



UNIVERSIDAD JAUME I DE CASTELLON
ESCUELA SUPERIOR DE TECNOLOGÍAS Y CIENCIAS EXPERIMENTALES
Departamento de Ingeniería Química

**UTILIZACIÓN DE VIDRIO RECICLADO Y ACIDO BÓRICO
COMO FUNDENTE EN COMPOSICIONES DE GRES
PORCELÁNICO**

Por
Carlos José Picardo Cohen.

Tutor
Dr. Prof. Carlos Feliu Mingarro

Memoria
Para optar al grado de Máster en
Ciencia, tecnología y aplicaciones de materiales cerámicos

Castellón, diciembre de 2018.

DEDICATORIA

*A ti Mamá
Karina y Alex mis hermanos
Gaby, Iker y Gary
Karla, primer gran amor
Mi Familia y amigos,
A todos GRACIAS*

AGRADECIMIENTOS

Sigo agradeciendo a D-os, por las oportunidades que me sigue dando, por esta nueva etapa, digo otra vez que sin él no podríamos llamar a esto que llamamos vida, a mi Mamá, por apoyarme, por ahora a lo lejos sigues animándome cada día, a mis hermanos, gracias por creer en mí, espero pronto nos podamos reunir.

A la gran y numerosa familia Cohen Zambrano, empezando por mis abuelos Gabry y Stella, ejemplos a seguir, a todas mis tías y tíos, primos, todos demostrando cariño y unión, esa fuerza que te impulsa a seguir adelante. Hago una mención especial a mis queridos tíos Gilbert y Nubia, que fueron los que me apoyaron económicamente para yo poder llegar hasta acá, sin ellos no hubiese podido lograr, siempre estaré agradecido.

A esa segunda familia que uno se encuentra en el camino, son los amigos que quieres para toda la vida, los saltamontes que siempre han estado ahí para apoyarme, solo que este camino me llevó a un sitio lejano, donde también me he encontrado a excelentes personas, compartiendo momentos, gracias porque sé que cuento con ustedes siempre.

Al grupo de profesores del Máster, a todos por sus enseñanzas, también agradezco a mi tutor por su paciencia, y en todo lo que necesité para culminar este proyecto, debo incluir en esta lista a todo el personal del ITC, donde me permitieron hacer los ensayos, en especial al laboratorio de composiciones, una ayuda invaluable en todo momento.

Por último y no menos importante, Gracias a ti amor, llegaste para sorprenderme, me volteaste el mundo y lo pusiste de color, llegaste en el momento preciso para darme fuerza y animo cuando lo necesite, para regañarme y aguantarme, Karla you are always on my mind!

Muchas gracias a todos

Carlos J. Picardo Cohen

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTOS	III
ÍNDICE	IV
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Baldosas cerámicas y su clasificación.	2
Tabla 1.1: Clasificación de las baldosas según la absorción de agua	2
Tabla 1.2: Tipos de baldosas cerámicas usuales en España. ^[2]	3
1.2. Gres Porcelánico.....	3
1.2.1. Proceso de fabricación del gres porcelánico.....	4
Figura 1.2.1: Esquema del proceso de producción del gres porcelánico. ^[1]	5
1.3. Materias primas típicas de gres porcelánico.	6
1.3.1. Arcillas.	6
1.3.2. Caolín.....	7
1.3.3. Feldespatos.	7
Figura 1.3.3: Efecto que ejerce sobre el intervalo de cocción, la adición de un feldespato sódico o potásico a una mezcla de arcillas. ^[1]	8
1.3.4. Sílice	8
1.4. Materias primas alternativas de gres porcelánico.	8
1.4.1. El Vidrio.....	8
1.4.2. Boro.	9
2. OBJETIVOS.....	10
2.1. Objetivo general.....	10
2.2. Objetivo específico y plan de trabajo.....	10
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	12
3.1. Materias primas.....	12
3.1.1. Materias primas plásticas.....	12
Tabla 3.1.1.1: Composiciones de las arcillas	12
3.1.2. Materias primas desgrasantes.	13
Tabla 3.1.2.1: Composiciones de feldespatos y arena.....	13
Tabla 3.1.2.2: Análisis químico del vidrio reciclado por F.R.X.....	13
Figura 3.1.1: Botones de fundencia de feldespatos.....	14
Figuras 3.1.2 y 3.1.3: Botones de fundencia de la arena y vidrio reciclado respectivamente	14
3.2. Formulaciones planteadas.	14
Tabla 3.2.1: Formulaciones planteadas.	14
Tabla 3.2.2: Formulaciones planteadas con MM.PP. fundentes	15
3.3. Metodología experimental.....	15

Figura 3.3: Esquema del procedimiento experimental realizado.	15
3.3.1. Molturación de materias primas por vía seca.....	16
Figura 3.3.1: Molino de martillos.....	16
3.3.2. Preparación de materias primas por vía húmeda	16
Figura 3.3.2: Jarra y bolas de alúmina usadas en molino planetario.....	16
3.3.3. Conformado de probetas por prensado.	17
Figura 3.3.3: Prensa de probetas cilíndricas	18
3.3.4. Cocción de materias primas arcillosas.....	18
Tabla 3.3.4: Ciclo de cocción.	18
Figura 3.3.4: Horno eléctrico de laboratorio para cocción.	18
3.3.5. Determinación de la pérdida por calcinación	19
3.3.6. Determinación del contenido de humedad.....	19
3.3.7. Determinación de la densidad aparente	19
Figura 3.3.7: Montaje para determinación de densidad aparente por inmersión en mercurio.....	20
3.3.8. Determinación de la contracción lineal de cocción	20
3.3.9. Determinación de la absorción de agua.....	20
Figura 3.3.9: equipo utilizado para medir absorción de agua acoplado a bomba de vacío	21
3.3.10. Determinación de resistencia mecánica	21
Figura 3.3.10: Ensayo de flexión a 3 puntos en maquina universal de ensayos.	22
3.3.11. Análisis de fluorescencia de rayos x.....	22
3.3.12. Análisis por microscopía electrónica de barrido.....	22
4. RESULTADOS.....	23
4.1. Curvas de gresificación.	23
Figura 4.1.1: Curva de gresificación para composiciones estándar.	23
Figura 4.1.2: Curva de gresificación para composiciones con fundentes.	24
Figura 4.1.3: Densidad aparente de todas las composiciones	25
4.2. Resistencia mecánica a la flexión	26
Figura 4.2.1: Comparación de resistencia mecánica en seco.	26
Figura 4.2.2: Comparación de resistencia mecánica en cocido.....	27
4.3. Análisis de microestructura en M.E.B.....	27
Figura 4.3.1: Microestructuras de las formulaciones a 200X. A:STD-1. B:STD- K. C:STD-Na.....	28
Figura 4.3.2: Microestructuras de las formulaciones a 1000X A:STD-1. B:STD- K. C:STD-Na.....	28
Figura 4.3.3: Microestructura de la formulación VR10Na20 a diferentes aumentos A: 200X. B: 1000X. C: 8000X.....	28

Figura 4.3.4: Microestructura de la formulación VR10K20 a diferentes aumentos A: 200X. B: 1000X. C: 5000X.....	28
Figura 4.3.5: análisis de D.R.X. de la muestra STD-1 a las diferentes estructuras.....	30
Figura 4.3.6: análisis de D.R.X. de la muestra VR10Na20 a las diferentes estructuras.....	31
Figura 4.3.7: análisis de D.R.X. global de la muestra VR10K20.....	32
Figura 4.3.8: análisis de D.R.X. de la muestra VR10K20.	33
5. CONCLUSIONES.	34
6. BIBLIOGRAFÍA	36
7. ANEXOS.	38
Tabla 7.1: Datos obtenidos de la muestra STD-1 ensayados	38
Tabla 7.2: Datos promedio de la muestra STD-1	38
Figura 7.1. Curva de gresificación muestra STD-1	39
Figura 7.2. Densidad aparente muestra STD-1	39
Tabla 7.3: Datos obtenidos de la muestra STD-Na ensayados.....	40
Tabla 7.4: Datos promedio de la muestra STD-Na	40
Figura 7.3. Curva de gresificación muestra STD-Na	41
Figura 7.4. Densidad aparente muestra STD-Na	41
Tabla 7.5: Datos obtenidos de la muestra STD-K ensayados.....	42
Tabla 7.6: Datos promedio de la muestra STD-K.....	42
Figura 7.5: Curva de gresificación muestra STD-K	43
Figura 7.6 Densidad aparente muestra STD-K.....	43
Tabla 7.7: Datos obtenidos de la muestra VR10Na20 ensayados	44
Tabla 7.8: Datos promedio de la muestra VR10Na20	44
Figura 7.7: Curva de gresificación muestra VR10Na20.....	45
Figura 7.8: Densidad aparente muestra VR10Na20.....	45
Tabla 7.9: Datos obtenidos de la muestra VR10K20 ensayados	46
Tabla 7.10: Datos promedio de la muestra VR10K20	46
Figura 7.9: Curva de gresificación muestra VR10K20	47
Figura 7.10: Densidad aparente muestra VR10K20	47

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales cerámicos siempre han estado involucrados en la vida del hombre, en la antigüedad, los usaban como elementos constructivos, con el pasar del tiempo, se ampliaron los usos como objetos ornamentales, recipientes para la alimentos, cada vez descubriendo y aprovechando las cualidades que estos materiales les podían dar, hasta llegar a nuestros días, donde estos están presentes en la vida cotidiana, y más aun en el proceso productivo de múltiples productos que en muchos casos se desconoce su participación.

El ciclo térmico en las cerámicas es de gran importancia, ya que es donde se obtiene la densificación del material, dependiendo del tipo de las materias primas y el uso de éste, la temperatura máxima puede ser elevada, lo que implica un costo energético asociado, por lo que la nueva tendencia es incorporar materiales fundentes para obtener nuevos productos cerámicos con las mismas prestaciones a menor temperatura, que también se traduce en menor coste en el proceso de cocción.

Una materia prima poco común dentro de la fabricación de pavimento y revestimiento es el vidrio, en su mayoría están compuestos por óxidos formadores y modificadores, con una estructura amorfa y constituido generalmente de óxidos de silicio, calcio y sodio, le dan un carácter fundente, lo que origina menor viscosidad en el fundido dentro de una composición de gres, haciendo que se densifique aun mas y a menor temperatura, logrando una reducción en la temperatura optima de cocción y por ende, disminuir las emisiones de CO₂.

Este trabajo de investigación, está orientado a la inclusión de materias primas fundentes en una composición de gres porcelánico para intentar disminuir su temperatura óptima de cocción, entre las materias primas seleccionadas para tal fin es el vidrio reciclado y el acido bórico, y se hará de la siguiente forma:

- Se formularan composiciones solo con feldespatos sódico o potásico, al igual que una mezcla de los mismos.
- Se formularan nuevas composiciones en base a resultados previos, esta vez incluyendo la materia prima fundente.

1.1. Baldosas cerámicas y su clasificación.

Dentro de los productos cerámicos que se encuentran actualmente, están los pavimentos y revestimientos, denominados también baldosas cerámicas, constituidos principalmente de arcilla junto con otra materia inorgánica, son piezas de poco grosor, impermeables, de porosidad variable, la cual puede tener o no, un recubrimiento vidriado. ^[1]

Las cerámicas se suelen encontrar en los recubrimientos de suelos y paredes, hoy en día es muy diversa la gama de tamaños y formas en las que se presentan, son obtenidas luego de atravesar diferentes procesos de molienda, homogenización, moldeo, secado y cocidas a una temperatura tal que adquieren rigidez y que alcance las propiedades requeridas. ^[2]

Hay varias clasificaciones donde podemos situar a las baldosas, puede ser según el método de moldeo, donde se encuentran las baldosas extruidas y las prensadas en seco.

Otra clasificación es según la absorción de agua, la cual es de mayor interés, ya que según el porcentaje de absorción, se obtiene la porosidad, cuya propiedad es de gran importancia en el comportamiento del material cerámico. Y este valor se obtiene a través de un ensayo normalizado. A continuación, se presenta una tabla donde se clasifican las baldosas según su porcentaje de absorción de agua.

Tabla 1.1: Clasificación de las baldosas según la absorción de agua

Tipo	% Absorción agua	Grupo
Muy baja	$< 0,5$	IA
Baja	$0,5 < AA < 3$	IB
Media baja	$3 < AA < 6$	IIA
Media alta	$6 < AA < 10$	IIB
Alta	$AA > 10$	III

AA: % de Absorción Agua. ^[2]

Existen algunos tipos de baldosas cerámicas más comunes, las cuales se presentan en la siguiente tabla, cabe destacar que esta clasificación no está estandarizada. Dentro de los tipos de baldosas se desarrollara una en particular conocida como el gres porcelánico, y es de particular interés, ya que se sitúa en el

grupo de muy baja absorción de agua, lo que lo hace muy útil en diferentes aplicaciones que se mostrarán posteriormente.

Tabla 1.2: Tipos de baldosas cerámicas usuales en España. ^[2]

Tipo de baldosa	Modelo	Soporte	Esmalte	Espesor (mm)	Grupo norma ISO 13006 UNE 67-087
Azulejo	Prensado	Poroso	Si	< 10	BIII
Gres esmaltado	Prensado	No poroso	Si	> 8	BIb – BIIa
Gres porcelánico	Prensado Esmaltado	No poroso	Si – No	> 8	BIIa – AI
Baldosín catalán	Extruido	Poroso – ligeramente poroso	No	< 8	AIIb – AIII
Gres rustico	Extruido	No poroso	Si – No	> 10	AI – AIIa
Barro cocido	Extruido	Poroso	No	> 10	AIIb – AIII

1.2. Gres Porcelánico.

Se define como gres porcelánico a una baldosa cerámica completamente vitrificada, con una absorción de agua muy baja, el cual puede estar esmaltado o no, constituido por arcillas, caolín y feldespatos. Su uso puede ser tanto en pavimento como en revestimiento de interiores o exteriores, en edificaciones residenciales, comerciales e industriales. ^[2,3]

Los requisitos físicos que debe cumplir el gres porcelánico son:

- Elevado grado de blancura.
- Desarrollo del color.
- Alta resistencia mecánica.
- Resistente a las heladas y manchas.

