los límite de control según las fórmulas de la Tabla 2 y las líneas de subdivisión, se construyó la carta de control de individuales y se graficaron en la misma los datos recolectados; en la Tabla 19 se presentan los valores de los LC y las líneas de subdivisión (que permiten subdividir al gráfico de control en 6 zonas para análisis de comportamientos no aleatorios), y en el Anexo I de presenta el gráfico de control inicial.

Tabla 19: Datos de límites de control.

LCS	7.31
LC	6.55
LCI	5.79
L1	6.80
L2	7.05
L3	6.04
L4	6.29

Se analizó el gráfico de control y se identificó que el mismo se encontraba fuera de control debido a que 1 punto (dato número 153) estaba fuera del LIC, los demás datos se encontraban dentro de los límites de control y cumplían con las reglas de aleatoriedad.

Aplicando lo señalado por Drew (2015) en el apartado 1.9.6.1, se procedió a eliminar el dato 153 y recalcular los límites de control y las líneas de subdivisión, se reconstruyó la carta de control y se graficaron los 455 datos; en la Tabla 20 se presentan los nuevos valores recalculados como parte de la etapa de ajuste y en el Anexo J se presenta el gráfico de control del primer ajuste.

Tabla 20: Datos de límites de control.

LCS	7.30
LC	6.55
LCI	5.80
L1	6.80
L2	7.05
L3	6.05
L4	6.30

Se analizó la variabilidad del nuevo gráfico generado identificando que el mismo se encontraba bajo control (Anexo K), por lo que se utilizaron los límites presentados en la Tabla 20 para generar la carta de control (en blanco) para la aplicación de la fase de control por parte de la empresa (Anexo L).

Complementariamente, en el Anexo M se presenta el gráfico de control del primer ajuste (bajo control) en el que se incluyeron los límites de especificación de la empresa, con el objeto de analizar el comportamiento del proceso de humedad del polvo atomizado en el prensado

frente a estas especificaciones, se identificó que el proceso se encuentra descentrado (hacia el límite inferior) con respecto a los límites de especificación como se muestra en la Figura 14, indicando así que la empresa debería tomar acciones correctivas en cuanto a los límites tratando de ajustarlos al comportamiento real de la variable.

CAPÍTULO IV

4 Conclusiones y recomendaciones**4.1 Conclusiones**

La comprensión y gestión de la estabilidad dimensional son fundamentales para mantener altos estándares de calidad en la producción de baldosas cerámicas, por lo que, el objetivo de este estudio fue establecer los límites de especificación de la humedad de polvo atomizado y presión de prensado con el fin de optimizar tiempos durante la producción, así, en base a los resultados, se concluye que:

Tanto la humedad como la presión son factores determinantes en la obtención de la densidad aparente en seco de las piezas cerámicas, evidenciándose una relación directa entre la presión usada y las densidades. Además, se encontró que, para un mismo valor de presión, las densidades se incrementan al disminuir la humedad del polvo atomizado.

La Tabla 17 se constituye como una herramienta decisiva en la gestión de la humedad del polvo atomizado, delineando un protocolo para un rango específico de humedad que se correlaciona directamente con una presión predefinida.

Después de un mes de aplicación de la Tabla 17, se alcanzó un avance en la estabilidad dimensional, con una mejora del 7.84% en el calibre central; aumentando la cantidad de baldosas cerámicas de primera calidad.

Se concluye que la variable del polvo atomizado se encuentra bajo control estadístico, esto luego de que se logró realizar la etapa de ajuste, realizando un ajuste al eliminar un punto que se encontró fuera del límite inferior de control; acto seguido, se armó una carta de control en blanco para realizar la etapa de control.

Se analiza y concluye que existe una descentralización hacia el límite inferior de los límites de control calculados contra los límites de especificación establecidos por la empresa y además existe un rango muy estrecho entre los límites de especificación (0,8) y un rango muy amplio de los límites de control (1,5), siendo esto una posible causa de la descentralización.

Con esto se cumplió el objetivo general de establecer los límites de especificación de la humedad de polvo atomizado y presión de prensado utilizados en relación a los valores determinados por la empresa de: densidad, absorción de agua y contracción de las baldosas

cerámicas para conseguir estabilidad dimensional y aplicar control estadístico a la variable de entrada (humedad) y a las baldosas cerámicas en función a la estabilidad dimensional.

4.2 Recomendaciones

- Es aconsejable seguir usando la Tabla 17 a nivel de producción debido a la mejora que se evidenció en el periodo de prueba.
- Se recomienda a la empresa tratar de centrar al proceso con respecto a las especificaciones o cambiar los límites de especificación a un rango más apropiado analizando el verdadero comportamiento de la variable analizada; para la toma de decisión de cualquiera de estas dos opciones sería necesario verificar si los límites de especificación versus calibre central estén cumpliendo con la estabilidad dimensional deseada.
- Además, es aconsejable realizar una investigación de correlación de los datos de humedad con el porcentaje de baldosas de calibre central.
- Se sugiere a la empresa la adopción de gráficos o cartas de control como parte integral de un proceso más eficaz de análisis de datos, ya sea para la humedad del polvo atomizado u otras variables que puedan surgir.
- Se recomienda a la empresa realizar un estudio similar al presente, pero considerando ya no la humedad del polvo sino la influencia de la distribución granulométrica del polvo atomizado con el que se llena el alveolo de la prensa.
- Tomando en cuenta el tiempo transcurrido desde la etapa de ajuste a la fecha actual se sugiere que se realice nuevamente la etapa de ajuste y aplicar el control del proceso de manera inmediata.
- Se recomienda revisar el diseño de la prensa debido a que no ejerce la misma presión a las tres baldosas cerámicas en un mismo ciclo de prensado.

