



Universidad de Cuenca

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Química

Análisis comparativo para la optimización del defloculante usado en la etapa de molienda para la elaboración de baldosas en una empresa cerámica

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

Autores:

Mishel Estefanía Carabajo Carangui

Diana Carolina Idrovo Quilambaqui

Director:

Sandra Catalina Peñaherrera Palacios

ORCID:  0000-0002-1054-4605

Cuenca, Ecuador

2023-10-31

Resumen

El sector cerámico es una de las industrias más relevantes en la economía del país, su constante crecimiento conlleva a las empresas productoras de cerámica plana a optimizar sus procesos y ser más eficientes. En las etapas productivas de molienda por vía húmeda y atomizado, una de las variables más importantes es el defloculante; el cual mejora la reología de la barbotina, permitiendo usar la menor cantidad de agua posible, lo que implica disminuir la cantidad de agua a eliminar durante el proceso de atomizado, reflejado en un menor consumo energético. En este trabajo de titulación se determinó la dosificación óptima de la mezcla de defloculantes, usando silicato de sodio y poliacrilato de sodio de diferentes proveedores y cumpliendo los requisitos fisicoquímicos para la barbotina preestablecidos por la empresa.

Para la tecnología de porcelanato, las dos mezclas óptimas de defloculantes fueron: 1) 75% silicato de sodio y 25% polímero español y 2) 95% silicato de sodio y 5% polímero mexicano, logrando incrementar la producción de polvo atomizado en 1.55% y 2.54%, respectivamente y un ahorro económico total anual del 4.52% y 17.68%, en cada caso. Por otro parte, en la tecnología de gres, las mezclas óptimas fueron: 1) 75% silicato de sodio y 25% polímero español y 2) 90% silicato de sodio y 10% polímero mexicano, aumentando la producción de polvo atomizado en un 3.05% y 1.74% con cada mezcla, ligado a un ahorro económico total anual del 7.29% y 18.45%, respectivamente.

Palabras clave: proceso industrial, compuestos químicos, optimización de material, proceso de producción



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 ceramic sector is one of the most relevant industries within the country's economy. Its constant growth leads companies producing flat ceramic to optimize their processes and become increasingly more efficient. Then, in the wet grinding and atomizing stages, one of the important variables to control is the deflocculant, which improves the rheology of the ceramic suspension using the least amount of water possible therefore less water to eliminate during atomization, reflected in lower energy consumption. In this degree work, the optimal dosage of the mixture of deflocculants with sodium silicate and sodium polyacrylate from different suppliers was determined, complying with the physicochemical requirements for barbotine established by the company.

For the porcelain technology, the two optimal mixtures of deflocculants were: 1) 75% sodium silicate and 25% Spanish polymer and 2) 95% sodium silicate and 5% Mexican polymer, managing to increase the production of atomized powder by 1.55% and 2.54%, respectively, and a total annual economic savings of 4.52% and 17.68%, in each case. On the other hand, in stoneware technology, the optimal mixtures were: 1) 75% sodium silicate and 25% Spanish polymer and 2) 90% sodium silicate and 10% Mexican polymer, increasing the production of atomized powder by 3.05 % and 1.74% with each mixture, linked to a total annual economic savings of 7.29% and 18.45%, respectively.

Keywords: industrial process, chemical compounds, material optimization, production process



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/>

Índice de contenido

Resumen	2
Abstract	3
Índice de contenido	4
Índice de figuras	8
Dedicatoria	11
Agradecimiento	12
Agradecimiento	13
Introducción	14
Objetivos.....	15
Objetivo general.....	15
Objetivos específicos.....	15
CAPÍTULO I.....	16
Marco teórico.....	16
1.1 PROCESO GENERAL DE FABRICACIÓN DE LAS BALDOSAS CERÁMICAS	16
1.2 MATERIAS PRIMAS CERÁMICAS.....	18
1.2.1 Materias primas plásticas	18
1.2.2 Materias primas no plásticas o desengrasantes.....	20
1.3 MATERIAS PRIMAS AUXILIARES.....	21
1.3.1 Agua.....	21
1.3.2 Aditivos.....	22
1.4 SUSPENSIONES CERÁMICAS	22
Conceptos generales	22
1.5 MECANISMOS DE DEFLOCULACIÓN	23
1.5.1 Tipos de defloculante.....	24
1.6 REOLOGÍA DE LAS SUSPENSIONES CERÁMICAS	25
1.6.1 Tixotropía	27
1.6.2 Viscosidad.....	27
1.7 Características de la barbotina que va a ser atomizada	29
CAPÍTULO II.....	31

Metodología.....	31
2.1 CONDICION DEL AGUA DE MOLIENDA	31
2.2 PREPARACIÓN DEL DEFLOCULANTE	31
2.3 PREPARACIÓN DE LA BARBOTINA: MOLIENDA VÍA HÚMEDA.....	32
2.3.1 Dosificación de cada materia prima:	32
2.3.2 Dosificación de agua:	32
2.3.3 Dosificación del defloculante:	32
2.3.4 Carga y descarga del molino:.....	32
2.3.5 Medida del residuo:	33
2.4 CARACTERIZACIÓN DE LA SUSPENSIÓN	33
2.4.1 Medida del tiempo de flujo:.....	33
2.4.2 Medida de la densidad:.....	33
2.4.3 Medida del contenido de sólidos:	34
2.5. CURVAS DE DEFLOCULACIÓN.....	34
2.6. ENSAYO DE ROBUSTEZ.....	34
2.7. PRUEBA INDUSTRIAL Y ANÁLISIS ECONÓMICO	35
2.7.1 Cálculo y análisis del costo de defloculante en la etapa de molienda	35
-Cálculo del costo unitario de las mezclas de defloculantes:	35
-Cálculo del costo de las mezclas de defloculantes en la molienda: el costo productivo de las mezclas se realizó a partir del porcentaje de adición de defloculante actual, el tonelaje del molino en kg/h y el costo por kilogramo de mezcla de defloculante, siguiendo la presente fórmula:	35
2.7.2 Prueba industrial:	35
2.7.3 Análisis del consumo y costo de combustible en la etapa de atomizado:	36
CAPÍTULO III.....	37
Resultados y discusión	37
3.1 CONDICIONES estandar De la barbotina	37
3.2 CURVAS DE DEFLOCULACIÓN PARA PORCELANATO	37
3.2.1 Curvas de defloculación utilizando poliacrilato de sodio del proveedor español ...	37

3.2.2 Resultados del estudio de robustez para porcelanato utilizando poliacrilato de sodio del proveedor español.....	40
3.2.3 Curvas de defloculación utilizando poliacrilato de sodio del proveedor mexicano	42
3.2.4 Resultados del estudio de robustez para porcelanato utilizando poliacrilato de sodio del proveedor mexicano.....	44
3.3 RESULTADOS DEL ANÁLISIS ECONÓMICO PARA LA TECNOLOGÍA DE PORCELANATO.....	46
3.3.1 Resultados del análisis económico en la etapa de molienda utilizando el polímero español.....	46
3.3.2 Resultados de la prueba industrial en porcelanato.....	48
3.3.3 Resultados del análisis económico en la etapa de atomizado utilizando el polímero español.....	49
3.3.4 Resultados del análisis económico en la etapa de molienda utilizando el polímero mexicano.....	50
3.3.5 Resultados del análisis económico en la etapa de atomizado utilizando el polímero mexicano.....	52
3.4 RESULTADOS CURVAS DE DESFLOCULACIÓN PARA GRES.....	53
3.4.1 Curvas de defloculación utilizando poliacrilato de sodio del proveedor español ...	53
3.4.2 Resultados del estudio de robustez para gres utilizando poliacrilato de sodio del proveedor español	55
3.4.3 Curvas de defloculación utilizando poliacrilato de sodio del proveedor mexicano para gres.....	57
3.4.4 Resultados del estudio de robustez para gres utilizando poliacrilato de sodio del proveedor mexicano	59
3.5 Resultados del análisis económico para la tecnología de gres	62
3.5.1 Resultados del análisis económico en la etapa de molienda utilizando el polímero español.....	62
3.5.2 Resultados de la prueba industrial en gres.....	63
3.5.3 Resultados del análisis económico en la etapa de atomizado utilizando el polímero español.....	63
3.5.4 Resultados del análisis económico en la etapa de molienda utilizando el polímero mexicano.....	65

3.5.5 Resultados del análisis económico en la etapa de atomizado utilizando el polímero mexicano	66
CAPÍTULO IV	69
4.1 Conclusiones	69
4.2 Recomendaciones	70
Referencias	71
Anexos	75

Índice de figuras

Figura 1: Teoría de la doble capa. Fuente: Instituto de tecnología cerámica, 2019.	23
Figura 2: Comportamiento de los fluidos newtonianos y no newtonianos. Fuente: Instituto de Tecnología Cerámica, 2019.	27
Figura 3: Relación del contenido de sólidos con la viscosidad. Fuente: Barba, et al., 2002.	28
Figura 4: Curvas de defloculación utilizando diferentes defloculante. Fuente: Bernardin, Casagrande & Riella, 2006.	29
Figura 5: Curvas de defloculación utilizando mezclas con el poliacrilato del proveedor español.	38
Figura 6: Curvas de defloculación con mezclas iniciales e intermedias.	39
Figura 7: Curvas de defloculación con la mezcla S75%-P25% aumentando el contenido de sólidos en la barbotina.	40
Figura 8: Curvas de defloculación con la mezcla S65%-P35% aumentando el contenido de sólidos en la barbotina.	41
Figura 9: Curvas de defloculación utilizando mezclas con el poliacrilato del proveedor mexicano.	42
Figura 10: Curvas de defloculación con mezclas iniciales e intermedias usando el polímero mexicano.	43
Figura 11: Curvas defloculación con la mezcla S95%-PMX5% aumentando el contenido de sólidos en la barbotina.	44
Figura 12: Curvas de defloculación con la mezcla S90%-PMX10% aumentando el contenido de sólidos en la barbotina.	45
Figura 13: Curvas de defloculación utilizando mezclas con el poliacrilato español para gres.	54
Figura 14: Curvas de defloculación con mezclas iniciales e intermedias para gres.	55
Figura 15: Curvas de defloculación con la mezcla S75%-P25% aumentando el contenido de sólidos para gres.	56
Figura 16: Curvas de defloculación con la mezcla S65%-P35% aumentando el contenido de sólidos para gres.	57
Figura 17: Curvas de defloculación utilizando mezclas con el poliacrilato del proveedor mexicano para gres.	58
Figura 18: Curvas de defloculación con mezclas iniciales e intermedias usando el polímero mexicano para gres.	59
Figura 19: Curvas defloculación con la mezcla S90%-PMX10% aumentando el contenido de sólidos en la barbotina para gres.	60
Figura 20: Curvas de defloculación con la mezcla S85%-PMX15% aumentando el contenido de sólidos en la barbotina para gres.	61

Índice de tablas

Tabla 1: Mecanismos de acción de los defloculante.	25
Tabla 2: Porcentajes de dosificado para las mezclas de defloculante.....	32
Tabla 3: Condiciones de molienda para cada tecnología establecidos por la empresa.....	33
Tabla 4 Condiciones iniciales de la barbotina para la tecnología de porcelanato y gres	37
Tabla 5: Especificaciones técnicas de la molienda y parámetros actuales.	40
Tabla 6: Resumen de las mezclas óptimas para porcelanato.....	46
Tabla 7: Costos por kilogramo de aditivo.....	46
Tabla 8: Costos de las mezclas de defloculantes por kilogramo usando el polímero español.	47
Tabla 9: Condiciones del molino como promedio trimestral.	47
Tabla 10: Costo de las mezclas con poliacrilato español para porcelanato.	47
Tabla 11: Condiciones del molino prueba industrial mezcla 75%-25% para porcelanato.....	48
Tabla 12: Costo productivo de las mezclas con un tonelaje de 12.3 ton/h disminuyendo el porcentaje de adición de defloculante.	48
Tabla 13: Condiciones de la barbotina y polvo atomizado.	49
Tabla 14: Resultados del costo y consumo de combustible.....	49
Tabla 15: Resumen de costos.....	50
Tabla 16: Costos de las mezclas óptimas con el polímero mexicano.....	50
Tabla 17: Costos de las mezclas con 0.75% de defloculante usando el polímero mexicano.	51
Tabla 18: Costo anual de las mezclas disminuyendo el porcentaje de adición de defloculante.	51
Tabla 19: Condiciones de la barbotina y polvo atomizado con la mezcla óptima usando el polímero mexicano.	52
Tabla 20: Resultados del consumo y costo del combustible comparado con el estándar. ...	52
Tabla 21: Resumen de costos totales utilizando el polímero mexicano.	53
Tabla 22: Resumen de las mezclas óptimas para gres.....	61
Tabla 23: Condiciones del molino como promedio trimestral para gres.	62
Tabla 24: Costos productivos de las mezclas con defloculante español para gres.	62
Tabla 25: Condiciones del molino prueba industrial mezcla 75-25% para gres.	63
Tabla 26: Costos productivos de las mezclas con tonelaje de 14.6 ton/h disminuyendo el porcentaje de adición de defloculante.	63
Tabla 27: Condiciones de la barbotina y polvo atomizado para gres.	64
Tabla 28: Resultados del costo y consumo de combustible en gres.	64
Tabla 29: Resumen de condiciones de la barbotina y costos totales.	65
Tabla 30: Costos de las mezclas óptimas con el polímero mexicano para gres.	65

Tabla 31: Costos de las mezclas con 0.95% de defloculante usando el polímero mexicano para gres.	65
Tabla 32: Costo anual de las mezclas disminuyendo el porcentaje de adición de defloculante para gres.	66
Tabla 33: Condiciones de la barbotina y polvo atomizado con la mezcla óptima usando el polímero mexicano para gres.	67
Tabla 34: Resultados del consumo y costo de combustible comparado con el estándar para gres.....	67
Tabla 35: Costos totales utilizando el polímero mexicano para gres.	68
Tabla 36: Parámetros fisicoquímicos del agua reciclada de cisterna.	75
Tabla 37: Formulación y dosificación de las materias primas para porcelanato y gres.	75
Tabla 38: Especificaciones del polímero mexicano.....	75
Tabla 39: Especificaciones del polímero español.....	76
Tabla 40: Especificaciones del silicato de sodio.....	76
Tabla 41: Datos del agua y combustible.....	76
Tabla 42: Registro de viscosidades y densidades a diferentes porcentajes de defloculante en porcelanato.....	77
Tabla 43: Registro de viscosidades y densidades a diferentes porcentajes de defloculante en gres.....	78
Tabla 44: Registro de viscosidades aumentando la densidad en porcelanato.....	79
Tabla 45: Registro de viscosidades aumentando la densidad en gres.....	81
Tabla 46: Registro de viscosidades y densidades a diferentes porcentajes de defloculante usando el polímero mexicano en porcelanato.....	83
Tabla 47: Registro de viscosidades y densidades a diferentes porcentajes de defloculante usando el polímero mexicano en gres.....	84
Tabla 48: Registro de viscosidades aumentando la densidad usando el polímero mexicano en porcelanato.....	85
Tabla 49: Registro de viscosidades aumentando la densidad usando el polímero mexicano en gres.....	87
Tabla 50: Resumen de los resultados de la prueba industrial con S75%-P25% en porcelanato.....	88
Tabla 51: Resumen de los resultados de la prueba industrial con S75%-P25% en gres.	88

Dedicatoria

Para nuestras hijas, Bianca Martina y Amelia Carolina.

Mishel y Diana

Agradecimiento

A mis padres, hermanos y sobrinos, por ser mi cable a tierra, el pilar sobre el cuál pude construir un sueño y la motivación para no darme por vencida, a mi madre, por ser una compañera de vida excepcional, mi valiente heroína y superabuelita, gracias por enseñarme que con esfuerzo y amor todo es posible, a mi padre por ser ese extraordinario ser humano, abuelito, un luchador y catapultador de sueños de tus hijos. A ellos por haber recorrido este camino a mi lado demostrándome su amor y apoyo siempre, infinitas gracias.

A mis amigos y compañeros gracias por ayudarme y acompañarme todos estos años, en especial cuando más lo necesitaba.

A la empresa por brindarnos todas las facilidades necesarias para realizar y culminar este trabajo de titulación.

Mishel Carabajo.

Agradecimiento

A mis papás y hermanos, que han sido el pilar fundamental de mi vida y la principal fuente de apoyo para culminar mis estudios, a mi maravillosa mamá, abuela y amiga, Nelly, sin ella no hubiera sido posible ninguno de mis logros, gracias por alentarme a ser mejor y sobre todo creer en mí.

A mis amigos que han estado presentes en las etapas más difíciles, especialmente a Gabriela y Nathaly, gracias por todo el cariño y apoyo emocional que me han brindado todos estos años.

A la empresa, por abrirnos las puertas y permitirnos realizar este trabajo de titulación, a todos los chicos del DTC, por nunca cohibirse en ayudarme y enseñarme hasta las cosas más pequeñas dentro del laboratorio. A los ingenieros, por las enseñanzas, confianza y sobre todo por ver potencial en mí.

Diana Idrovo.

Introducción

La industria cerámica es una de las más antiguas del mundo y ha evolucionado para satisfacer las necesidades de una gran variedad de industrias, como la construcción, la decoración, la alimentación y la medicina, entre muchas otras. Alrededor de todo el mundo, se ha convertido en una de las fuentes más importantes de empleo, por lo que significa una gran representación en todo lo que refiere a la economía global (Canillada, 2007).

Dentro de Ecuador, la producción de cerámica plana se encuentra asentada principalmente en las provincias de Azuay y Chimborazo, siendo la ciudad de Cuenca donde están la mayoría de empresas debido a la ubicación de los yacimientos de las materias primas como las arcillas y feldespatos (Luna, Melean, & Ferrer, 2022).

La cerámica plana, específicamente baldosas de gres y porcelanato, son piezas cuyo uso principal es el revestimiento de pisos y paredes, la diferencia general entre estos dos productos es la formulación de la pasta, siendo gres una cerámica de pasta roja mientras que el porcelanato de pasta blanca. Para su producción pasan por un proceso de molienda, atomización, prensado, secado y cocción, cada etapa incide en el siguiente paso del proceso por lo que es necesario la correcta ejecución de las mismas para la obtención del producto final deseado (González & Chávez, 2017).

De forma general, en las empresas cerámicas ecuatorianas se realiza la etapa de molienda por vía húmeda, en este proceso se realiza una mezcla que consta de una mayor proporción de sólidos acompañados de aditivos como defloculante y agua para formar una suspensión llamada barbotina. La dosificación correcta de cada uno de estos componentes que ingresan a la molienda es de suma importancia ya que afectará a las propiedades reológicas de la barbotina (Cevallos, 2010).

El proceso productivo de las baldosas cerámica busca, en general, tres parámetros en la molienda; 1. una gran concentración de sólidos que permita obtener más polvo atomizado que conlleve a una mayor producción; 2. el uso de la menor cantidad de agua posible ya que la mayor parte de la misma será eliminada en el proceso de atomización; 3. buenas propiedades de flujo. Estos tres puntos están interrelacionados y se consigue realizando una defloculación completa de la pasta (Ramírez, 2010).

El contar con un defloculante adecuado y usarlo de manera óptima no solo permite la disminución de la cantidad de agua que se debe añadir en la pasta, sino también la reducción

del consumo de combustible, menos desgaste de motores y bombas, menor gasto en defloculante y permite aumentar la densidad, viéndose reflejado en una optimización del proceso, desde el punto de vista económico y productivo (Monzo, Martinez, & Enrique, 1979).

Es por ello que, en este trabajo de titulación se buscará la dosificación óptima de los dos defloculantes usados para la mezcla en la etapa de molienda dentro de la empresa cerámica, mediante cambios en las proporciones de los mismos en referencia a la mezcla 80% silicato de sodio y 20% poliacrilato de sodio español, utilizada actualmente en la empresa. Además, considerar la opción de reemplazar el poliacrilato de sodio actual (español) por uno de menor costo (mexicano) que presenta ventajas de disponibilidad y ubicación.

Objetivos

OBJETIVO GENERAL

Determinar la mejor alternativa para la mezcla de defloculantes usados en la etapa de molienda vía húmeda para la producción de la tecnología de gres y porcelanato en una empresa cerámica, a fin de aumentar la eficiencia en el proceso de molienda y atomizado.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la dosificación óptima para la mezcla de los defloculantes (poliacrilato de sodio y silicato de sodio) usados actualmente en la empresa, mediante curvas de defloculación, tanto para la producción de gres como de porcelanato.
- Determinar la dosificación óptima para la mezcla de los defloculantes (poliacrilato de sodio y silicato de sodio), usando una alternativa comercial para el poliacrilato de sodio y realizar una comparación entre los resultados obtenidos con los diferentes poliacrilatos de sodio.
- Evaluar la eficiencia de la producción de polvo atomizado con las dosificaciones óptimas halladas, desde el punto de vista económico.

CAPÍTULO I

Marco teórico**1.1 PROCESO GENERAL DE FABRICACIÓN DE LAS BALDOSAS CERÁMICAS**

El proceso productivo para la elaboración de baldosas cerámicas consta de una serie de operaciones en las que a partir de un grupo de materias primas se obtiene una pieza de forma, estructura y características deseadas; cada etapa de producción requiere tener determinados controles (Moreno R. , 2000). De manera general presenta las siguientes etapas:

1) Selección, explotación y almacenamiento de materias primas

Se obtiene el material sin tratar de canteras o minas. Las materias primas seleccionadas deben cumplir las propiedades deseadas, una vez aprobadas son transportadas hasta una zona de descarga y se almacena generalmente en patios de acopio hasta su posterior uso (Universidad Autónoma del Occidente & Universidad del Atlántico).

2) Pesaje y dosificación de materias primas

Las materias primas llegan desde los patios de acopio hasta la planta de producción y dependiendo de la formulación del producto a elaborar se realiza el pesaje y dosificación de las materias primas principales y auxiliares (Universidad Autónoma del Occidente & Universidad del Atlántico).

3) Molienda

La etapa de molienda implica la reducción granulométrica del material hasta obtener un residuo preestablecido, esto se realiza con el fin de garantizar una distribución óptima y homogeneización total (Instituto de Tecnología Cerámica, 2011; Universidad Autónoma del Occidente & Universidad del Atlántico).

La duración de la misma influye directamente en la granulometría del sistema y la temperatura de la barbotina. La granulometría (residuo) es la variable que indica la eficiencia del proceso además de que influye drásticamente en el comportamiento durante la quema, esta se mide a través del porcentaje de residuo retenido en un determinado tamiz en base a un valor seco conocido, la luz de la malla a usar depende del tipo de material a producir (SACMI, 2004b). La molturación puede realizarse tanto por vía seca como por vía húmeda, esta última requiere un posterior secado de la suspensión, generalmente mediante atomización (SACMI, 2004a). En la molturación vía húmeda con molinos tipo Alsing, se introduce en estos los distintos sólidos en conjunto con un porcentaje aproximado del 35% de agua y un óptimo de defloculante, obteniéndose la suspensión (barbotina); la reducción de tamaño se da como resultado del rozamiento, presión y del choque entre las esferas y el tambor, esto debido al

efecto de rotación del tambor en donde las esferas deberán tener una caída en cascada (Instituto de Tecnología Cerámica, 2011).

4) Secado por atomización

Este proceso tiene el objetivo de evaporar casi la totalidad del agua contenida en la barbotina transformándose así en polvo atomizado, con granulometría y humedad controlada. El principio del secado por atomización está basado en realizar una elevada dispersión y una nebulización, en un ambiente caliente (Estrada & Espinosa de los Monteros, 1982).

