

DISEÑO Y ELABORACIÓN DE UNIDADES CERÁMICAS MACIZAS A PARTIR DE LA  
CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA, QUÍMICA Y ESTRUCTURAL DEL CASCARÓN  
DESECHO DEL PROCESO DE MICROFUNDICIÓN EN FASAB SOGAMOSO

AUTORES

KAROL LIZETH ROA BOHÓRQUEZ  
RICARDO ALFONSO PAREDES ROA

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO  
ESCUELA DE INGENIERIA INDUSTRIAL  
SOGAMOSO

2017

DISEÑO Y ELABORACIÓN DE UNIDADES CERÁMICAS MACIZAS A PARTIR DE LA  
CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA, QUÍMICA Y ESTRUCTURAL DEL CASCARÓN  
DESECHO DEL PROCESO DE MICROFUNDICIÓN EN FASAB SOGAMOSO

AUTORES

KAROL LIZETH ROA BOHÓRQUEZ  
RICARDO ALFONSO PAREDES ROA

Trabajo de grado para optar al título de  
INGENIERO INDUSTRIAL

Modalidad: Monografía

Director

HUGO FELIPE SALAZAR SANABRIA  
Magister en Ingeniería Industrial

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO  
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
SOGAMOSO

2017

*En primer lugar queremos dedicar el presente proyecto a Dios, por darnos sabiduría para superar todas las dificultades, paciencia para entender que las metas toman tiempo y bastante esfuerzo y amor para seguir orientados por el mejor camino.*

*Seguidamente, damos gracias a nuestros padres por el apoyo y amor que nos brindaron en todo momento.*

*Por último, a todas aquellas personas que nos ofrecieron su mano para que cada día fuera un aprendizaje y un continuo crecimiento tanto intelectual como personal.*

## AGRADECIMIENTOS

Una vez finalizado el presente proyecto nos vemos en la obligación de agradecer magnánimamente a personas que con sus conocimientos marcaron y ayudaron a la construcción de cada una de las bases del gran resultado presentado.

Expresamos un agradecimiento especial al director el ingeniero Hugo Felipe Salazar Sanabria por creer que se es posible la innovación y desarrollo por medio de la investigación y ser una de las grandes ayudas.

Al doctor Luis Ángel Lara González por infundir esa chispa investigativa y avivarla cada día, por creer infinitamente en cada uno de los proyectos presentados por el semillero de investigación MEDICIS, y creer que cada día podemos ser mejores que el anterior, por ver lo mejor de cada persona que pasa a su alrededor y explotarlo para el bien de todo su entorno.

Al ingeniero Isnardo Antonio Grandas por impulsarnos a vivir en el mundo de las ideas y recalcar nos lo importante que es perseverar para conseguir los objetivos propuestos.

A nuestro gran amigo y maestro Carlos Vargas por su gran paciencia y sabiduría

A los grupos de investigación GEAM y OBSERVATORIO de los cuales nos sentimos enaltecidos de pertenecer y haber representado en los diferentes eventos internacionales y nacionales.

Al doctor Gabriel Peña Rodríguez por crear nuevos desafíos intelectuales y enseñarnos cuán importante es la disciplina.