Referencias

- Albaro, J. L. A., & Fuentes, A. B. (2010). ESTUDIO DE LA COMPACTACION DE SOPORTES CERÁMICOS (BIZCOCHOS) DE PAVIMENTO Y REVESTIMIENTO. I. INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE GRANULO DE ATOMIZADO.
- Albuja. (2016, mayo 4). Baldosa modular. Cauchos y Plásticos - CAELCA S.A.S. <https://caelca.com.co/baldosa-modular/>
- Amorós, J. L., Mallo, G., Llorens, D., Boix, J., Arnau, J. M., Feliu, C., Cerisuelo, J. A., & Gargallo, J. J. (2014). ESTUDIO DE LA OPERACIÓN DE PRENSADO DE BALDOSAS DE GRAN FORMATO UTILIZANDO LA ABSORCIÓN DE RAYOS X.
- Argoti Morales, M. A. (2019). Gráficos de control por atributos con curvas ARL cuasi insesgadas: Análisis y desarrollo de métodos. [Universitat Politècnica de València]. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/120025>
- Arias, A., Zaera, R., López-Puente, J., & Navarro, C. (2004). Fabricación y caracterización mecánica de un material compuesto de matriz polimérica y carga cerámica. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 43(2), 401-405. <https://doi.org/10.3989/cyv.2004.v43.i2.552>
- Barreno Robalino, J. P. (2010). Optimización del Proceso de Atomización en la Producción de Azulejos [bachelorThesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/241>
- Bernabeu, E. P., Cantó, M. Á. S., & Soler, V. G. (2012). LOS GRÁFICOS DE CONTROL POR ATRIBUTOS.
- Boix. (2014). (PDF) Medida de la densidad aparente de baldosas cerámicas de forma rápida, inocua y no destructiva | Juan Boix—Academia.edu. https://www.academia.edu/91136561/Medida_de_la_densidad_aparente_de_baldosas_cer%C3%A1micas_de_forma_r%C3%A1pida_inocua_y_no_destructiva?uc-g-sw=108257586

- Boix, J., Mallol, G., Aguilera, M., Hotza, D., Dolly, S., & Cantavella, V. (2014). ADECUACIÓN DE LAS TOLERANCIAS DIMENSIONALES DE LAS BALDOSAS CERÁMICAS A LA TIPOLOGÍA DE PRODUCTO Y A LAS CONDICIONES DE PROCESADO.
- Boix, J., Mallol, G., Aguilera, M., Hotza, D., Dolly, S., & Cantavella, V. (2021). ADECUACIÓN DE LAS TOLERANCIAS DIMENSIONALES DE LAS BALDOSAS CERÁMICAS A LA TIPOLOGÍA DE PRODUCTO Y A LAS CONDICIONES DE PROCESADO.
- Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. (2010). Bol. Soc. Esp. Ceram. V., 49.
- Bravo Saldaña, V. (2016, diciembre 6). HERRAMIENTAS DEL CONTROL ESTADÍSTICO DE LA CALIDAD. <https://es.linkedin.com/pulse/herramientas-del-control-estad%C3%ADstico-de-la-calidad-bravo-salda%C3%B1a>
- Bresciani, A., & Ricci, C. (2020). COMPACTACIÓN CONTINUA DE PLACAS CERÁMICAS REFORZADAS CON FIBRAS ALTAMENTE RESISTENTES. 16.
- Brito, F. (2017, marzo 7). ¿Qué son gráficos X-R? ¿Cómo interpretarlos? - Measure Control. <https://measurecontrol.com/que-es-un-grafico-x-r-como-interpretarlo/>
- Buenaño. (2019, marzo 20). ABSORCIÓN DE LAS BALDOSAS CERÁMICAS Y RECOMENDACIONES. <https://decorbagno.com/2019/03/absorcion-de-las-baldosas-ceramicas-y-recomendaciones/>
- Caprino. (2009, febrero 4). Engobe. Arteologic. <https://arteologic.com/ceramica/tecnicas-alfareria/engobe/>
- Carces. (2019, agosto 20). : IPC:: Uniformidad y estabilidad dimensional. http://www.ipc.org.es/guia_colocacion/info_tec_colocacion/introduccion_a/atributos/recubrimiento/atributos/uniformidad.html
- Carro Paz, R. (2011). Control estadístico de procesos.
- Cevallos Villavicencio, C. R., & Caiza López, D. P. (2019). Diseño y construcción de un molino de bolas, a escala de laboratorio, para la pulverización de arcillas utilizadas en trabajos de cerámica [bachelorThesis, Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)]. <http://localhost/handle/27000/5531>

- Contreras. (2016, febrero 11). Patrones en las Cartas de Control. Conceptos Ingeniería Industrial. <https://conceptosingenieraindustrial.wordpress.com/2016/02/11/patrones-en-las-cartas-de-control/>
- Cotino, J. (2009). Guía de las Mejores Técnicas Disponibles para la Fabricación de Baldosas Cerámicas—Web corporativa de CEPCO. http://www.cepco.es/noticia.asp?id_rep=3689
- Díez. (2021, agosto 12). Qué es el engobe cerámico y cómo utilizarlo © Díez Ceramic. Díez Ceramic. <https://diezceramic.com/engobe-ceramico/>
- Drew. (2015, marzo 4). Guía completa: Control estadístico de procesos en la línea de montaje. <https://blog.wearedrew.co/control-estadistico-de-procesos-en-la-linea-de-montaje>
- Effting, C., Alarcon, O. E., & Güths, S. (s. f.). INFLUENCIA DE LA POROSIDAD EN LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS PAVIMENTOS CERÁMICOS.
- Flores. (2022, septiembre 26). Graficos de Control Atributos y Variables. Mi Sitio. <https://www.xr-industrial.com/post/graficos-de-control>
- Formigine. (2015, noviembre 18). El proceso de fabricación de las baldosas de cerámica | PLATINUM. <https://www.platinum-pcs.com/es/proceso-productivo-baldosas-de-ceramica/>
- Galindo, R. (2018, noviembre 23). Diagramas de cocción. https://rafagalindoceramica.com/wp-content/uploads/2020/04/Diagramas_coccion.pdf
- García. (2017, noviembre 11). Construya Noticias. https://www.grupoconstruya.com.ar/notas/Informes_Detalles?CCTN=4581&CINF=400
- GREGORIOASUAREZ. (2018, mayo 22). Gráficos de Control p, de fracción defectuosa, por Macario Hernández Garza. QUALITY ROAD. <https://qualityway.wordpress.com/2018/05/21/graficos-de-control-p-de-fraccion-defectuosa-por-macario-hernandez-garza/>

Gromaz. (2019, mayo 13). ¿Cómo es el proceso de elaboración de baldosas?