Para poder lograr todos los requerimientos antes mencionados, se deben obtener ciertas propiedades a nivel microestructural como la ausencia de porosidad abierta, a su vez una mínima cantidad de porosidad cerrada, en donde los poros deben estar aislados y ser de tamaño no mayor a 10 μm . En el caso de la resistencia mecánica, se obtiene cuando en la matriz vítrea hay suficiente fase cristalina, también esta proporción fase-matriz influye sobre la blancura y el desarrollo del color. ^[3]

Para la obtención de todas las propiedades del producto conformado, se deben vigilar dos aspectos, uno es la apropiada microestructura desde el momento de prensado, y el otro es el proceso de cocción, que es donde ocurre la sinterización, la cual ocurre a altas temperaturas y debido a la naturaleza de las materias primas, el mecanismo de densificación se da por la alta viscosidad en fase líquida, que permite la disolución de las fases cristalinas y la desvitrificación de nuevas fases. [3]

En antecesor del gres porcelánico es un producto llamado gres químico, fabricado en formatos de 5 x 5 cm. hasta 10 x 10 cm. hecho con tecnología ya en desuso y de composición parecida, con proporciones mayoritarias de caolín, seguida por los feldespatos y en menor cantidad arcilla plástica y cuarzo, con temperaturas entre los 1200 – 1220 °C con ciclos aproximados entre 30 y 50 horas. Actualmente las composiciones respetan más la proporción 50/50 de material plástico y desgrasante con mayores cantidades de feldespatos y arcillas, seguido de caolín y muy poca cantidad de cuarzo, con los cuales se cuecen a una temperatura máxima de entre 1200 -1230 °C pero en ciclos entre 50 y 70 minutos. [3,4]

En base a lo dicho anteriormente, la formulación de un gres porcelánico puede tener infinidad de combinaciones, sin embargo para que cumpla con una microestructura de matriz vítrea y presencia de fase cristalina, una porosidad casi nula y que la temperatura de cocción óptima no sea tan alta, en definitiva, que logre la densificación del material en un ciclo corto de tiempo. Entre las combinaciones más utilizadas y eficientes están basadas en el sistema $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{M}_2\text{O}$, este último es un fundente alcalino aportado por el feldespato, bien sea sódico o potásico, donde predomina el uso del Na^+ ya que es el más fundente. Por otro lado, para lograr la compactación del material en el prensado, en especial las partículas de mayor tamaño que son los desgrasantes, son necesarias partículas coloidales que son aportadas por las arcillas caoliniticas o caolines. [3]

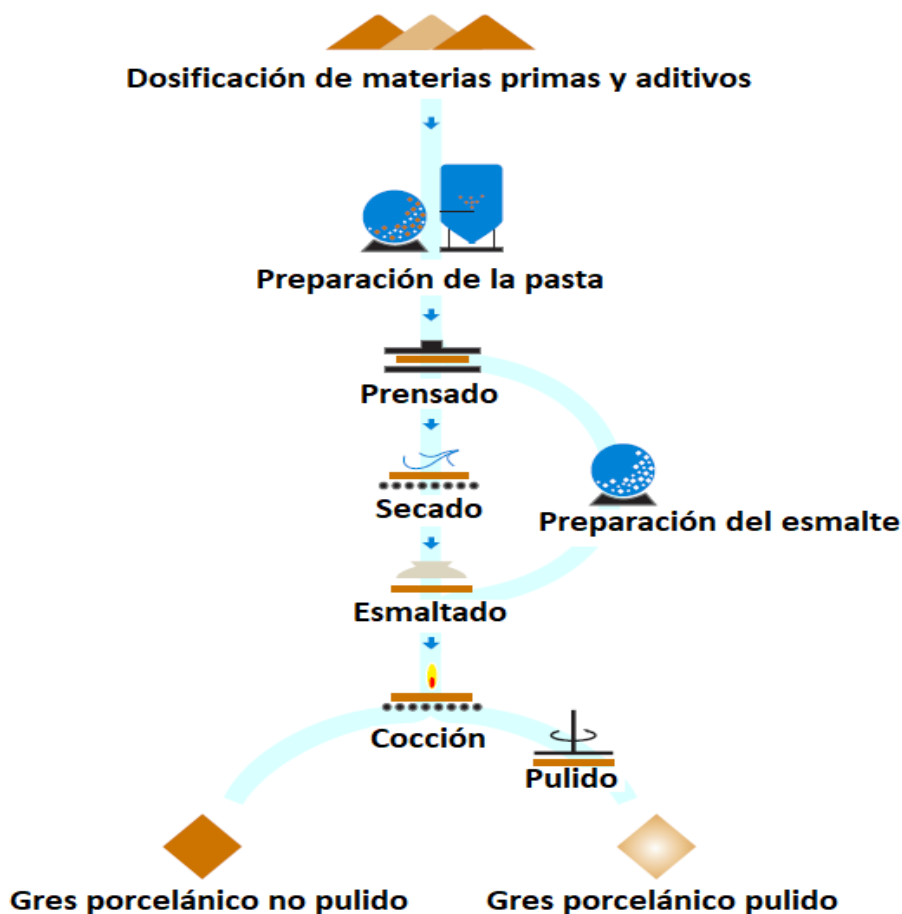
1.2.1. Proceso de fabricación del gres porcelánico.

El proceso de fabricación se puede subdividir en tres etapas: preparación de pastas o materia prima, conformado o moldeado y cocción. Comenzando por la preparación de pastas que consiste en la molturación de materias primas, esto se puede hacer por dos vías, húmeda y seca, el más utilizado es por vía húmeda ya que es más eficiente, sumado al hecho que a menor tamaño de partícula, mayor será su reactividad. Si por un lado la molienda en húmedo es más beneficiosa

porque se pueden eliminar las impurezas con mayor facilidad, también está la influencia de la materia prima plástica sobre la reología, ya que puede haber arcillas que con un tamaño muy fino pueda tener dificultades para desflocular. En esta etapa también se realiza el tamizado para los controles de tamaño de partícula y eliminación de impurezas. [1]

Posterior a la molienda y homogenizado viene el conformado, este proceso se puede hacer por dos métodos, el prensado y extrusión, pero en su mayoría se obtiene por el prensado uniaxial, ya que se obtiene menor variación en el calibre de la pieza, una vez esmaltada la baldosa, se procede a la cocción, que este se puede subdividir también según la duración del ciclo, es decir, rápida o lenta, o si se hace la cocción solo del soporte o junto con el esmalte, que se refiere al proceso de monococción o bicocción. Para mejorar el acabado superficial se puede realizar un pulido para obtener superficies brillantes. A continuación en la siguiente figura se mostrará un diagrama del proceso productivo del gres porcelánico.

Figura 1.2.1: Esquema del proceso de producción del gres porcelánico. [1]



1.3. Materias primas típicas de gres porcelánico.

Entre las materias primas cerámicas se pueden encontrar una diversa gama, donde cada una cumple su función, en su mayoría de origen natural, y debido a esto se encuentran variaciones en las mismas, un primer intento para su clasificación se pueden dividir entre las materias primas plásticas y las no plásticas, las del primer grupo son materiales de grano fino, que con la presencia de una pequeña cantidad de agua, tienen un comportamiento plástico, entre las más comunes se encuentran las arcillas y caolines. ^[1]

Por otro lado se encuentran las materias primas no plásticas, las cuales actúan como desgrasantes en las composiciones cerámicas, ya que no presentan comportamiento plástico frente al agua sino mas bien reduce la plasticidad en las composiciones, al igual que mejora la desfloculación, cumplen dos funciones principales: mejoran el empaquetamiento, ya que poseen un tamaño de grano mayor a las arcillas, y la segunda ya que amplían la distribución de tamaño de partículas, eso implica que aumente el tamaño de poro, permitiendo a los gases evacuar la pieza sin generar defectos. Entre las materias primas no plásticas tenemos los feldespatos y arena. Se verán a continuación una breve descripción de las materias primas a utilizar a lo largo de este trabajo. ^[1]

1.3.1. Arcillas.

Las arcillas son rocas de diferentes materiales en su mayoría de naturaleza silicatada, de origen muy variado, las cuales están compuestas de diferentes minerales, básicamente silicatos alumínicos hidratados, sedimentados en forma de láminas o fibras. Es prácticamente imposible encontrarla por si sola en estado puro, por lo que en un yacimiento siempre se encuentran mezclados varios tipos de arcilla junto con material no arcilloso como feldespatos, cuarzo, carbonatos y minerales pesados entre otros. ^[1,4]

Las arcillas se pueden encontrar en la corteza terrestre, en rocas de fácil disgregación, con tamaño de grano que varía entre 2 y 0,1 micras. A continuación se presenta los principales componentes ^[1]:

- Minerales propios de la arcilla.
- Sílice libre.
- Carbonatos.

- Feldespatos.
- Micas no hidratadas.
- Compuestos de hierro y titanio.
- Sales solubles.
- Materia orgánica.

1.3.2. Caolín.

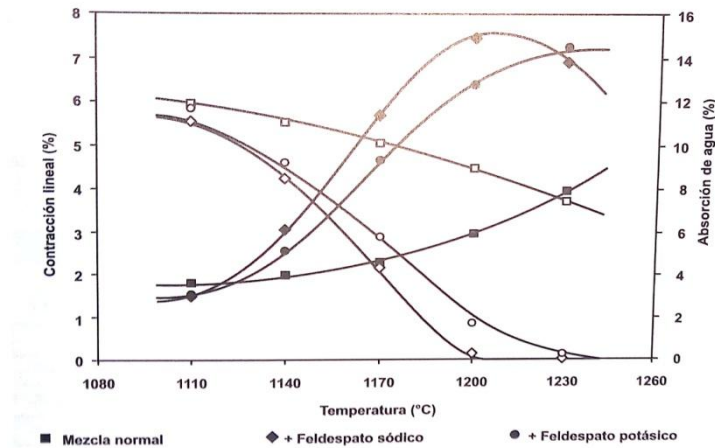
Es una roca muy blanca y en algunos casos muy poco coloreada, la cual contiene al menos 15% de material arcilloso, presenta un tamaño de grano más grueso en comparación a la arcilla. No solo por su color blanco es que es muy utilizado, sino también por ser inerte a agentes químicos y no tóxico. En la industria cerámica es de gran interés por varias razones, la estabilidad del color a altas temperaturas, alta refractariedad y disminuye el coeficiente de dilatación. ^[1]

1.3.3. Feldespatos.

Entre las materias primas desgrasantes, está el mineral más común en la corteza terrestre y lo constituyen los feldespatos, los cuales pueden ser aluminosilicatos de elementos alcalinos y alcalinotérreos, los cuales tienen diversas soluciones sólidas depende del grado de ordenamiento como la albita, anortita, ortoclasa y celsiana, donde se reemplazan los átomos de silicio por aluminio junto con alcalinos. Es de gran utilidad en la industria cerámica ya que es muy abundante, de bajo costo y proporciona elementos fundentes, los cuales permiten la formación de material vítreo y ayuda a tener una viscosidad apropiada en la barbotina. ^[1]

En la industria cerámica los feldespatos más usados son el sódico y el potásico, para la selección entre ambos va a influir mucho los requerimientos finales del producto, cabe destacar que el feldespato sódico es mucho más fundente que el potásico, es decir, acentúa más las pendientes en el diagrama de gresificación, esto se puede ver en la siguiente figura. Por su parte, el feldespato potásico permite trabajar con un mayor intervalo de cocción. ^[1,4]

Figura 1.3.3: Efecto que ejerce sobre el intervalo de cocción, la adición de un feldespato sódico o potásico a una mezcla de arcillas. [1]



1.3.4. Sílice

Otro de los minerales que abunda en la corteza terrestre es la sílice, en su composición solo tiene un átomo de silicio como catión formando la molécula SiO_2 . La sílice anhidra dependiendo del rango de temperatura, cambia su forma cristalina como el cuarzo, que es más común, tridimita, cristobalita y una fase amorfa vítrea. [1,4]

En las pastas cerámicas es muy frecuente encontrar el cuarzo, bien sea como materia prima o junto a las arcillas naturales, ya que por ser un material desgrasante entre los beneficios está reducir la plasticidad, mejora la desgasificación en el secado y cocido originado por agua e impurezas, como también disminuye la contracción. [1]

1.4. Materias primas alternativas de gres porcelánico.

1.4.1. El Vidrio.

Es un producto inorgánico constituido mayormente por sílice que se caracteriza por ser duro, frágil, transparente, de elevada resistencia mecánica y química, que puede ser deformable a altas temperaturas. [5]

Como se había dicho anteriormente, el vidrio está compuesto por óxidos formadores y modificadores, tiene una estructura vítrea amorfa, y al estar compuesto por oxidas alcalinos al igual que los feldespatos, ambas condiciones le proveen al vidrio un carácter fundente, por esta razón se puede añadir en la composición de

gres porcelánico, además que no altera la composición del mismo, por lo que el vidrio reciclado, puede ser una materia prima alternativa para la fabricación del mismo. ^[6]

El vidrio reciclado puede provenir de diferentes fuentes, siendo las más abundantes de vidrio plano, pero también se encuentran los vidrios provenientes de envases y botellas, que es vidrio hueco, como también el proveniente de lámparas, tubos fluorescentes y pantallas. Dependiendo del tratamiento de cada uno para su reutilización, dependerá el costo del mismo. ^[6]

1.4.2. Boro.

En boro es un elemento semimetálico de la tabla periódica, en la naturaleza se puede encontrar en el mineral de bórax, este óxido puede tener usos muy diversos, pero en la industria del vidrio ha sido utilizado por muy largo tiempo, ya que es un fundente y un óxido formador de red. Esta cualidad permite también su uso en el área de esmaltes ya que ajusta la temperatura de fusión del esmalte al soporte y promueve una adecuada expansión térmica del esmalte para su mejor adaptación. ^[7]

2. OBJETIVOS.

La finalidad de este trabajo es investigar sobre la efectividad de materiales fundentes como el vidrio reciclado y el ácido bórico dentro de una composición de vidrio reciclado, con esto se busca reducir la temperatura de cocción óptima, lo que se traduce en abaratar costos de producción y menos emisiones de CO₂ a la atmósfera, todo esto sin que repercuta en las prestaciones finales del producto acabado.

2.1. Objetivo general.

Formular una composición de gres porcelánico con vidrio reciclado y ácido bórico, partiendo de composiciones típicas, y estudiar el efecto de fundencia a través de un diagrama de gresificación, midiendo propiedades como contracción lineal, densidad aparente y absorción de agua, al igual que un estudio de resistencia mecánica y por último la factibilidad técnico económica.

2.2. Objetivo específico y plan de trabajo.

Dentro de los objetivos específicos a desarrollar, así como el plan de trabajo a seguir se tiene:

- A. Formular composiciones de gres porcelánico típicas, variando la cantidad de feldespatos sódico y potásico.
- B. Elaborar un diagrama de gresificación para determinar la temperatura óptima de cocción en cada composición.
- C. Formular nuevas composiciones en base a la más fundente, añadiendo vidrio reciclado y ácido bórico, para determinar su temperatura de cocción óptima.
- D. Comparar la resistencia mecánica tanto para la formulación estándar como para la que está compuesta con fundentes, para determinar su efecto en las mismas.

E. Observar la microestructura de todas las composiciones en el microscopio electrónico de barrido para ver como se aprecia el efecto de fundencia y ver las fases presentes en las mismas.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para lograr los objetivos planteados, a continuación se presentaran las materias primas utilizadas para la formulación de composiciones de gres porcelánico propuestas, que luego se realizaron diferentes ensayos los cuales se analizaran posteriormente.

3.1. Materias primas.

Las materias primas utilizadas en este proyecto son de una típica formulación de gres porcelánico, compuesta de una mitad de material plástico, es decir una mezcla de arcillas y caolín, la otra mitad lo conforman los feldspatos y la arena, que componen los materiales desgrasantes. Para obtener composiciones cocidas a menor temperatura, se añadieron materias primas fundentes como el vidrio reciclado y el ácido bórico

3.1.1. Materias primas plásticas.

Entre las arcillas que se utilizaron, la que se encuentra en mayor proporción es una arcilla ucraniana, a pesar de su lejanía, su preferencia se debe a que aporta un conjunto de características muy beneficiosas las cuales son: blancura, plasticidad y fundencia. En menor proporción se encuentra una arcilla portuguesa la cual tiene un carácter más plástico que la anterior. En la siguiente tabla se muestra el análisis químico de ambas arcillas ^[1]

Tabla 3.1.1.1: Composiciones de las arcillas

Óxidos	% Arcilla Ucraniana (SH-DBY-3T)	% Arcilla Portuguesa (PP1)
SiO ₂	59,97	60,33
Al ₂ O ₃	>25	24,10
Fe ₂ O ₃	<1,3	1,48
TiO ₂	1,3	0,59
CaO	0,30	0,17
MgO	0,50	0,37
Na ₂ O	0,50	0,38
K ₂ O	2,20	2,91
MnO	-	0,01
Cr ₂ O	-	0,009
P ₂ O ₅	-	0,24

3.1.2. Materias primas desgrasantes.

Estos materiales en una formulación de gres porcelánico lo constituyen los feldespatos sódico, potásico y la arena, en la tabla que se muestra a continuación está su composición y costo asociado.