La operación se lleva a cabo inyectando la barbotina desde abajo hacia arriba, por medio de bombas de alta presión, las pequeñas gotas de la suspensión cerámica son lanzadas de manera uniforme en una cámara cilíndrica, aquí se ponen en contacto con una corriente de gas o de aire a la temperatura suficiente como para ceder el calor necesario para la evaporación del agua hasta llegar a la humedad residual deseada (Estrada & Espinosa de los Monteros, 1982; SACMI, 2004).

5) Prensado

El prensado en seco es el más utilizado en la conformación de baldosas cerámicas, en este proceso se usa generalmente prensas hidráulicas que permite compactar el polvo en un matriz metálica mediante presión aplicada unidireccionalmente, maximizando el grado de compactación, y obteniendo la pieza en crudo con una densificación adecuada (SACMI, 2004; León & Cordero, 2011).

6) Secado

Esta operación elimina la humedad residual de las baldosas recién conformadas, el agua se transporta, mediante capilares, desde el interior de la pieza hasta su superficie para que pueda ser evaporada por lo que se considera tanto la velocidad de difusión como la de evaporación (Estrada & Espinosa de los Monteros, 1982).

La temperatura utilizada va a depender del tipo de secadero y la duración del ciclo dependerá de la composición, dimensión y espesor de las piezas (SACMI, 2004a).

7) Operaciones estéticas

Luego del secado generalmente se aplica engobe en las piezas seguido de una o varias capas de esmalte con el fin de proporcionar ciertas características fisicoquímicas como impermeabilizar la cara vista de las baldosas o simplemente estéticas, finalmente se decora la superficie de la pieza mediante distintas técnicas.

8) Cocción

Esta operación es considerada la más importante dentro del proceso de producción, aquí las piezas cerámicas son sometidas a un ciclo térmico a altas temperaturas dentro de un horno; las temperaturas utilizadas en la cocción son propias del tipo de producto a fabricar (Instituto de Tecnología Cerámica, 2011).

De este proceso se obtendrá un producto con características y propiedades deseadas, como la resistencia mecánica, resistencia a la abrasión, estabilidad dimensional, baja absorción de agua y resistencia a los productos químicos, al mismo tiempo muestra si las fases precedentes se han llevado a cabo correctamente al obtener el producto final (Universidad Autónoma del Occidente & Universidad del Atlántico).

1.2 MATERIAS PRIMAS CERÁMICAS

La principal materia prima usada en el proceso de fabricación de la cerámica es la arcilla, esta se mezclará en conjunto con materiales desengrasante, agua y aditivos. Existe una gran variedad de materias primas en donde cada una de ellas puede ser empleada en distintos tipos de productos cerámicos, a pesar de tener funciones y requerimientos diferentes. De manera general se dividen en dos grandes grupos: materias primas plásticas y materias primas no plásticas o desgrasantes (Sánchez, García-Ten, & Regueiro, 2006).

1.2.1 Materias primas plásticas

Las materias primas plásticas son aquellas que contienen minerales arcillosos, es decir caolines y arcillas, estas tienen la capacidad de ser moldeadas en presencia de agua y el contenido de finos definirá la plasticidad y otras propiedades de las mismas (Restrepo, 2011; Sánchez, García-Ten, & Regueiro, 2006).

Los minerales arcillosos son silicatos hidratados de aluminio con fórmula general $n\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot m\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, donde n , m y x son constantes, estos tienen un tamaño de partícula menor a $2\mu\text{m}$ y están conformados en láminas que pueden dar lugar a fenómenos de desplazamiento unas sobre otras, estructura que caracteriza a los filosilicatos (Güeto, 2005; SACMI, 2004). Algunos de los minerales arcillosos más utilizados en la producción de cerámica son:

– Caolinita: presenta coloración blanca después de la quema si presentan bajo contenido de hierro, por lo que es utilizado en la fabricación de porcelanato, la arcillas que presenta un contenido superior al 20% de caolinita tiende a aumentar su resistencia a la cocción, es decir, es refractaria, presenta baja plasticidad, se seca fácilmente y no tiene buena resistencia mecánica (Bernal, Cabezas, Espitia, Mojica, & Quintero, 2003).

– Montmorillonitas: presentan propiedades como alta plasticidad, alta capacidad de contracción y su principal uso cerámico es como aditivo plastificante; en este caso los porcentajes de uso no superan nunca el 5% (SACMI, 2004a).

– Illita: presenta menor plasticidad que la montmorillonita, pero su plasticidad aumenta a medida que disminuye el tamaño del grano, la presencia de potasio dentro de la estructura de la Illita indica cierto grado de poder fundente. (Bernal, Cabezas, Espitia, Mojica, & Quintero, 2003; SACMI, 2004).

– Cloritas: la presencia de clorita en una arcilla conduce generalmente a una disminución de las características reológicas, con la aparición de la tixotropía y la presencia de un límite de fluencia, además, son fundentes y presentan buena resistencia mecánica a la flexión de los materiales crudos (verde y seco) (SACMI, 2004a).

Las arcillas con altos contenidos de illita y montmorillonita transmiten alta plasticidad a las pastas cerámicas, lo que se traduce en un fácil conformado de las piezas, pero también en una gran contracción de las mismas durante el secado y la cocción, lo cual puede llevar a la formación de grietas; en tales casos se debe agregar material desgrasante para ajustar la plasticidad de la pasta (Santos, Malagón, & Córdoba, 2011).

Principales propiedades de las arcillas:

– Plasticidad: es la propiedad por la cual, mediante la adición de cierta cantidad de agua, la arcilla adquiere la forma deseada y al ejercer la presión necesaria para deformarla no presentará rotura; esto se debe de cierta manera a la forma de grano, la atracción química entre las partículas, la materia carbonosa u orgánica, además el contenido de finos será el que determine la plasticidad y otras propiedades de las arcillas (Andrade, Al-Qureshi, & Hotza, 2011; Pérez, 2015; Restrepo, 2011).

De manera general la plasticidad idónea es la mínima necesaria para que el proceso de moldeado se realice de forma correcta y que posteriormente las piezas no presenten deformaciones o escasa resistencia mecánica.

– Contracción de secado: propiedad que se produce debido a la evaporación del agua contenida en la pasta durante la etapa del secado y se representa con un encogimiento de la pieza (Fuentes, et al., 2008).

- Refractoriedad: las arcillas tienen la capacidad de resistir elevadas temperaturas sin sufrir variaciones, no obstante, la temperatura de cocción dependerá del tipo de arcilla (Gavilanes & Santellán, 2016).
- Porosidad: el grado de porosidad depende del tipo de arcilla, mientras la temperatura de cocción de la arcilla sea más baja habrá mayor porosidad, menos compactación y, por ende, mayor absorción de agua (Gavilanes & Santellán, 2016).
- Color: la coloración que adopten las arcillas después de la cocción varía dependiendo su composición como la presencia de óxido de hierro, óxido de titanio, carbonato cálcico, entre otros compuestos (Gavilanes & Santellán, 2016).
- Granulometría: La granulometría de las arcillas influye en su comportamiento durante las etapas de secado y cocción, a su vez tiene relación directa con la plasticidad, también afecta a propiedades de los productos cerámicos como grado de empaquetamiento y por consiguiente a propiedades físico-mecánicas de los materiales cocidos como la porosidad, absorción de agua, resistencia a la flexión, entre otras. (Manoharan, Sutharsan, Dhanapandian, & Venkatachalapathy, 2012; Santos, Malagón, & Córdoba, 2011).

1.2.2 Materias primas no plásticas o desengrasantes

Tienen naturaleza diversa y desempeña algunas funciones dentro de la cerámica como reducir la plasticidad, facilitar la defloculación, ayuda a mejorar la permeabilidad y empaquetamiento de la pasta, además aportan óxidos para la formación de fases líquidas y cristalinas o pueden ser inertes (Aparicio & Galán, Materias primas para la industria cerámica, 2006).

Entre las materias primas desengrasantes más importantes se encuentran los feldespatos que actúan como fundentes, el cuarzo y arenas silíceas que son inertes hasta cierta temperatura de cocción, también la calcita y dolomita que pueden actuar como fundentes y ser reactivos; minerales de hierro y otros elementos cromóforos como el titanio y cobre que suelen actuar como pigmentos, y en algunos casos como fundentes (Galán y Aparicio, 2005).

1.2.2.1 Sílice

Se presenta en tres formas cristalinas: cuarzo, tridimita y cristobalita y una fase amorfa vítrea o fundida (SACMI, 2004a). La sílice se emplea tanto en pastas cerámicas blancas como rojas en proporciones pequeñas, pueden usarse para incrementar la blancura y temperatura de cocción, reducir la plasticidad y a su vez la contracción y deformación en la quema,

favoreciendo la desgasificación de las impurezas y la eliminación de agua en el secado (SACMI, 2004; Güeto, 2005).

1.2.2.2 Feldespatos

En general los feldespatos actúan como fundentes favoreciendo la formación de vidrio a una temperatura de fusión menor, además tiene la capacidad de formar eutécticos con otros componentes y aumenta la resistencia mecánica en la cocción. Los feldespatos se utilizan en gran parte en los materiales cerámicos de alta densificación como el gres porcelánico, la porcelana, entre otros (Restrepo, 2011).

1.2.2.3 Carbonatos

Los más representativas son la calcita (carbonato de calcio) y dolomita (carbonato de calcio y magnesio), son utilizados para obtener productos de baja contracción, por otro lado, complica la quema de los esmaltes ya que por reacción desprende CO₂ pudiendo dar lugar a un defecto llamado pinchazo (SACMI, 2004a).

1.3 MATERIAS PRIMAS AUXILIARES

1.3.1 Agua

El agua es parte fundamental del proceso cerámico. El agua potable de reciclado o natural difieren respecto a sus características fisicoquímicas, lo cual afecta el comportamiento reológico de las suspensiones cerámicas (Bruno da Silva, Urano de Carvalho, Cabral Kuhnen, Gracher Riella, & Bernardin, 2008).

El agua al estar expuesta a diferentes agentes y procesos biológicos que consumen y desprenden diferentes sustancias pueden llegar a presentar en su composición química diferentes compuestos mayoritarios como los carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, cloruros y nitratos y como minoritarios los fosfatos, silicatos, trazas de metales y gases disueltos como el oxígeno, dióxido de carbono y nitrógeno (Snoeyink & Jenkins, 1999).

En diferentes estudios realizados sobre la viscosidad llevados a cabo con agua desionizada y agua potable se observa que los resultados obtenidos con el agua desionizada son mejores, esto debido a que el agua potable presenta iones floclulantes y alta carga iónica total. De manera general, se suele utilizar agua reciclada que ha sufrido tratamientos físicos-químicos de clarificación y floclulación, por lo que contiene sustancias iónicas floclulantes dificultando el proceso de defloclulación. Se debe determinar la calidad de agua utilizada mediante el control de propiedades fisicoquímicas como conductividad, contenido de sal soluble y pH óptimo para la defloclulación (8-9) (Enrique, Monfort, Busani, & Mallol, 2000; SACMI, 2004a).

1.3.2 Aditivos

1.3.2.1 Defloculantes

El uso de este aditivo tiene como objetivo principal proporcionar mayor fluidez a la suspensión cerámica al aumentar las fuerzas repulsivas; al conseguir bajas viscosidades se puede obtener altas cargas sólidas utilizando la mínima cantidad de agua posible en la molienda, esto se refleja en un menor volumen de agua a vaporizar en la etapa de atomización, lo que representa una eficiencia económica-productiva, con un menor gasto de combustible, energía y recursos, además de una facilidad para el transporte y permanencia en las balsas de agitación, bombeo y atomización de la barbotina (Marco, Labanda, & Llorens, 2004; SACMI, 2004).

1.4 SUSPENSIONES CERÁMICAS

Conceptos generales

Una pasta cerámica obtenida por vía húmeda se consigue mediante la mezcla de arcillas de baja granulometría con agua y aditivos, pasando a un estado de pasta plástica para conformar suspensiones con características reológicas diferentes consideradas y tratadas como suspensiones coloidales. Las suspensiones cerámicas son sistemas complejos que constan de dos fases, una de sólidos finamente divididos denominada fase dispersa y una líquida denominada fase continua. Debido al tamaño de partícula de los minerales arcillosos esta suspensión es considerada un sistema coloidal (Linares, Huertas & Barahona, 1969; Moreno R. , 2005; SACMI, 2004a)

Las partículas que componen los sistemas coloidales están sometidos a diferentes tipos de fuerzas, como las de Van der Waals, electrostáticas y estéricas, siendo el comportamiento de estos sistemas muy sensible al conjunto de interacciones producidas por dichas fuerzas (Linares, Barahona & Huertas, 1969; Moreno, 2005).

Doble Capa difusa:

Se conoce como doble capa difusa al fenómeno que se produce cuando una arcilla entra en contacto con un fluido, en dicho fenómeno la fase líquida alrededor de las partículas de arcilla forma una concentración de cationes y de agua dipolar (Gómez Burgos & Parra Cubillos, 2015). La doble capa eléctrica, presentada en la Figura 1, se basa en el modelo de Stern con unas ligeras modificaciones, en este se indica que una fracción de los contra-iones es adsorbida para formar una monocapa cercana a la superficie denominada capa de Stern. El potencial en el límite exterior de esta capa se denomina potencial de Stern, mientras que se le conoce como potencial de Nerst al existente sobre la superficie del sólido. En ocasiones el

límite entre la liosfera (capa de moléculas adsorbidas) y el líquido libre se considera como un plano de cizalla, el potencial en dicho plano es denominado potencial zeta (Barba, et al., 2002).

Potencial Zeta:

Es un parámetro fundamental dentro de la estabilidad de los sistemas coloidales, su determinación permite evaluar cuantitativamente la fuerza de repulsión entre partículas, la cual es más intensa mientras mayor es el valor absoluto del potencial zeta. La mejor condición de estabilidad de una suspensión es cuando el valor del potencial zeta es superior a 60mV, sin embargo, si su valor se encuentra entre 40-60 se puede considerar su estabilidad como buena, no así con valores inferiores a 25mV (Barba, Juliá, & Mondragón, 2014; Barba, et al., 2002).

Dentro de los sistemas arcilla-agua el incremento del potencial zeta, por lo tanto, de las fuerzas repulsivas, significa un alza en la dispersión de las partículas en el agua, es decir, en la defloculación (Barba, et al., 2002).

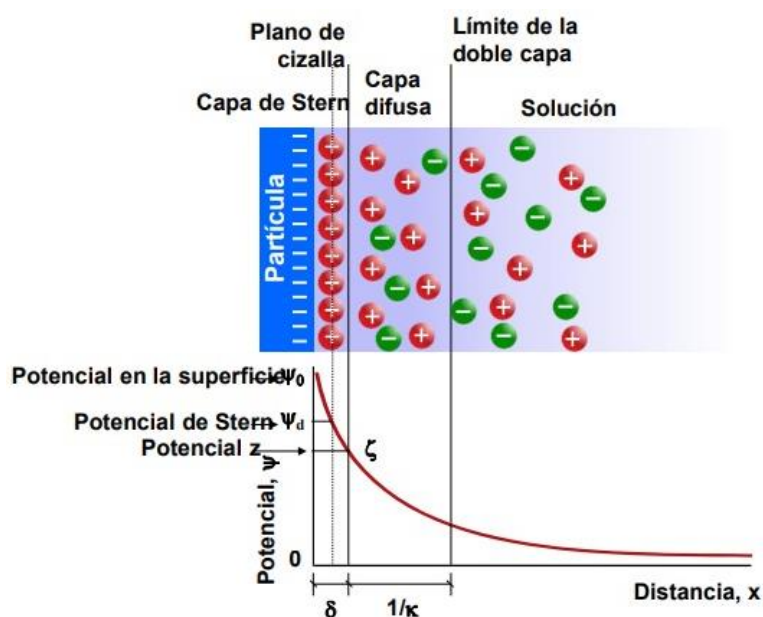


Figura 1: Teoría de la doble capa. Fuente: Instituto de tecnología cerámica, 2019.

1.5 MECANISMOS DE DEFLOCULACIÓN

La defloculación es el proceso mediante el cual las partículas sólidas coloidales se alejan entre sí en el fluido dispersante y se mantienen dispersas. Para obtener una suspensión coloidal defloculada y estable, es decir con una alta dispersión de las partículas cerámicas, las fuerzas de repulsión deberán ser superiores a las fuerzas de atracción de Van der Waals; los dos efectos principales de repulsión son: repulsión electrostática y barrera estérica (Labanda & Llorens, 2005; Moliner, 2017; SACMI, 2004a)

El aumento de las fuerzas de repulsión se logra modificando la carga superficial de las partículas de la suspensión cerámica, esto puede darse mediante:

- Cambio en el pH, guiándolo a valores básicos al introducir iones OH^- mediante bases monovalentes o electrólitos básicos, sin embargo, un exceso de los mismos reduce el potencial zeta provocando el fenómeno de sobredefloculación. Según SACMI (2004a) el intervalo óptimo de pH para la defloculación, generalmente está entre 8 y 9.
- Introducción de defloculante de carácter iónico, los cuales modifican la carga superficial por sustitución de los cationes que constituyen el lado positivo de la doble capa difusa con cationes grandes y de carga baja como Li^+ , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , estos modifican el potencial zeta elevándolo.
- Eliminación de cationes flocculantes, mediante formación de complejos de coordinación o insolubilización del ion flocculante. Estos cationes reducen el potencial zeta disminuyendo las fuerzas de repulsión; los iones flocculantes son pequeños y de alta carga como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} , Zn^{2+} (Güeto, 2005; SACMI, 2004a).

Para producir el efecto estérico, los defloculantes actúan recubriendo las cargas de las partículas proporcionando un elevado volumen a las mismas, produciendo una barrera física que impide el contacto partícula-partícula entre las cadenas poliméricas adsorbidas, con lo que no llegan a formar flóculos. Generalmente estos compuestos son de carácter iónico por lo que también provocan una repulsión electrostática (Cáceres, 2016; Moliner, 2017). La mayor o menor intensidad de las fuerzas de repulsión estérica dependerá de: el número y posición de los grupos funcionales sobre el polímero, el tipo de interacción polímero-líquido y el grado de recubrimiento de la superficie (Rodríguez, Novaes de Oliveira, Alarcon, Pozzi, & Andreola, 2002).

1.5.1 Tipos de defloculante

Los defloculante pueden ser inorgánicos u orgánicos. Los inorgánicos son electrolitos como carbonatos, silicatos, fosfatos sódicos, entre otros; estos son más sensibles a la naturaleza y cantidad de iones que se encuentran en la suspensión y no se eliminan en las fases de cocción, al usar este aditivo no suele presentarse el fenómeno de tixotropía. A la misma concentración, los defloculantes de naturaleza orgánica presentan una mayor eficacia, menor sensibilidad a la presencia de otros iones en la suspensión y mayor poder estabilizador, estos se volatilizan en la cocción, pero son tixotrópicos y más costosos; pueden ser electrolitos o no electrolitos, entre los más representativos están los ácidos húmicos, compuestos de tanino, poliacrilatos, entre otros.

En las empresas cerámicas se suelen utilizar mezclas idóneas de defloculante inorgánicos y orgánicos para aprovechar su efecto sinérgico al actuar por diferentes mecanismos y se usa

habitualmente sales sódicas ya que este contra-ión genera un potencial zeta elevado (SACMI, 2004a); en la Tabla 1 se presenta los mecanismos de acción de algunos de los defloculantes más utilizados:

Tabla 1: Mecanismos de acción de los defloculante.

	Electrostático			Estérico
	Adición de cationes defloculante	Eliminación de cationes floculante	Modificación de la carga superficial	
Silicato de sodio	✓	✓	✓	✓
Carbonato de sodio	✓	✓	✓	
Fosfatos	✓	✓	✓	✓
Poliacrilatos	✓		✓	✓
Huminatos	✓		✓	✓

Fuente: Barba, et al., 2002

Silicato de sodio: como defloculante es el más utilizado en pastas y engobes, este es más enérgico que el carbonato sódico, actúa introduciendo iones Na^+ , a su vez precipita los iones Ca^{2+} como silicato de calcio, incrementa el pH debido a la hidrólisis y además forma un coloide protector que impide el acercamiento entre partículas (Barba, et al., 2002).

Poliacrilatos: Se utilizan poliacrilatos alcalinos, especialmente poliacrilato de sodio. Estos actúan principalmente produciendo el efecto estérico, recubriendo las partículas e impidiendo su agrupamiento, también produce el mecanismo de intercambio iónico y finalmente acompañado con una capacidad de secuestrar los cationes floculantes. Se debe considerar el peso molecular del polímero ya que cadenas demasiado largas pueden neutralizar su efecto defloculante (Corradi, Manfredini, Pellacani, & Pozzi, 1994; Rodrigues, Novaes de Oliveira, Alarcon, Pozzi, & Andreola, 2002).

1.6 REOLOGÍA DE LAS SUSPENSIONES CERÁMICAS

La reología hace referencia al estudio y caracterización del comportamiento de los fluidos en movimiento, las principales características reológicas controladas en la industria cerámica son: viscosidad, densidad relativa, grado de tixotropía, plasticidad, entre otras. Su estudio desempeña un papel importante dentro del proceso productivo, tanto en la mejora económica

como en la calidad del producto final (Bernardin, Casagrande, & Riella, 2006; Labanda & Llorens, 2005).

La reología de las suspensiones cerámicas depende directamente del nivel de agregación de las partículas arcillosas, bajo condiciones variables de electrolitos y de temperatura, debido a que estas constituyen la fracción plástica, que es la que determina en gran medida el comportamiento reológico (Gardini & Galass, 2004; Labanda & Llorens, 2005). También está influenciada por otros factores como:

- Concentración de la fase dispersa
- Distribución y tamaño de las partículas
- Características físicas del agua
- Proporciones de las materias primas
- Naturaleza y proporción de los aditivos incorporados
- Temperatura de la suspensión (Barba, et al., 2002; Pérez & Garcell, 2006)

En general, las suspensiones cerámicas tienen una estabilidad limitada en el tiempo por lo que dificulta, en la mayoría de los casos, la medida experimental del comportamiento reológico y la interpretación de los resultados. Por lo cual, el estudio de las propiedades reológicas es la herramienta más importante para caracterizar la estabilidad de una suspensión (Linares, Huertas & Barahona, 1969; Moreno R. , 2005).

Uno de los parámetros fundamentales para la caracterización reológica de una suspensión es la viscosidad, por lo que es importante mencionar que tipo de fluido son las suspensiones cerámicas, ya que, a diferencia de otros líquidos como el agua, la barbotina no presenta una viscosidad constante, por lo tanto es considerada un fluido no newtoniano, con un comportamiento plástico o pseudoplástico dependiendo de la arcilla y del porcentaje de sólidos en la barbotina (Barba, et al., 2002; SACMI, 2004a). En la Figura 2 se representa el comportamiento de los distintos tipos de fluidos no newtonianos y newtoniano, en el eje de las abscisas se muestra la fuerza de cizalla mientras que en el eje de las ordenadas la viscosidad de los fluidos.

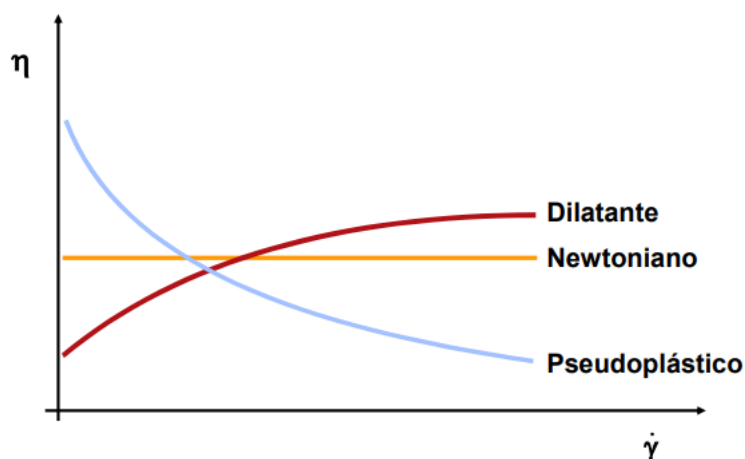


Figura 2: Comportamiento de los fluidos newtonianos y no newtonianos. Fuente: Instituto de Tecnología Cerámica, 2019.