<https://industriasgromaz.com/blog/proceso-elaboracion-baldosas>

Huffer. (2015). Cerámica de gran durabilidad Technology in detail.

<https://krohne.com/es/tecnologias/ceramica-de-gran-durabilidad>

Jérez. (2021, julio 7). Tipos de materiales cerámicos ☯ Blog Díez Ceramic. Díez Ceramic.

<https://diezceramic.com/tipos-materiales-ceramicos/>

Kerv. (2017, septiembre 29). Bandas transportadoras para granos y sus ventajas.

<https://gruponavarro.net/2023/10/09/ventajas-de-las-bandas-transportadoras-para-granos/>

Kozikova, V. (2013, noviembre 5). Estadística descriptiva.

<https://www.salusplay.com/apuntes/apuntes-metodologia-de-la-investigacion/tema-2-estadistica-descriptiva>

Leroy. (2023, agosto 22). Cómo se fabrican las baldosas y los azulejos | Leroy Merlin. Leroy

Merlin - Bricolaje, Decoración, Hogar, Jardín. <https://www.leroymerlin.es/ideas-y-consejos/consejos/como-se-fabrican-las-baldosas-y-los-azulejos.html>

Mallol, G., Llorens, D., Boix, J., Pascual, N., Poyatos, A., & Bonaque, R. (2012). MEDIDA Y CONTROL DE LA PRESIÓN MÁXIMA EN LOS ALVEOLOS DE UN MOLDE DE FABRICACIÓN DE BALDOSAS CERÁMICAS.

Mallol, G., Llorens, M., Boix, J., Arnau, J. M., & Foucard, L. (2010). MEDIDA DE LA DENSIDAD APARENTE DE BALDOSAS CERÁMICAS DE FORMA RÁPIDA, INOCUA Y NO DESTRUCTIVA.

Mayén González, J. (2015). Control estadístico del proceso. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Departamento de Sistemas. <http://zaloamati.azc.uam.mx//handle/11191/449>

Medina, T. A., Vázquez, M., & Leiva, L. (2022). Sistema de inspección de defectos en baldosas cerámicas implementado en FPGA. *Elektron*, 6(1), Article 1. <https://doi.org/10.37537/rev.elektron.6.1.144.2022>

- Molina. (2017, enero 21). Molienda y atomización. ICF & Welko. <https://www.icf-welko.it/es/ceramic-es/productos/molienda-y-atomizacion/>
- Montiel, M. (2016, septiembre 14). Grafica de Medias y Rangos | PDF | Calidad (comercial) | Medición. Scribd. <https://es.scribd.com/presentation/324024228/Grafica-de-Medias-y-Rangos>
- Moreno Quintero, M. P., Pabón Acevedo, Y. A., Cely Illera, L., & Cely Niño, J. (2019). Influencia de la molienda húmeda en el comportamiento estructural y mecánico de productos cerámicos conformados por extrusión de una arcilla del Zulia (Norte de Santander, Colombia). *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 58(5), 190-198. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2019.01.001>
- Naxa. (2021, septiembre 24). La clasificación de las baldosas de cerámica. Platinum. <https://www.platinum-pcs.com/es/clasificacion-de-las-baldosas-en-ceramica/>
- Nebot, J. V. A., Pastor, C. V., Bellido, G. M. B., & Mira, J. S. (2015a). Estudio de los factores de transmisión de la variabilidad dimensional en la fabricación de baldosas cerámicas.
- Nebot, J. V. A., Pastor, C. V., Bellido, G. M. B., & Mira, J. S. (2015b). Estudio de los factores de transmisión de la variabilidad dimensional en la fabricación de baldosas cerámicas.
- Noem. (2021, junio 7). Proceso de Fabricación de Baldosas Cerámicas—Blog Construmatica. <https://www.construmatica.com/blog/proceso-de-fabricacion-de-baldosas-ceramicas/>
- Oier. (2023, febrero 20). Baldosas cerámicas: Conceptos básicos, tipos y características. RUBI Blog ES. <https://www.rubi.com/es/blog/baldosas-ceramicas/>
- Paguay. (2013, junio 8). Gráficos de control C. <https://www.uv.es/ceaces/calidad/t5/c.htm>
- Parker. (2022, enero 11). La cerámica es decorativa, sostenible, durable e higiénica. <https://mindtile.com/es/actualidad/cuales-son-las-propiedades-de-las-baldosas-de-ceramica>
- Pelial. (2015, marzo 5). Graficos de control P. <https://www.uv.es/ceaces/calidad/t5/p.htm>
- Penuela, M. (2013, diciembre 3). BALDOSAS CERÁMICAS (AZULEJOS). <https://es.slideshare.net/mpenuela/baldosas-ceramicas-azulejos>