Tabla 3.1.2.1: Composiciones de feldespatos y arena

Óxidos	% Feldespato sódico (E26)	% Feldespato Potásico (FK-201)	% Arena (CM2)
SiO ₂	70,00 ± 1,00	67,50	90,3
Al ₂ O ₃	18,00 ± 1,00	18	3,95-3,75
Fe ₂ O ₃	0,06 ± 0,02	0,1	<0,18
TiO ₂	0,15 ± 0,03	0,02	<0,15
CaO	0,80 ± 0,10	0,3	<0,09
MgO	0,10 ± 0,05	0,3	<0,07
Na ₂ O	10,00 ± 0,30	4	<0,22
K ₂ O	0,30 ± 0,10	8,5	2,25-1,85
Costo total (€/Ton)	42	52	13

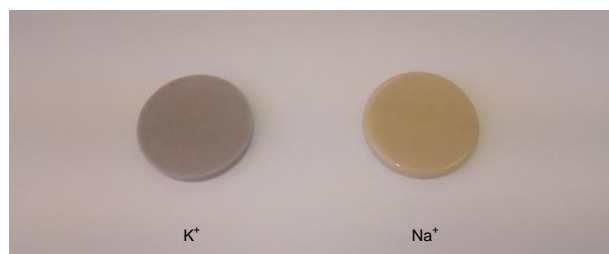
El vidrio reciclado fue añadido para promover la fundencia dentro de la composición, el que fue utilizado en esta investigación corresponde a un vidrio reciclado de naturaleza sódico-cálcico, y su análisis químico correspondiente se muestra en la siguiente tabla a continuación.

Tabla 3.1.2.2: Análisis químico del vidrio reciclado por F.R.X.

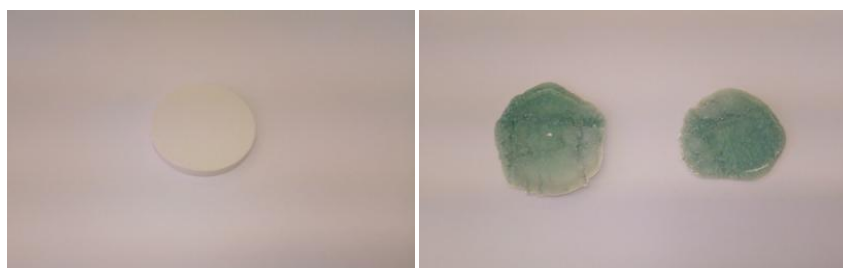
Oxido	% Composición
SiO ₂	69,1%
Al ₂ O ₃	0,80%
Fe ₂ O ₃	0,75%
CaO	8,39%
MgO	3,79%
Na ₂ O	13,55%
K ₂ O	0,28%
TiO ₂	0,06%
ZrO ₂	<0,01%
PbO	<0,01%
ZnO	<0,01%
HfO ₂	<0,01%
P ₂ O ₅	0,02
SrO	<0,01%
MnO	0,02%
Pérdida por calcinación a 900°C	3,25 %

Para estudiar la fundencia de manera cualitativa de los materiales desgrasantes, se realizaron botones de fusión de los feldespatos, arena y vidrio, cada uno por separado y luego de la cocción, su apariencia se puede ver en las siguientes imágenes

Figura 3.1.1: Botones de fundencia de feldespatos.



Figuras 3.1.2 y 3.1.3: Botones de fundencia de la arena y vidrio reciclado respectivamente



3.2. Formulaciones planteadas.

Siguiendo las recomendaciones bibliográficas, se formularon 3 composiciones de gres porcelánico para determinar en cada caso, la temperatura de cocción óptima, una primera estándar con igual cantidad de feldespato sódico y potásico, y las restantes con un 100% de cada feldespato, estas composiciones se muestran en la tabla a continuación.

Tabla 3.2.1: Formulaciones planteadas.

Materia prima	STD-1	STD-Na	STD-K
%Arcilla Ucraniana	33,6	33,6	33,6
%Arcilla Portuguesa	8,4	8,4	8,4
%Caolín	8	8	8
%Feldespato sódico	20	40	0
%Feldespato potásico	20	0	40
%Arena	10	10	10

Posteriormente se formularon dos composiciones añadiendo una cantidad de vidrio reciclado y acido bórico como materia prima fundente, reemplazando una parte de los feldespatos, las cuales se muestran en la siguiente tabla.

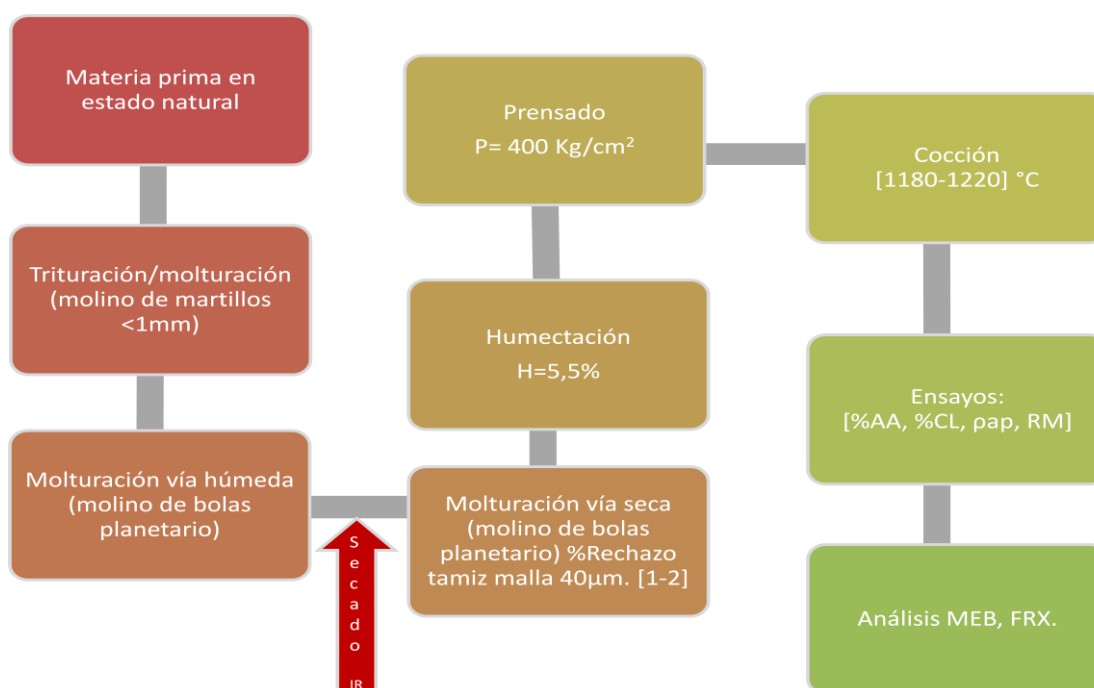
Tabla 3.2.2: Formulaciones planteadas con MM.PP. fundentes

Materia prima	VR10K20	VR10Na20
%Arcilla Ucraniana	33,6	33,6
%Arcilla Portuguesa	8,4	8,4
%Caolín	8	8
%Feldespato Sódico	10	20
%Feldespato Potásico	20	10
%Vidrio Reciclado	10	10
%Acido bórico	0,5	0,5

3.3. Metodología experimental.

Para la realización de los ensayos y análisis a las probetas, se debe hacer una preparación de las materias primas para el conformado de las mismas, todo el procedimiento que se siguió, está representado en el esquema a continuación, el cual representa gráficamente los diferentes procesos que se realizaron, el cual simula el proceso de fabricación de un gres porcelánico a nivel de laboratorio.

Figura 3.3: Esquema del procedimiento experimental realizado.



3.3.1. Molturación de materias primas por vía seca.

Las arcillas se encontraban en su estado natural, es decir en rocas de gran tamaño, las cuales se dejaron secando en una estufa a 110°C por 24 horas, con el fin de que remover la humedad presente, una vez secas, se procedió a molturar las mismas en un molino de martillo, el cual tiene acoplado un tamiz de salida de apertura de 1 mm. Con el fin de homogenizar cada materia prima por separado. En la siguiente imagen, se muestra el molino de martillo utilizado. ^[8]

Figura 3.3.1: Molino de martillos



3.3.2. Preparación de materias primas por vía húmeda

Para la elaboración de las diferentes composiciones, respetando los porcentajes de cada materia prima se procedió a pesar 400 gr. De material solido junto con 400 gr. de agua destilada dentro de una jarra de 1000 ml para molino de bolas planetario, para los cuerpos de molienda se utilizaron bolas de alúmina de dos tamaños, grandes entre 1 y 2 cm de diámetro y pequeñas entre 0,4 y 0,7 cm, el tiempo de molturación fue de 15 minutos. A continuación se muestra una jarra usada en la molienda con su respectivo cuerpo de molienda ^[8]

Figura 3.3.2: Jarra y bolas de alúmina usadas en molino planetario.



Las materias primas desgrasantes como los feldespatos, vidrio y arena, fueron molturadas también por molino de martillos, pero para ser añadidos en la composición, se molturaron cada uno por separado por vía humedad hasta obtener un rechazo de entre 2 y 3% en un tamiz de malla de 75 μm .

Una vez efectuada la molienda en húmedo, las composiciones de dejaron secar bajo lámparas de infrarrojos en bandejas de vidrio, luego se procedió a molturar nuevamente en el molino de bolas cada composición completamente seco, por un tiempo de 10 min. Y se comprobó el rechazo, para esto se tomaban 25 gr. de muestra en una suspensión de agua, al término de una hora, se vertió sobre un tamiz de malla 40 μm . con abundante agua hasta que saliera agua limpia del tamiz, por último se secó y pesó el material que quedó en el tamiz. ^[8]

$$R = \frac{\text{gramos de residuo seco}}{\text{gramos de masa seca}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

R: Rechazo (%)

3.3.3. Conformado de probetas por prensado.

Ya con las composiciones secas y pulverizadas, se procedió a prensar para obtener las probetas, para ello se necesita de cierta humedad en el polvo, por lo que se calculó la masa de agua que se añadió para obtener una humedad del polvo de $5,5 \pm 0,2\%$, esto se hizo con una pistola de pulverización. Una vez rociado el polvo, se dejó homogenizando por una hora dentro de una bolsa plástica cerrada, luego se midió la humedad en balanzas de infrarrojos previamente agitando para obtener una humedad uniforme en toda la muestra. ^[8]

Para la conformación de las probetas, se procedió a prensar el polvo fijando previamente la presión de 400 kg/cm^2 , se obtuvieron una serie de probetas de forma cilíndrica de diámetro 4 cm que fueron pesadas inmediatamente al salir de la prensa y luego de permanecer 24 horas dentro de la estufa para comprobar la humedad de prensado. ^[8]

Figura 3.3.3: Prensa de probetas cilíndricas



3.3.4. Cocción de materias primas arcillosas.

Luego de ser prensadas las probetas, fueron secadas completamente en una estufa a 110°C y posteriormente fueron sometidas a un ciclo de cocción en un horno eléctrico de laboratorio como muestra la figura 3.3.4, el cual realiza un ciclo de cocción mostrado en la siguiente tabla.

Tabla 3.3.4: Ciclo de cocción.

Calentamiento		Cocción		Enfriamiento
T < 505°C	T > 505°C	Temperatura optima	t (min)	
Calentamiento rápido	27°C/min	STD-1: 1220°C	6	Forzado con aire
		STD-Na: 1220°C		
		STD-K: 1240°C		
		VR10Na20: 1180°C		
		VR10K20: 1180°C		

Figura 3.3.4: Horno eléctrico de laboratorio para cocción.



3.3.5. Determinación de la pérdida por calcinación

Este ensayo que establece la pérdida de masa luego de la cocción, se realiza pesando las probetas en una balanza, antes y después del ciclo térmico, luego se determina el valor usando la siguiente ecuación. ^[8]

$$PPC = \frac{m_s - m_c}{m_s} \times 100 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

PPC = pérdida por calcinación (%).

m_s = masa de la probeta en seco (g).

m_c = masa de la probeta calcinada (g)

3.3.6. Determinación del contenido de humedad

Para determinar la humedad en el momento del prensado, se pesan en una balanza, las probetas una vez prensadas y luego de que se hayan secado en la estufa, y se obtiene el valor de la humedad según la ecuación 3. ^[8]

$$H = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

H = Contenido de humedad (%).

m_h = peso de la probeta en húmedo (g).

m_s = peso de la probeta en seco (g).

3.3.7. Determinación de la densidad aparente

La realización de este ensayo fue hecho a través del método de inmersión de mercurio, el cual consiste en sumergir las probetas bien sea secas o cocidas en un recipiente que contiene mercurio, el cual está acoplado a un montaje que ayuda a la probeta a mantenerse hundida mientras se pesa en una balanza. La densidad aparente de la probeta se calcula mediante la siguiente ecuación. ^[8]

$$D_{ap} = \frac{m \cdot d_{Hg}}{ep} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

D_{ap} = Densidad aparente de la probeta seca (D_{ap_s}) o cocida (D_{ap_c}) (g/cm^3)

m = masa de la probeta seca (m_s) o cocida (m_c) (g)

ep = empuje probeta seca (ep_s) o cocida (ep_c) sumergida en el mercurio (g)

d_{Hg} = densidad del mercurio = $13,53 \text{ g}/\text{cm}^3$

Figura 3.3.7: Montaje para determinación de densidad aparente por inmersión en mercurio



3.3.8. Determinación de la contracción lineal de cocción

Una vez prensada la probeta, se secaron dentro de una estufa y luego se midió el diámetro con un pie de rey en tres puntos para tomar una media, posteriormente se repitió el mismo procedimiento de medición luego de someter a las probetas en el ciclo de cocción correspondiente. Para determinar este resultado se utilizó la siguiente ecuación. ^[8]

$$CL = \frac{L_s - L_c}{L_s} \times 100 \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

CL = contracción lineal (%)

L_s = diámetro de la probeta seca (mm)

L_c = diámetro de la probeta cocida

3.3.9. Determinación de la absorción de agua

Las probetas ya cocidas y pesadas, se dejan dentro de un recipiente donde se hace vacío por una media hora, luego se deja pasar el agua hasta que las probetas queden sumergidas y se dejan reposar otros 15 minutos, finalizado

este tiempo, se secan superficialmente las probetas con un paño húmedo y son pesadas nuevamente, el valor de la absorción de agua es dado por esta ecuación. [8]

$$AA = \frac{m_a - m_c}{m_c} \times 100 \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

AA = absorción de agua (%)

m_a = masa de la probeta húmeda

m_c = masa de la probeta cocida

Figura 3.3.9: equipo utilizado para medir absorción de agua acoplado a bomba de vacío



3.3.10. Determinación de resistencia mecánica

De manera análoga a la conformación de probetas cilíndricas para la realización de todos los ensayos anteriores, se realizó la preparación de materias primas para la realización del ensayo de resistencia mecánica de flexión a tres puntos, la variación es que las probetas se conforman en una prensa diferente ya que se necesita otra geometría. Con probetas rectangulares de dimensiones 20 x 80 x 7 mm, bien sea con probetas secas o cocidas, se realiza el montaje como lo muestra la figura 3.3.10, donde se mide la fuerza máxima al momento de la rotura, que luego se introduce en la ecuación 7 para el cálculo de la resistencia mecánica. La velocidad del ensayo dependió del estado de la probeta, para las probetas en seco la velocidad de bajada fue de 10 mm/min y las cocidas de 5 mm/min.

$$\sigma = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot L_s}{2 \cdot e^2 \cdot a} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

σ = resistencia mecánica (Kgf/cm²)

F_{\max} = fuerza máxima (Kgf)

L_s = distancia entre apoyos (cm)

e = espesor de la probeta (cm)

a = anchura de la probeta (cm)

Figura 3.3.10: Ensayo de flexión a 3 puntos en maquina universal de ensayos.



3.3.11. Análisis de fluorescencia de rayos x

Al vidrio reciclado se le realizó este análisis químico para identificar la naturaleza del mismo, para ello se molto en un molino de anillos de carburo de wolframio para homogenizar el tamaño de partícula, que posteriormente se elaboraron perlas a las que fueron sometidas a un análisis de fluorescencia de rayos x.

3.3.12. Análisis por microscopía electrónica de barrido

Para el análisis de la microestructura del gres porcelánico, se utilizó un microscopio electrónico de barrido, donde las probetas cocidas se cortaron y embutieron para la observación.