Al instituto de recursos minero energéticos (IRME) e Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales (INCITEMA) por facilitarnos las herramientas técnicas y tecnológicas para llevar a cabo cada etapa del proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS .....	10
LISTA DE TABLAS .....	14
LISTA DE ANEXOS .....	15
INTRODUCCIÓN .....	16
ANTECEDENTES.....	18
EL PROBLEMA .....	19
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	19
FORMULACIÓN DE LA PREGUNTA PROBLEMA.....	20
JUSTIFICACIÓN .....	21
ALCANCES Y LIMITACIONES .....	23
OBJETIVOS .....	24
OBJETIVO GENERAL .....	24
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	24
1. FUNDAMENTACIÓN.....	25
1.1. DESCRIPCIÓN DE MATERIAS PRIMAS .....	25
1.1.1. ARCILLAS COMUNES .....	25
1.1.2. CASCARÓN DE MICROFUNDICIÓN.....	26
1.2. CLASIFICACIÓN DE UNIDADES DE MAMPOSTERÍA .....	26
1.2.1. UNIDAD DE MAMPOSTERÍA DE PERFORACIÓN VERTICAL (LADRILLOS Y BLOQUES) (PV) .....	26
1.2.2. UNIDAD DE MAMPOSTERÍA DE PERFORACIÓN HORIZONTAL (LADRILLOS Y BLOQUES) (PH) .....	26
1.2.3. UNIDADES MACIZAS (LADRILLOS) (M).....	26

1.3.	PROCESOS DE CONFORMACIÓN.....	27
1.3.1.	PRENSADO .....	27
1.3.2.	COLADO.....	27
1.3.3.	EXTRUSIÓN.....	27
1.4.	TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN .....	27
1.4.1.	DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX).....	27
1.4.2.	MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB) .....	28
1.4.3.	MICROSCOPIA ÓPTICA .....	28
1.4.4.	FLUORESCENCIA DE RAYOS X (FRX): .....	28
1.4.5.	CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC):.....	28
1.4.6.	TERMOGRAVIMETRÍA (TGA) .....	29
1.4.7.	ABSORCIÓN .....	29
1.4.8.	ENSAYO UNIVERSAL DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN. ....	29
2.	INDUSTRIA MILITAR FÁBRICA SANTA BÁRBARA: GENERALIDADES. 30	
2.1.	UBICACIÓN.....	30
2.2.	OBJETIVO DE FASAB.....	30
2.3.	LÍNEAS DE PRODUCCIÓN .....	31
2.4.	PROCESO DE MICROFUNDICIÓN .....	31
3.	DISEÑO METODOLÓGICO PARA LA CARATERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS Y ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES .....	33
3.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN .....	33
3.2.	FASES PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS .....	33
3.3.	DESCRIPCIÓN DE LA POBLACIÓN DE ESTUDIO.....	36
3.4.	DEFINICIÓN DE HIPÓTESIS, VARIABLES E INDICADORES.....	37
3.4.1.	HIPÓTESIS .....	37

3.4.2.	VARIABLES DE ESTUDIO .....	38
3.4.3.	INDICADORES .....	38
4.	ESTRUCTURA DE LOS MODELOS DE INFLUENCIAS PARA LAS PROPIEDADES DE ESTUDIO DE LAS UNIDADES CERÁMICAS MACIZAS .....	39
4.1.	DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS LINEALES MULTIVARIADOS .....	39
4.2.	ARREGLO DE LOS MODELOS LINEALES MULTIVARIADOS .....	40
4.3.	SOLUCIÓN DE LOS MODELOS LINEALES MULTIVARIADOS USANDO LA HERRAMIENTA ESTADÍSTICA SPSS .....	42
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	44
5.1.	CARACTERIZACIÓN DE POLVOS DE ARCILLA .....	44
5.1.1.	POSIBLES COMPONENTES .....	44
5.1.2.	RESULTADOS FLUORESCENCIA DE RAYOS X.....	45
5.2.	CARACTERIZACIÓN DE LAS ARENAS UTILIZADAS PARA ELABORAR EL CASCARÓN DE MICROFUNDICIÓN .....	47
5.2.1.	ARENA MALLA 20 .....	47
5.2.2.	ARENA MALLA 30 .....	51
5.2.3.	ARENA MALLA 70 .....	54
5.2.4.	ARENA MALLA 200 .....	57
5.3.	CARACTERIZACIÓN DEL CASCARÓN DE MICROFUNDICIÓN DESECHO.....	66
5.4.	CARACTERIZACIÓN UNIDADES CERÁMICAS MACIZAS FINALES.....	73
5.4.1.	MICROSOCPÍA ÓPTICA .....	73
5.4.2.	MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.....	78
5.4.3.	RESISTENCIA MECÁNICA A LA COMPRESIÓN .....	83
5.4.4.	ABSORCIÓN .....	86
5.4.5.	DENSIDAD APARENTE.....	90