- Peyato, P. (2023, junio 21). ▷ Límites de Control. Probabilidad y Estadística.
<https://www.probabilidadyestadistica.net/limites-de-control/>
- Poyatos, A., Bonaque Rodríguez, R., Mallol Gasch, G., & Boix, J. (2010). New system and methodology for avoiding calibers in ceramic tile production.
https://core.ac.uk/display/61397731?utm_source=pdf&utm_medium=banner&utm_campaign=pdf-decoration-v1
- Pulido, H. G. (2010). Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma.
- Quintuña, C., Torres, D., & Tripaldi, D. P. (2004). TEMA: ESTUDIO DEL ACOPLAMIENTO ENTRE SOPORTE-ENGOBE Y ESMALTE.
- Quintuña, C., Torres, D., & Tripaldi, D. P. (2018). TEMA: ESTUDIO DEL ACOPLAMIENTO ENTRE SOPORTE-ENGOBE Y ESMALTE.
- Rodríguez, A. I. P., & Franco, J. R. (2009). Control estadístico de la calidad de un servicio mediante Gráficas X y R.
- Sacmi. (2004). Tecnología Cerámica Aplicada II SACMI | PDF | Automatización | Cerámica.
<https://es.scribd.com/document/507512524/Tecnologia-ceramica-aplicada-II-SACMI>
- Salamanca, N. (2016, marzo 4). (PDF) Leccion10.Baldosas Ceramicas | Noemi Salamanca—Academia.edu.
https://www.academia.edu/24659256/Leccion10_Baldosas_Ceramicas
- Sánchez, J. (1994). ESTUDIO DE LA DINAMICA DEL CICLO DE PRENSADO Y SU INFLUENCIA SOBRE LA COMPACTACION DE BALDOSAS CERAMICAS MEDIANTE LA SENSORIZACION DE UNA PRENSA INDUSTRIAL. Qualicer.
<https://www.qualicer.org/recopilatorio/ponencias/pdfs/9423051s.pdf>
- Sandoval, F., & Ibáñez Rodríguez, A. (2000). Discusión sobre la influencia de la porosidad en la resistencia mecánica de las baldosas cerámicas.
<https://digital.csic.es/handle/10261/14958>

- Shihua. (2018, marzo 8). Azulejo de cerámica básico formación método—Conocimiento—Industrial Co., Ltd de Foshan Hanse. <http://www.hanse-tile.com/info/ceramic-tile-basic-forming-method-24603383.html>
- Tabel. (2018, mayo 5). Gráficas de control de variables en Minitab [Mtbtopic]. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/20/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/control-charts/supporting-topics/understanding-variables-control-charts/variables-control-charts-in-minitab/>
- Tellez, E. (2016). Patron de descontrol. https://www.academia.edu/15460303/Patron_de_descontrol
- Teran, A. (2017, noviembre). Construya Noticias. https://www.grupoconstruya.com.ar/notas/Informes_Detalles?CCTN=4581&CINF=400
- Terjam. (2018). Características Físicas y Mecánicas de las Baldosas. Ensayos—Construmatica. https://www.construmatica.com/construpedia/Caracter%C3%ADsticas_F%C3%ADsticas_y_Mec%C3%A1nicas_de_las_Baldosas._Ensayos
- Tortajada, I., Peris-Fajarnés, G., Aguilar, M., & Latorre, P. (2006). Análisis del proceso de clasificación cerámico. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 45(1), 22-27. <https://doi.org/10.3989/cyv.2006.v45.i1.324>
- Toscana, L. (2014, marzo 4). Límites de advertencia | Accu-Chek Academy. <https://accu-chek.academy/es/handbook/48851/view/50501.613291>

Anexos

Anexo A. Tabla de los rangos de las características de la barbotina y del polvo atomizado.

Tabla 21: Rangos de barbotina y polvo atomizado.

Rango	Barbotina			Humedad (%)	Polvo Atomizado					
	Residuo (g)	Tiempo de escurrido (s)	Densidad (Kg/m ³)		Malla AST M 10 (g)	Malla AST M 40 (g)	Malla ASTM 100 (g)	Malla ASTM 200 (g)	Malla ASTM 325 (g)	Fondo (g)
Inferior	1,80	25	1630	5,50	0,80	28,45	19,80	21,00	13,00	3,55
Superior	3,20	40	1655	7,50	2,50	35,50	24,50	26,50	20,00	5,90

Anexo B. Resultados de pruebas del polvo atomizado a distintas humedades por duplicado.

Tabla 22: Resultados de pruebas duplicadas con humedad del 5%

Humedad (%)	5				
Presión (Kg/cm ²)	203	268	369	470	570
DAP Verde (Kg/m ³)	1827	1878	1938	1980	1991
DAP Seco (Kg/m ³)	1824	1876	1930	1974	1989
DAP Seco (Kg/m ³)	1764	1810	1869	1910	1930
Contracción (%)	8,33	7,90	8,00	7,18	6,91
Absorción de agua (%)	8,30	7,84	7,00	7,06	6,81
Absorción de agua (%)	7,40	6,20	5,50	4,15	3,9
Absorción de agua (%)	7,31	6,18	4,48	3,99	4,03

Tabla 23: Resultados de pruebas duplicadas con humedad del 6%

Humedad (%)	6				
Presión (Kg/cm2)	203	268	369	470	570
DAP Verde (Kg/m3)	1866	1915	1976	2020	2039
	1862	1907	1966	2014	2037
DAP Seco (Kg/m3)	1790	1850	1895	1930	1960
	1798	1834	1897	1934	1956
Contracción (%)	7,45	8,04	7,28	6,80	6,70
	9,40	7,62	7,30	6,92	6,74
Absorción de agua (%)	3,14	2,75	2,00	1,66	1,10
	3,94	2,72	2,14	1,64	1,16

Tabla 24: Resultados de pruebas duplicadas con humedad del 7%

Humedad (%)	7				
Presión (Kg/cm2)	203	268	369	470	570
DAP Verde (Kg/m3)	1920	1971	2020	2060	2089
	1928	1973	2030	2068	2087
DAP Seco (Kg/m3)	1825	1870	1925	1966	1970
	1827	1865	1927	1964	1986
Contracción (%)	7,37	7,00	6,88	6,80	6,30
	8,37	7,80	6,94	6,92	7,29
Absorción de agua (%)	5,89	4,99	3,83	3,70	2,70
	6,69	5,03	3,83	3,74	2,74

Anexo C. Datos de: humedad de polvo, presión de prensa y densidades aparentes en verde y en seco, porcentaje de contracción y porcentaje de absorción de agua de baldosas de formato 45 x 45 cm.

Tabla 25: Datos de densidad aparente (DAP) en verde.