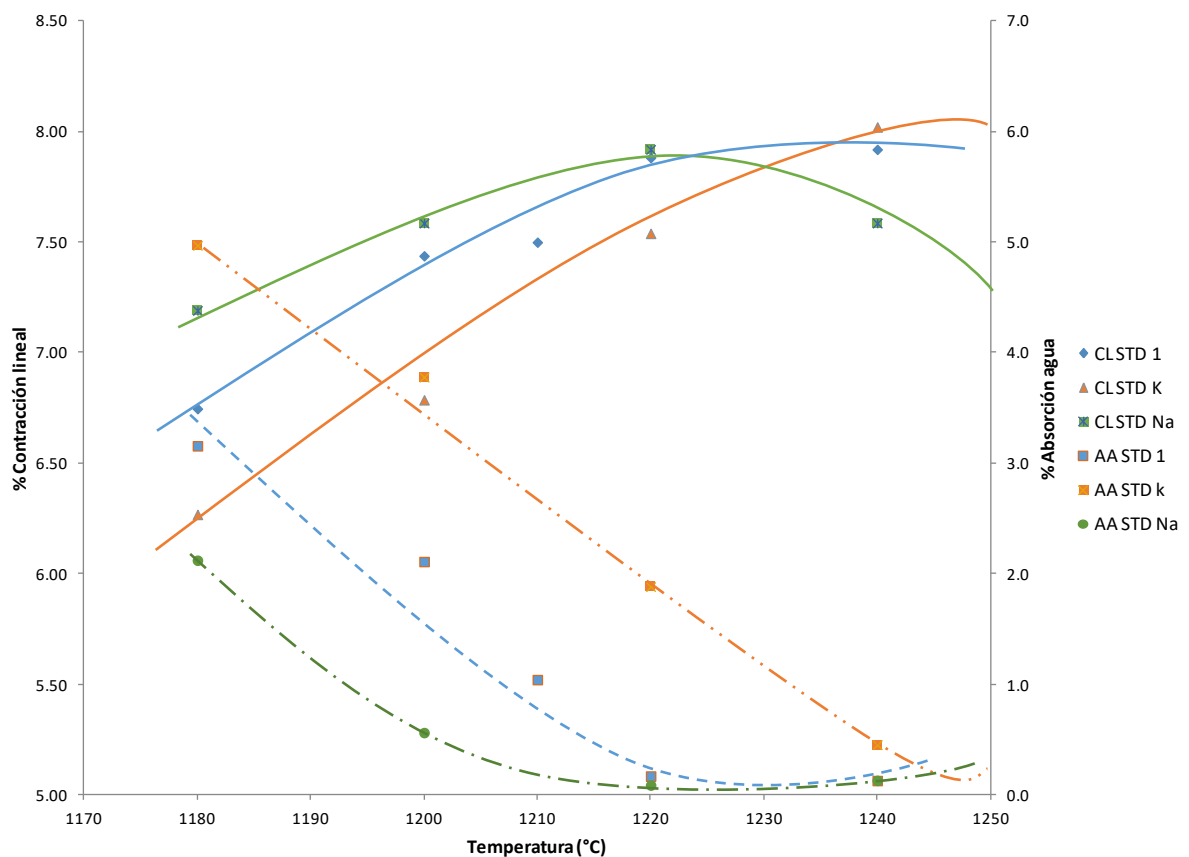
4. RESULTADOS

Siguiendo lo descrito en el apartado anterior, se obtuvieron los siguientes resultados, con los que se hicieron los análisis respectivos para las diferentes formulaciones de gres porcelánico a menor temperatura de lo habitual, determinando propiedades como contracción lineal, absorción de agua y densidad aparente.

4.1. Curvas de gresificación.

En primer lugar, con las primeras formulaciones de gres se observó el comportamiento fundente, y la influencia de los feldespatos sódico y potásico cuando están en partes iguales y cuando se encuentra uno solo de ellos dentro de la formulación. A continuación se presenta la curva de gresificación donde se muestran los porcentajes de absorción de agua, contracción lineal a las diferentes temperaturas.

Figura 4.1.1: Curva de gresificación para composiciones estándar.

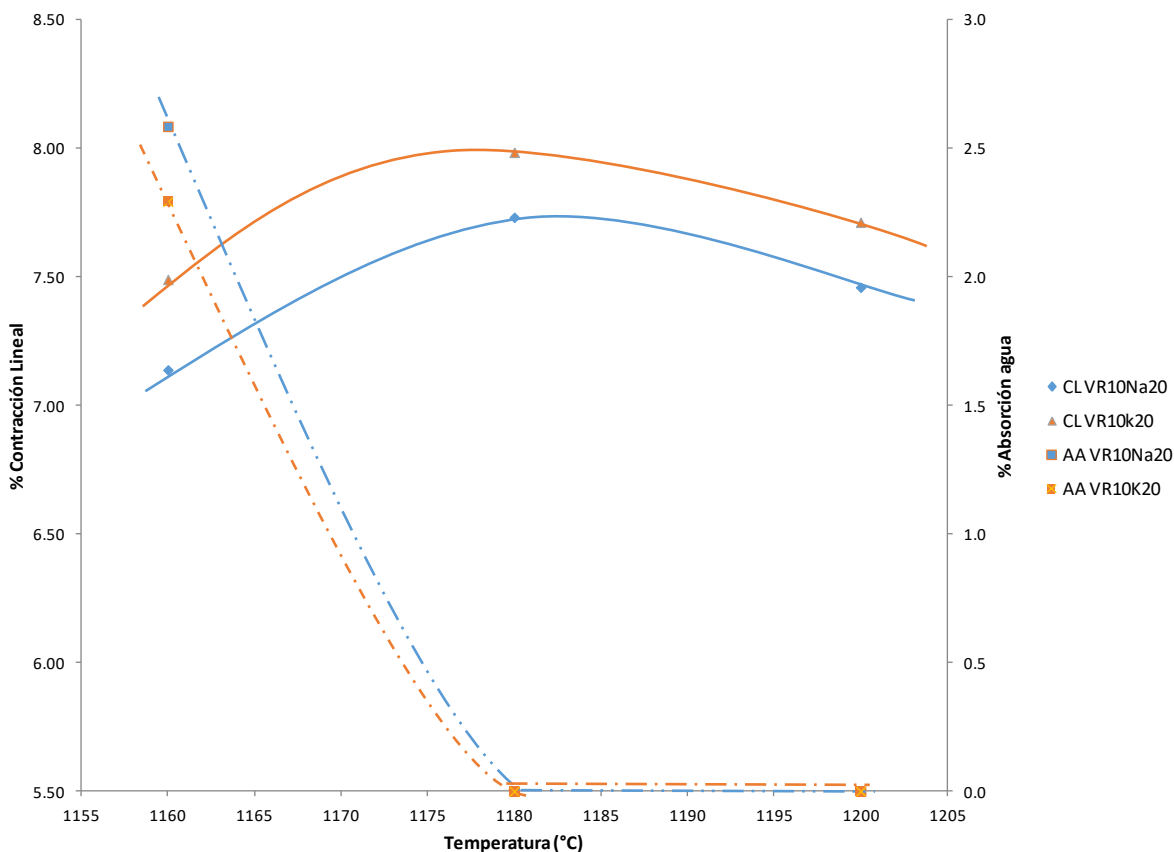


En primera instancia se puede apreciar que la composición únicamente con feldespato potásico en cuanto a la contracción lineal es la que presenta la pendiente

más acusada, como es el menos fundente entre los feldespatos, su temperatura de cocción óptima esta después de los 1240°C . También se puede observar que las composiciones STD-1 y STD-Na presentan su temperatura de cocción óptima alrededor de los 1220°C, ya que tienen en común al feldespato sódico, que es el más fundente. Otro aspecto que se notar que la composición STD-1 con igual cantidad de feldespatos, es la que presenta un intervalo de cocción más amplio por debajo de los 1240°C, es decir, que la variación de contracción lineal es casi nula, esto es beneficioso, ya que dentro de un horno de producción, en el cual puede haber gradientes de temperatura, este hecho hace que no altere las propiedades físicas del producto terminado.

En cuanto a la absorción de agua, se tiene que el feldespato sodico al ser más fundente, hay menor porosidad cerrada, esto implica que será más resistente a las manchas, por lo que la composición que solo tiene feldespato sódico es la que menos presenta absorción de agua, seguida de la composición de mezclas de los feldespatos y por último la composición que está constituida de solo feldespato potásico.

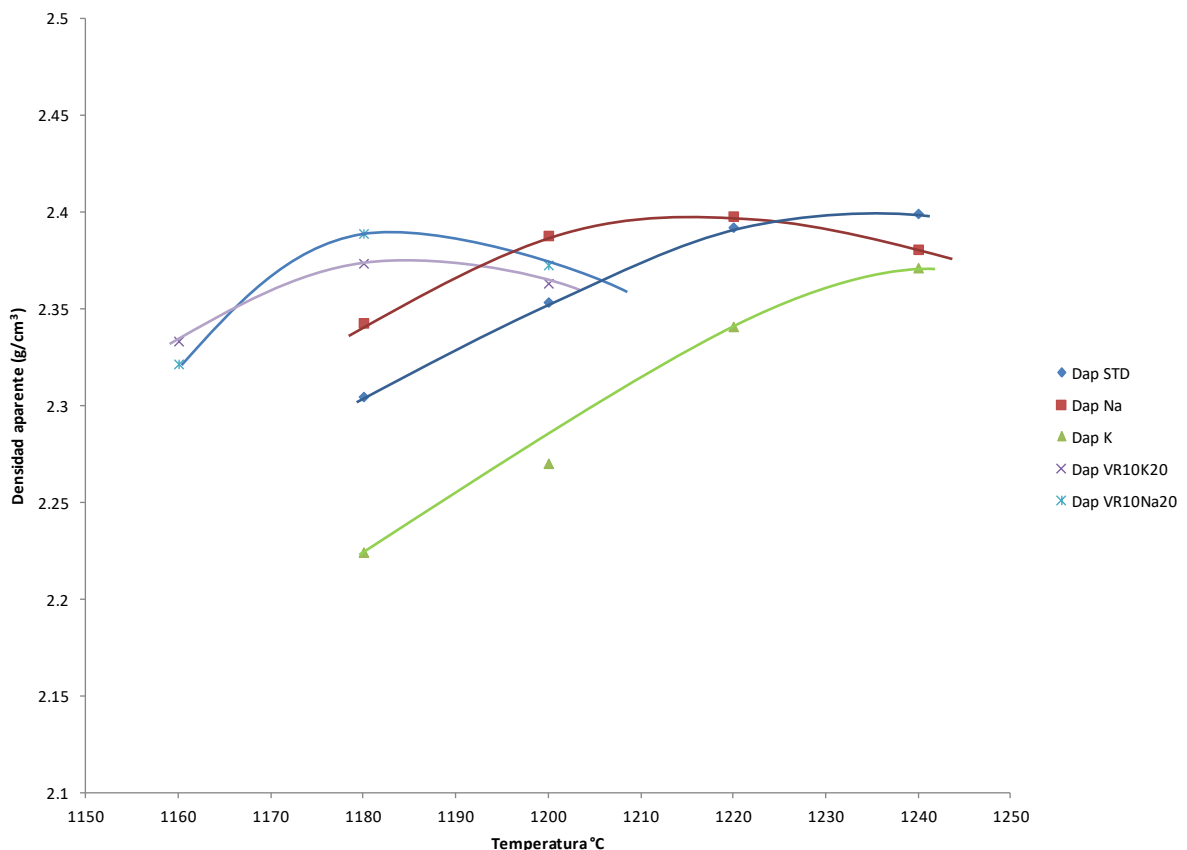
Figura 4.1.2: Curva de gresificación para composiciones con fundentes.



De la imagen anterior se nota claramente en ambas composiciones, tienen su temperatura de cocción óptima en 1180 °C, mucho menor comparado con las composiciones que no poseen material fundente adicional como el vidrio reciclado y el ácido bórico, al igual ambas tienen forma muy semejantes, específicamente hablando del intervalo de cocción.

Estas formulaciones que contienen material fundente, alcanzan la temperatura de cocción óptima a más baja en comparación a las primeras composiciones, y a su vez, este material fundente disminuye la viscosidad en el fundido que es capaz de cerrar la porosidad abierta formada por el material arcilloso, promoviendo una mejor densificación, por este hecho se llega a conseguir valores muy bajos de absorción de agua, todo sin que afecte el calibre del producto final. [9]

Figura 4.1.3: Densidad aparente de todas las composiciones



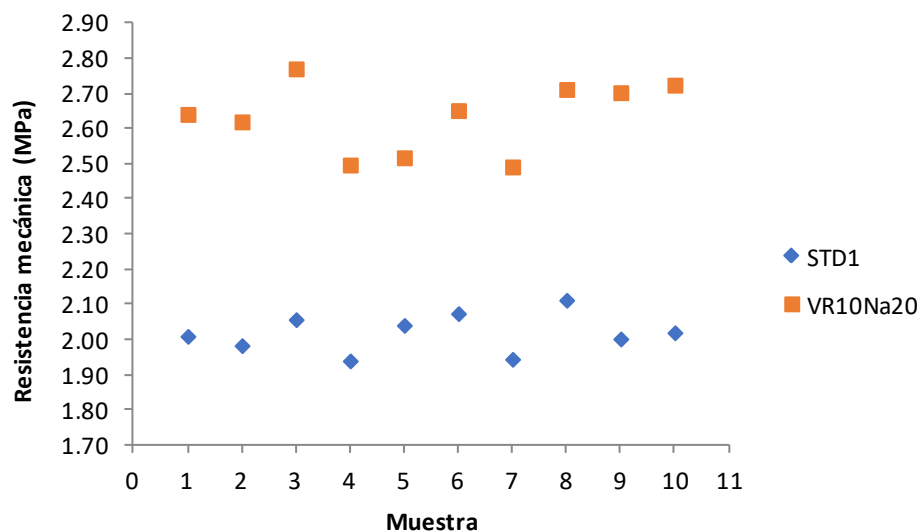
En la imagen anterior, se ve representada la densidad aparente de todas las formulaciones hechas, de manera análoga a las curvas de gresificación, se ve como las curvas alcanzan su máximo en el caso de las que no contienen el vidrio reciclado y el ácido bórico, a partir de una temperatura de 1220°C, las que si contienen los

añadidos fundentes presentan su máximo a la temperatura óptima de cocción de 1180°C, corroborando que en el punto de densificación máxima lo encuentra en su temperatura óptima de cocción, donde la porosidad abierta obtiene un valor mínimo y la contracción lineal es máxima. [10]

4.2. Resistencia mecánica a la flexión

De las composiciones estudiadas anteriormente, hubo un particular interés en el estudio de la resistencia mecánica en dos especialmente, la composición estándar con igual cantidad de feldespatos, y la composición con vidrio reciclado que tiene una mayor parte de de feldespato sódico, ambas presentan un valor de densidad aparente en cocido muy semejante, de 2,399 g/cm³ para la STD-1 y 2,393 g/cm³ para VR10Na20. A continuación se presenta una comparación entre las resistencia mecánica tanto en seco como en cocido para ambas composiciones.

Figura 4.2.1: Comparación de resistencia mecánica en seco.