Las suspensiones cerámicas son consideradas fluidos con comportamiento pseudoplástico ya que, al aumentar la fuerza de cizalla su viscosidad disminuye, a diferencia de un fluido dilatante que tiene comportamiento inverso, como muestra la Figura 2.

1.6.1 Tixotropía

Se trata de un comportamiento reversible que presentan algunas suspensiones cerámicas, en donde la mezcla fluida adquiere rigidez, formando un gel después de mantenerse en reposo; es decir, la viscosidad va aumentando según pase el tiempo y vuelve a alcanzar fluidez con agitación. Esta característica depende de las propiedades superficiales de las partículas coloidales de arcilla y cualquier electrolito que altere la interacción entre ellas (Singer & Singer, 1971; Galindo, 2020).

1.6.2 Viscosidad

La viscosidad es una propiedad fisicoquímica de los fluidos, esta representa la resistencia a fluir a causa de su fricción interna. La mayoría de las arcillas posee una elevada viscosidad al mezclarse con agua, que disminuirá a altas tensiones de cizallamiento (Singer & Singer, 1971). La viscosidad cambia en función del tiempo; esto es que, en un estado de reposo, la estructura de la suspensión se modifica convirtiéndose en una estructura rígida, que al aplicar un esfuerzo de cizalla se romperá, esta es la razón por la cual las suspensiones cerámicas se mantienen en constante agitación (SACMI, 2004a)

El control de esta propiedad es muy importante en la industria cerámica, ya que si la viscosidad es demasiado baja genera problemas de sedimentación de la barbotina, una cantidad excesiva de agua y finura en el polvo atomizado; por otro lado, si la viscosidad es

muy elevada hay un incremento en el tiempo de molienda, evidenciado en un mayor porcentaje de rechazo, problemas en el transporte y descarga de la barbotina, dificultad en el tamizado y en el atomizado genera un polvo excesivamente grueso.

A continuación, se presenta algunas de los factores que afectan a la viscosidad:

Contenido de sólidos: mientras mayor sea el contenido de sólidos en la suspensión mayor serán las interacciones de tipo hidrodinámico y coloidal, por ende existirá mayor viscosidad, como se refleja en la Figura 3 (Barba, et al., 2002; SACMI, 2004a).

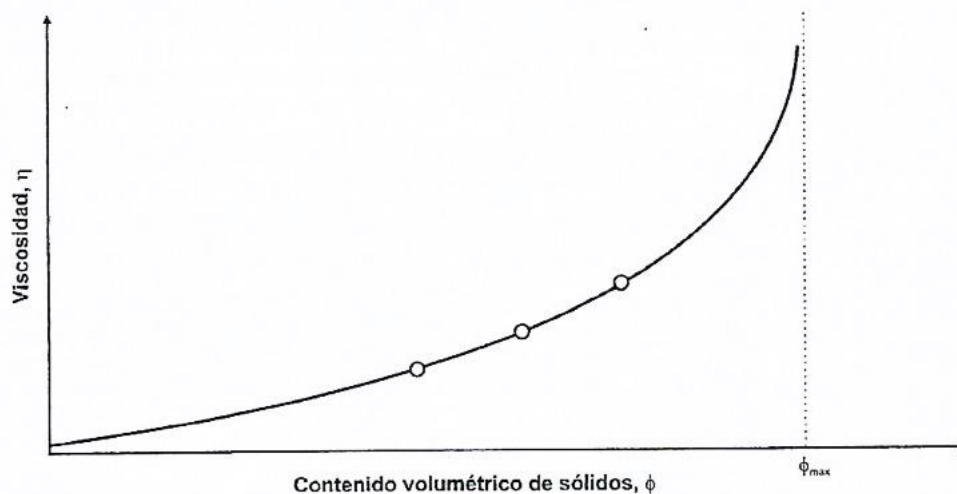


Figura 3: Relación del contenido de sólidos con la viscosidad. Fuente: Barba, et al., 2002.

Distribución y tamaño de partículas: mientras más pequeño sea el tamaño de estas, mayor será la viscosidad; por otro lado, la distribución influye sobre el contenido de sólidos máximo que puede alcanzar la suspensión; por ende, influye sobre su viscosidad (Barba, et al., 2002).

Temperatura de la suspensión: tiene una proporcionalidad inversa con la viscosidad, es decir si la temperatura es mayor la viscosidad es menor. Cuando se presenta una temperatura excesiva puede causar problemas de tixotropía, daños estructurales en los cauchos de revestimiento del molino (SACMI, 2004b).

Uso de defloculante: el tipo de defloculante y su concentración influyen en gran medida sobre la viscosidad aparente de la barbotina, la efectividad del defloculante está relacionado directamente con su función sobre las fuerzas de repulsión, como se mencionó anteriormente. Cada materia prima o la mezcla de estas, tendrá un porcentaje óptimo de defloculante, representado por el porcentaje de defloculante donde se consigue un mínimo de viscosidad aparente, para ello se realiza curvas de defloculación, que son representaciones gráficas que

relacionan la viscosidad en función de la cantidad de defloculante añadido (Ramírez, 2010; SACMI, 2004a). De igual manera, para una misma suspensión cerámica, los distintos tipos de defloculantes reflejarán diferentes porcentajes óptimos de defloculante, dependiendo de su efectividad, como se muestra en la Figura 4.

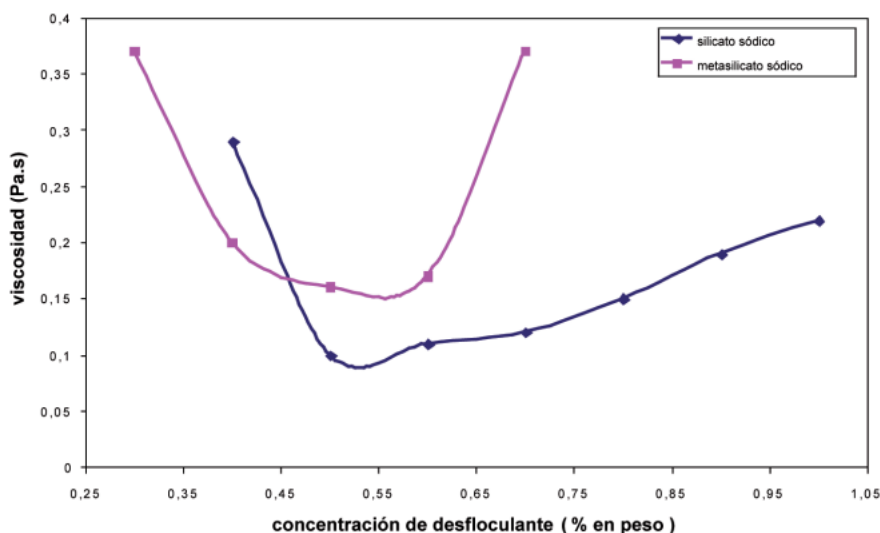


Figura 4: Curvas de defloculación utilizando diferentes defloculante. Fuente: Bernardin, Casagrande & Riella, 2006.

Existen varios sistemas para la medida de la viscosidad, entre los más utilizados están los viscosímetros de copa y rotacionales.

– *Viscosímetros de copa*: son los más utilizados en la industria cerámica debido a su costo, resistencia y sobre todo por la facilidad de manejo, obteniendo resultados rápidamente. Se utiliza específicamente la copa Ford, esta mide el tiempo de flujo a través del capilar a una presión conocida, generalmente la fuerza de gravedad; sin embargo, presenta baja precisión (Barba, et al., 2002).

– *Viscosímetros rotacionales*: proporcionan información más completa y fiable; sin embargo, son más costosos. Estos instrumentos miden la viscosidad captando el par de torsión, que es proporcional a la resistencia viscosa, necesario para hacer girar a una velocidad constante el husillo dentro del fluido. Su respuesta está representada en unidades de mPa.s (De Sousa, 2022).

1.7 CARACTERÍSTICAS DE LA BARBOTINA QUE VA A SER ATOMIZADA

La barbotina obtenida de la molienda vía húmeda se seca a través del proceso de atomización, resultando un polvo atomizado con una humedad controlada y granulometría ideal para la

siguiente etapa del proceso. Algunas de las propiedades de la barbotina importantes para el proceso de atomización son: viscosidad, contenido de sólidos y tensión superficial. Estas variables influyen en la curva granulométrica del polvo; es decir, en el tamaño de la gota a ser atomizada.

- A mayor viscosidad de la suspensión cerámica, más gruesa serán las partículas.
- Un aumento en el contenido de sólidos afecta a las características de evaporación y generará un aumento de densidad y tamaño de partícula.
- Por último, al tener una tensión superficial mayor generan gotas de mayor diámetro (Muñoz, 2007; SACMI, 2004b).

Otros factores que influyen directamente en la curva granulométrica y humedad del polvo es la energía disponible para la atomización; la cual, a caudal constante de barbotina y con un aumento del consumo energético genera un tamaño de granulo menor. De la misma manera, al aumentar el caudal de entrada de la suspensión genera partículas más gruesas. También influye el caudal de aire el cual controla el tiempo de residencia del producto en la cámara de secado por lo que si se aumenta como consecuencia se incrementa el tiempo para eliminar el agua de la suspensión. Y por último la temperatura de secado también aumenta la capacidad de evaporación (Enrique Navarro, Amoros Albaro, & Monzo Fuster, 1985).

CAPÍTULO II

Metodología

Actualmente la empresa cerámica trabaja con una mezcla de defloculantes en proporción 80% silicato de sodio y 20% poliacrilato de sodio de origen español. En este trabajo de titulación, se comparó distintas curvas de defloculación, realizadas cambiando las diferentes proporciones de mezclado tanto del silicato de sodio como del poliacrilato de sodio, con el fin de obtener el dosificado óptimo de la misma, cumpliendo con las especificaciones técnicas de la barbotina. Además, se realizó las mismas pruebas reemplazando el actual polímero español por un poliacrilato de sodio mexicano, para comprobar su eficiencia e identificar si es posible el reemplazo debido a su menor costo.

Estos experimentos se realizaron para las dos tecnologías más importantes producidas dentro de la empresa, que son gres y porcelanato. Las pastas cerámicas se prepararon a nivel de laboratorio mediante molienda vía húmeda, con las respectivas materias primas cerámicas y agua reciclada correspondiente a cada tecnología y las diferentes mezclas de defloculantes. A continuación, se describe la metodología utilizada.

2.1 CONDICION DEL AGUA DE MOLIENDA

El agua reciclada proviene de la limpieza de pisos y equipos como molinos, atomizadores, entre otros. El agua usada al ser reciclada tiene cierto contenido de sólidos y iones disueltos, por lo que se realizó un control general de la condición del agua de molienda, mediante la medida de la densidad, pH y conductividad, para asegurar que cumpla con los requerimientos impuestos por la empresa y no afectar las condiciones de la pasta, los cuales están expresados en el Anexo A. (Tabla resumen de las especificaciones de los parámetros fisicoquímicos del agua reciclada de cisterna). Esta agua es almacenada en constante agitación para evitar decantaciones por el contenido de sólidos en suspensión que posee.

El agua que se usó para las diferentes curvas de defloculación se recolectó directo de los tanques de almacenamiento correspondientes, el agua que se usó para gres proviene de la línea de fabricación de gres, así mismo el agua usada para la tecnología de porcelanato es proveniente de la línea de fabricación de la tecnología de porcelanato, y se colocó en recipientes herméticos para su uso progresivo.

2.2 PREPARACIÓN DEL DEFLOCULANTE

La preparación de las diferentes mezclas de silicato de sodio y poliacrilato de sodio, tanto del proveedor español como del mexicano, se realizaron en las proporciones especificadas en la Tabla 2, en función al requerimiento técnico de la empresa, ya que un porcentaje mayor al 40% de polímero no es rentable para la misma.

Tabla 2: Porcentajes de dosificado para las mezclas de defloculante.

Silicato de sodio	Poliacrilato de sodio
100%	-
90%	10%
80%	20%
70%	30%
60%	40%

2.3 PREPARACIÓN DE LA BARBOTINA: MOLIENDA VÍA HÚMEDA

2.3.1 Dosificación de cada materia prima: tomando en cuenta los porcentajes de formulación de la pasta de cada tecnología descritos en el Anexo B: Formulación y dosificación de materias primas para porcelanato y gres, se determinó el peso de cada una de las materias primas para obtener 300 g de fórmula total, aplicando la siguiente fórmula:

$$\text{peso bruto } M.P = \frac{300 \text{ g} * \% \text{Formulación}}{100 - \% \text{Humedad de } M.P} \quad (1)$$

-M.P.: materia prima.

2.3.2 Dosificación de agua: con el agua reciclada homogenizada adecuadamente, se dosificó un porcentaje aproximado de 34-37% (según guía de la empresa), mediante la fórmula:

$$g \text{ agua} = \frac{300 \text{ g} * 100}{100 - \% \text{Agua de pasta}} - \sum \text{peso bruto } M.P. \quad (2)$$

2.3.3 Dosificación del defloculante: la dosificación del defloculante en cada una de las moliendas se realizó con el siguiente cálculo:

$$g \text{ defloculante} = 300 \text{ g} * \% \text{ adición del defloculante} \quad (3)$$

Los porcentajes de adición del defloculante utilizados son: 0.50, 0.70, 0.90, 1.10 y 1.30%, estos son impuestos por la empresa para realizar las curvas de defloculación.

2.3.4 Carga y descarga del molino: colocar los elementos moledores completamente secos, respetando la fracción de llenado de 50-55%, adicionar conjuntamente las materias primas dosificadas, el agua y defloculante. Una vez colocado todos los materiales en el molinete se

efectuó la molienda, con el tiempo preestablecido en las condiciones de molienda para la pasta de cada tecnología mostrados en la Tabla 3. Al obtener la barbotina, se descargó la misma para las pruebas pertinentes.

Tabla 3: Condiciones de molienda para cada tecnología establecidos por la empresa

Tecnología	Porcelanato	Gres
Tiempo de molienda (min)	21	10
Rechazo malla ASTM N° 230	-	4,5
Rechazo malla ASTM N° 325	1,8	-
Temperatura °C	35 - 37	29 - 31

2.3.5 Medida del residuo: para iniciar las pruebas se realiza el control del rechazo o residuo mediante lavado de la barbotina haciéndolo pasar por el tamiz malla ASTM N° 230 (63 micras) para la pasta de tecnología de gres y el tamiz malla ASTM N° 325 (45 micras) para la pasta de tecnología de porcelanato.

2.4 CARACTERIZACIÓN DE LA SUSPENSIÓN

El control de la reología de las suspensiones cerámicas sigue el mismo procedimiento tanto para gres como para porcelanato.

2.4.1 Medida del tiempo de flujo: a nivel de laboratorio se utiliza la copa Ford #4 para obtener el tiempo de flujo, que es proporcional a la viscosidad, de cada una de las suspensiones, mediante los siguientes pasos:

- Colocar la copa Ford en el soporte y tapar el orificio inferior con el dedo.
- Llenar la copa con la suspensión a medir y con un cronómetro medir el tiempo en segundos desde que se quita el dedo y empieza a escurrir la barbotina hasta el momento en que el hilo del líquido se rompe.

2.4.2 Medida de la densidad: se utilizó el método del picnómetro para la determinación de la misma y se trabajó con un rango de densidad de 1.670-1.679 g/cm³ para gres y 1.680-1.689 g/cm³ para porcelanato. Se sigue estos pasos:

- Colocar en la balanza analítica el picnómetro limpio y seco con su tapa y tarar la balanza.
- Llenar el picnómetro con la barbotina homogenizada y taparlo dejando salir el exceso por el orificio superior.
- Limpiar y secar el picnómetro, pesar.
- Para obtener la densidad se divide el peso obtenido, es decir, el peso de la muestra, para el volumen del picnómetro (100cm³).

2.4.3 Medida del contenido de sólidos: para conocer el porcentaje de sólidos contenido en las suspensiones se sigue los siguientes pasos:

- a. Pesar el recipiente metálico en la balanza y anotar el peso (A).
- b. Tarar la balanza y pesar 10g de barbotina previamente homogenizada.
- c. Retirar el plato metálico con su contenido y colocarlo en la estufa eléctrica hasta que esté completamente seco, el tiempo estimado es de 5 minutos.
- d. Retirar el plato caliente y dejarlo enfriar.
- e. Pesar el plato metálico con su contenido seco, anotar el peso (B).

Con los pesos obtenidos se sigue el siguiente cálculo:

$$\% C.S. = (B - A) * 10 \quad (4)$$

C.S: contenido de sólidos

2.5. CURVAS DE DEFLOCULACIÓN

Se graficaron las curvas de defloculación de cada una de las mezclas de defloculante preparadas, relacionando en el eje de ordenadas el tiempo de flujo, que es proporcional a su viscosidad, y en el eje de las abscisas el porcentaje de defloculante añadido en la molienda, de donde se obtuvo visualmente las dos combinaciones más eficientes. Se consideran las mejores mezclas a aquellas en las cuales analizando a un mismo porcentaje de adición de defloculante, se obtienen los tiempos de flujo más bajos.

Una vez identificadas estas dos mejores curvas, se procedió a preparar dos mezclas de defloculante adicionales con porcentajes intermedios, para esto se siguió nuevamente los pasos 2.3 y 2.4 (las mezclas intermedias se realizaron solo a partir de las mejores mezclas, debido a la disponibilidad de recursos y tiempo). Finalmente, se analizó estas últimas 4 curvas de defloculación y se eligieron nuevamente las dos mejores opciones. Esto se realizó para las dos tecnologías y usando el poliacrilato de sodio español y mexicano.

Tanto para las curvas de defloculación como para los ensayos de robustez, las pruebas se realizaron por duplicado, si estos resultados cumplían con la desviación estándar de la copa Ford del laboratorio, eran tomados como válidos los mismos y se procedió a obtener su promedio, caso contrario se realizó una siguiente prueba.

2.6. ENSAYO DE ROBUSTEZ

Para conocer qué tan eficientes son las mezclas seleccionadas en el punto anterior a diferentes contenidos en sólidos, se realizó el análisis de la robustez aumentando la densidad de las suspensiones de 1.68 g/cm³ hasta 1.72 g/cm³ en el caso de porcelanato y de 1.67 g/cm³

hasta 1.71 g/cm³ para gres. Este ensayo se realizó utilizando mezclas con las dos muestras de polímeros tanto el español como el mexicano.

2.7. PRUEBA INDUSTRIAL Y ANÁLISIS ECONÓMICO

2.7.1 Cálculo y análisis del costo de defloculante en la etapa de molienda

-Cálculo del costo unitario de las mezclas de defloculantes: partiendo de los costos individuales de los dos aditivos utilizados para la preparación de las mezclas de defloculante y sus respectivos porcentajes, se calculó el costo por kilogramo de las mejores mezclas con la siguiente ecuación:

$$\text{Costo Mezcla de Defloculante} = \%S * \text{costo } S + \%P * \text{costo } P \quad (5)$$

S: silicato de sodio

P: poliacrilato de sodio

A partir de estos costos, se realizó una comparativa versus el costo del defloculante estándar usado actualmente en la fábrica, con el objetivo de determinar la más rentable de todas las opciones desde el punto de vista económico.

-Cálculo del costo de las mezclas de defloculantes en la molienda: el costo productivo de las mezclas se realizó a partir del porcentaje de adición de defloculante actual, el tonelaje del molino en kg/h y el costo por kilogramo de mezcla de defloculante, siguiendo la presente fórmula:

(6)

$$\text{Costo productivo Defloculante} = \% \text{Adición defloculante} * \text{Tonelaje} * \text{Costo Defloculante}$$

2.7.2 Prueba industrial: al cambiar la escala de laboratorio a nivel de planta se obtiene datos reales de las condiciones de trabajo a las que se puede llegar con la mezcla óptima; las pruebas industriales las realizó el personal de planta con las mezclas seleccionadas como óptimas desde el punto de vista económico; para la preparación de las pastas de las dos tecnologías se utilizó únicamente el poliacrilato de origen español, debido a que no se disponía de suficiente cantidad de polímero mexicano para hacer la prueba industrial.

A partir de los resultados de las pruebas industriales, se analizó si es posible bajar el porcentaje de adición de defloculante en la molienda, si es el caso, se ejecutó nuevamente los cálculos para la obtención del costo productivo de defloculante para su respectivo análisis.

2.7.3 Análisis del consumo y costo de combustible en la etapa de atomizado: a partir de la prueba industrial, datos de la barbotina, polvo atomizado y especificaciones de los combustibles se calculó los costos del consumo del combustible y ahorro anual que se darían en la etapa de atomización.

-Cálculo del consumo de combustible: se obtuvo los kilogramos de combustible por hora mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Cantidad de combustible} = \frac{\text{Energía para evaporar H}_2\text{O (kcal/h)}}{\text{Poder Calorífico del combustible (kcal/kg)}} \quad (7)$$

Para conocer la energía necesaria para la evaporación se aplicó la presente fórmula:

(8)

$$\text{Energía para evaporar H}_2\text{O} = \text{Masa de Agua (kg)} * \text{Calor Vaporización (Kcal/Kg H}_2\text{O)}$$

Los kilogramos de masa de agua a evaporar se obtuvieron de la siguiente manera:

$$\text{Masa de Agua} = \% \text{ agua a evaporar} * \text{Capacidad del atomizador} \quad (9)$$

$$\% \text{ Agua a evaporar} = \% \text{ agua en la barbotina} - \% \text{ humedad del polvo} \quad (10)$$

-Cálculo del costo de combustible consumido: el costo del combustible por hora se calculó mediante la siguiente fórmula:

(11)

$$\text{Costo consumo de combustible} = \text{Cant. combustible (kg/h)} * \text{precio combustible (\$/kg)}$$

CAPÍTULO III

Resultados y discusión

Dentro de este capítulo se presenta todos los datos y curvas de defloculación obtenidos luego de haber realizado a nivel de laboratorio los ensayos de las mezclas con los diferentes porcentajes de defloculantes, además de las pruebas industriales realizadas con el polímero español, evidenciado así la existencia o no de mejoras y por lo tanto de ahorros económicos.

3.1 CONDICIONES ESTANDAR DE LA BARBOTINA

Teniendo como base las especificaciones de molienda establecidos en la empresa cerámica, en la Tabla 4 se presenta las condiciones iniciales de la barbotina, preparadas a nivel de laboratorio para los ensayos respectivos:

Tabla 4 Condiciones iniciales de la barbotina para la tecnología de porcelanato y gres

Tecnología	Porcelanato	Gres
% Agua	35.1	36.5
% Contenido Sólidos	64.9	63.5
Densidad barbotina (g/cm ³)	1.68	1.67

3.2 CURVAS DE DEFLOCULACIÓN PARA PORCELANATO

Para presentar los resultados obtenidos para las curvas de defloculación es importante mencionar que:

-Las curvas de defloculación se obtuvieron trabajando las barbotinas en las mismas condiciones conforme lo indicado en la tabla 3 y 4, variando solo los porcentajes de adición de defloculante.

-Para el análisis de las curvas de defloculación y robustez se va a tomar como referencia los valores de fluidez correspondientes al 0.70% de adición de defloculante debido a que es el inmediato inferior del porcentaje usado actualmente en la empresa cerámica (0.75%).

-La mezcla de defloculante utilizada actualmente en la empresa es 80% Silicato de sodio-20% Poliacrilato de sodio español (S80%-P20%), por lo que se representa a esta como estándar tanto para las gráficas como para el análisis económico.