FECHA	PRESIÓN (kg/cm ²)	HUMEDAD (%)	DAP VERDE T1 (kg/m ³)	DAP VERDE T2 (kg/m ³)	DAP VERDE T3 (kg/m ³)	PROMEDIO
6/4/2022	350	6.7	1953	1959	1957	1956
6/4/2022	365	6.7	1983	1989	1989	1987
6/4/2022	335	6.6	1975	1980	1981	1979
7/4/2022	365	6.5	1993	2004	1999	1999
7/4/2022	350	6.6	1991	1992	1996	1993
11/4/2022	365	6.6	1981	1996	1988	1988
11/4/2022	350	6.6	1976	1994	1983	1984
12/4/2022	350	6.6	1982	1995	1985	1987
12/4/2022	335	6.5	1979	1986	1981	1982
13/4/2022	350	6.5	1979	1980	1982	1980
13/4/2022	335	6.5	1971	1974	1977	1974
14/4/2022	335	6.8	1964	1955	1968	1962
14/4/2022	350	6.8	1964	1958	1965	1962
14/4/2022	365	6.8	1974	1965	1974	1971

Tabla 26: Datos de densidad aparente (DAP) en seco.

FECHA	PRESIÓN (kg/cm ²)	HUMEDAD (%)	DAP SECO T1 (kg/m ³)	DAP SECO T2 (kg/m ³)	DAP SECO T3 (kg/m ³)	PROMEDIO
6/4/2022	350	6.7	1882	1887	1885	1885
6/4/2022	365	6.7	1892	1895	1894	1894
6/4/2022	335	6.6	1872	1876	1878	1875
7/4/2022	365	6.5	1894	1903	1897	1898
7/4/2022	350	6.6	1889	1896	1893	1893
11/4/2022	365	6.6	1879	1864	1883	1885
11/4/2022	350	6.6	1871	1887	1876	1878
12/4/2022	350	6.6	1852	1864	1856	1857
12/4/2022	335	6.5	1872	1880	1875	1876
13/4/2022	350	6.5	1874	1875	1877	1875
13/4/2022	335	6.5	1869	1869	1872	1870
14/4/2022	335	6.8	1863	1855	1865	1861
14/4/2022	350	6.8	1868	1863	1872	1868
14/4/2022	365	6.8	1875	1868	1878	1874

Anexo D. Tabla de datos del porcentaje de contracción lineal tras la quema de las tres baldosas cerámicas.

Tabla 27: Datos del porcentaje de contracción lineal (C.L) tras la quema.

FEC HA	PRESIÓN N (kg/cm ²)	HUMEDA D (%)	C.L QUEMA T1 (%)	C.LQUEMA T2 (%)	C.L QUEMA T3 (%)	PROMEDI O
6/4/2 2	350	6.7	7.04	7.13	7.22	7.13
6/4/2 2	365	6.7	6.98	6.90	7.06	6.98
7/4/2 2	365	6.5	7.01	7.03	7.04	7.03
11/4/ 22	365	6.6	7.43	7.18	7.33	7.31
6/4/2 2	335	6.6	6.99	6.98	7.00	6.99
7/4/2 2	350	6.6	7.14	7.06	7.06	7.09
11/4/ 22	350	6.6	7.49	7.32	7.37	7.39
12/4/ 22	350	6.6	7.42	7.28	7.32	7.34
12/4/ 22	335	6.5	7.44	7.37	7.41	7.41
13/4/ 22	350	6.5	7.19	7.16	7.14	7.16
13/4/ 22	335	6.5	7.26	7.24	7.24	7.25
14/4/ 22	335	6.8	7.14	7.13	7.09	7.12
14/4/ 22	350	6.8	7.31	7.34	7.216	7.30
14/4/ 22	365	6.8	7.20	7.30	7.10	7.20

Anexo E. Tabla de datos del porcentaje de absorción de agua de las tres baldosas cerámicas.

Tabla 28: Datos del porcentaje de absorción de agua (A.A).

FECHA	PRESIÓN (kg/cm ²)	HUMEDAD (%)	A.A T1 (%)	A.A T2 (%)	A.A T3 (%)	PROMEDIO
6/4/22	350	6.7	3.95	4.22	3.97	4.05
6/4/22	365	6.7	3.98	3.97	4.06	4.00
6/4/22	335	6.6	4.78	4.55	4.58	4.64
7/4/22	365	6.5	4.33	4.36	4.18	4.29
7/4/22	350	6.6	4.36	4.4	4.38	4.38
11/4/22	365	6.6	3.23	3.24	3.23	3.23
11/4/22	350	6.6	3.25	3.25	3.29	3.26
12/4/22	350	6.6	4.24	4.48	4.28	4.33
12/4/22	335	6.5	4.33	4.13	4.26	4.24
13/4/22	350	6.5	4.24	4.14	4.37	4.25
13/4/22	335	6.5	4.24	4.24	4.31	4.26
14/4/22	335	6.8	4.39	4.47	4.25	4.37
14/4/22	350	6.8	4.12	4.09	4.08	4.10
14/4/22	365	6.8	4.03	4.19	4.35	4.19

Anexo F. Medidas de las tres baldosas cerámicas tras la quema

Tabla 29: Datos de las medidas de las tres baldosas cerámicas.

FECHA	PRESIÓN (kg/cm ²)	HUMEDAD (%)	MEDIDA T1 (mm)	MEDIDA T2 (mm)	MEDIDA T3 (mm)
6/4/2022	350	6.7	450.05	449.61	449.35
6/4/2022	365	6.7	450.35	4503.79	450.09
6/4/2022	335	6.6	450.13	450.20	450.22
7/4/2022	365	6.5	450.18	450.06	450.18
7/4/2022	350	6.6	449.48	449.78	449.92
11/4/2022	365	6.6	448.02	449.19	448.62
11/4/2022	350	6.6	447.72	448.51	448.36
12/4/2022	350	6.6	448.11	448.83	448.56
12/4/2022	335	6.5	447.98	448.20	448.03
13/4/2022	350	6.5	449.28	449.35	449.55
13/4/2022	335	6.5	449.00	449.00	449.10