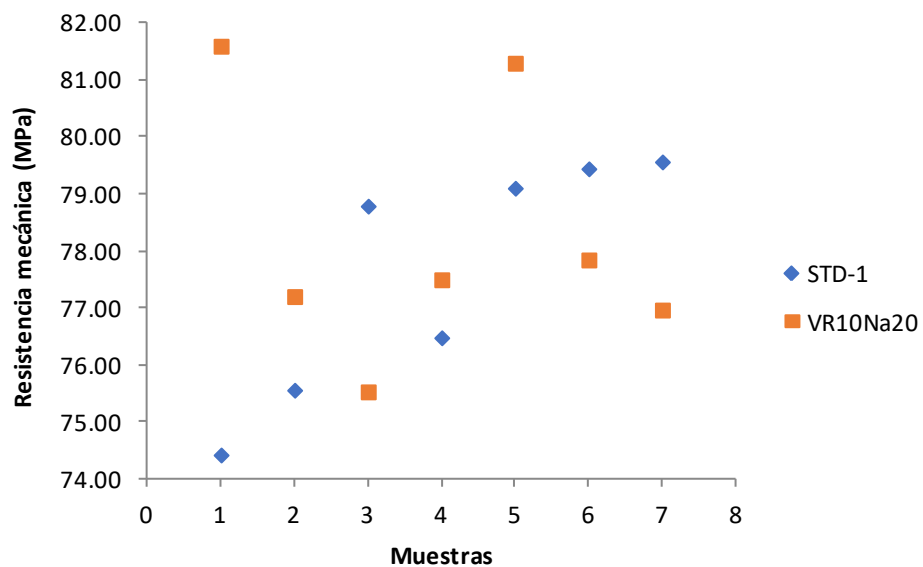


En esta primera imagen se puede notar cómo influye el vidrio reciclado sobre la resistencia mecánica, ya que el valor promedio de resistencia mecánica para la composición estándar es de 2,0 MPa. y para la composición con fundente es de 2,6 MPa. Ambas composiciones presentan valores de densidad aparente en seco muy semejantes, siendo para la composición estándar un valor de 1,888 g/cm³ y para la que contiene vidrio reciclado con mayor cantidad de feldespato sódico es de 1,885 g/cm³, la compacidad y la permeabilidad en la composición con vidrio reciclado es mucho mejor, lo que se traduce en una mayor resistencia mecánica en seco. [1]

Otro efecto asociado a la mayor resistencia mecánica de la composición con fundentes, es el pequeño porcentaje de ácido bórico, que actúa como ligante, ya que es capaz de aumentar el valor de la resistencia mecánica en seco, esto permite incluso, reducir el espesor de las piezas, sin perder cualidades como la resistencia mecánica, lo que se traduce en reducción de costos de producción.

Al analizar la resistencia mecánica en cocido para las mismas composiciones la tendencia no se mantiene igual, esto se ve representado en la siguiente gráfica que muestra la variación de este parámetro, hay que destacar que los valores medios de la resistencia mecánica no difieren tanto uno del otro, ya que para la composición STD-1 es de 77,6 MPa. y para VR10Na20 es de 78,2 MPa. Lo que se puede interpretar es que la adición de material fundente a una composición de gres porcelánico, no afecta en el valor de resistencia mecánica en cocido, a continuación se muestra la gráfica de calores de resistencia mecánica en cocido.

Figura 4.2.2: Comparación de resistencia mecánica en cocido.



4.3. Análisis de microestructura en M.E.B.

A continuación se presentarán las imágenes de la microestructura de las diferentes composiciones, analizadas en el microscopio electrónico de barrido, a diferentes aumentos, cada una cocida a su respectiva temperatura óptima.

Figura 4.3.1: Microestructuras de las formulaciones a 200X. A:STD-1. B:STD-K. C:STD-Na.

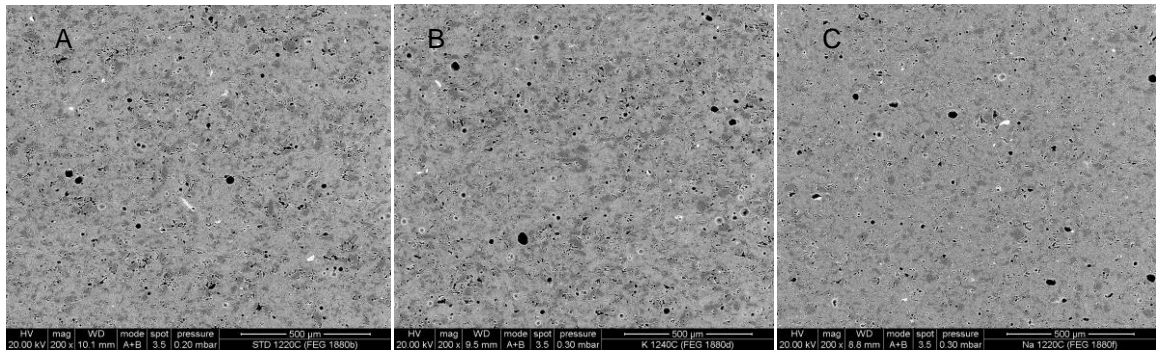


Figura 4.3.2: Microestructuras de las formulaciones a 1000X A:STD-1. B:STD-K. C:STD-Na.

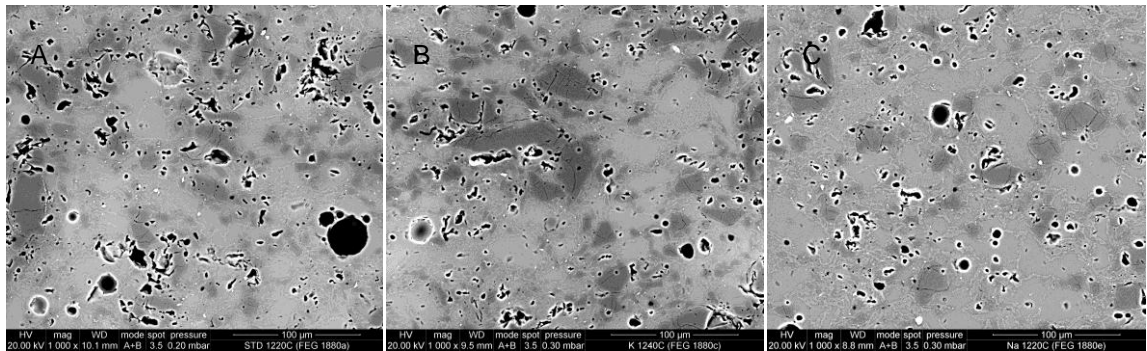


Figura 4.3.3: Microestructura de la formulación VR10Na20 a diferentes aumentos A: 200X. B: 1000X. C: 8000X.

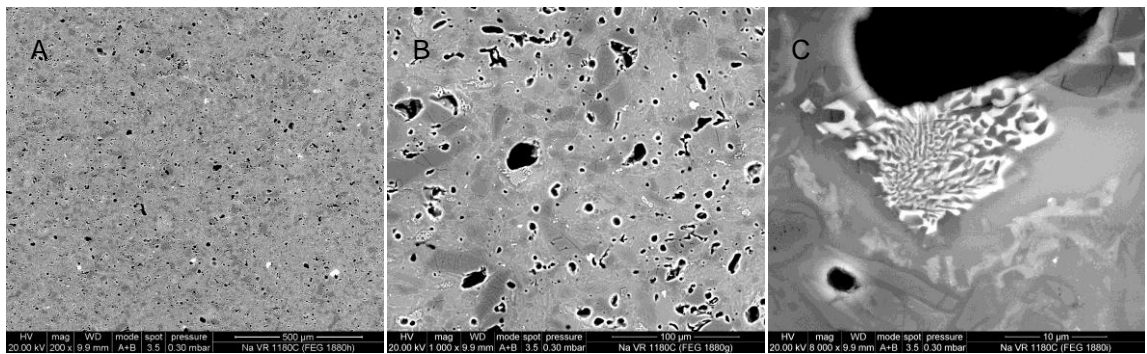
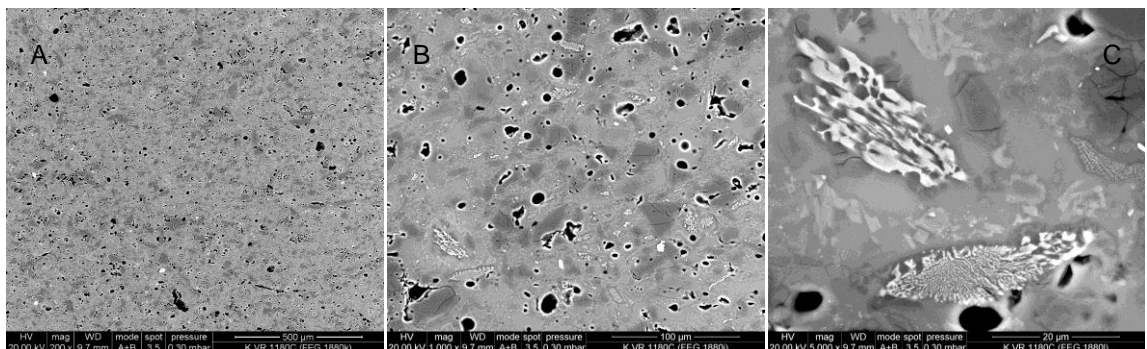


Figura 4.3.4: Microestructura de la formulación VR10K20 a diferentes aumentos A: 200X. B: 1000X. C: 5000X.



Las imágenes que recoge el microscopio electrónico son en parte, gracias a los electrones retrodispersados, los cuales dan información acerca de la composición de la muestra, ya que si las fases encontradas son de número atómico bajo, la imagen obtenida es más oscura, en cambio si la imagen obtenida es más clara o brillante, corresponde a mayor emisión de electrones retrodispersados, lo que implica que son de número atómico mayor. Ya que la imagen también depende de la topografía de la superficie, se puede notar en los sitios donde hay porosidad, ya que los electrones no son recibidos por los electrones y no se obtiene una imagen. ^[11]

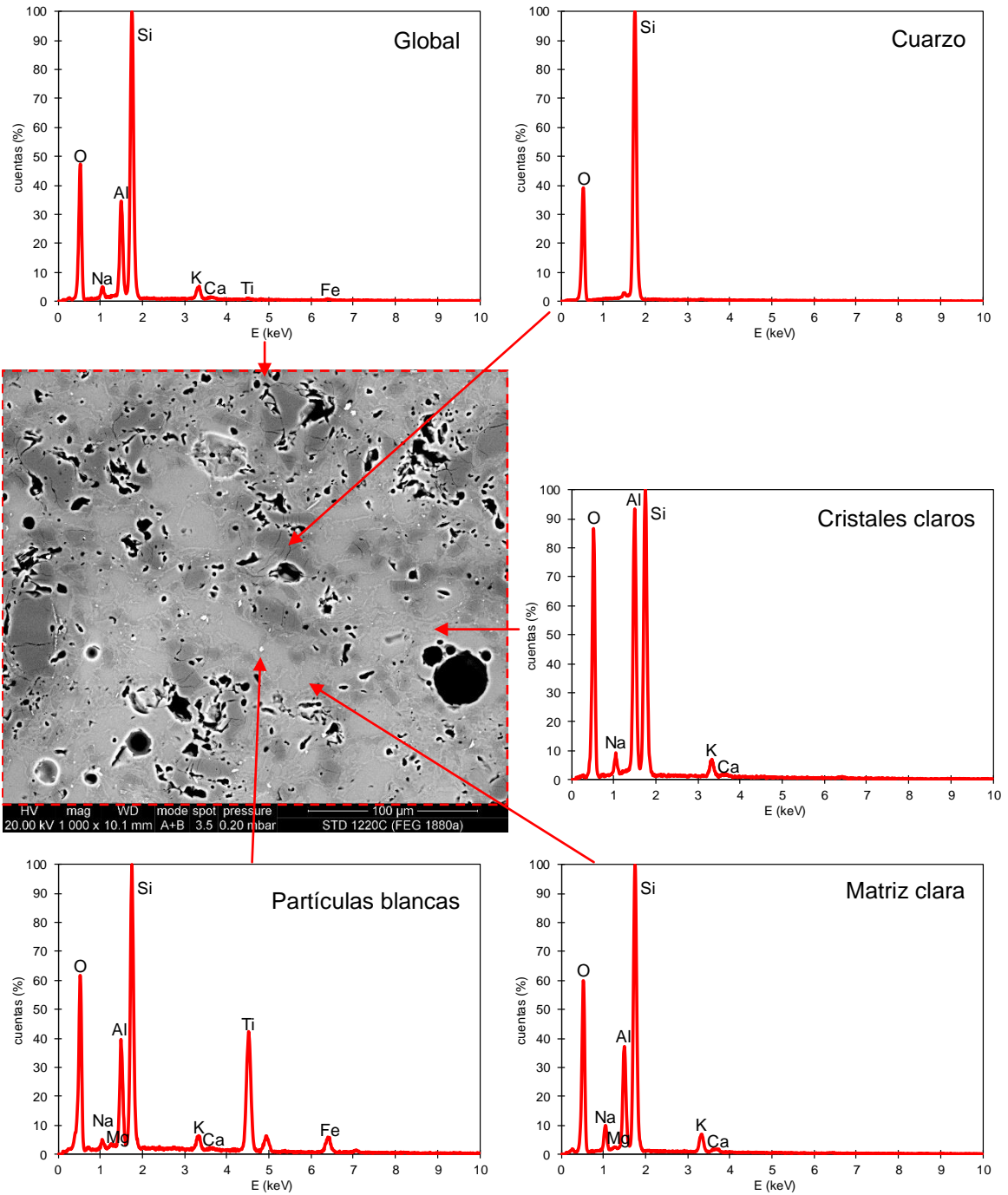
Como se había dicho anteriormente, las imágenes corresponden a las muestras cocidas a su temperatura de cocción óptima, esto se puede ver claramente en cada imagen, donde la morfología que presentan los poros son redondeados. También se sabe de análisis de microestructuras de gres porcelánico, que las zonas en gris claro, representan la matriz vítrea que la aporta el material fundente que es el feldespato, ya que por su tonalidad dada por números atómicos bajos de los alcalinos, las fases en gris oscuro corresponden al cuarzo que no ha fundido.

Para analizar de manera detallada, las diferentes fases que se mostraron en las imágenes anteriores, se utilizó el método de fluorescencia de rayos x acoplado al M.E.B. dicho análisis es mostrado en la figura 4.3.5. La composición STD-1 en el análisis global muestra los diferentes elementos presentes, El silicio que predomina, seguido del aluminio, los cuales proceden tanto de las arcillas como del feldespatos, luego con menor presencia de sodio y potasio correspondiente a los respectivos feldespatos, todos presentes en forma de óxidos debido a la presencia del oxígeno en dicho análisis, en muy poca cantidad se puede observar el calcio, titanio y hierro, los cuales pueden provenir de impurezas de las muestras.

Las zonas gris oscuras como se había dicho anteriormente, corresponden al cuarzo, ya que visualmente presenta grietas debido a las transformaciones que atraviesa durante el calentamiento y enfriamiento, en su respectivo análisis se ve claramente la presencia del SiO_2 .