6. SIMULACIÓN DE LAS UNIDADES CERÁMICAS MACIZAS EN SOLIDWORKS .....	92
6.1. BOCETO DE LA UNIDAD CERÁMICA MACIZA.....	92
6.2. CONFIGURACIÓN DEL NUEVO MATERIAL CONFORME LAS PROPIEDADES FÍSICAS ENCONTRADAS .....	93
6.3. ANÁLISIS DE TENSIONES.....	96
7. CONCLUSIONES .....	98
BIBLIOGRAFÍA .....	100
ANEXOS .....	105

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. La Fábrica Metalúrgica “Santa Bárbara” está ubicada en la Calle 54 No. 10D-10 Sogamoso (Boyacá). .....	30
Figura 2. Diagrama de recolección, preparación y caracterización de materias primas. ....	35
Figura 3. Diagrama definición de variables y proceso de preparación de especímenes. ....	35
Figura 4 Diagrama de los ensayos a realizar para caracterizar las unidades cerámicas.....	36
Figura 5. Curva de cocción diseñada para la sinterización de los especímenes a base de arcilla y cascarón de microfundición. ....	37
Figura 6. Modelo general de un proceso o sistema.....	39
Figura 7. Fluorescencia de Rayos X de arcilla.....	46
Figura 8. Microscopía Electrónica de Barrido de muestra de arena malla 20 a 23X.....	48
Figura 9. Microscopía óptica de arena malla 20 a 20X.....	49
Figura 10. Microscopía óptica arena malla 20 a 40X.. ..	49
Figura 11 MEB grano arena malla 20 a 87X .....	49
Figura 12. MEB grano arena malla 20 a 296X.. ..	50
Figura 13. Difracción de rayos X arena malla 20. ....	51
Figura 14. MEB arena malla 30 a 30X.. ..	52
Figura 15. Microscopía óptica de arena malla 30 a 20X.....	52
Figura 16. Microscopía óptica de arena malla 30 a 40X.....	52
Figura 17. MEB de grano arena malla 30 a 114X. ....	53
Figura 18. MEB de grano arena malla 30 a 229X. ....	53
Figura 19. Difracción de rayos X de arena malla 30.....	54
Figura 20. MEB de arena malla 70 a 46X.....	55
Figura 21. Microscopía óptica de arena 70 a 20X.. ..	55

Figura 22. Microscopía óptica de arena 70 a 40X..	55
Figura 23. MEB grano de arena malla 30 a 229X.	56
Figura 24. MEB grano de arena malla 70 a 639X..	56
Figura 25. Difracción de rayos x de arena malla 70..	57
Figura 26. MEB arena malla 200 a 176X..	58
Figura 27. MEB de grano arena malla 200 a 1170X.	58
Figura 28. MEB de grano arena malla 200 a 928X.	58
Figura 29. Microscopía óptica de arena malla 200 a 20X.....	59
Figura 30. Microscopía óptica arena 200-40X.....	59
Figura 31. . Difracción de rayos X de arena malla 200.....	59
Figura 32. MEB del cascarón en verde a 56X. ....	60
Figura 33. Microscopía óptica cascarón en verde.....	61
Figura 34. Difracción de rayos X del cascarón en verde. ....	61
Figura 35. MEB del cascarón con precalentamiento a 122X.....	62
Figura 36. Difracción de rayos X del cascarón con precalentamiento.....	63
Figura 37. TGA del cascarón precalentado.....	64
Figura 38. DSC de cascarón precalentado .....	65
Figura 39. MEB de cascarón desecho a 116X. ....	66
Figura 40. MEB de cascarón desecho a 44X.. ....	67
Figura 41. . MEB de cascarón desecho a 280X. ....	68
Figura 42 Difracción de rayos X del cascarón desecho. ....	69
Figura 43. Ampliación del pico con mayor intensidad del difractograma de rayos X (DRX) de desecho de cascarón cerámico. ....	70
Figura 44. Estructura de la fase cuarzo alfa modelada en el software CrystalMaker. ....	71
Figura 45. MEB de cascarón desecho a 411X.. ....	72