3.2.1 Curvas de defloculación utilizando poliacrilato de sodio del proveedor español

Utilizando las mezclas de defloculantes descritas en la Tabla 2, se obtuvo las siguientes curvas de defloculación que se muestra en la figura 5:

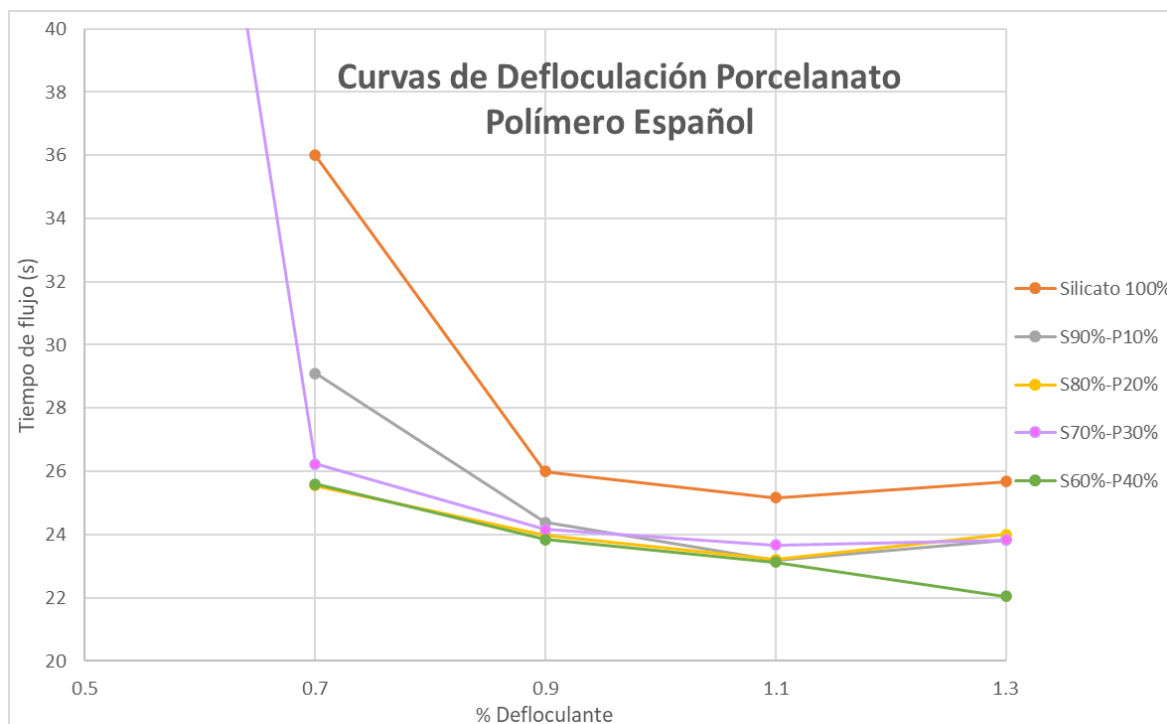


Figura 5: Curvas de defloculación utilizando mezclas con el poliacrilato del proveedor español.

Nota. La letra “S” refiere al silicato de sodio y “P” al poliacrilato de sodio, seguido de sus porcentajes en mezcla.

En la figura 5 se puede observar que casi todas las curvas empiezan su proceso de defloculación en 0.7% de defloculante a excepción de la curva 70%S-30%P que empieza ya a deflocular con un porcentaje inferior a 0.7%.

Con un valor de 0.50% de defloculante las mezclas no logran una defloculación completa de la barbotina, a excepción de la mezcla ya mencionada que tiene un tiempo de flujo excesivamente alto, por lo que se presentan los resultados en la gráfica solo a partir de 0.7% de defloculante.

Se puede evidenciar en la Figura 5 que, de manera general las curvas muestran un incremento de efectividad conforme se va aumentando el porcentaje de polímero adicionado en las mezclas. Esto se debe a que los mecanismos de defloculación actúan conjuntamente, tanto el silicato de sodio con su efecto electrostático predominante, ya que modifica la carga superficial aumentando el pH, y así mismo el poliacrilato con su efecto estérico, actuando principalmente por adsorción de las partículas, también aumenta el pH de la suspensión facilitando la defloculación.

En general, se observa el fenómeno de sobredefloculación que consiste en un aumento de la viscosidad aparente, debido al exceso de defloculante, en la mayoría de los casos levemente a un porcentaje de 1.30% de adición de defloculante en todas las mezclas excepto la de S60%-P40%.

Basados en la teoría, las mejores mezclas a elección son: S80%-P20% y S60%-P40%, debido a que con estas se obtienen los valores más bajos de fluidez o viscosidad. Partiendo de las dos mezclas seleccionadas, se preparó dos mezclas adicionales cuyas proporciones intermedias son S75%-P25% y S65%-P35%, en la siguiente figura se encuentran los resultados obtenidos en las curvas de defloculación:

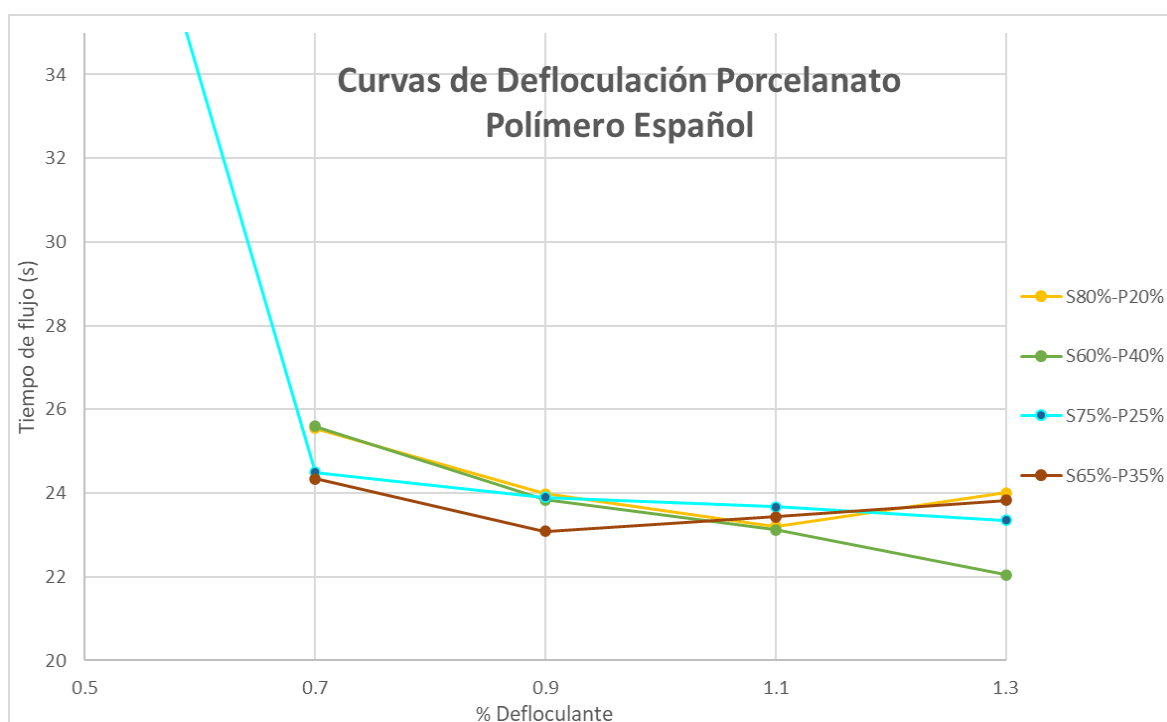


Figura 6: Curvas de defloculación con mezclas iniciales e intermedias.

Tomando en consideración el mismo método de análisis y elección de las mezclas óptimas anteriores, se observa en la Figura 6 que, estas dos mezclas adicionales son las más efectivas, al generar un menor tiempo de flujo, por lo cual, partiendo de este resultado se realizó el análisis de robustez para evidenciar la eficiencia de las mismas a diferentes contenidos de sólidos.

Para el análisis de la robustez de las mezclas escogidas, se planteó un panorama de aumento de contenido de sólidos, el cual se encuentra en relación directa con el aumento de la densidad de las suspensiones, esto se logra disminuyendo los porcentajes de dosificación del

agua en la molienda. La empresa cerámica cuenta con límites de control tanto superior como inferior de viscosidad para una correcta operación en la planta, descritos en la tabla 5.

Tabla 5: Especificaciones técnicas de la molienda y parámetros actuales.

	Mínimo	Central	Máximo	Actual en porcelanato	Actual en gres
Viscosidad (s)	26	36	46	-	-
Residuo (g)	1.30	1.50	1.70	-	-
Defloculante (%)				0.75	0.95
Densidad (g/cm ³)	1.64	1.68	1.72	1.66	1.65
C.S (%)	-	-	-	64.20	62.2

3.2.2 Resultados del estudio de robustez para porcelanato utilizando poliacrilato de sodio del proveedor español.

Se inició el análisis de robustez con la mezcla de silicato de sodio 75%-poliacrilato de sodio 25%, obteniendo los siguientes resultados:

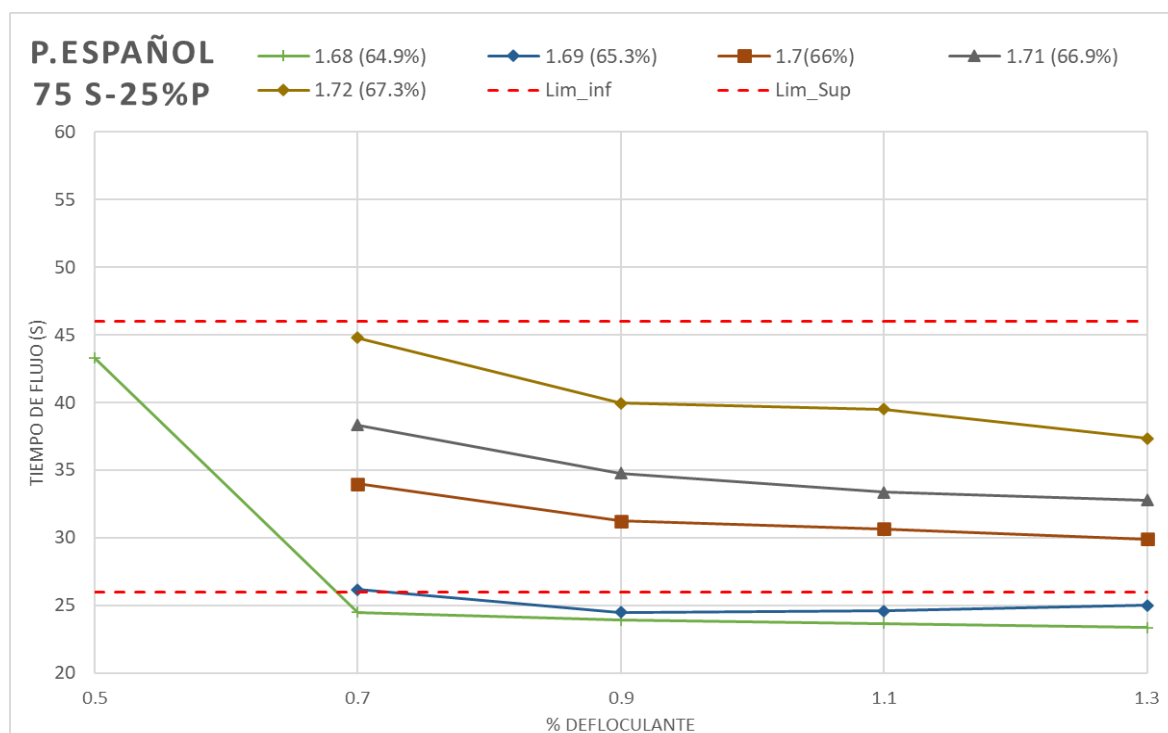


Figura 7: Curvas de defloculación con la mezcla S75%-P25% aumentando el contenido de sólidos en la barbotina.

Nota. En la leyenda se encuentra las diferentes densidades en g/cm³ y entre paréntesis el porcentaje de contenido de sólidos.

Como se observa en la Figura 7 es evidente que, mientras más contenido en sólidos tiene la suspensión, mayor es la viscosidad, debido a que al tener menos agua en la suspensión disminuye la fluidez de la misma.

Analizando esta gráfica de robustez, se sabe que se puede alcanzar una densidad de 1.72 g/cm^3 , que refleja un contenido de sólidos del 67.3% obteniendo viscosidades dentro de los parámetros aceptables especificados en la Tabla 5; sin embargo, se tomó en consideración que con 0.70% de adición de defloculante, la viscosidad se encuentra al límite superior (46 s), por lo que se tomó como curva ideal la curva con densidad de 1.71 g/cm^3 , con un contenido en sólidos de 66.90% que se encuentra en el rango central de viscosidad.

Como se presenta en la Tabla 5, actualmente la empresa trabaja con un promedio de 1.66 g/cm^3 de densidad y un contenido de sólidos del 64.20%, por lo que, lograr aumentar su contenido a 66.90% equivale a un aumento significativo de sólidos, lo que representa menor porcentaje de agua usado en la molienda, lo cual se reflejara en un ahorro económico en la etapa de atomizado, ya que la cantidad de agua a evaporar por tonelada de barbotina sería menor, y en consecuencia disminuiría el consumo de combustible utilizado en este proceso; este resultado se verá reflejado en el análisis económico.

La segunda mezcla analizada en este estudio de robustez es la mezcla de silicato de sodio 65%-poliacrilato de sodio 35%, en los ensayos se obtuvo las siguientes curvas de defloculación:

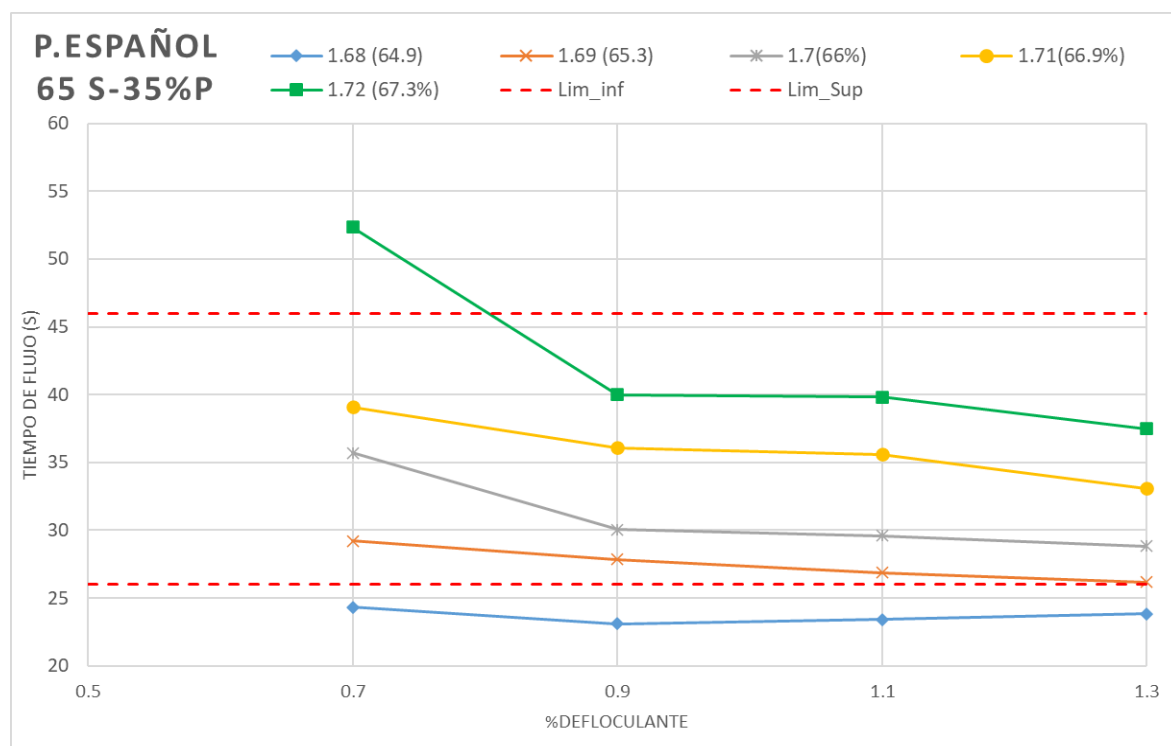


Figura 8: Curvas de defloculación con la mezcla S65%-P35% aumentando el contenido de sólidos en la barbotina.

Nota. En la leyenda se encuentra las diferentes densidades en g/cm³ y entre paréntesis el porcentaje de contenido de sólidos.

Realizando el análisis con el mismo criterio de aceptación, se puede decir que, en esta Figura 8 la densidad óptima de trabajo es de 1.71 g/cm³, que equivale a un contenido en sólidos del 66.9%, ya que las viscosidades se encuentran dentro de los límites aceptados. Al igual que en el caso anterior, llegar a esta densidad se refleja en un ahorro económico.

3.2.3 Curvas de defloculación utilizando poliacrilato de sodio del proveedor mexicano

Siguiendo las mismas secuencias de mezclas de defloculantes dadas en la Tabla 2, se obtuvieron las siguientes curvas de defloculación usando el polímero proveniente de México.

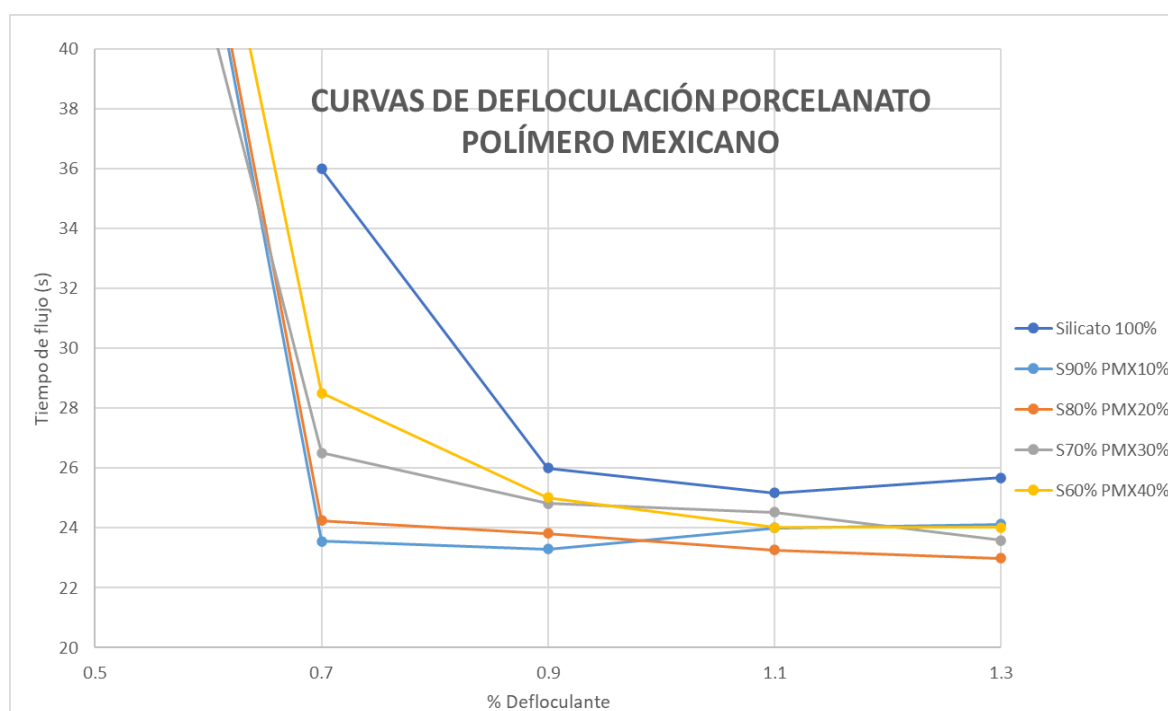


Figura 9: Curvas de defloculación utilizando mezclas con el poliacrilato del proveedor mexicano.

Nota. La letra “S” refiere al silicato de sodio y “PMX” al poliacrilato de sodio mexicano, seguido de sus porcentajes en mezcla.

Aplicando los mismos criterios de análisis que en el caso anterior, de forma general se puede evidenciar en la Figura 9 que, a medida que se va añadiendo mayor porcentaje de polímero mexicano en la mezcla su efectividad va disminuyendo, por lo que a porcentajes menores de adición de polímero se consigue un menor tiempo de escurrido.

Comparando el comportamiento de las curvas de defloculación de los dos polímeros, se puede observar que, la acción de defloculación de los polímeros en las mezclas es inversa;

es decir que, mientras se añade mayor porcentaje de polímero español a la mezcla su efectividad aumenta; por otro lado, al añadir un mayor porcentaje de polímero mexicano su efectividad disminuye.

Con la Figura 9 y tomando como referencia 0.70% de defloculante, la mezcla S60%-PMX40% es la menos efectiva, después del silicato puro, y las dos mejores mezclas de defloculantes son: S90%-PMX10% y S80%-PMX20%. Las suspensiones llegan a deflocular inclusive con un 0.50% de adición de defloculante, sin embargo, las viscosidades son muy elevadas por lo que no se presentan dentro del rango de datos de la gráfica. Por otro lado, el fenómeno de sobredefloculación de las suspensiones no es pronunciado.

Conociendo las dos mejores mezclas, se procedió a realizar mezclas intermedias para conocer el comportamiento de las mismas, sus proporciones son: S85%-PMX15% y S95%-PMX5%, se obtuvo los siguientes resultados:

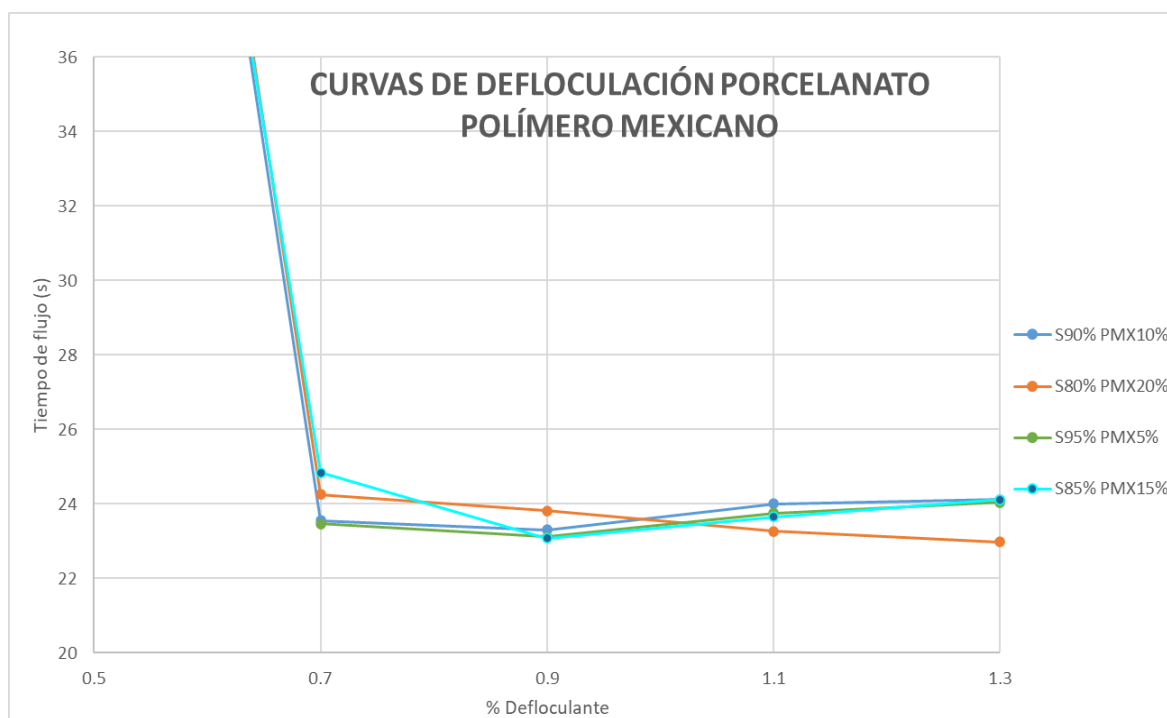


Figura 10: Curvas de defloculación con mezclas iniciales e intermedias usando el polímero mexicano.