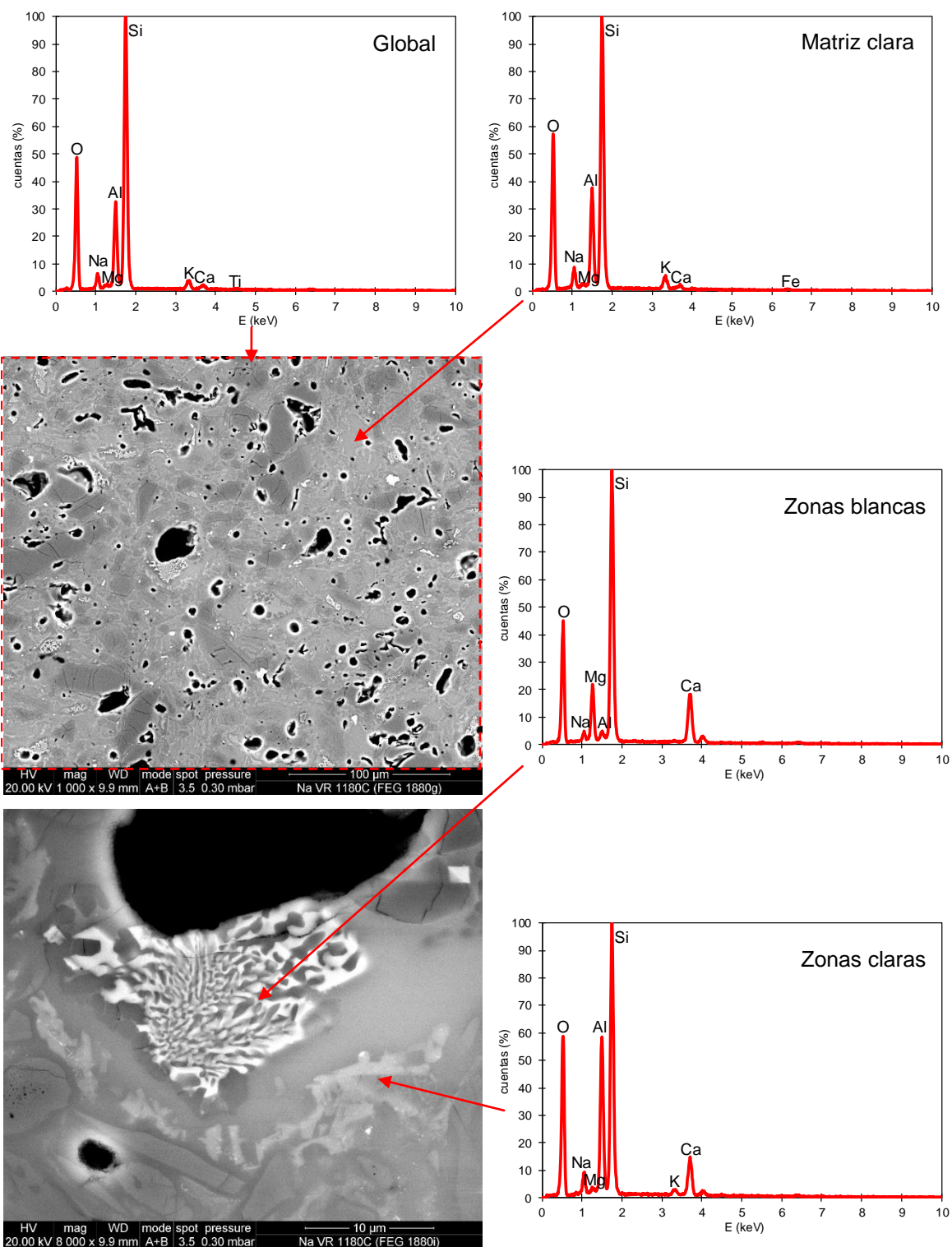
Las pequeñas partículas blancas, corresponde a elementos pesados, es decir de número atómico más alto, como lo son el titanio mayormente y hierro, los cuales se pueden deber a impurezas, ya que se encuentran de forma esporádica en la imagen.

Figura 4.3.5: análisis de F.R.X. de la muestra STD-1 a las diferentes estructuras.



Esas pequeñas betas que se pueden notar más claras en la imagen anterior, corresponden a los cristales claros, por el análisis respectivo se puede decir que es el material arcilloso, y por último se encuentra la matriz clara, donde no hay cristalización, es decir, donde se encuentra todo el material fundido.

Figura 4.3.6: análisis de F.R.X. de la muestra VR10Na20 a las diferentes estructuras.



El análisis global de esta muestra de la figura 4.3.6, es muy semejante al anterior, solo difiere con la presencia de magnesio aportado por el vidrio reciclado, de resto, presenta los mismos elementos observados en la composición estándar, lo cual es

coherente ya que las formulaciones no difieren una de la otra, lo mismo ocurre con el análisis la matriz clara.

En estas muestras con material fundente a diferencia de la anterior, presentan unas zonas blancas y muy claras ricas en calcio y magnesio, debido a la naturaleza sódico-cálcica del vidrio reciclado, con un mayor aumento se puede apreciar visualmente la desvitrificación de estas fases presentes.

Para la muestra VR10K20, también se le hizo el análisis respectivo, el cual es similar a los anteriores, tanto para la muestra en forma global, como para las fases cristalinas claras y blancas de la desvitrificación del vidrio reciclado, y dichos análisis son mostrados a continuación.

Figura 4.3.7: análisis de F.R.X. global de la muestra VR10K20.

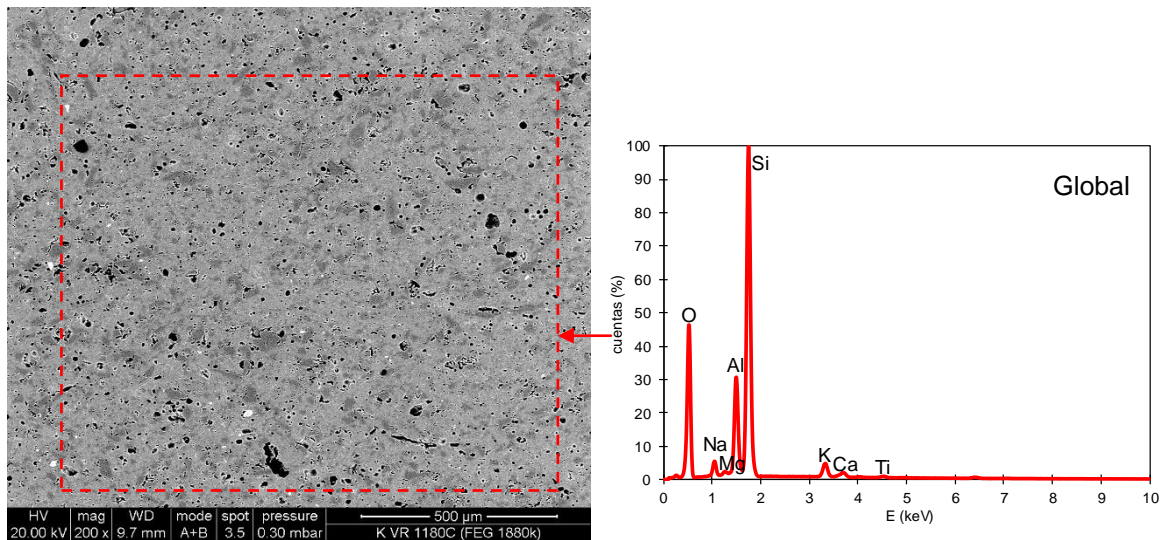
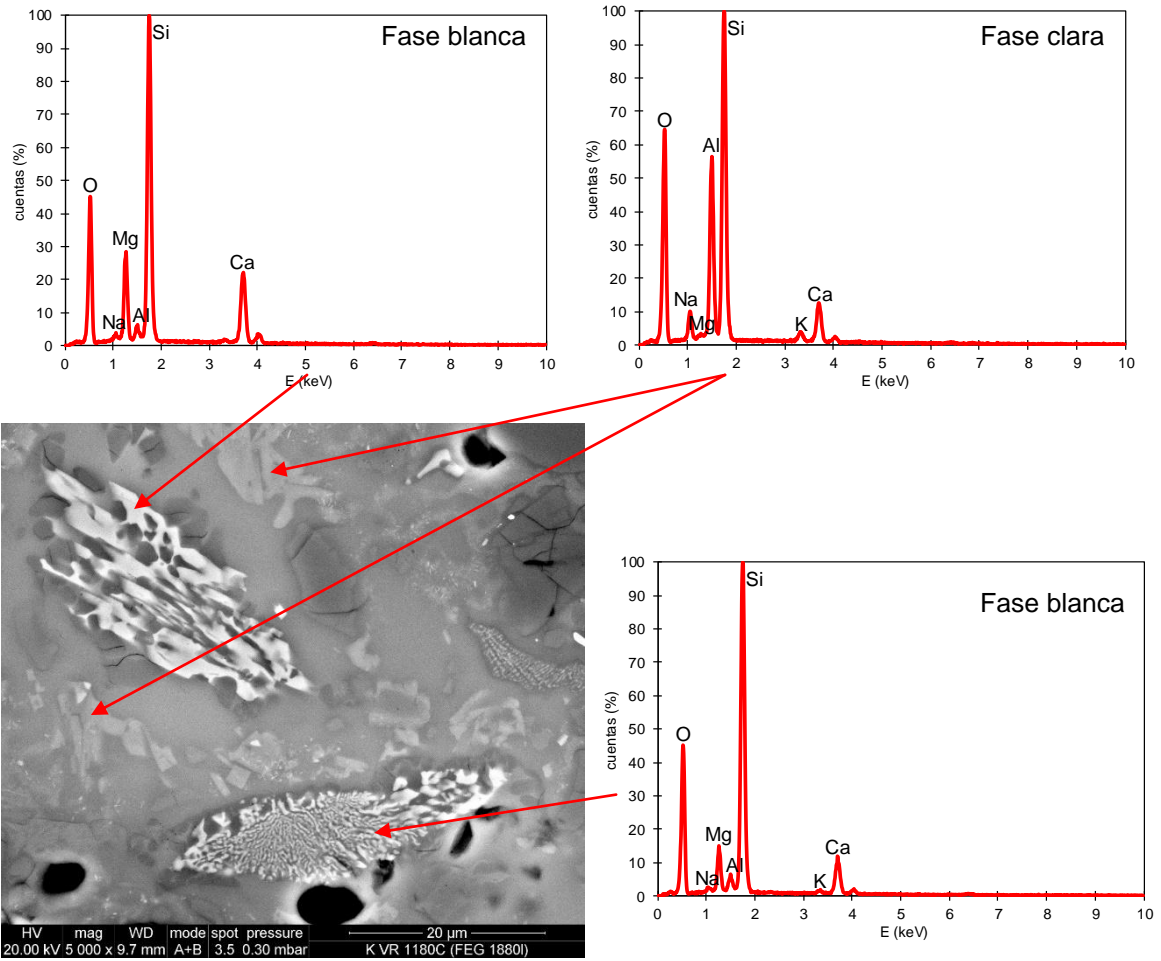


Figura 4.3.8: análisis de F.R.X. de la muestra VR10K20.



5. CONCLUSIONES.

En esta investigación, se formularon inicialmente composiciones típicas de gres porcelánico variando la cantidad de materias primas desgrasantes, luego se añadieron a la composición, material fundente, donde se analizaron diversas propiedades para determinar la eficiencia del mismo sobre las composiciones de gres porcelánico, de diferentes mezclas que se hicieron, se analizaron los resultados obtenidos haciendo un diagrama de gresificación, estudio de la resistencia mecánica y de la microestructura a través de un microscopio electrónico de barrido, de todo este estudio se pudieron extraer las siguientes conclusiones:

El material fundente logró disminuir la temperatura óptima de cocción, 40 grados centígrados aproximadamente, ya que la composición de partida alcanzaba su temperatura óptima luego de 1220°C y para las composiciones con vidrio reciclado y ácido bórico tenían su pico correspondiente en 1180°C, gracias a que este agregado promueve la reducción de viscosidad en el fundido, obteniendo una mayor densificación a menor temperatura.

En las muestras que contienen el material fundente, se encontró que el intervalo de cocción es muy estrecho, esto quiere decir que al menor cambio de temperatura, las propiedades como contracción lineal o absorción de agua se ven afectadas bruscamente, en términos de fabricación, donde existen gradientes de temperatura dentro de un horno de producción de piezas cerámicas, esto puede afectar gravemente en las propiedades como el calibre.

El ácido bórico dentro de la formulación, cumple dos funciones principales, actuar como materia prima fundente, y también tiene como agente ligante, ya que es el responsable del aumento de la resistencia mecánica en seco, pero no afecta dicho valor en cocido, lo que implica, que se pueden reducir los espesores de las piezas, reduciendo así el coste del material.

La importancia de la disminución de la temperatura de cocción radica en dos aspectos principales, contribuye a la reducción de emisión de CO₂ al ambiente, y un menor gasto energético, ya que el costo asociado para la cocción de piezas a elevada temperatura es considerable.

Entre las recomendaciones que se pueden dar es continuar con más formulaciones con material fundente, por ejemplo una con igual cantidad de feldespatos sódico y potásico, ya que la variación de la contracción lineal de la composición STD-1 entre 1220 y 1240°C es casi nula, por lo que se pudiera decir que a iguales cantidades de feldespatos, permite ampliar el rango de temperatura óptima de cocción.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] BARBA, A; BELTRAN, V; FELIU, C; et al. Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas. 2º ed. Castellón: Instituto de tecnología cerámica. 2002.
- [2] Guía de la baldosa cerámica. 4ª ed. Valencia. Instituto valenciano de la edificación.22-31. 2003.
- [3] SANCHEZ, E. Consideraciones técnicas sobre el producto y el proceso de fabricación del gres porcelánico. Castellón. Qualicer 2002.
- [4] Tecnología cerámica aplicada. Volumen I. SACMI. Asociación española de técnicos cerámicos. Castellón de la plana. 2004.
- [5] FERNANDEZ N, J. El vidrio. 2ª ed. Consejo superior de investigaciones científicas, sociedad española del vidrio. Madrid. P 52 1991.
- [6] LÁZARO, C; RAMÓN TRILLES, V; GÓMEZ, F; ALLEPUZ, S; FRAGA, D; CARDA, J.B. Incorporación de residuos derivados de la fabricación cerámica y del vidrio reciclado en el proceso cerámico integral Criterios de selección de materias primas para la fabricación de pavimentos y revestimientos cerámicos. Castellón. Qualicer 2012.
- [7] MORENO, A; GARCÍA-TEN, J; BOU, E; GOZALBO, A; El boro como fundente auxiliar en las composiciones de gres porcelánico. Castellón. Qualicer 2000.
- [8] AMORÓS, J.L.; SÁNCHEZ, E; GARCÍA-TEN, J; SANZ, V; MONZÓ, M; Manual para el control de la calidad de materias primas arcillosas. Castellón: Instituto de tecnología cerámica. 1998.
- [9] SANCHEZ-MUÑOS, L; CARDA CASTELLO, J.B. Materias primas y aditivos cerámicos. Tomo 2.2. Castellón. 2003. P 239.
- [10] DELVASTO ARJONA, S; GUZMÁN APONTE, Á; TORRES LEÓN, J. A; CEDEÑO VENTÉ, M. L; & ACOSTA GUARÍN, D. F. Viabilidad de uso del polvo de vidrio como fundente en la elaboración de baldosas de gres porcelánico. *Revista Tecnura*, 19(44), (2015). P59-70. doi:http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.2.a04
- [11] Guión de prácticas de laboratorio de la asignatura SIT006 procesamiento de materiales cerámicos. Microscopía electrónica de barrido (MEB) y microanálisis por dispersión de energías de rayos x (EDX). Curso 2017/17.

[12] QUEREDA, M.F; GARCÍA TEN, F; SABURIT, A; SORIANO, M. Uso del vidrio procedente del reciclado de lámparas y tubos fluorescentes como fundente en composiciones de soportes cerámicos. Castellón. Qualicer 2018.