14/4/2022	335	6.8	449.31	449.33	449.50
14/4/2022	350	6.8	448.51	448.31	448.71

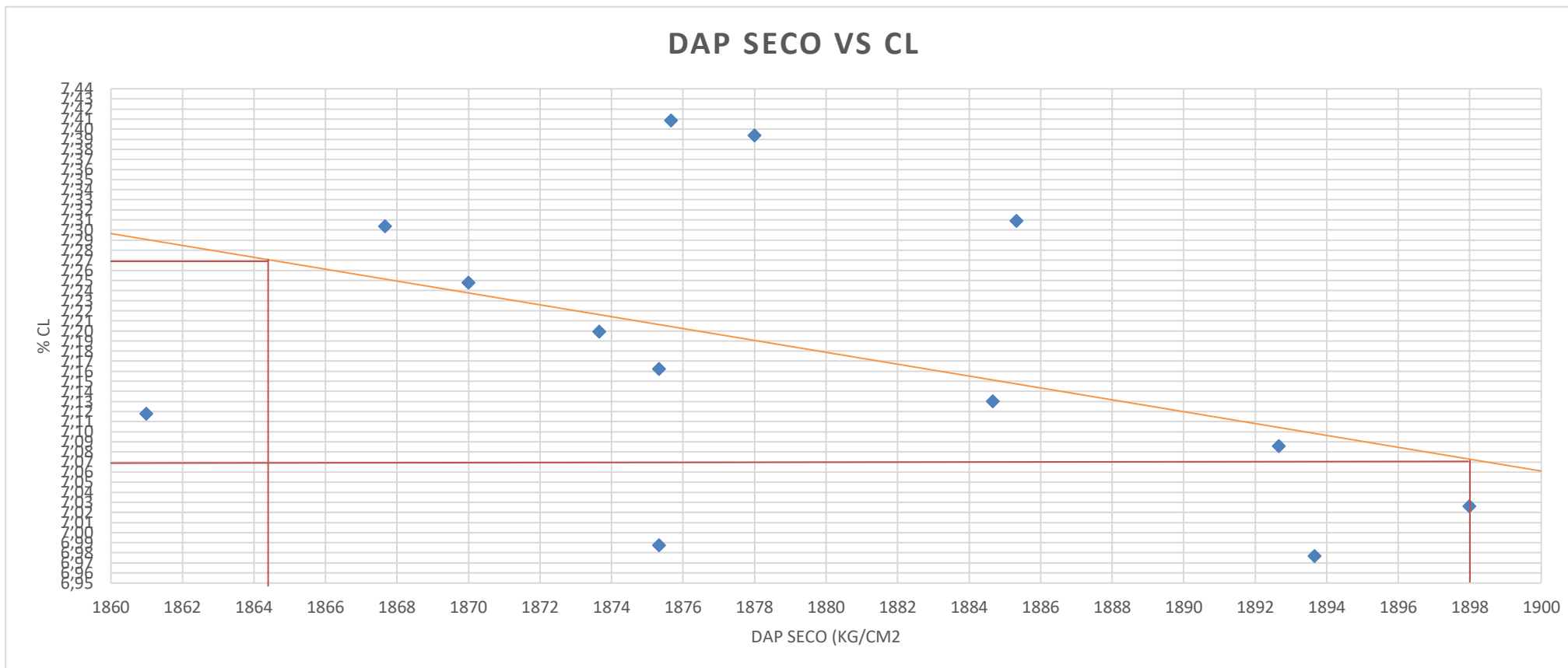
Anexo G. Tabla de datos de los calibres correspondientes a cada baldosa cerámica.

Tabla 30: Datos de los calibres de las tres baldosas cerámicas.

FECHA	PRESIÓN (kg/cm²)	HUMEDAD (%)	CALIBRE T1	CALIBRE T2	CALIBRE T3
6/4/22	350	6.7	3	3	2
6/4/22	365	6.7	3	4	3
6/4/22	335	6.6	3	3	3
7/4/22	365	6.5	3	3	3
7/4/22	350	6.6	2	3	3
11/4/22	365	6.6	1	2	2
11/4/22	350	6.6	1	2	1
12/4/22	350	6.6	1	2	2
12/4/22	335	6.5	1	1	1
13/4/22	350	6.5	2	2	3
13/4/22	335	6.5	2	2	2
14/4/22	335	6.8	2	2	3
14/4/22	350	6.8	2	1	2
14/4/22	365	6.8	2	2	2

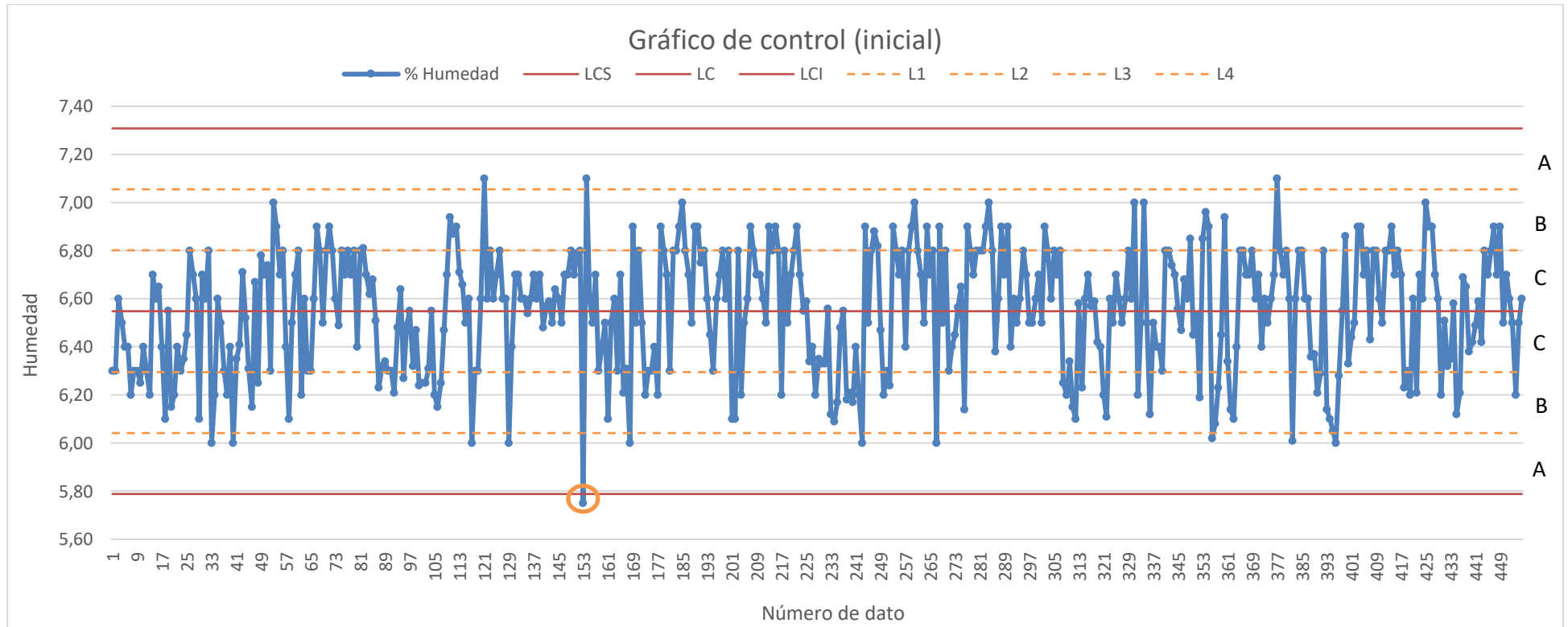
Anexo H. Gráfico de densidad aparente en seco versus porcentaje de contracción lineal.