Nota. La letra “S” refiere al silicato de sodio y “PMX” al poliacrilato de sodio mexicano, seguido de sus porcentajes en mezcla

A partir de la Figura 10 se puede observar que, con 0.70% de adición de defloculante, las curvas que presentan el menor tiempo de flujo o menor viscosidad, por ende, las más

eficientes son las de las mezclas S90%-PMX10% y S95%-PMX5%, que tienen prácticamente el mismo comportamiento.

Se realizó el ensayo de robustez con las mismas especificaciones de la barbotina que con el polímero español, que se encuentran referenciadas en la Tabla 5.

3.2.4 Resultados del estudio de robustez para porcelanato utilizando poliacrilato de sodio del proveedor mexicano

Para los ensayos de robustez, se realizaron incrementos graduales de la densidad iniciando en 1.68 g/cm³ hasta 1.72 g/cm³, que equivale en porcentaje de contenido de sólidos de 64.90% hasta 67.30%, respectivamente. Se inició con la mezcla S95%-PMX5%.

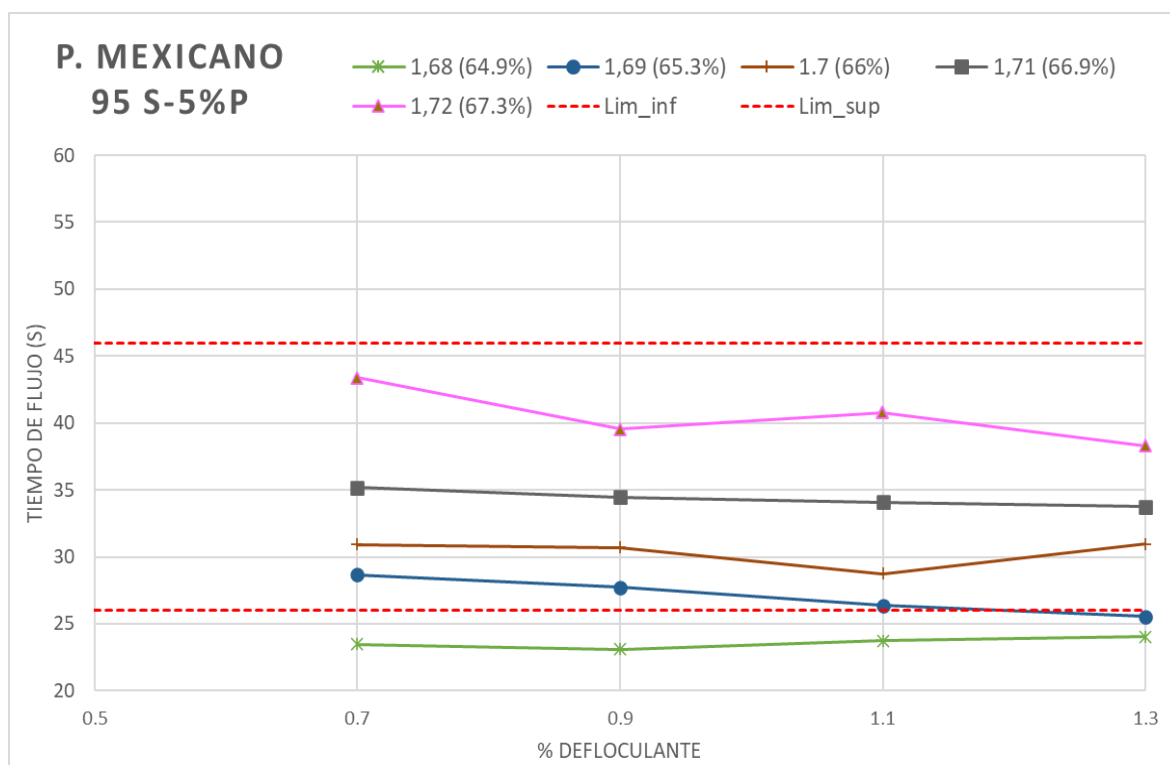


Figura 11: Curvas defloculación con la mezcla S95%-PMX5% aumentando el contenido de sólidos en la barbotina.

Nota. En la leyenda se encuentra las diferentes densidades en g/cm³ y entre paréntesis el porcentaje de contenido de sólidos

Como se observa en la Figura 11, todas las curvas realizadas a distintos contenidos de sólidos se encuentran por debajo del límite superior de viscosidad, lo que muestra que se puede llegar a alcanzar una densidad de 1.72 g/cm³, no obstante, la curva que da este valor, se encuentra

cercano al límite superior (46 s), por lo que se considera ideal trabajar con una densidad de 1.71 g/cm^3 , que representa un 66.90% en contenido de sólidos.

La segunda mezcla escogida para el estudio de robustez fue la S90%-PMX10%, se realizaron las pruebas a las mismas condiciones que la anterior y se obtuvieron las siguientes curvas de defloculación:

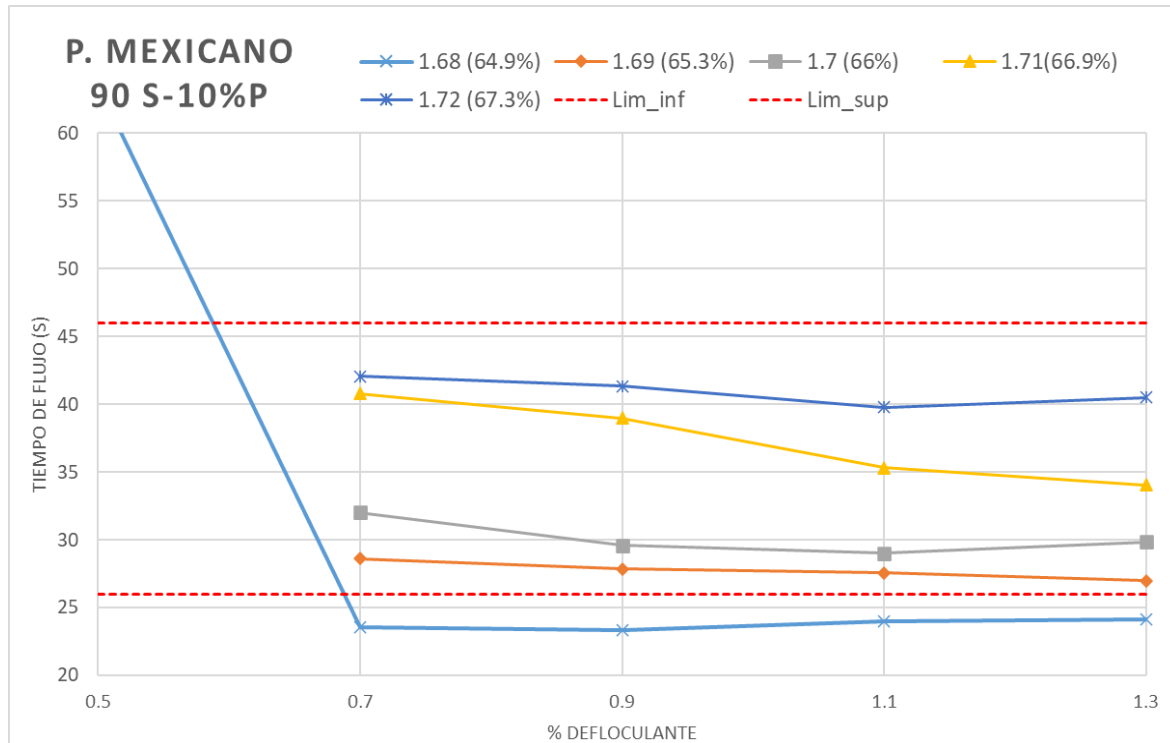


Figura 12: Curvas de defloculación con la mezcla S90%-PMX10% aumentando el contenido de sólidos en la barbotina.

Nota. En la leyenda se encuentra las diferentes densidades en g/cm^3 y entre paréntesis el porcentaje de contenido de sólidos

De manera similar al anterior caso, la Figura 12 muestra que se puede alcanzar exitosamente una densidad de 1.72 g/cm^3 con esta mezcla, pero por encontrarse en el límite superior de viscosidad, se toma como ideal trabajar a una densidad de 1.70 g/cm^3 ; por lo que, desde el punto de vista del proceso de atomizado, se considera un ahorro, ya que se obtiene una suspensión con 66% de sólidos, lo que equivale a un 34% de agua a eliminar en el atomizador versus el 35.8% actual.

La siguiente tabla muestra un resumen de las dos dosificaciones óptimas de las mezclas silicato de sodio-poliacrilato de sodio de cada proveedor:

Tabla 6: Resumen de las mezclas óptimas para porcelanato.

Defloculante analizado (%)	Proveedor	Silicato de sodio (%)	Poliacrilato de sodio (%)	Densidad de trabajo escogida (g/cm ³)
0.70	Español	75	25	1.71
		65	35	1.71
	Mexicano	95	5	1.71
		90	10	1.70

En cuanto a la capacidad de las mezclas para trabajar con densidades superiores a los valores preestablecidos, se puede decir que tienen un comportamiento similar entre ellas, es decir alcanzan una densidad máxima similar; por lo tanto, no sería un factor decisivo a la hora de la elección de la mezcla óptima, sin embargo, es importante tener en cuenta para la optimización del proceso de atomizado.

Todas estas pruebas se realizaron en condiciones controladas de laboratorio, por lo que hay que tener en cuenta que se puede presentar ligeras variaciones en los resultados a la hora de aplicarlas en la planta productiva; por otro lado, en cuanto a los porcentajes de dosificación de las mezclas se afirma que, mientras más polímero contenga en su formulación, más costosa será la producción de la misma por el costo del aditivo.

3.3 RESULTADOS DEL ANÁLISIS ECONÓMICO PARA LA TECNOLOGÍA DE PORCELANATO.

3.3.1 Resultados del análisis económico en la etapa de molienda utilizando el polímero español.

En la optimización de procesos, uno de los factores decisivos es el económico; en la etapa de molienda, se realizó el estudio económico enfocado en el costo de las mezclas, que están directamente relacionado con el precio de los polímeros, además de la disminución del consumo del defloculante al bajar su porcentaje de adición en la molienda. Los costos de los aditivos utilizados en este estudio se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7: Costos por kilogramo de aditivo.

Aditivo	\$/Kg
Silicato de sodio	0.41
Poliacrilato de sodio (proveedor español)	1.58
Poliacrilato de sodio (proveedor mexicano)	1.62

A partir del costo de los aditivos, se calculó el precio de las dos mezclas de defloculantes consideradas más eficientes usando el polímero español, en función de las curvas de defloculación analizadas previamente, y la mezcla de defloculantes estándar usado actualmente en la empresa (S80%-P20%); los costos se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8: Costos de las mezclas de defloculantes por kilogramo usando el polímero español.

MEZCLAS PREPARADAS			
% Silicato de sodio	80(STD)	75	65
% Poliacrilato de sodio	20(STD)	25	35
\$/kg	\$ 0.64	\$0.70	\$0.82

Para conocer los costos productivos de las mezclas, se realizó un promedio trimestral (junio-agosto 2022) de las condiciones de trabajo del molino, para utilizarlos como datos referenciales para los cálculos. Las condiciones se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9: Condiciones del molino como promedio trimestral.

CONDICIONES DEL MOLINO PROMEDIO TRIMESTRAL				
Adición defloculante (%)	Tonelaje (ton secas/h)	Densidad (kg/m ³)	Contenido de agua (%)	Contenido de sólidos (%)
0.75	13.48	1660	35.80	64.20

A partir de los datos estándar, como es el porcentaje de adición de defloculante, el tonelaje promedio transformado a kg/h y el costo por kilogramo de mezcla de defloculante, se obtuvo los siguientes costos productivos:

Tabla 10: Costo de las mezclas con poliacrilato español para porcelanato.

Costo de las mezclas con 0.75% de defloculante			
Mezcla (%)	80/20 (STD)	75/25	65/35
\$/h	65.11	71.02	82.85
\$/año	562 537	613 637	715 837

Cambiar la mezcla estándar por cualquiera de las dos opciones consideradas como las eficientes, genera un gasto superior anual de \$51 100 y \$153 300, respectivamente. A partir de las figuras 7 y 8, se sabe que las dos mezclas de elección tienen un comportamiento similar con respecto al análisis de robustez, con lo que se descarta la de silicato de sodio 65%-poliacrilato de sodio 35%, ya que el gasto es mayor y no se compensa en ningún punto.

Partiendo de este análisis, la prueba industrial se efectuó con la mezcla silicato de sodio 75%-poliacrilato de sodio 25%.

3.3.2 Resultados de la prueba industrial en porcelanato

La prueba industrial fue realizada por el personal de la planta productiva (por política de la empresa); una vez logran estabilizar el proceso de molienda, modifican las condiciones de las variables de entrada hasta lograr la optimización de la misma, es decir, ocupar un porcentaje de adición de defloculante mínimo y llegar a un contenido de sólidos máximo. Los resultados se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11: Condiciones del molino prueba industrial mezcla 75%-25% para porcelanato.

CONDICIONES DEL MOLINO PRUEBA PLANTA			
% Defloculante	Tonelaje (ton/h)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad (s)
0.65	12.30	1690	37

Se consiguió reducir el porcentaje de dosificación de defloculante de 0.75% a 0.65% y subir la densidad de 1.66 a 1.69 g/cm³, resultando una viscosidad de 37 segundos, logrando estas condiciones de molienda se procedió a corregir los cálculos económicos asumiendo el mismo tonelaje de la prueba para las condiciones estándar.

Tabla 12: Costo productivo de las mezclas con un tonelaje de 12.3 ton/h disminuyendo el porcentaje de adición de defloculante.

Costo anual de las mezclas con 12.30 ton secas/h		
% Defloculante	0.75	0.65
Mezcla (%)	80/20 (STD)	75/25
\$/h	59.41	56.16
\$/año	513 294	485 265

Como se mencionó anteriormente, utilizar la mezcla silicato de sodio 75%-poliacrilato de sodio 25% como reemplazo a la 80/20% estándar, genera un gasto si se usa el mismo porcentaje de adición del aditivo en la molienda, sin embargo, la prueba industrial mostró que se puede reducir en un 0.10% esta adición, con lo cual se conseguiría un ahorro anual de \$28 029 en la etapa de molienda.

3.3.3 Resultados del análisis económico en la etapa de atomizado utilizando el polímero español

A partir de los resultados de la prueba industrial indicados en la Tabla 11, se sabe que con la mezcla S75%-P25% la densidad de trabajo de la barbotina es de 1.69 g/cm³, esta es superior a la densidad con la que se trabaja con la mezcla estándar, es decir 1.66 g/cm³, estas dos densidades fueron consideradas para los cálculos; además, se eligió como referente uno de los cuatro combustibles empleados en la empresa, los datos del mismo se encuentran en el Anexo D: Tabla de datos del agua y combustible.

Para iniciar con los cálculos, en la Tabla 13 se muestra las condiciones de la barbotina y del polvo atomizado, tanto de las condiciones estándar como las obtenidas con la prueba.

Tabla 13: Condiciones de la barbotina y polvo atomizado.

BARBOTINA			
	Unidades	Estándar	S75%-P25%
Densidad	Kg/m ³	1660	1690
Agua	%	35.80	34.70
Contenidos sólidos secos	%	64.20	65.30
ATOMIZADO			
Capacidad del atomizador	kg/h	11 000	
Humedad del polvo atomizado	%	6.50	

A partir de la Tabla 13 y Anexo D (datos del combustible), se realizó los cálculos respectivos y se obtuvo los resultados presentados en la Tabla 14.

Tabla 14: Resultados del costo y consumo de combustible.

		Estándar	S75%-P25%
Agua a evaporar	%	29.3	28.2
Masa de agua a evaporar	Kg/h	3 223	3 102
Masa de polvo atomizado	Kg/h	7 777	7 898
Energía para evaporar H₂O	Kcal/h	1 740 420	1 675 080
Costo y consumo de combustible			
Cantidad de combustible	Kg/h	161.15	155.10
Precio combustible consumido	\$/h	72.68	69.95
	\$/año	627 943	604 368

Basado en los resultados presentados en la Tabla 14, se aumenta en un 1.55% la producción de polvo atomizado, lo que equivale a 1 045 ton/año más. Por otra parte, al lograr aumentar el contenido de sólidos en la barbotina con la mezcla óptima, se reduce el porcentaje de agua en la misma, por ende, la cantidad de agua a evaporar en el atomizado será menor, en conjunto con la disminución del consumo de combustible. La mezcla de defloculantes estándar genera un gasto anual de \$627 943, mientras que la mezcla óptima obtenida en este estudio generaría un gasto de \$604 368, consecuentemente se obtendría un ahorro anual de aproximadamente \$23 575.

Una vez realizado el análisis económico y como se muestra en la Tabla 15, existe un ahorro total (molienda+atomizado) de \$51 604 al año, representando un porcentaje de ahorro anual del 4,52%.

Tabla 15: Resumen de costos.

	Unidades	Estándar	S75%-P25%	Δ
Costo Consumo Defloculante	\$/anual	513 294	485 265	28 029
Costo Combustible	\$/anual	627 943	604 368	23 575
Costo Total	\$/anual	1 141 237	1 089 633	51 604

3.3.4 Resultados del análisis económico en la etapa de molienda utilizando el polímero mexicano

En la sección 3.2.3 se consideraron las mezclas S90%-PMX10% y S95%-PMX5% como las óptimas, por lo que a partir de los costos de los aditivos descritos en la Tabla 7, se calculó los costos de estas mezclas y se presentan en la Tabla 16, en conjunto con el costo de la mezcla 80/20% que se refiere a la mezcla estándar utilizada actualmente en la empresa, mas no al costo de la mezcla usando el polímero mexicano. Este último costo se utiliza para la comparación con las mezclas óptimas usando el poliacrilato de sodio mexicano.

Tabla 16: Costos de las mezclas óptimas con el polímero mexicano.

MEZCLAS PREPARADAS			
% Silicato de sodio	80 (STD)	95	90
% Poliacrilato de sodio	20 (STD)	5	10
\$/kg	\$0.64	\$ 0.47	\$0.53

Para el cálculo de los costos productivos de las mezclas se utilizó el tonelaje de las condiciones de molienda descritos en la Tabla 11, ya que se está analizando la misma tecnología; obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 17.

Tabla 17: Costos de las mezclas con 0.75% de defloculante usando el polímero mexicano.

Costo de las mezclas con 0.75% de defloculante			
Mezcla (%)	80/20 (STD)	95/5	90/10
\$/h	59.41	43.40	48.98
\$/año	513 294	375 007	423 228

Al ser el polímero el aditivo de mayor costo, las mezclas serán más económicas mientras menor sea el porcentaje de dosificación del mismo, por lo que, partiendo de esta certeza, al disminuir el porcentaje en la mezcla desde el 20% de poliacrilato de sodio español a un 10% del poliacrilato mexicano, genera un ahorro de \$90 066 y a un 5% el ahorro es de \$138 286.

Adicionalmente, a partir de la Figura 11 y 12, se sabe que las dos mezclas, tanto la S90%-PMX10% y S95%-PMX5%, tienen un comportamiento eficiente con una adición de defloculante del 0.70%, inclusive si se aumenta la densidad a 1.72 g/cm³; no obstante, al ser el polímero mexicano un aditivo de estudio, no se cuenta con la cantidad necesaria para realizar una prueba a nivel industrial para corroborar hasta que porcentaje es posible disminuir la adición del defloculante, por lo que, los cálculos se realizaron teóricamente con 0.70%, conforme los resultados obtenidos en las pruebas a nivel de laboratorio, comparado con 0.75% del estándar. Los costos se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18: Costo anual de las mezclas disminuyendo el porcentaje de adición de defloculante.

Costo anual de las mezclas			
% Defloculante	0.75	0.70	
Mezcla (%)	80/20 (STD)	95/5	90/10
\$/h	59.41	40.51	45.72
\$/año	513 294	350 007	395 013

Conseguir bajar el porcentaje de adición de defloculante del 0.75% al 0.70%, generaría un ahorro económico anual de \$163 287 y \$118 281, respectivamente; las Figuras 11 y 12 muestran que estas dos mezclas tienen una robustez prácticamente igual, por lo que se eligió como óptima la mezcla de silicato de sodio 95%-poliacrilato de sodio 5%.

3.3.5 Resultados del análisis económico en la etapa de atomizado utilizando el polímero mexicano

A partir de la Figura 11, que presenta las curvas de defloculación resultantes del estudio de robustez, se sabe que operar con densidades menores a 1.72 g/cm^3 garantiza estar por debajo del límite superior de viscosidad; para trabajar con un rango central de viscosidades, se realizó el análisis económico con una densidad de 1.70 g/cm^3 , que representa un 66% de contenido de sólidos. Las condiciones de la barbotina y polvo atomizado, tanto de la mezcla estándar como la de S95%-PMX5%, se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19: Condiciones de la barbotina y polvo atomizado con la mezcla óptima usando el polímero mexicano.

BARBOTINA			
	Unidades	Estándar	S95%-PMX5%
Densidad	Kg/m ³	1660	1700
Agua	%	35.80	34.00
Contenidos sólidos secos	%	64.20	66.00
ATOMIZADO			
Capacidad atomizador	kg/h	11 000	
Humedad del polvo atomizado	%	6.50	

A partir de la Tabla 19 y Anexo D (datos del combustible), se calculó las cantidades y costos de combustible consumido, los resultados se exponen en la Tabla 20.

Tabla 20: Resultados del consumo y costo del combustible comparado con el estándar.

		Estándar	S95%-PMX5%
Agua a evaporar	%	29.30	27.50
Masa de agua a evaporar	Kg/h	3 223	3 025
Masa de polvo atomizado	Kg/h	7 777	7 975
Energía para evaporar H₂O	Kcal/h	1 740 420	1 633 500
Costo y consumo de combustible			
Cantidad de combustible	Kg/h	161.15	151.25
Precio combustible consumido	\$/h	72.68	68.21
	\$/año	627 943	589 366

A partir de estos resultados, se sabe que existe un aumento de la producción de polvo atomizado de 1 710 ton/año, que representa un 2.54%, esto debido a la disminución del contenido de agua en la barbotina.

Aumentar el contenido de sólidos del 64.20% al 66% con la mezcla S95-PMX5%, genera un ahorro anual aproximado de \$38 577 en combustible.

Una vez realizado el análisis económico y como se muestra en la Tabla 21, se calculó que, al utilizar la mezcla S95%-PMX5%, existe un ahorro total (molienda+atomizado) de \$201 864, que representa un 17,68% de ahorro anual.

Tabla 21: Resumen de costos totales utilizando el polímero mexicano.

	Unidades	Estándar	S95%-PMX5%	Δ
Costo Consumo Defloculante	\$/anual	513 294	350 007	163 287
Costo Combustible	\$/anual	627 943	589 366	38 577
Costo Total	\$/anual	1 141 237	939 373	201 864

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las pruebas aplicadas a la tecnología de gres.

3.4 RESULTADOS CURVAS DE DESFLOCULACIÓN PARA GRES

Para la tecnología de gres, la empresa trabaja con un porcentaje de adición de defloculante del 0.95% con la misma mezcla estándar, por lo que, para el análisis de las curvas de defloculación y robustez se utilizará 0.90% de adición, ya que es el inmediato inferior disponible. Además, todas las pastas barbotinas fueron preparadas en las mismas condiciones, especificadas en la Tabla 4.