7. ANEXOS.

A. Muestra STD-1

Tabla 7.1: Datos obtenidos de la muestra STD-1 ensayados

Ref.	Masa Húmeda (g)	Masa Seca (g)	Humedad (%)	Empuje (g)	Densidad aparente (g/cm ³)	Diámetro seco (cm)	Diámetro cocido (cm)	Contracción Lineal (%)	Masa cocida (g)	Pérdida calcinación (%)	Empuje cocido (g)	Densidad aparente (g/cm ³)	Masa agua (g)	Absorción agua (%)	Temperatura (°C)
1	12.89	12.21	5.57	87.1	1.897	4.050	3.777	6.75	11.72	4.01	68.8	2.305	12.09	3.16	1180
2	13.53	12.82	5.54	91.2	1.902	4.051	3.750	7.41	12.30	4.06	70.9	2.347	12.58	2.28	1200
3	13.58	12.87	5.52	91.4	1.905	4.050	3.748	7.46	12.35	4.04	70.8	2.360	12.59	1.94	1200
4	12.95	12.26	5.63	87.2	1.902	4.050	3.730	7.91	11.79	3.83	66.7	2.392	11.81	0.17	1220
5	12.94	12.26	5.55	87.3	1.900	4.050	3.732	7.86	11.78	3.92	66.6	2.393	11.80	0.17	1220
6	12.92	12.23	5.64	87.8	1.885	4.050	3.729	7.93	11.75	3.92	66.2	2.401	11.77	0.17	1240
7	12.63	11.97	5.51	85.9	1.885	4.051	3.730	7.91	11.50	3.93	64.9	2.397	11.51	0.09	1240

Tabla 7.2: Datos promedio de la muestra STD-1

T ^a	Dap	CL	AA	PpC
1180	2.305	6.75	3.2	4.01
1200	2.354	7.44	2.1	4.05
1220	2.392	7.88	0.2	3.87
1240	2.399	7.92	0.1	3.93

Figura 7.1. Curva de gresificación muestra STD-1

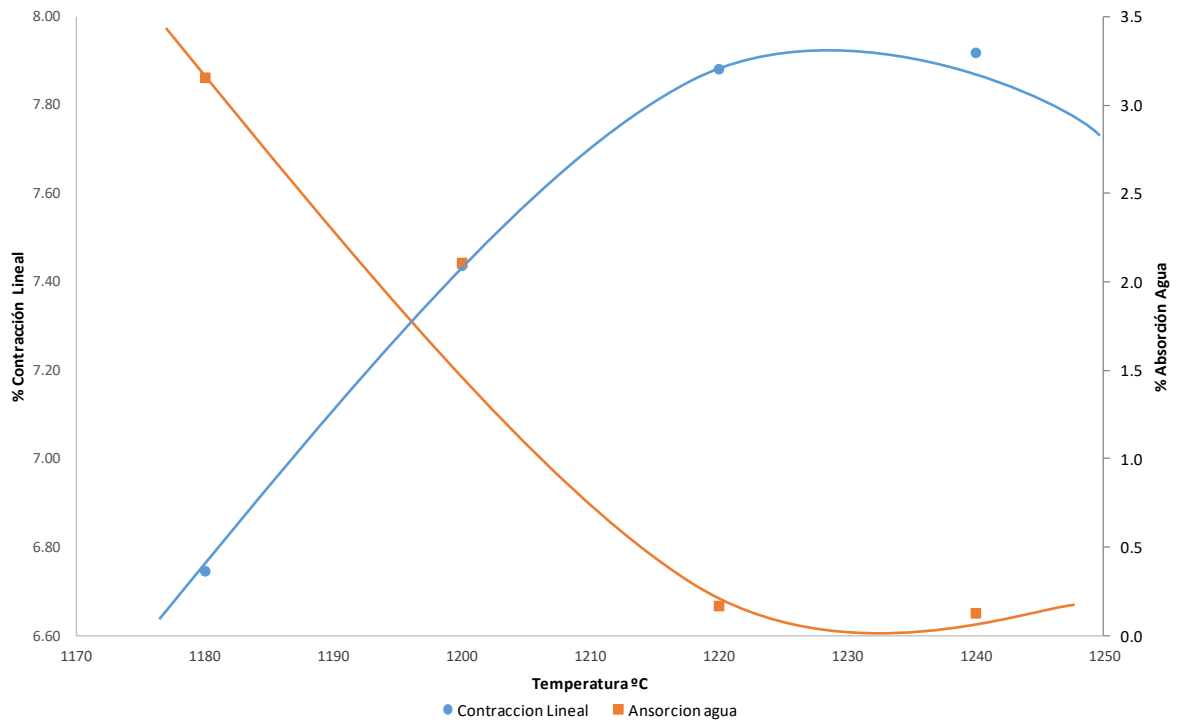
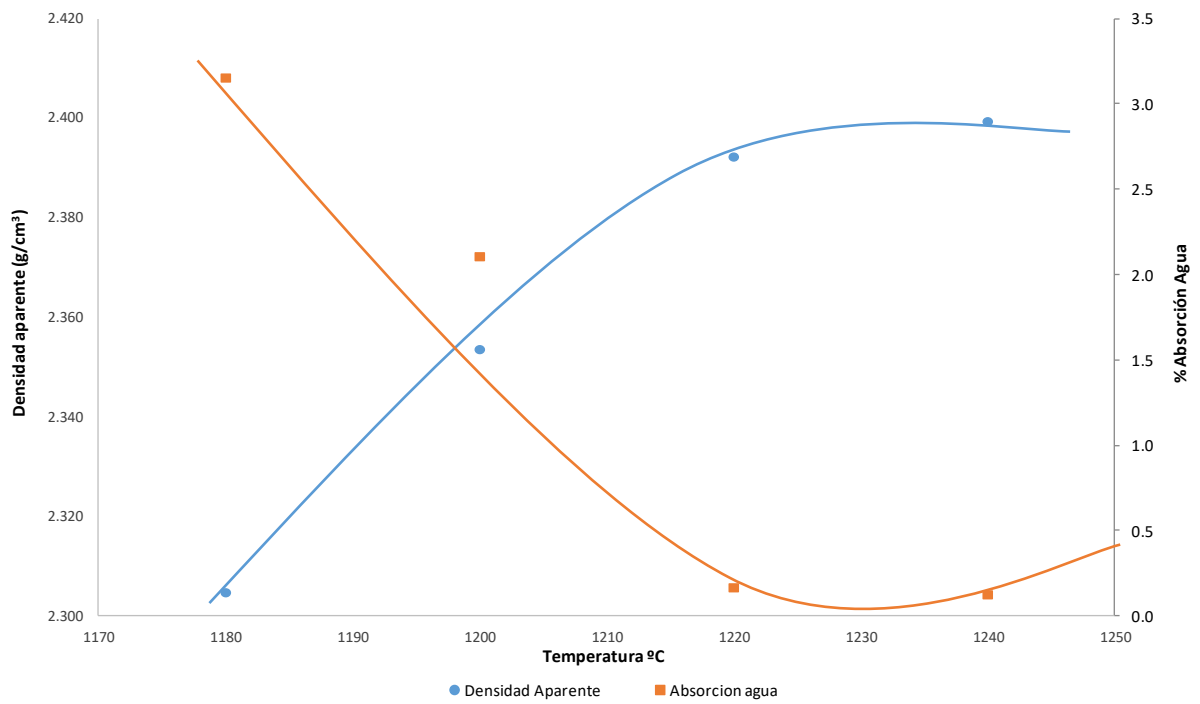


Figura 7.2. Densidad aparente muestra STD-1



B. Muestra STD-Na

Tabla 7.3: Datos obtenidos de la muestra STD-Na ensayados

Ref.	Masa Húmeda (g)	Masa Seca (g)	Humedad (%)	Empuje (g)	Densidad aparente (g/cm ³)	Diámetro seco (cm)	Diámetro cocido (cm)	Contracción Lineal (%)	Masa cocida (g)	Pérdida calcinación (%)	Empuje cocido (g)	Densidad aparente (g/cm ³)	Masa agua (g)	Absorción agua (%)	Temperatura (°C)
1	11.90	11.29	5.40	79.9	1.912	4.049	3.758	7.19	10.84	3.99	62.6	2.343	11.07	2.12	1180
2	12.76	12.09	5.54	85.7	1.909	4.049	3.745	7.51	11.61	3.97	65.9	2.384	11.71	0.86	1200
3	12.50	11.85	5.49	84.0	1.909	4.048	3.739	7.66	11.37	4.05	64.3	2.392	11.40	0.26	1200
4	12.70	12.03	5.57	85.5	1.904	4.050	3.740	7.64	11.56	3.91	65.1	2.403	11.57	0.09	1210
5	12.75	12.08	5.55	85.7	1.907	4.049	3.736	7.73	11.60	3.97	65.4	2.400	11.63	0.26	1210
6	12.57	11.91	5.54	84.2	1.914	4.050	3.730	7.88	11.41	4.20	64.4	2.397	11.43	0.18	1220
7	11.59	10.99	5.46	77.9	1.909	4.048	3.727	7.96	10.55	4.00	59.5	2.399	10.55	0.00	1220
8	12.71	12.05	5.48	85.6	1.905	4.050	3.740	7.64	11.56	4.07	65.6	2.384	11.58	0.17	1240
9	12.56	11.91	5.46	84.5	1.907	4.050	3.744	7.54	11.44	3.95	65.1	2.378	11.45	0.09	1240

Tabla 7.4: Datos promedio de la muestra STD-Na

T ^a	Dap	CL	AA	PpC
1180	2.343	7.19	2.1	3.99
1200	2.388	7.59	0.6	4.01
1210	2.401	7.68	0.1	3.94
1220	2.398	7.92	0.1	4.10
1240	2.381	7.59	0.1	4.01

Figura 7.3. Curva de gresificación muestra STD-Na

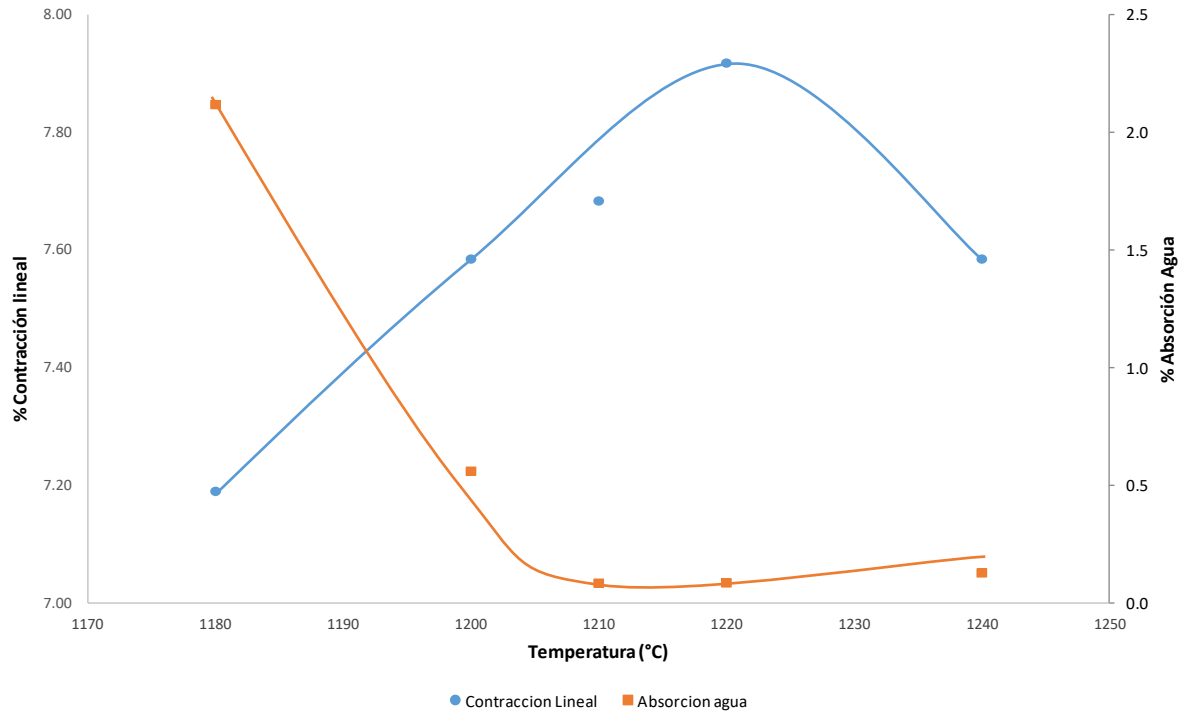
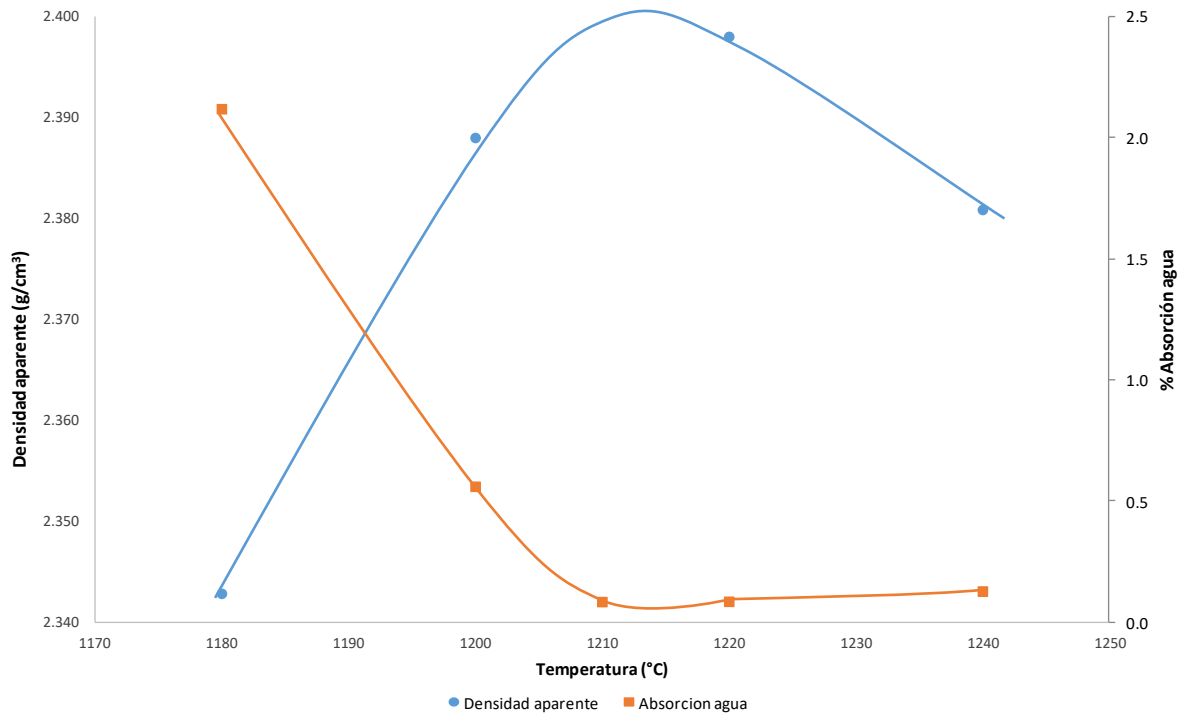


Figura 7.4. Densidad aparente muestra STD-Na



C. Muestra STD-K

Tabla 7.5: Datos obtenidos de la muestra STD-K ensayados

Ref.	Masa Húmeda (g)	Masa Seca (g)	Humedad (%)	Empuje (g)	Densidad aparente (g/cm ³)	Diámetro seco (cm)	Diámetro cocido (cm)	Contracción Lineal (%)	Masa cocida (g)	Pérdida calcinación (%)	Empuje cocido (g)	Densidad aparente (g/cm ³)	Masa agua (g)	Absorción agua (%)	Temperatura (°C)
1	13.04	12.35	5.59	89.3	1.871	4.050	3.797	6.27	11.87	3.89	72.2	2.224	12.46	4.97	1180
2	13.80	13.08	5.50	94.3	1.877	4.052	3.782	6.64	12.57	3.90	75.2	2.262	13.07	3.98	1200
3	13.20	12.51	5.52	90.3	1.874	4.051	3.770	6.93	12.01	4.00	71.3	2.279	12.44	3.58	1200
4	12.89	12.22	5.48	88.2	1.875	4.052	3.747	7.50	11.82	3.27	68.2	2.345	12.01	1.61	1220
5	13.23	12.54	5.50	90.5	1.875	4.051	3.744	7.58	12.04	3.99	69.7	2.337	12.30	2.16	1220
6	13.40	12.70	5.51	91.7	1.874	4.052	3.727	8.00	12.20	3.94	69.7	2.368	12.27	0.57	1240
7	13.22	12.54	5.42	90.5	1.875	4.051	3.725	8.05	12.04	3.99	68.6	2.375	12.08	0.33	1240

Tabla 7.6: Datos promedio de la muestra STD-K

T ^a	Dap	CL	AA	PpC
1180	2.224	6.27	5.0	3.89
1200	2.270	6.79	3.8	3.95
1220	2.341	7.54	1.9	3.63
1240	2.371	8.02	0.5	3.96