Figura 9: Densidad aparente en seco vs contracción lineal



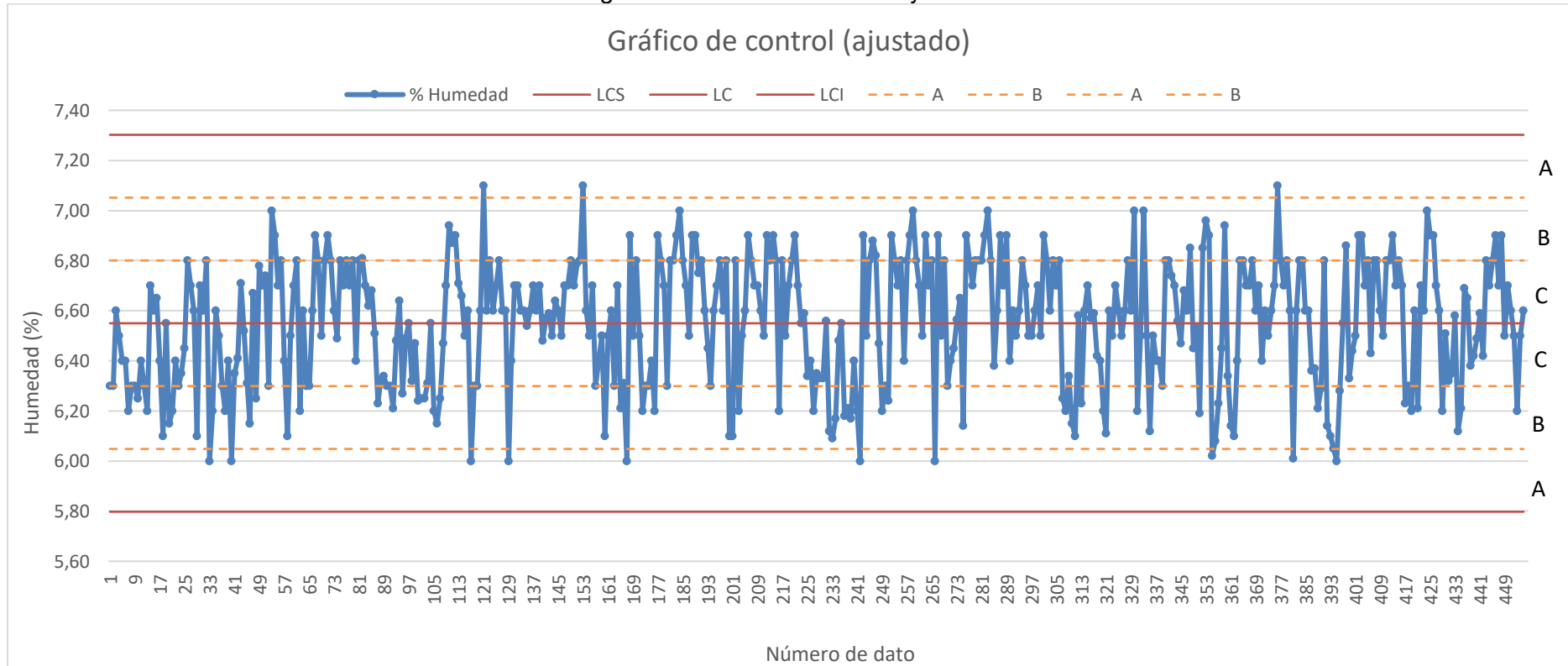
Anexo I. Carta de control en la etapa de ajuste.