3.4.1 Curvas de defloculación utilizando poliacrilato de sodio del proveedor español

Utilizando las mezclas descritas en la Tabla 2, se obtuvo las siguientes curvas de defloculación con la pasta roja en la tecnología de gres.

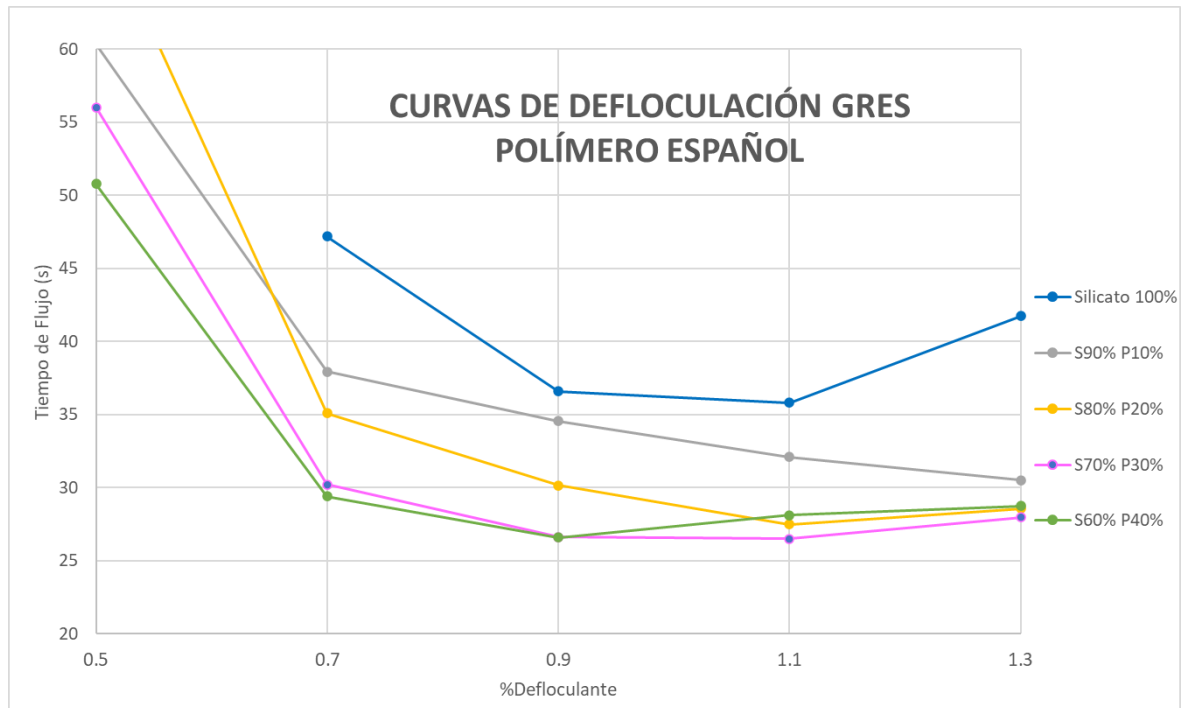


Figura 13: Curvas de defloculación utilizando mezclas con el poliacrilato español para gres.

Se puede evidenciar en la Figura 13 que, las curvas de defloculación muestran una eficiencia mayor conforme se va adicionando más poliacrilato de sodio a las mezclas, como se ha mencionado en el apartado de porcelanato; de igual manera se infiere que dicha efectividad se debe a que convergen los dos mecanismos de repulsión vistos en la sección teórica.

Analizando las curvas, se observa que con un 0.90% de adición de defloculante las mejores mezclas son: S70%-P30% y S60%-P40%, ya que con éstas se obtienen los menores tiempos de flujo. Es importantes mencionar que estas mezclas trabajan bien inclusive con un 0.70% de defloculante, lo que indica una buena efectividad de las mismas. Además, se observa que en general no existe un fenómeno de sobredefloculación muy pronunciado, a excepción del silicato puro con 1.30% de adición.

Partiendo de estas dos mejores mezclas, se realizó pruebas con mezclas intermedias para conocer su efectividad, las proporciones de mezcla son: S75%-P25% y S65%-P35%, los resultados obtenidos en las curvas de defloculación se presentan a continuación.

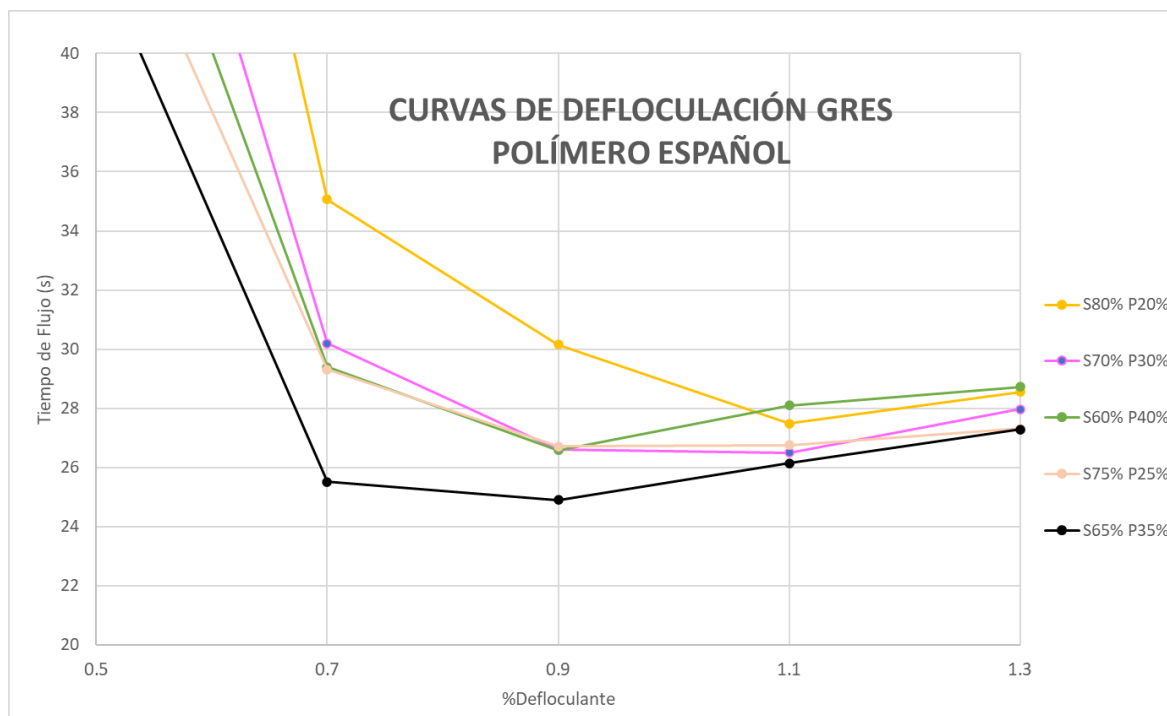


Figura 14: Curvas de defloculación con mezclas iniciales e intermedias para gres.

Siguiendo el mismo método de análisis y elección de las mezclas eficientes del caso anterior, en la Figura 14 se observa que, la mezcla S65%-P35% es la más eficaz por presentar el menor tiempo de flujo, seguidas de esta, varias mezclas actúan de manera similar; sin embargo, se escoge la mezcla S75%-P25%, ya que contiene menor porcentaje de polímero, que implica un menor costo de la mezcla. Partiendo de este resultado, se realizó el análisis de robustez de estas dos mezclas seleccionadas, con un aumento de contenido en sólidos, para conocer la eficiencia de las mismas.

3.4.2 Resultados del estudio de robustez para gres utilizando poliacrilato de sodio del proveedor español

Se partió el análisis de la robustez con la mezcla S75%-P25%, dando como resultados lo siguiente:

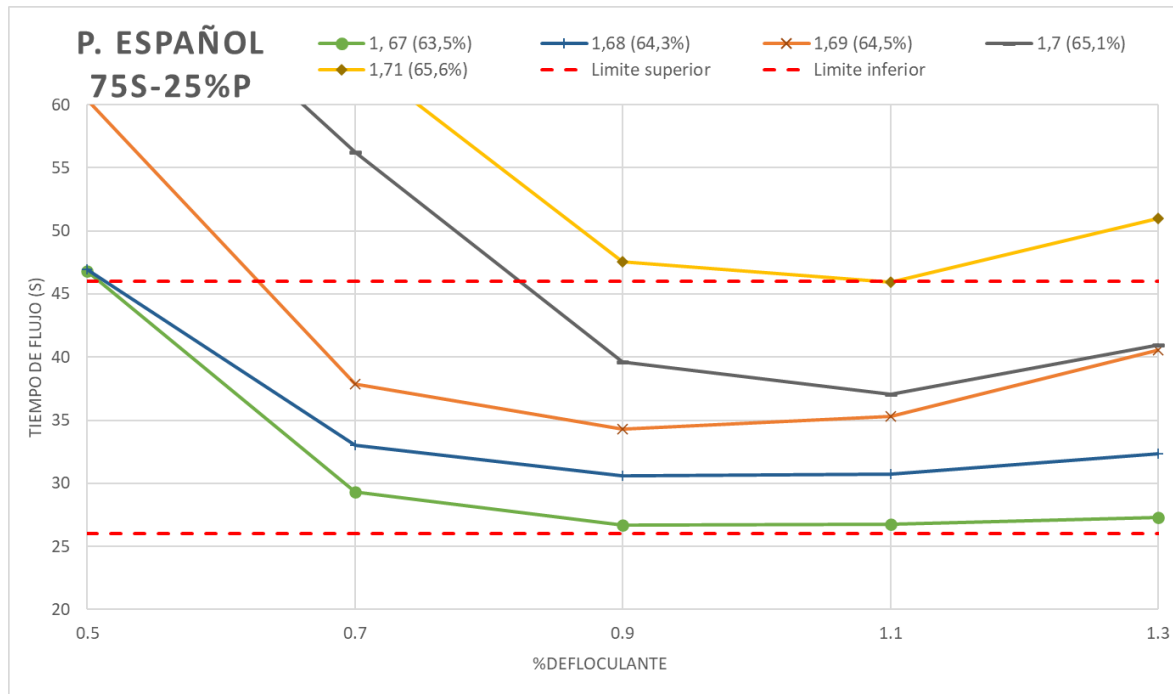


Figura 15: Curvas de defloculación con la mezcla S75%-P25% aumentando el contenido de sólidos para gres.

Al analizar las curvas de defloculación de la Figura 15 con 0.90% de defloculante, se observa que, al llegar a un valor de densidad de 1,71 g/cm³ sobrepasa el límite superior de viscosidad; por lo tanto, se puede decir que, la curva óptima de este estudio de robustez es la que presenta una densidad de 1,69 g/cm³ (64,50%), ya que tiene su viscosidad dentro del rango central de los parámetros aceptados. Al llegar a este contenido de sólidos habría un aumento del mismo en comparación con el actual del 62.2%, lo que a una disminución de la cantidad de agua a evaporar en el proceso de atomización.

El siguiente estudio de robustez se realizó para la mezcla de S65%-P35%, resultando las curvas de defloculación mostradas en la Figura 16.

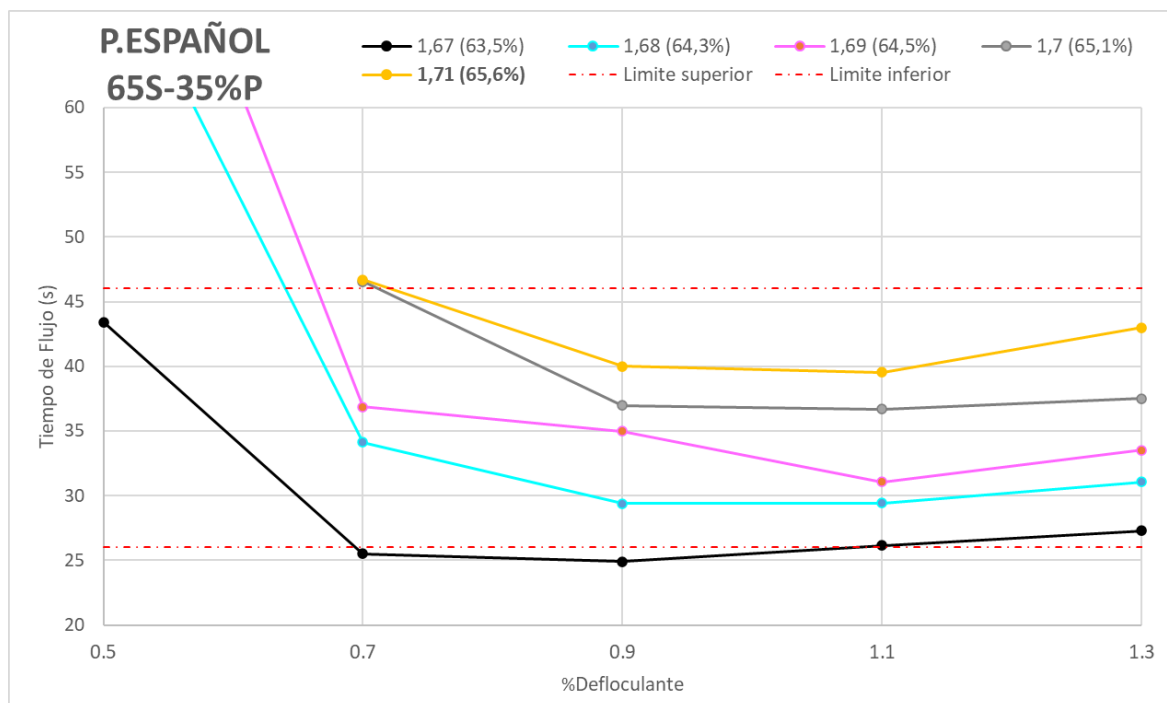


Figura 16: Curvas de defloculación con la mezcla S65%-P35% aumentando el contenido de sólidos para gres.

Con esta mezcla se puede alcanzar una densidad de 1.71 g/cm^3 con 0.90% de adición de defloculante, no obstante, se toma como ideal trabajar con una densidad de 1.70 g/cm^3 , 65.1% en sólidos, ya que la viscosidad se encuentra más cercana al rango central de las especificaciones; al igual que el caso anterior, se lograría disminuir la cantidad de agua a evaporar en la etapa de atomizado.

3.4.3 Curvas de defloculación utilizando poliacrilato de sodio del proveedor mexicano para gres

Siguiendo las mismas secuencias de mezclas redactadas en la Tabla 2, se obtuvieron las siguientes curvas de defloculación para gres usando el polímero proveniente de México.

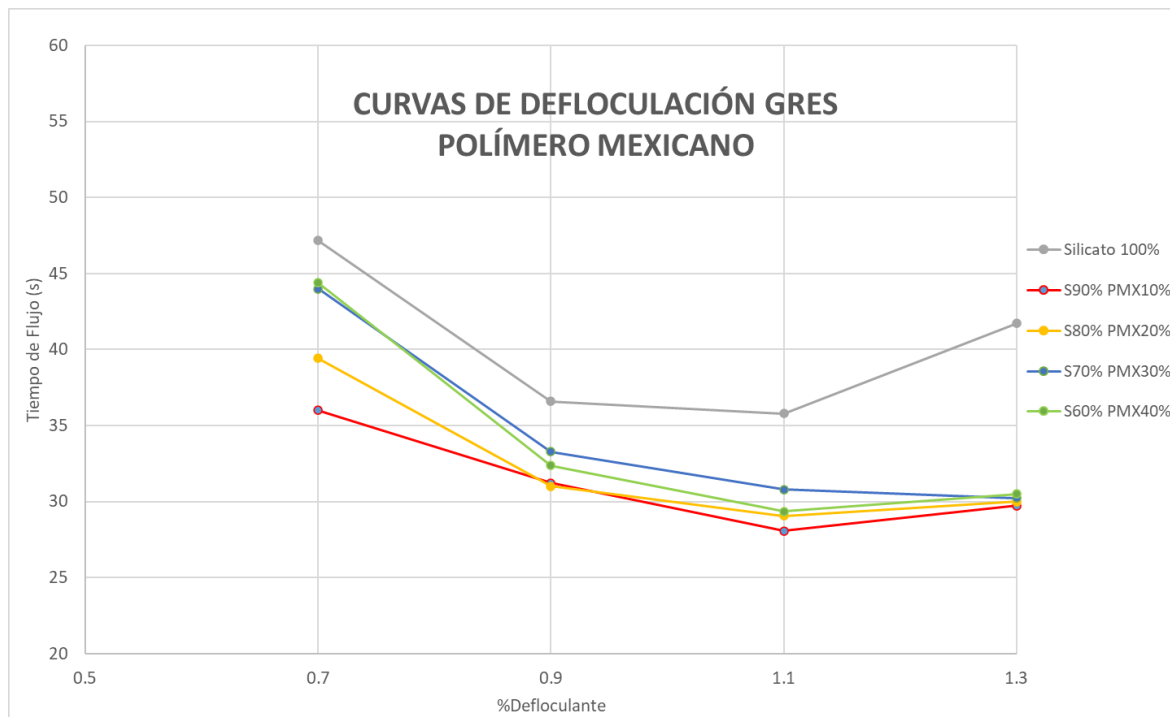


Figura 17: Curvas de defloculación utilizando mezclas con el poliacrilato del proveedor mexicano para gres.

Al igual que en la pasta de porcelanato, en la Figura 17 se observa de forma general que, existe una mayor efectividad de las mezclas, conforme menor porcentaje de polímero mexicano se añada a la mezcla para realizar la defloculación.

Basándose en la teoría para la elección de la mejor curva de defloculación, se puede determinar que las dos curvas óptimas de defloculación son: S90%-PMX10% y S80%-PMX20%, ya que presentan los valores más bajos de viscosidad con menor porcentaje de adición de defloculante (0.70-0.90%).

En este punto, se realizó mezclas intermedias para conocer el comportamiento de las mismas, estas mezclas son: S85%-PMX15% y S95%-PMX5%, obteniendo los siguientes resultados:

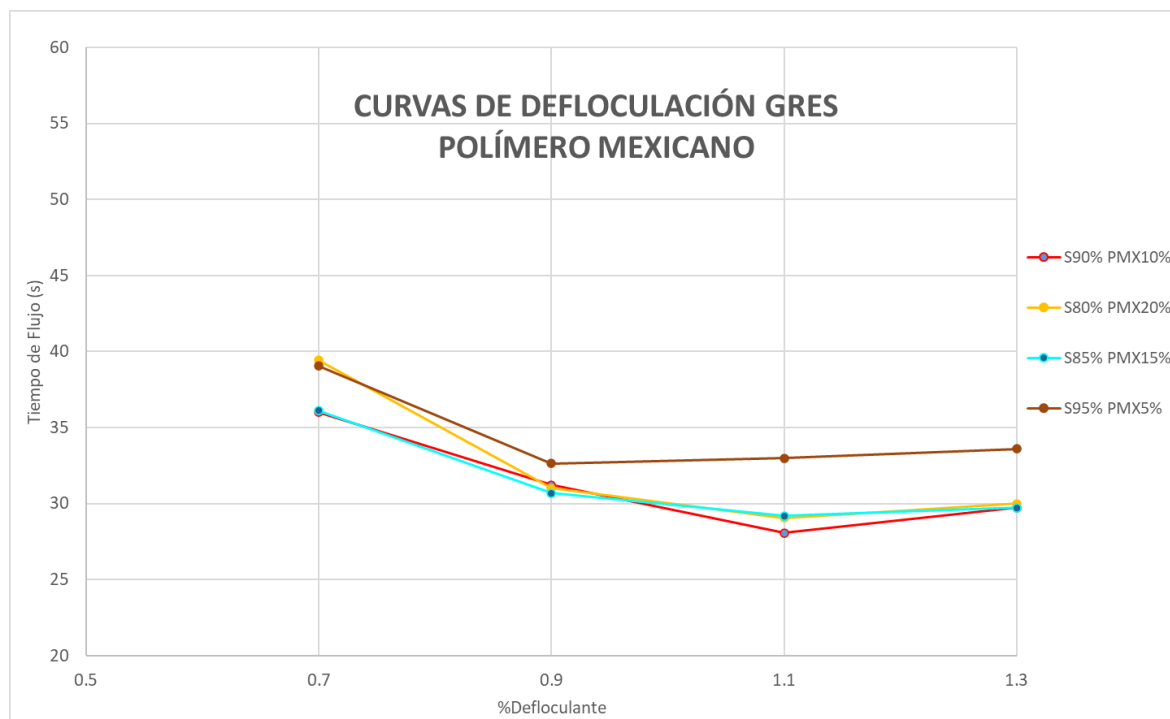


Figura 18: Curvas de defloculación con mezclas iniciales e intermedias usando el polímero mexicano para gres.

Tomando como referencia un porcentaje de adición de defloculante de 0.90%, las curvas de las mezclas S90%-PMX10%, S85%-PMX15% y S80%-PMX20% presentan un comportamiento similar, con el menor tiempo de flujo o menor viscosidad; sin embargo, se escoge las mezclas S90%-PMX10% y S85%-PMX15% como las más eficientes, ya que presentan menor contenido de polímero en su mezcla.

En base a estos resultados, se procedió a realizar los ensayos de robustez con un aumento del contenido de sólidos en la barbotina, en las mismas condiciones de las mezclas usadas con el polímero español.

3.4.4 Resultados del estudio de robustez para gres utilizando poliacrilato de sodio del proveedor mexicano

El estudio se inició con la mezcla S90%-PMS10%, obteniendo las curvas de defloculación mostradas en la Figura 19.

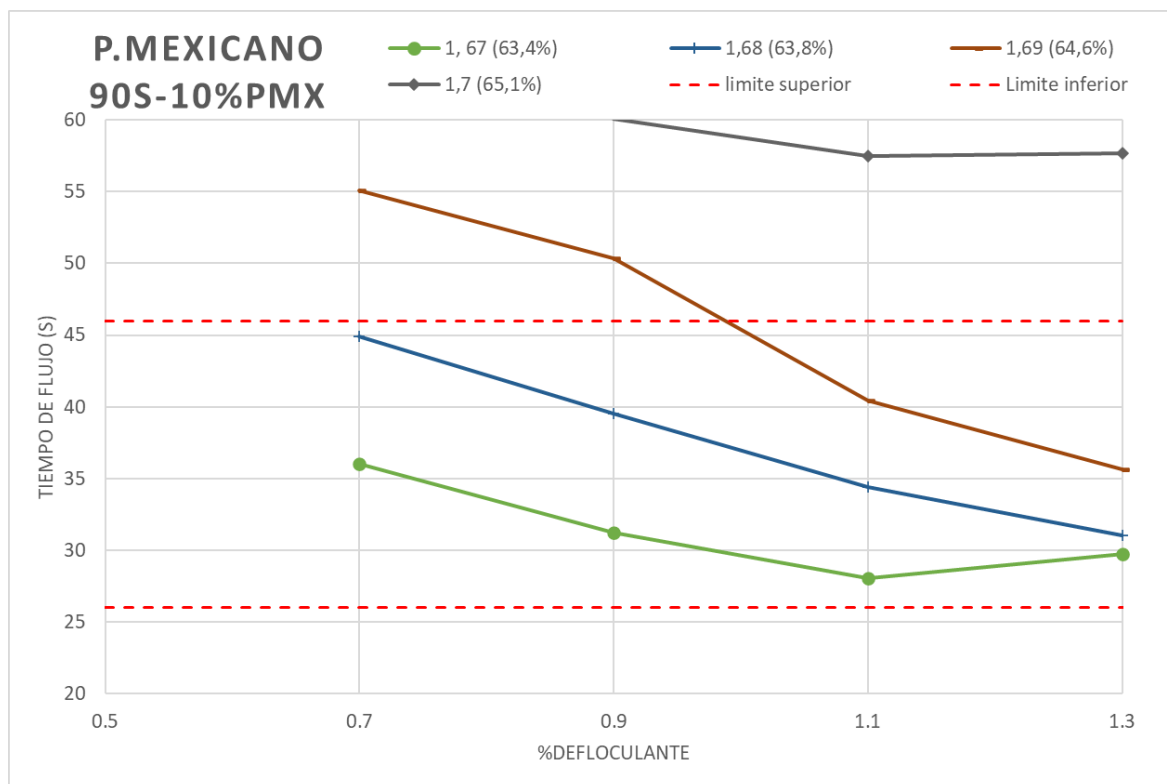


Figura 19: Curvas defloculación con la mezcla S90%-PMX10% aumentando el contenido de sólidos en la barbotina para gres.