Figura 7.5: Curva de gresificación muestra STD-K

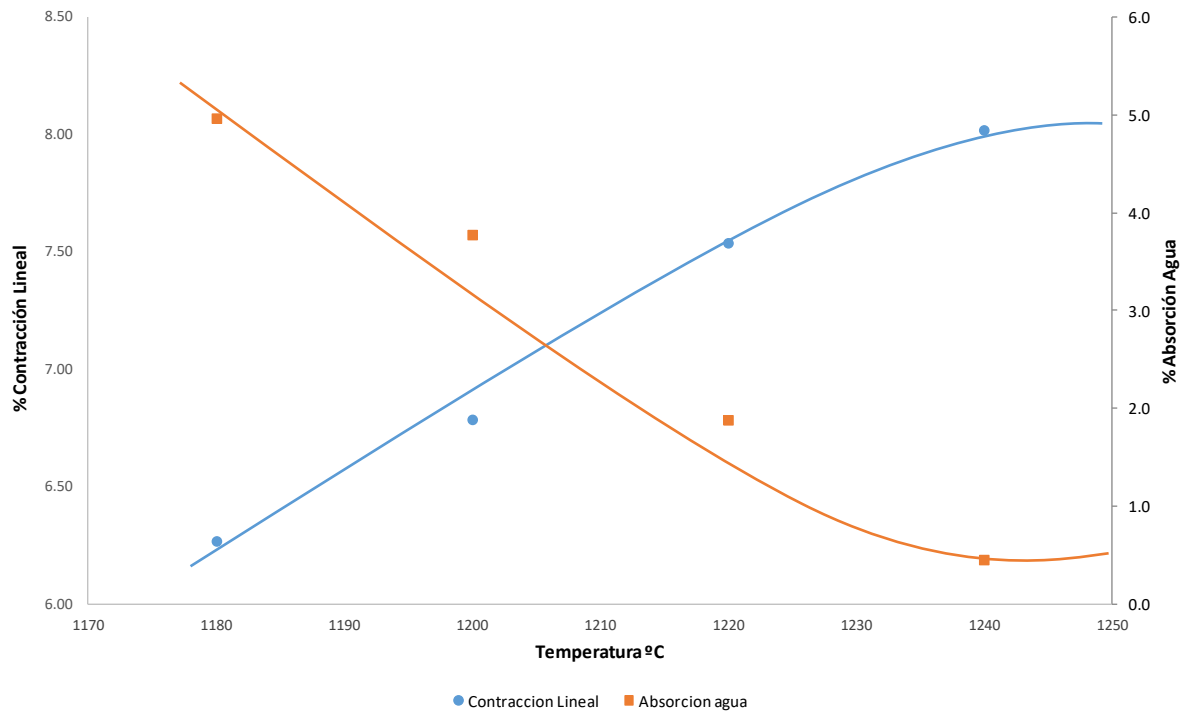
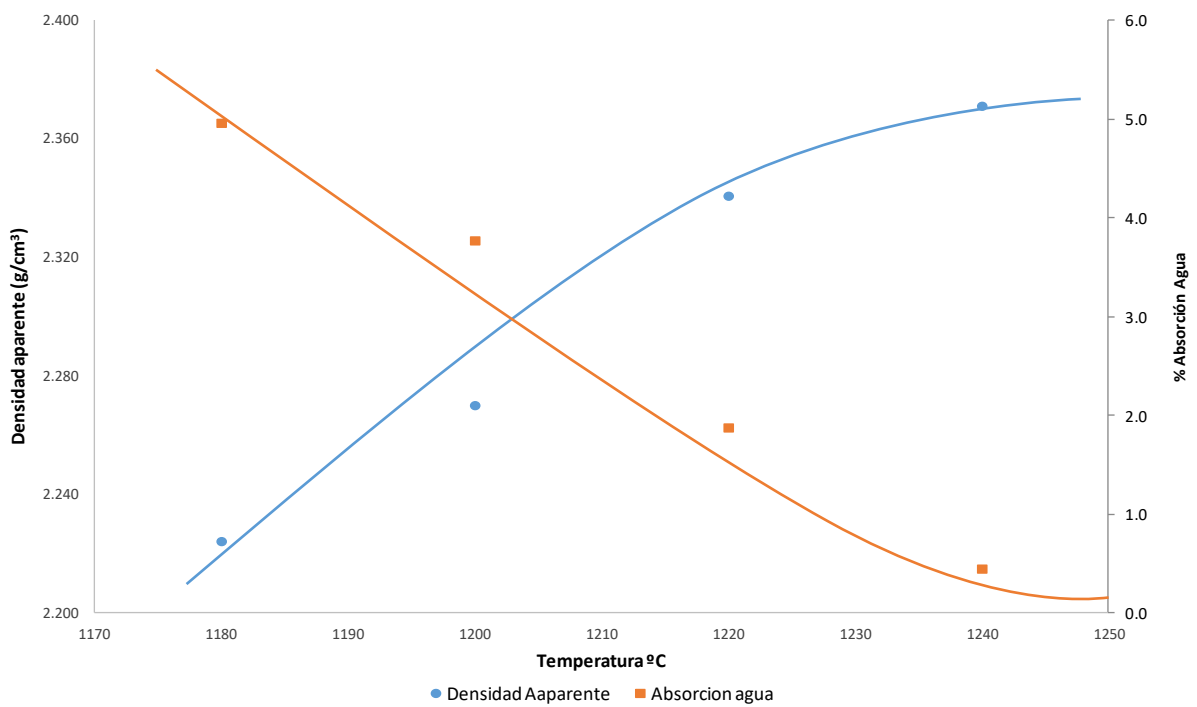


Figura 7.6 Densidad aparente muestra STD-K



D. Muestra VR10Na20

Tabla 7.7: Datos obtenidos de la muestra VR10Na20 ensayados

Ref.	Masa Húmeda (g)	Masa Seca (g)	Humedad (%)	Empuje (g)	Densidad aparente (g/cm ³)	Diámetro seco (cm)	Diámetro cocido (cm)	Contracción Lineal (%)	Masa cocida (g)	Pérdida calcinación (%)	Empuje cocido (g)	Densidad aparente (g/cm ³)	Masa agua (g)	Absorción agua (%)	Temperatura (°C)
1	12.77	12.06	5.89	86.2	1.893	4.045	3.756	7.14	11.60	3.81	67.6	2.322	11.90	2.59	1160
2	13.49	12.77	5.64	91.6	1.886	4.045	3.732	7.73	12.29	3.76	69.6	2.389	12.29	0.00	1180
3	13.44	12.73	5.58	91.1	1.891	4.045	3.740	7.53	12.24	3.85	69.6	2.379	12.24	0.00	1200
4	13.17	12.46	5.70	89.2	1.890	4.045	3.746	7.39	11.98	3.85	68.5	2.366	11.98	0.00	1200

Tabla 7.8: Datos promedio de la muestra VR10Na20

T ^a	Dap	CL	AA	PpC
1160	2.322	7.14	2.6	3.81
1180	2.389	7.73	0.0	3.76
1200	2.373	7.46	0.0	3.85

Figura 7.7: Curva de gresificación muestra VR10Na20

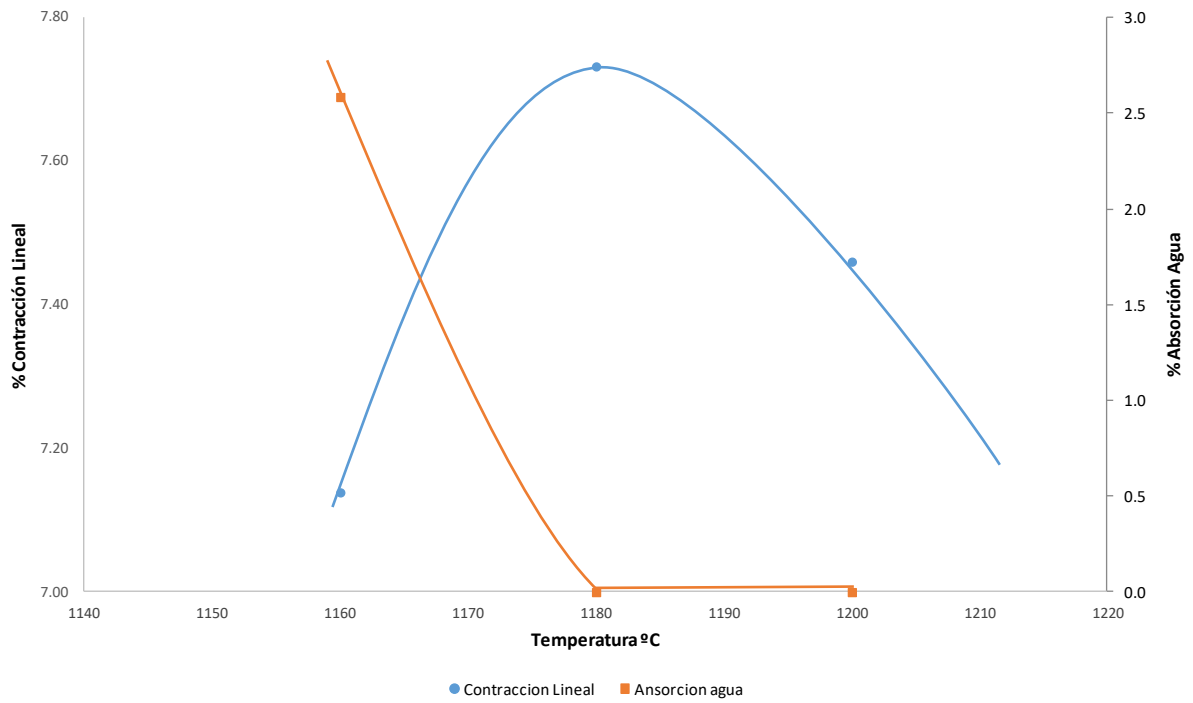
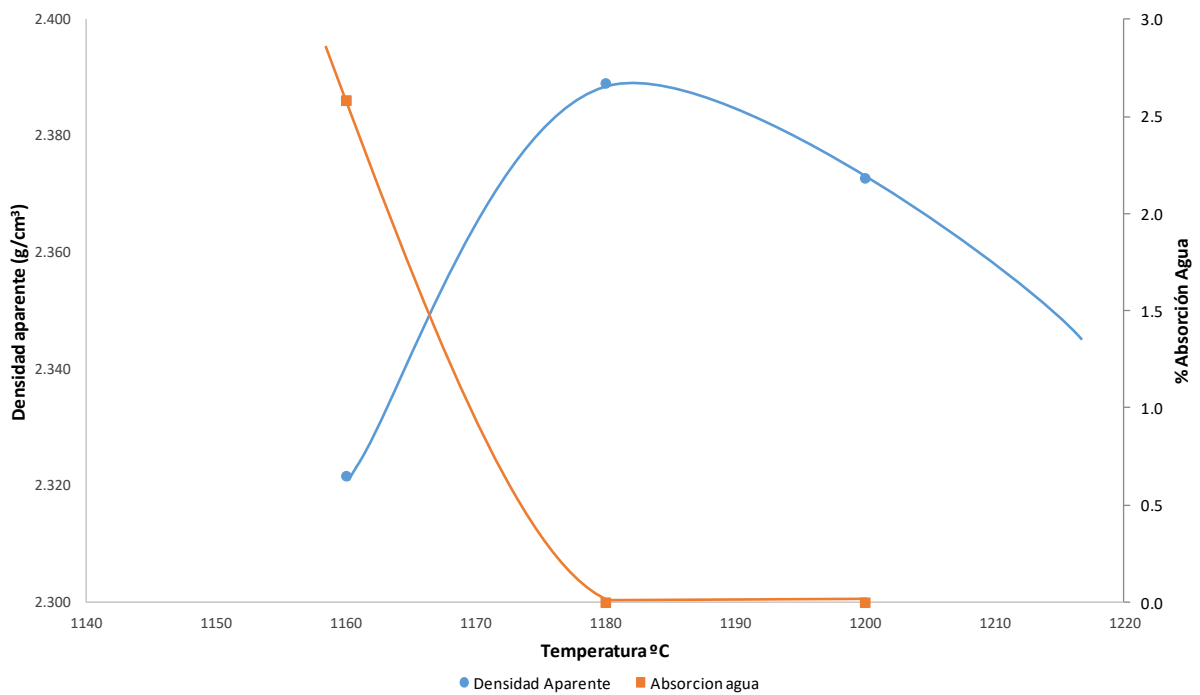


Figura 7.8: Densidad aparente muestra VR10Na20



E. Muestra VR10K20

Tabla 7.9: Datos obtenidos de la muestra VR10K20 ensayados

Ref.	Masa Húmeda (g)	Masa Seca (g)	Humedad (%)	Empuje (g)	Densidad aparente (g/cm ³)	Diámetro seco (cm)	Diámetro cocido (cm)	Contracción Lineal (%)	Masa cocida (g)	Pérdida calcinación (%)	Empuje cocido (g)	Densidad aparente (g/cm ³)	Masa agua (g)	Absorción agua (%)	Temperatura (°C)
1	11.96	11.34	5.47	81.9	1.873	4.044	3.742	7.49	10.9	3.88	63.2	2.333	11.15	2.3	1160
7	11.99	11.37	5.45	82.2	1.871	4.045	3.722	7.99	10.93	3.87	62.3	2.374	10.93	0.0	1180
3	12.43	11.79	5.43	85.1	1.874	4.046	3.736	7.64	11.34	3.82	65.1	2.357	11.34	0.0	1200
4	11.92	11.31	5.39	81.6	1.875	4.045	3.73	7.79	10.86	3.98	62	2.370	10.86	0.0	1200

Tabla 7.10: Datos promedio de la muestra VR10K20

T ^a	Dap	CL	AA	PpC
1160	2.333	7.49	2.3	3.88
1180	2.374	7.99	0.0	3.87
1200	2.363	7.71	0.0	3.90

Figura 7.9: Curva de gresificación muestra VR10K20

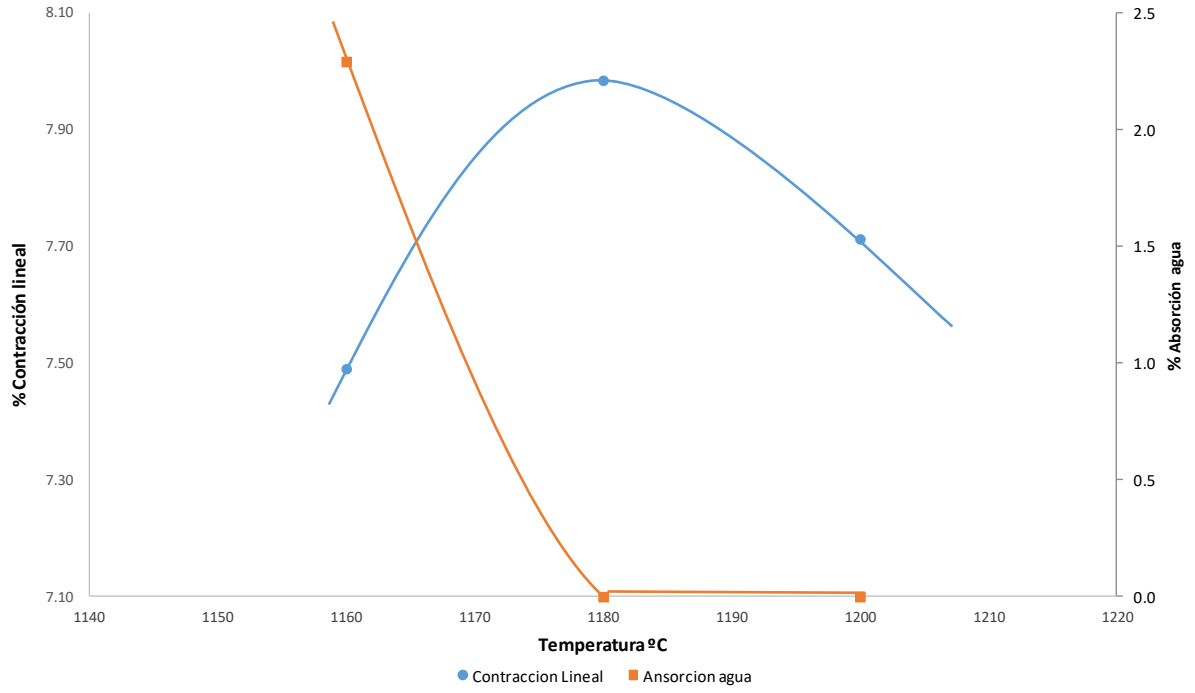


Figura 7.10: Densidad aparente muestra VR10K20