Figura 10: Gráfico de control en la etapa de ajuste



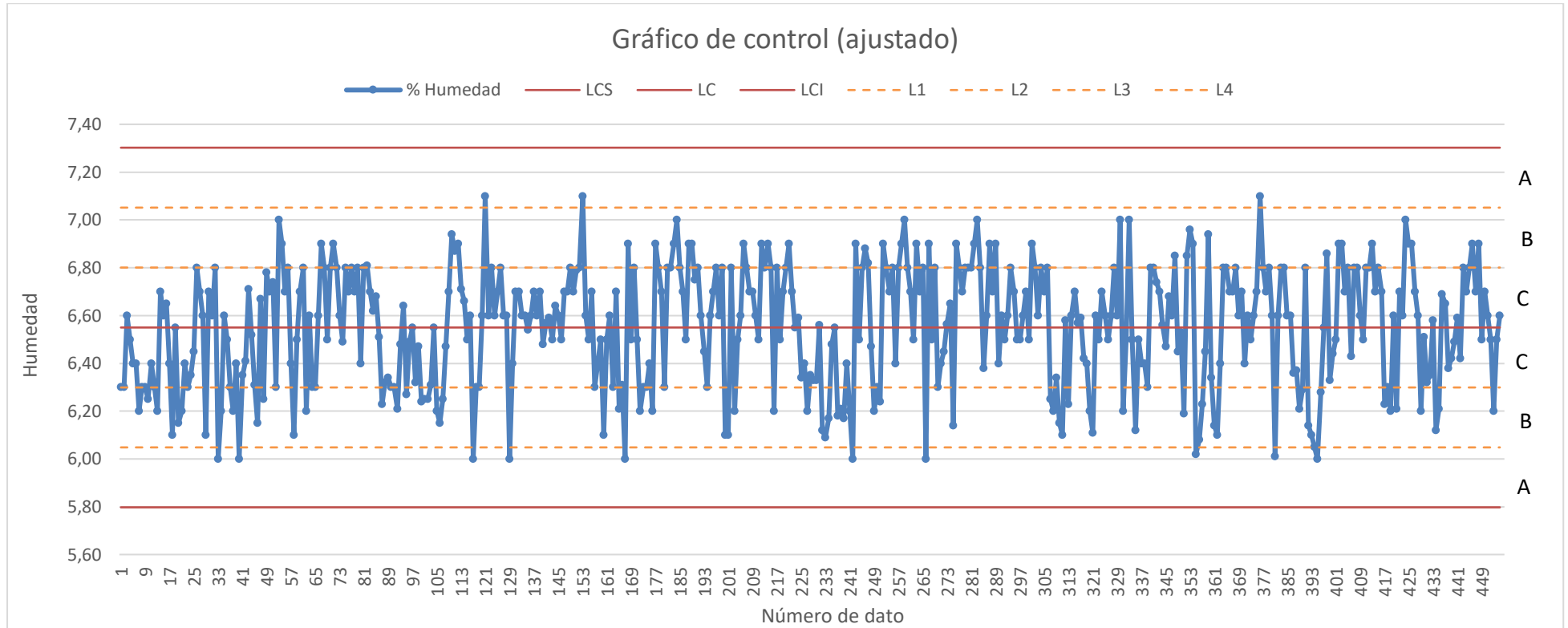
Anexo J. Carta de control reajustada.

Figura 11: Gráfico de control ajustado.



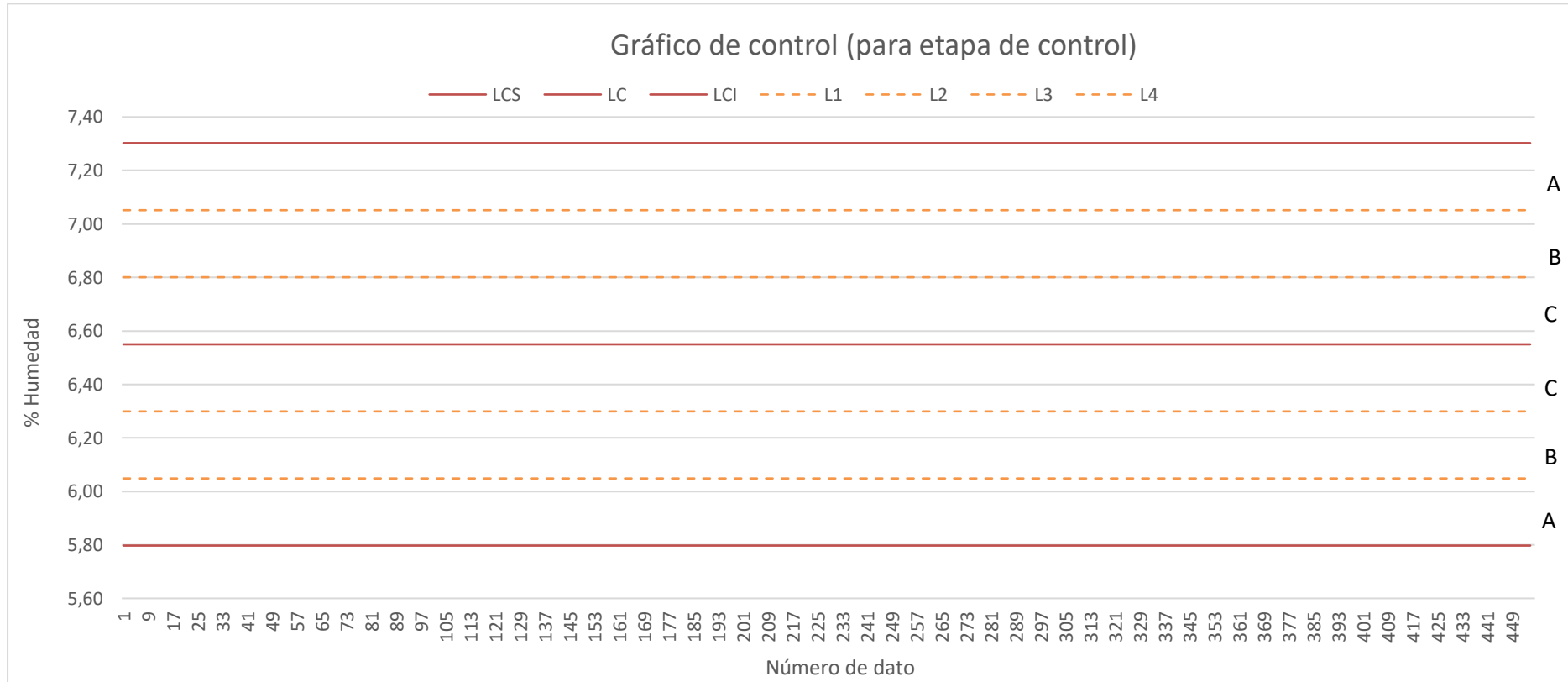
Anexo K. Gráfico de control ajustado

Figura 12: Gráfico de control ajustado y bajo CE.



Anexo L. Carta de control en blanco para etapa de control.

Figura 13: Gráfico de control en blanco para la etapa de control.



Anexo M. Comparación de Límites de Especificación contra Límites de Control calculados.

Figura 14: Gráfico de comparación de límites.