En este estudio de robustez se planteó dos panoramas, el primero, en donde con un porcentaje de adición de 0.70% de defloculante se puede alcanzar una densidad de 1.67 g/cm³ (63.4% en sólidos) en un rango central de viscosidad y el segundo, en donde se alcanza una densidad superior, de 1.68 g/cm³ (63.8% en sólidos) con 0.90% de defloculante. En ambos casos, se lograría un aumento en el contenido de sólidos, ya que el estándar presenta 62.20% en sólidos, por lo tanto, habría una disminución del porcentaje de agua en la molienda y la cantidad de agua a evaporar en la atomización sería menor, en consecuencia, disminuiría el consumo de combustible; este resultado se verá reflejado en el análisis económico.

La segunda mezcla de elección para el estudio de robustez fue la S85%-PMX15%, se realizaron las pruebas a las mismas condiciones que la anterior mezcla y se obtuvieron las siguientes curvas de defloculación.

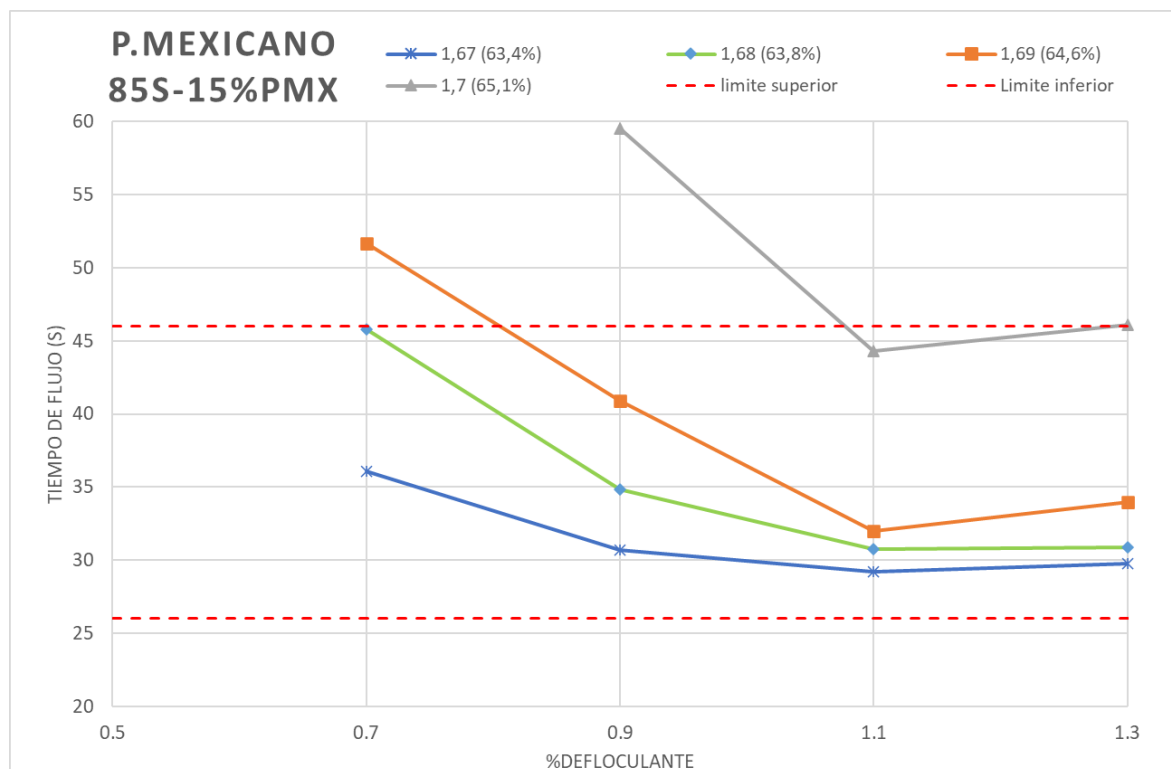


Figura 20: Curvas de defloculación con la mezcla S85%-PMX15% aumentando el contenido de sólidos en la barbotina para gres.

A partir de la Figura 20 de la mezcla de S85%-PMX15%, también se planteó dos panoramas, una con una adición de defloculante del 0,70% se presenta su viscosidad en el rango central a una densidad de 1.67 g/cm³ y la segunda, con un porcentaje de defloculante de 0.90% con una densidad de 1.68 g/cm³. En ambos casos se logra un aumento del contenido de sólidos y disminución de la cantidad de agua a evaporar.

La siguiente tabla presenta de manera resumida las dos dosificaciones óptimas de cada proveedor y las condiciones alcanzadas.

Tabla 22: Resumen de las mezclas óptimas para gres.

% Defloculante analizado	Proveedor	% Silicato de sodio	% Poliacrilato de sodio	Densidad de trabajo escogida (g/cm ³)
0.7	Mexicano	90	10	1.67
		85	15	1.67
0.90	Español	75	25	1.69
		65	35	1.70
	Mexicano	90	10	1.68
		85	15	1.68

3.5 RESULTADOS DEL ANÁLISIS ECONÓMICO PARA LA TECNOLOGÍA DE GRES

3.5.1 Resultados del análisis económico en la etapa de molienda utilizando el polímero español

Como en el apartado de porcelanato, se realizó el análisis de costos en área de molienda y atomizado, tomando en cuenta el costo de mezcla de materiales para preparar el defloculante, consumo de defloculante y cantidad de agua evaporada.

En la sección 3.4.1 se consideró como mejores mezclas a la S75%-P25% y la S65%.P35%, el costo de los aditivos para las mezclas se encuentra en la Tabla 7, así como los costos por kilogramo de cada mezcla de defloculante en la Tabla 8.

Para el cálculo de los costos productivos de las mezclas, se obtuvo como datos las condiciones de trabajo del molino como promedio trimestral (noviembre 2022-enero 2023), estos datos se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23: Condiciones del molino como promedio trimestral para gres.

CONDICIONES DEL MOLINO PROMEDIO TRIMESTRAL				
Adición de defloculante (%)	Tonelaje (ton secas/h)	Densidad (kg/m ³)	Contenido de Agua (%)	Contenido de Sólidos (%)
0.95	14.20	1652	37.80	62.20

Partiendo de estas condiciones, se realizó el primer análisis de costos con respecto a los costos productivos de las mezclas, los resultados se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla 24: Costos productivos de las mezclas con defloculante español para gres.

Costo de las mezclas con 0.95% de defloculante			
Mezcla (%)	80/20 (STD)	75/25	65/35
\$/h	86.88	94.77	110.55
\$/año	750 605	818 789	955 157

Como se muestra en la Tabla 24, con un porcentaje de adición de defloculante de 0.95%, no existe ahorro para ninguna de las dos mezclas óptimas comparadas con el estándar, debido al aumento de la cantidad de polímero utilizado en las mismas; a partir de las Figuras 15 y 16, que muestran el análisis de robustez, se sabe que las dos mezclas alcanzan prácticamente el mismo porcentaje de contenido de sólidos, por lo que, se toma como la más adecuada para realizar una prueba industrial a la mezcla S75%-P25%, ya que presenta menor gasto que la S65%-P35% por el costo del polímero.

3.5.2 Resultados de la prueba industrial en gres

La empresa realizó la respectiva prueba industrial en producción, en base a los resultados presentados previamente, las condiciones finales alcanzadas se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 25: Condiciones del molino prueba industrial mezcla 75-25% para gres.

CONDICIONES DEL MOLINO PRUEBA GRES			
% Defloculante	Tonelaje (ton/h)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad (s)
0.80	14.60	1680	39

A partir de estos datos presentados en la Tabla 25, se sabe que, las condiciones a las que se llega con este defloculante son, una disminución del porcentaje de adición en un 0,15% y un aumento de la densidad en un 1.69% es decir, de un valor de 1,65 g/cm³ a 1,68 g/cm³.

Con estas nuevas condiciones se realizó el cálculo del costo productivo de las mejores mezclas, en comparación con el estándar.

Tabla 26: Costos productivos de las mezclas con tonelaje de 14.6 ton/h disminuyendo el porcentaje de adición de defloculante.

Costo anual de las mezclas con 14.60 ton secas/h		
% Defloculante	0.95	0.80
Mezcla (%)	80/20 (STD)	75/25
\$/h	89.32	82.05
\$/año	771 748	708 929

Como se muestra en la Tabla 26, con la disminución de adición de defloculante, la mejor mezcla genera un ahorro económico de \$62 819 al año.

3.5.3 Resultados del análisis económico en la etapa de atomizado utilizando el polímero español

Para iniciar con los cálculos, en la Tabla 27 se muestra las condiciones de la barbotina y del polvo atomizado, tanto de las condiciones estándar como las obtenidas con la prueba.

Tabla 27: *Condiciones de la barbotina y polvo atomizado para gres.*

BARBOTINA			
	Unidades	Estándar	S75%-P25%
Densidad	Kg/m ³	1652	1680
Agua	%	37.80	35.70
Contenidos sólidos secos	%	62.20	64.30
ATOMIZADO			
Capacidad del atomizador	kg/h	18 000	
Humedad del polvo atomizado	%	6.50	

A partir de la Tabla 13 y Anexo D (datos del combustible), se realizó los cálculos respectivos y se obtuvo los resultados presentados en la Tabla 28.

Tabla 28: *Resultados del costo y consumo de combustible en gres.*

		Estándar	S75%-P25%
Agua a evaporar	%	31.30	29.20
Masa de agua a evaporar	Kg/h	5 634	5 256
Masa de polvo atomizado	Kg/h	12 366	12 744
Energía para evaporar Kg H₂O	Kcal/h	3 042 360	2 838 240
Costo y consumo de combustible			
Cantidad de combustible	Kg/h	281.7	262.80
Precio	\$/h	127.05	118.52
	\$/año	1 097 683	1 024 036

Como se muestra en la Tabla 28, se obtuvo que la disminución de agua en la suspensión, con lo que se genera un aumento en la producción de polvo atomizado de 3 265 ton/año, que representan un aumento del 3.05%, conjuntamente con esto, se refleja en una disminución del gasto en combustible lo cual genera un ahorro anual aproximado de \$73 647.

Finalmente, la suma de ahorro tanto en la etapa de molienda, con el porcentaje de adición de defloculante, como en el atomizador, con el aumento del contenido en sólidos genera un ahorro económico total anual del 7,29%, equivalente a \$136 466, los resultados se reflejan en la Tabla 29.

Tabla 29: Resumen de condiciones de la barbotina y costos totales.

	Unidades	Estándar	S75%-P25%	Δ
Costo Consumo Defloculante	\$/anual	771 748	708 929	62 819
Costo Combustible	\$/anual	1 097 683	1 024 036	73 647
Costo Total	\$/anual	1 869 431	1 732 965	136 466

3.5.4 Resultados del análisis económico en la etapa de molienda utilizando el polímero mexicano

Al igual que en el porcelanato, tampoco fue posible realizar la prueba industrial debido a que no se cuenta con suficiente cantidad de polímero mexicano.

En la sección 3.4.3 se consideraron como mezclas óptimas las de las proporciones S90%-PMX10% y S85%-PMX15%, por lo que, a partir de la Tabla 7 se obtuvieron los siguientes costos por kilogramo de mezcla, presentados en la Tabla 30. El costo de la combinación 80/20% refiere a la mezcla estándar utilizada actualmente en la empresa, mas no al costo de la mezcla usando el polímero mexicano. Este costo se utiliza para comparación con las mezclas óptimas usando el poliacrilato de sodio mexicano.

Tabla 30: Costos de las mezclas óptimas con el polímero mexicano para gres.

MEZCLAS PREPARADAS			
% Silicato de sodio	80 (STD)	90	85
% Poliacrilato de sodio	20 (STD)	10	15
\$/kg	\$0.64	\$ 0.53	\$0.59

Partiendo de las condiciones de molienda presentadas en la Tabla 26, como es el porcentaje de adición de defloculante del 0.95% y un tonelaje de 14.6 ton/h, se obtuvo los siguientes costos de las mezclas.

Tabla 31: Costos de las mezclas con 0.95% de defloculante usando el polímero mexicano para gres.

Costo de las mezclas con 0.95% de defloculante			
Mezcla (%)	80/20 (STD)	90/10	85/15
\$/h	89.32	73.65	82.04
\$/año	771 748	636 333	708 835

Como se evidencia en la Tabla 31, al disminuir el porcentaje del poliacrilato de sodio en las mezclas preparadas se genera un mayor ahorro, por lo que, reducir el porcentaje de polímero

del 20% de poliacrilato de sodio español, a un 10% del poliacrilato mexicano, genera un ahorro de \$135 415 y una disminución al 15%, el ahorro es de \$62 913. A partir de la Figura 19 y 20, se sabe que las dos mezclas pueden llegar a una misma densidad, por lo que, por tema de costo de defloculante se selecciona como óptima a la mezcla S90%-PMX10%.

Como se mencionó en el apartado 3.4.4, para esta mezcla seleccionada como óptima se planteó dos escenarios, bajando el porcentaje a 0.7 y 0.9% de defloculante, logrando mayor densidad con la segunda, por lo que al no contar con prueba industrial se realizó el balance con estas dos opciones.

Tomando como base las condiciones de la suspensión descrita en la Tabla 25, se realizó los cálculos de los costos productivos de las mezclas a diferentes porcentajes de adición de defloculante. Como se muestra en la Tabla 32, se genera un ahorro anual aproximado de \$168 906 si se disminuye del 0.95 al 0.9% de adición de defloculante y al 0.70% genera \$302 871 de ahorro.

Tabla 32: Costo anual de las mezclas disminuyendo el porcentaje de adición de defloculante para gres.

Costo anual de las mezclas bajando el porcentaje de adición				
% Defloculante	0.95		0.90	0.70
Mezcla (%)	80/20 (STD)	90/10	90/10	90/10
\$/h	89.32	73.65	69.77	54.27
\$/año	771 748	636 333	602 842	468 877

3.5.5 Resultados del análisis económico en la etapa de atomizado utilizando el polímero mexicano

A partir del estudio de robustez de esta mezcla (S90%-PMX10%), se conoce que es ideal trabajar con una densidad de 1.67 g/cm³ con 0.7% de defloculante y a una densidad de 1.68 g/cm³ con 0.9% de adición de defloculante, partiendo de esto, en la siguiente tabla se presenta una comparativa de condiciones con el estándar.

Tabla 33: Condiciones de la barbotina y polvo atomizado con la mezcla óptima usando el polímero mexicano para gres.

BARBOTINA				
	Unidades	Estándar	S90%-PMX10%	
% Defloculante		0,95	0,70	0,90
Densidad	Kg/m ³	1650	1670	1680
Agua	%	37.80	36.60	36.20
Contenidos sólidos secos	%	62.20	63.40	63.80
ATOMIZADO				
Capacidad atomizador	kg/h		18 000	
Humedad del polvo atomizado	%		6.50	

Como se mencionó previamente, aumentar el contenido de sólidos en la barbotina genera una menor cantidad de agua a evaporar en el atomizador, por ende, una mayor producción de polvo atomizado. Como se presenta en la Tabla 34, en el caso de subir la densidad a 1.67 g/cm³, la producción de polvo atomizado incrementa en un 1.74% (1 892 ton/año), de la misma forma, subir a 1.68 g/cm³ incrementa un 2.33% (2 523 ton/año). Conjuntamente con esto, se disminuye la cantidad de combustible usado, lo cual se refleja en un menor gasto económico, el primer caso con un ahorro anual aproximado de \$42 084 y en el segundo de \$56 112.

Tabla 34: Resultados del consumo y costo de combustible comparado con el estándar para gres.

		Estándar	S90%-PMX10%	
% Defloculante		0.95	0.70	0.90
Agua a evaporar	%	31.30	30.10	29.70
Masa de agua a evaporar	Kg/h	5 634	5 418	5346
Masa de polvo atomizado	Kg/h	12 366	12 582	12654
Energía para evaporar H₂O	Kcal/h	3 042 360	2 925 720	2 886 840
Costo y consumo de combustible				
Cantidad de combustible	Kg/h	281.70	270.90	267.30
Precio	\$/h	127.05	122.18	120.55
	\$/año	1 097 683	1 055 599	1 041 571

Tomando en cuenta los dos panoramas analizados, se procedió a sacar el ahorro económico total (molienda+atomizado), obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 35: Costos totales utilizando el polímero mexicano para gres.

	Unidades	Estándar	S90%- PMX10%	Δ	S90%- PMX10%	Δ
Costo Consumo	\$/anual	771 748	468 877	302 871	602 842	168 906
Defloculante						
Costo	\$/anual	1 097 683	1 055 599	42 084	1 041 571	56 112
Combustible						
TOTAL	\$/anual	1 869 431	1 524 476	344 955	1 644 413	225 018

Como indica la Tabla 35, el ahorro generado al disminuir el porcentaje de adición del 0.95 al 0.7% de defloculante y alcanzar una densidad de 1.67 g/cm³, es de un 18.45%; mientras que, al disminuir al 0.90% con densidad de 1.68 g/cm³, es 12.03%; por lo que, el primer escenario es el más eficiente.

CAPÍTULO IV

4.1 CONCLUSIONES

La optimización del proceso productivo de la fabricación de baldosas cerámicas es de suma importancia tanto a nivel productivo como económico y ambiental. Una de las etapas más importantes y representativas es la de molienda vía húmeda y atomizado de la pasta, en la cual, un factor esencial a controlar es la reología de las suspensiones cerámicas o barbotinas mediante el contenido de agua a añadir a la pasta y el defloculante usado; a raíz de lo dicho, el objetivo de este estudio fue determinar la mejor mezcla de defloculante a fin de aumentar la eficiencia de este proceso, por lo que luego de haber realizado todas las pruebas y estudios necesarios y basándose en los resultados obtenidos es posible concluir que:

- La dosificación óptima para la mezcla de defloculante usando el poliacrilato de sodio del proveedor español es de 75% silicato de sodio y 25% poliacrilato de sodio, tanto para la tecnología de gres como para la de porcelanato, logrando en esta última, disminuir el porcentaje de adición de defloculante en la molienda en un 0.1%.
- Con esto, además, teniendo como base los parámetros de control de la empresa, se logra aumentar el contenido de sólidos en la barbotina de la tecnología de porcelanato que a su vez se refleja en un aumento de 1.55% de la masa de polvo atomizado, al mismo tiempo el gasto y consumo de combustible es menor al actual, generando un ahorro anual de \$51 604 (4.52%). De la misma manera, para la tecnología de gres se consigue disminuir 0.15% de dosificación del defloculante y un incremento del 3.05% en la producción de polvo atomizado, que a su vez implica un menor gasto de combustible, logrando conjuntamente un ahorro anual de \$136 466 (7.29%).
- Con la alternativa comercial mexicana del polímero, la dosificación óptima de la mezcla de defloculante para porcelanato obtenido mediante las curvas de defloculación es 95% silicato de sodio y 5% poliacrilato de sodio mexicano, consiguiendo disminuir el porcentaje de adición de este aditivo en un 0.05% y un incremento de la cantidad de polvo atomizado en un 2.54%. Esto se refleja en una disminución de gasto y consumo de combustible, por lo que, en conjunto con lo economizado con el cambio de mezcla por la disminución del porcentaje de polímero en la mezcla, generaría un ahorro de \$201 864 (17.68%) al año.
- Para la tecnología de gres, la dosificación de la mezcla óptima es 90% silicato de sodio y 10% poliacrilato de sodio mexicano. Con esta dosificación se logra disminuir 0.25% en la adición de defloculante a la molienda, sumado a la reducción de la cantidad de combustible a utilizar debido a la menor cantidad de agua a evaporar en la atomización, teniendo como consecuencia un aumento de la cantidad de polvo atomizado producido en un 1.74%, dando como totalidad un ahorro de \$344 955 (18.45%) al año.

- Comparando los dos poliacrilatos de sodio usados en este estudio, se afirma que tanto para la tecnología de gres como porcelanato, se consigue mejores resultados con las mezclas utilizando el polímero mexicano; esto se ratifica especialmente en el aspecto económico debido a la disminución del porcentaje de polímero en la mezcla y la dosificación del mismo en la molienda; adicionalmente es necesario destacar el aumento de la cantidad de polvo atomizado. Lo cual implica una mayor producción de baldosas cerámicas y menor gasto en combustible.
- Para finalizar, se enfatiza que, la optimización de la mezcla de los defloculante encontrada, genera no solo un ahorro económico sino también incrementa la eficiencia de los recursos y del proceso productivo, cumpliéndose con los objetivos planteados al inicio de este trabajo de titulación.

4.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda a la empresa el cambio de la mezcla actual por la alternativa comercial mexicana, debido a que a nivel económico-productivo es la más eficiente; no obstante, si administrativamente no es posible conseguir este polímero, lo más recomendable es utilizar la mezcla 75% silicato - 25% poliacrilato de sodio español.
- Si se requiere tener mayor información sobre las propiedades reológicas de las suspensiones y se cuenta con el tiempo necesario, se recomienda cambiar el método de medida de la viscosidad de la copa Ford por un equipo más sensible como es el viscosímetro rotacional. A diferencia de la copa Ford, que mide el tiempo de escurrido que es una medida indirecta de la viscosidad, el viscosímetro rotacional permite además medir la tixotropía.
- Cada vez que se realice un cambio de la formulación de la pasta es necesario llevar a cabo nuevamente una determinación de las curvas de defloculación y óptimo de defloculante para verificar si se mantiene o se tiene una mejor alternativa de dosificación de defloculantes.

Referencias

- Andrade, F., Al-Qureshi, H., & Hotza, D. (2011). Applied Clay Science. *Elvesier*, 51(1), 1-7.
- Aparicio, P., & Galán, E. (2006). Materias primas para la industria cerámica. *Universidad de Sevilla*, 31-48.
- Aparicio, P., & Galán, E. (2006). Materias primas para la industria cerámica. *Seminarios de las sociedad española de mineralogía*, 31-49.
- Barba, A., Beltrán, V., Felú, C., García, J., Ginés, F., Sánchez, E., & Sanz, V. (2002). *Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas*. Instituto de Tecnología Cerámica.
- Barba, A., Juliá, J. E., & Mondragón, R. (2014). Preparación y caracterización de nanofluidos: Influencia de variables sobre su estabilidad, estado de aglomeración y propiedades físicas. *Sociedad española de cerámica y vidrio*, 53(3), 101-110.
- Barron, A. R., & Raja, P. M. (2022). *Métodos Físicos en Química y Nano Ciencia*.
- Bernal, I., Cabezas, H., Espitia, C., Mojica, J., & Quintero, J. (2003). Análisis próximo de arcilla para cerámica. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Física y Naturales*, 569-578.
- Bernardin, A., Casagrande, M., & Riella, H. (2006). Comportamiento reológico de la suspensión de gres porcelánico. *Qualicer*, 177-182.
- Blasco, A., Navarro, E., & Arrebola, C. (1986). Los defloculantes y su acción en las pastas cerámicas para atomización. *Cerámica y Cristal*, 37-41.
- Bruno da Silva, J. G., Urano de Carvalho, E. F., Cabral Kuhnen, N., Gracher Riella, H., & Bernardin, A. M. (2008). Influencia del agua de proceso en la viscosidad de la suspensión cerámica. Castellón.
- Cáceres, G. (2016). Síntesis de poliácridatos de masa molar contralada por procesos en solución acuosa y en emulsión, para aplicaciones como agentes defloculantes y dispersantes. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional del Litoral]. Biblioteca virtual UNL.
- Canillada, Á. (2007). *Cerámica: origen, evolución y técnicas*. Universidad Jaume I.
- Carrasco, R., Gajardo, A., & Mendoza, J. L. (2003). *Geología de yacimientos de arcillas plásticas para la elaboración de cerámica blanca y refractarios en las regiones VI y VII, Chile*. Chile: Universidad de Concepción.
- Cevallos, M. (2010). *Optmización del proceso de prensado, líneas de esmaltación y producto terminado monoquema del formato 31x31 en la planta de azulejos de la C.A. ecuatoriana de cerámica*. [Tesis de Pregrado, Escuela Superior Politécnica del Chimborazo].
- Collo, G. (2003). La inducción como método científico para establecer la génesis de la Illita en rocas de bajo grado de metamorfismo. *Problemas del Conocimiento en Ingeniería y Geología*, 53-64.
- Corradi, A. B., Manfredini, T., Pellacani, G. C., & Pozzi, P. (febrero de 1994). Deflocculation of Concentrated Aqueous Clay Suspensions with Sodium Polymethacrylates. *JOURNAL OF THE AMERICAN CERAMIC SOCIETY.*, 77(2), 509-513. Recuperado el 2023, de <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1994.tb07022.x>

- De Sousa, B. (2022). Implementación de mediciones que permitan tomar decisiones de manera predictiva en el proceso de fabricación de piezas cerámicas. *[Tesis de grado, Universidad de Antioquía. Repositorio Institucional Universidad de Antioquia, Medellín.*
- Enrique Navarro, J. E., Amoros Albaro, J. L., & Monzo Fuster, M. (1985). *Tecnología Cerámica* (Vol. III). Universidad de Valencia.
- Enrique, J. E., Monfort, E., Busani, G., & Mallol, G. (2000). Reciclado de aguas residuales en la fabricación de baldosas cerámicas. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 149-154.
- Estrada, D., & Espinosa de los Monteros, J. (1982). El secado de los productos cerámicos. *Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio*, 21(6), 327-337.
- Fuentes, R., Mejía, O., Álvarez, G., Caudillo, B., Guzmán, J., & Gallaga, Y. (2008). Evaluación de Mezclas de Arcillas de la Región de Guanajuato. *Universidad de Guanajuato*, 20(3), 20-26.
- Galindo, R. (2020). *Viscosidad y comportamiento reológico*. Obtenido de https://rafagalindoceramica.com/wp-content/uploads/2020/03/Comportamiento_reologico.pdf
- García-Portillo, C., Bastida, J., Pardo, P., Rodríguez-López, G., Lacruz, M. J., Vilar, M. L., & Lázaro, A. (2004). Influencia de características microestructurales de caolinita en las propiedades de sus pastas de colaje. *Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio*, 239-244.
- Gardini, D., & Galass, C. (2004). Analisi viscometrica di sospensioni argillose. *Istituto di Scienza e Tecnologia dei*, 19-23.
- Gavilanes, C., & Santellán, G. (2016). Normalización y estandarización de la fabricación de ladrillos y tejas del cantón Chambo. *[Tesis de Grado, Universidad Nacional del Chimborazo]*. Repositorio Digital UNACH.
- Gómez Burgos, L. A., & Parra Cubillos, Y. (2015). *Influencia de fluidos en el comportamiento de la doble capa difusa en arcillas*. Bogotá: [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia].
- González, M., & Chávez, G. (2017). Análisis de la Industria Ecuatoriana de Cerámica Plana y Porcelanato: Estrategias para su Competitividad. *[Tesis de Grado; Universidad Católica Santiago de Guayaquil. Repositorio USCG.*
- Güeto, J. (2005). *Tecnología de los materiales cerámicos*. España: Díaz Santos.
- Instituto de Tecnología Cerámica. (2011). *Proceso de fabricación de baldosas cerámicas. Conocimientos básicos*.
- Instituto de tecnología cerámica. (2019). *Conceptos básicos de reología*.
- Labanda, J., & Llorens, J. (2005). Improvement of the deflocculating power of polyacrylates in ceramic slips by small additions of quaternary ammonium salts. *Powder Technology*, 155(3), 181-186. doi:10.1016/j.powtec.2005.05.045
- León, W., & Cordero, J. (2011). Estudio de la relación entre la fuerza de prensado y la absorción de agua. *[Tesis de grado, Universidad del Azuay]*. Repositorio Institucional de la Universidad del Azuay.

- Linares, J., Huertas, F., & Barahona, E. (1969). Reología de suspensiones de minerales de la arcilla. *Ciencia y Técnica*, 8(6), 635-643.
- Luna, K., Melean, R., & Ferrer, M. (2022). Contexto socioeconómico del sector cerámico de la República del Ecuador. *Revista de Ciencias Sociales*, XXVIII(2), 233-244.
- Manoharan, C., Sutharsan, P., Dhanapandian, S., & Venkatachalapathy, R. (2012). Characteristics of some clay materials from Tamilnadu, India, and their possible ceramic uses. *Cerâmica*, 20(1), 412-418.
- Marco, P., Labanda, J., & Llorens, J. (2004). The effects of some polyelectrolyte chemical compositions on the rheological behaviour of kaolin suspensions. *Powder Technology*, 148(1), 43-47.
- Moliner, R. (2017). Aplicaciones estratégicas de la Nanofiltración para el tratamiento de las aguas en la industria cerámica. [Tesis de doctorado, Universitat Jaume I de Castelló]. Repositori Universitat Jaume I.
- Monzo, M., Martinez, A., & Enrique, J. (1979). Estudio de las propiedades reológicas de pastas cerámicas para atomización. *Sociedad española de cerámica y vidrio*, 18(4), 239-241.
- Moreno, R. (2000). Tendencias en el conformado de suspensiones cerámicas. *Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio*, 39(5), 601-608.
- Moreno, R. (2005). *Reología de suspensiones cerámicas*. Madrid: Consejo superior de investigaciones científicas.
- Muñoz, E. (2007). *Ingeniería básica de un sistema SNCR para incineradora de R.S.U.* Sevilla: [Tesis de pregrado: Universidad de Sevilla].
- Negre, F., Jarque, J. C., Feliu, C., & Enrique, J. E. (1994). Estudio de la operación de secado por atomización de polvos cerámicos a escala industrial, su control y automatización. *Qualicer*, 111-122.
- Pérez, L., & Garcell, L. (2006). Influencia de la distribución de tamaño de las partículas y de la temperatura sobre la reología de suspensiones lateríticas. *Tecnología Química*, XXVI(1), 88-93.
- Pérez, R. (2015). *Organización y gestión de la fabricación de pastas cerámicas*. España: Elearning S.L.
- Ramírez, F. (2010). Comparación entre las técnicas convencionales y las microondas para la conformación y secado de materiales cerámicos fabricados por colado. [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Colombia].
- Restrepo, O. (2011). *Baldosas cerámicas y gres porcelánico: Un mundo en permanente evolución*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Rodrigues, J., Novaes de Oliveira, A., Alarcon, O., Pozzi, P., & Andreola, F. (2002). Estudio comparativo de los mecanismos de desfloculación de suspensiones coloidales de arcillas. *Qualicer*, 283-300.
- Rozalén, M. (2006). *Mecanismo y velocidad de disolución de Montmorillonita en soluciones de electrolitos inertes. Influencia del pH y la temperatura*. Granada: Universidad de Granada.

- SACMI. (2004a). *Tecnología cerámica aplicada* (Vol. 1). España: Ibérica.
- SACMI. (2004b). *Tecnología cerámica aplicada* (Vol. II). España: Ibérica.
- Sánchez, E., García-Ten, J., & Regueiro, M. (2006). Materias para la industria cerámica española. Situación actual y perspectivas. *Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio*, 45(1), 1-12.
- Santos, J., Malagón, P., & Córdoba, E. (2011). Caracterización de arcillas y preparación de pastas cerámicas para la fabricación de tejas y ladrillos en la región de Barichara, Santander. *Dyna*, 50-58.
- Singer, F., & Singer, S. (1971). *Cerámica industrial*. Urmo.
- Snoeyink, V. L., & Jenkins, D. (1999). *Química del Agua*. Limusa.
- Universidad Autónoma del Occidente & Universidad del Atlántico. (s.f.). *Ahorro de energía en la industria cerámica*. UPME.

Anexos

Anexo A. Tabla resumen de las especificaciones de los parámetros fisicoquímicos del agua reciclada de cisterna.

Tabla 36: Parámetros fisicoquímicos del agua reciclada de cisterna.

Parámetros fisicoquímicos	Min	Max	Obtenido en el agua de gres	Obtenido en el agua de porcelanato
Densidad (g/cm ³)	1.013	1.169	1.09	1.09
pH	7.90	9.40	7.9	8
Conductividad (μΩ)	230	830	320	480

Anexo B. Formulación y dosificación de materias primas para porcelanato y gres.

Tabla 37: Formulación y dosificación de las materias primas para porcelanato y gres.

Tecnología	Materia Prima	Composición (%)	Humedad (%)	Peso neto (g)
Porcelanato	A	60	1.5	182.74
	B	30	1.8	91.65
	C	10	1.1	30.33
	Total	100		304.72
Gres	X	48	2.9	148.30
	Y	52	1.2	157.89
	Total	100		306.19

Anexo C. Especificaciones de los defloculante.

Tabla 38: Especificaciones del polímero mexicano.

Polímero Mexicano	
Propiedades	Valor
% Contenido sólidos	46 ±1
Densidad (g/cm ³)	1.33 ±0.02
pH	9 ±1
Viscosidad (s)	62

Tabla 39: Especificaciones del polímero español.

Polímero Español	
Propiedades	Valor
% Contenido sólidos	45 ±1
Densidad (g/cm³)	1.44 ±0.02
pH	12 ±1
Viscosidad (s)	104

Tabla 40: Especificaciones del silicato de sodio.

Silicato de sodio	
Propiedades	Valor
% Contenido sólidos	46 ±1
Densidad (g/cm³)	1.54 ±0.02
pH	12 ±1
Viscosidad (s)	65

Anexo D. Tabla de datos del agua y combustible.**Tabla 41:** Datos del agua y combustible.

Agua		
Calor de vaporización	Kcal/kg H ₂ O	540
Combustible		
Poder calorífico	Kcal/kg	10800
Precio	\$/kg	0.45

ANEXO E. Registro de viscosidades y densidades usando el polímero español.

Tabla 42: Registro de viscosidades y densidades a diferentes porcentajes de defloculante en porcelanato.

	%Defloculante	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3
Silicato 100%	Tiempo de flujo(s)	-	36	26	25.17	25.67
	Densidad (g/cm3)	1.6856	1.6873	1.6877	1.6869	1.6856
S90%-P10%	Tiempo de flujo(s)	-	29.1	24.38	23.19	23.82
	Densidad (g/cm3)	1.6863	1.6880	1.6858	1.6852	1.6861
S80%-P20%	Tiempo de flujo(s)	-	25.55	23.98	23.2	24
	Densidad (g/cm3)	1.6867	1.6780	1.6883	1.6879	1.6831
S70%-P30%	Tiempo de flujo(s)	72.79	26.23	24.16	23.66	23.83
	Densidad (g/cm3)	1.6885	1.6827	1.6881	1.6850	1.6872
S60%-P40%	Tiempo de flujo(s)	-	25.6	23.84	23.12	22.05
	Densidad (g/cm3)	1.6812	1.6859	1.6811	1.6800	1.6860
S75%-25%	Tiempo de flujo(s)	43.27	24.49	23.9	23.67	23.35
	Densidad (g/cm3)	1.6870	1.6854	1.6860	1.6860	1.6833
S65%-P35%	Tiempo de flujo(s)	-	24.34	23.09	23.43	23.83
	Densidad (g/cm3)	1.6843	1.6861	1.6846	1.6858	1.6871

Tabla 43: Registro de viscosidades y densidades a diferentes porcentajes de defloculante en gres.

	%Defloculante	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3
S90%- PMX10%	Tiempo de flujo(s)	63.61	23.55	23.3	24	24.12
	Densidad (g/cm3)	1.6835	1.6833	1.686'	1.6872	1.6870
S80%- PMX20%	Tiempo de flujo(s)	64	24.25	23.82	23.27	22.98
	Densidad (g/cm3)	1.6845	1.6842	1.6838	1.6805	1.6800
S70%- PMX30%	Tiempo de flujo(s)	56	26.5	24.82	24.53	23.59
	Densidad (g/cm3)	1.6845	1.6842	1.6838	1.6823	1.6800
S60%- PMX40%	Tiempo de flujo(s)	64.92	28.5	25.02	24.02	24.02
	Densidad (g/cm3)	1.6845	1.6842	1.6838	1.6823	1.6800
S95%- PMX5%	Tiempo de flujo(s)	-	23.46	23.11	23.75	24.04
	Densidad (g/cm3)	1.6876	1.6818	1.6825	1.6853	1.682
S85%- PMX15%	Tiempo de flujo(s)	62	24.84	23.08	23.65	24.11
	Densidad (g/cm3)	1.6847	1.6854	1.6819	1.6825	1.682

Anexo F. Registro de viscosidades aumentando la densidad para el estudio de robustez usando el polímero español.

Tabla 44: Registro de viscosidades aumentando la densidad en porcelanato.

Densidad (g/cm3)		1.69		
% Agua		34.7		% Sólidos 65.3
S75%-P25%			S65%-P35%	
%Defloculante	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm3)	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm3)
0.5	-	1.6955	-	1.6920
0.7	26.17	1.6902	29.22	1.6921
0.9	24.5	1.6924	27.85	1.6933
1.1	24.6	1.6913	26.87	1.6909
1.3	25.02	1.6927	26.18	1.6922
Densidad (g/cm3)		1.7		
% Agua		34		% Sólidos 66
%Defloculante	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm3)	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm3)
0.5	-	1.7087	-	1.7000
0.7	34	1.7039	35.71	1.7073
0.9	31.25	1.7022	30.05	1.7015
1.1	30.67	1.7050	29.6	1.7032
1.3	29.9	1.7026	28.82	1.7009
Densidad (g/cm3)		1.71		
% Agua		33.1		% Sólidos 66.9
%Defloculante	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm3)	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm3)
0.5	-	1.7124	-	1.7186
0.7	38.33	1.7122	39.1	1.7108
0.9	34.77	1.712	36.1	1.7123
1.1	33.37	1.7114	35.59	1.7121
1.3	32.78	1.7100	33.09	1.7112
Densidad (g/cm3)		1.72		
% Agua		32.7		% Sólidos 67.3

%Defloculante	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm3)	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm3)
0.5	-	1.7243	-	1.7259
0.7	44.8	1.7226	52.34	1.7212
0.9	39.95	1.7205	39.98	1.7234
1.1	39.51	1.7224	39.83	1.7254
1.3	37.35	1.7203	37.49	1.723

Tabla 45: Registro de viscosidades aumentando la densidad en gres.

Densidad (g/cm3)		1.69		
% Agua		34.7	% Sólidos	65.3
		S95%-PMX5%		S90%-PMX10%
%Defloculante	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm3)	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm3)
0.5	-	1.6977	-	1.6932
0.7	28.68	1.6950	28.62	1.6934
0.9	27.72	1.6930	27.86	1.6940
1.1	26.36	1.6950	27.54	1.6943
1.3	25.53	1.6902	26.97	1.6910
Densidad (g/cm3)		1.7		
% Agua		34	% Sólidos	66
%Defloculante	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm3)	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm3)
0.5	-	1.7020	-	1.7011
0.7	30.94	1.7028	32.02	1.7040
0.9	30.7	1.7030	29.57	1.7012
1.1	28.76	1.7046	29	1.7020
1.3	30.95	1.7070	29.85	1.7020
Densidad (g/cm3)		1.71		
% Agua		33.1	% Sólidos	66.9
%Defloculante	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm3)	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm3)
0.5	-	1.7072	-	1.7188
0.7	35.19	1.7152	40.8	1.7155
0.9	34.45	1.7157	38.97	1.7134
1.1	34.07	1.7180	35.3	1.7119
1.3	33.74	1.7134	34.05	1.7110
Densidad (g/cm3)		1.72		
% Agua		32.7	% Sólidos	67.3

%Defloculante	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm3)	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm3)
0.5	-	1.7234	-	1.7215
0.7	43.4	1.7242	42.07	1.7200
0.9	39.54	1.7220	41.34	1.7220
1.1	40.75	1.7251	39.78	1.7202
1.3	38.31	1.7200	40.51	1.7101

Anexo G. Registro de viscosidades y densidades usando el polímero mexicano.**Tabla 46:** *Registro de viscosidades y densidades a diferentes porcentajes de defloculante usando el polímero mexicano en porcelanato.*

	%Defloculante	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3
Silicato 100%	Tiempo de flujo(s)	-	47.17	36.58	35.79	41.72
	Densidad (g/cm3)	1.6733	1.6747	1.6750	1.6744	1.6709
S90%-P10%	Tiempo de flujo(s)	60.32	37.93	34.54	32.09	30.51
	Densidad (g/cm3)	1,6705	1.6747	1.6779	1.6755	1.6700
S80%-P20%	Tiempo de flujo(s)	69.61	35.07	30.15	27.49	28.56
	Densidad (g/cm3)	1.6718	1.6725	1.6700	1.6752	1.6740
S70%-P30%	Tiempo de flujo(s)	56	30.2	26.6	26.5	27.97
	Densidad (g/cm3)	1.678	1.6700	1.6712	1.6788	1.6733
S60%-P40%	Tiempo de flujo(s)	50.78	29.4	26.58	28.1	28.73
	Densidad (g/cm3)	1.6785	1.6777	1.6781	1.6871	1.6766
S75%-25%	Tiempo de flujo(s)	46.8	29.31	26.72	26.75	27.31
	Densidad (g/cm3)	1.6735	1.6720	1.6700	1.6734	1.6742
S65%-P35%	Tiempo de flujo(s)	43.41	25.52	24.9	26.14	27.29
	Densidad (g/cm3)	1.6713	1.6710	1.6700	1.6706	1.6710

Tabla 47: Registro de viscosidades y densidades a diferentes porcentajes de defloculante usando el polímero mexicano en gres.

	%Defloculante	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3
S90%- PMX10%	Tiempo de flujo(s)	-	36	31.23	28.07	29.73
	Densidad (g/cm3)	1.6744	1.6727	1.6735	1.6738	1.677
S80%- PMX20%	Tiempo de flujo(s)	-	39.41	31	29.05	30
	Densidad (g/cm3)	1.6759	1.6769	1.6778	1.6765	1.6755
S70%- PMX30%	Tiempo de flujo(s)	-	44	33.27	30.81	30.23
	Densidad (g/cm3)	1.6788	1.6740	1.6779	1.6791	1.675
S60%- PMX40%	Tiempo de flujo(s)	-	44.38	32.36	29.36	30.51
	Densidad (g/cm3)	1.6751	1.6736	1.6747	1.6747	1.6763
S95%- PMX5%	Tiempo de flujo(s)	-	39.04	32.65	33	33.59
	Densidad (g/cm3)	1.6782	1.6763	1.6755	1.6761	1.6790
S85%- PMX15%	Tiempo de flujo(s)	-	36.1	30.68	29.19	29.74
	Densidad (g/cm3)	1.6778	1.6747	1.6790	1.6780	1.6770

Anexo H. Registro de viscosidades aumentando la densidad para el estudio de robustez usando el polímero mexicano.

Tabla 48: Registro de viscosidades aumentando la densidad usando el polímero mexicano en porcelanato.

Densidad (g/cm3)		1.68		
% Agua		35.7	% Sólidos	64.3
		S75%-P25%	S65%-P35%	
%Defloculante	Flujo de tiempo(s)	Densidad (g/cm3)	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm3)
0.5	46.98	1.6877	74	1.6874
0.7	33	1.6865	34.11	1.6863
0.9	30.58	1.6865	29.39	1.6872
1.1	30.73	1.6861	29.43	1.682
1.3	32.36	1.6821	31.05	1.6836
Densidad (g/cm3)		1.69		
% Agua		35.5	% Sólidos	64.5
%Defloculante	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm3)	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm3)
0.5	60.41	1.6945	88.46	1.6900
0.7	37.86	1.6944	36.86	1.6928
0.9	34.32	1.6937	34.99	1.6972
1.1	35.32	1.6946	31.08	1.6900
1.3	40.58	1.6957	33.53	1.6900
Densidad (g/cm3)		1.7		
% Agua		34.9	% Sólidos	65.1
%Defloculante	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm3)	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm3)
0.5	75.62	1.7030	-	1.7022
0.7	56.24	1.7040	46.56	1.7020
0.9	39.64	1.7036	36.96	1.7018
1.1	37.08	1.7090	36.68	1.7025
1.3	40.96	1.7046	37.5	1.7012

Densidad (g/cm ³)		1.71		
% Agua		34.4	% Sólidos	65.6
%Defloculante	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm ³)	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm ³)
0.5	-	1.7146	-	1.7132
0.7	63.87	1.7107	46.69	1.7142
0.9	47.57	1.7138	40	1.7100
1.1	45.96	1.7163	39.52	1.7117
1.3	51	1.7160	42.98	1.7100

Tabla 49: Registro de viscosidades aumentando la densidad usando el polímero mexicano en gres.

Densidad (g/cm3)	1.68			
% Agua	36.2		% Sólidos	63.8
S90%-PMX10%		S85%-PMX15%		
%Defloculan	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm3)	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm3)
0.5	-	1.6833	-	1.6820
0.7	44.9	1.6840	45.77	1.6823
0.9	39.52	1.6830	34.84	1.6830
1.1	34.4	1.6860	30.79	1.6835
1.3	31.04	1.6834	30.89	1.6860
Densidad (g/cm3)	1.69			
% Agua	35.4		% Sólidos	64.6
%Defloculan	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm3)	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm3)
0.5	-	1.6945	-	1.6921
0.7	55.1	1.6930	51.7	1.6923
0.9	50.38	1.6940	40.92	1.6904
1.1	40.47	1.6932	32	1.6900
1.3	35.64	1.6900	34	1.6950
Densidad (g/cm3)	1.7			
% Agua	34.9		% Sólidos	65.1
%Defloculan	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm3)	Tiempo de flujo(s)	Densidad (g/cm3)
0.5	-	1.7012	-	1.7006
0.7	-	1.7029	-	1.7012
0.9	60.05	1.7025	59.51	1.7000
1.1	57.5	1.7040	44.34	1.7100
1.3	57.7	1.7046	46.12	1.7050

Anexo I. Resumen de los resultados de la prueba industrial.

Tabla 50: Resumen de los resultados de la prueba industrial con S75%-P25% en porcelanato.

S75%-P25%					
Fecha	% defloculante	Tonelaje ton/ secas	Densidad kg/m ³	Viscosidad s	Residuo g/100 cm ³
25 mayo	0.55	11.80	1693	48	1.45
26 a 28 mayo	0.6	12.06	1689	42	1.53
28 a 03 junio	0.65	12.30	1690	37	1.52

Tabla 51: Resumen de los resultados de la prueba industrial con S75%-P25% en gres.

S75%-P25%					
Fecha	% defloculante	Tonelaje ton/ secas	Densidad kg/m ³	Viscosidad s	Residuo g/100 cm ³
23 mayo	0.75	12.50	1676	49	3.61
23 a 25 mayo	0.85	13.50	1678	36	3.48
26 a 18 junio	0.8	14.60	1680	39	3.56