Figura 46 Microscopia óptica de matriz cerámica composición de arcilla 60% y cascaron de microfundición 40% con granulometría malla 20.....	73
Figura 47. Microscopia óptica superficie cerámica a 10X.....	74
Figura 48. Microscopia óptica con filtro polarizado, A: Granulometría malla 30, composición 60% Arcilla - 40% Cascarón. B: 70% Arcilla - 30% Cascarón.....	75
Figura 49. Microscopia óptica superficie cerámica malla 30 y composición 70% Arcilla - 30% Cascarón.....	75
Figura 50. Microscopia óptica superficie cerámica malla 70 y composición 80% Arcilla - 20% Cascarón.....	76
Figura 51. Microscopia óptica superficie cerámica malla 30 y composición por 80% Arcilla - 20% Cascarón.....	77
Figura 52. MEB superficie matriz cerámica malla 30 y composición 70% Arcilla - 30% Cascarón..	78
Figura 53. MEB superficie a 56X de matriz cerámica malla 20 y composición 60% Arcilla - 40% Cascarón.....	79
Figura 54. MEB superficie cerámica reforzada con cascaron de microfundición 100X. ....	80
Figura 55. MEB superficie cerámica reforzada con cascarón de microfundición a 58X.....	81
Figura 56. MEB superficie cerámica reforzada con cascarón de microfundición a 2000X.....	82
Figura 57. Montaje ensayo universal de resistencia mecánica a la compresión de cilindro con matriz de arcilla y refuerzo de cascarón de microfundición.....	84
Figura 58. Gráfico de tendencia de la propiedad resistencia mecánica a la compresión de unidades cerámicas.....	84
Figura 59. Gráfica de comportamiento de resistencia mecánica a la compresión frente a malla y temperatura.....	85
Figura 60. Gráfico de tendencia de la propiedad absorción de las unidades cerámicas. ....	87
Figura 61. Gráfica de comportamiento de absorción frente a mezcla y malla.....	88

Figura 62. Gráfico de tendencia de la propiedad contracción de las unidades cerámicas. ....	89
Figura 63. Grafica de comportamiento de contracción frente a malla y temperatura.....	90
Figura 64. Gráfico de tendencia de la propiedad densidad aparente de las unidades cerámicas. ..	91
Figura 65. Grafica de comportamiento de densidad aparente frente a malla y mezcla.....	91
Figura 66. Vista frontal (a), vista superior (b), vista lateral (c) y vista isométrica (d) de la unidad cerámica maciza simulada en Solidworks.....	92
Figura 67. Ventana del programa Solidworks donde se registran las propiedades del nuevo material.....	93
Figura 68. Sujeción de geometría fija en la cara inferior de la unidad cerámica maciza.....	94
Figura 69. Vectores de fuerza sobre la cara superior de la unidad cerámica maciza.....	95
Figura 70. Unidad cerámica maciza con malla gruesa. ....	95
Figura 71. Análisis de tensiones de la unidad cerámica maciza. ....	96
Figura 72. Aproximación esquina tensionada de la unidad cerámica maciza.....	97
Figura 73. Base de datos con todas las interacciones de los factores influyentes en las propiedades físicas de las unidades cerámicas maciza.....	106
Figura 74. Pruebas de los efectos inter – sujetos. Variable dependiente: Resistencia mecánica..	107
Figura 75. Pruebas de los efectos inter – sujetos. Variable dependiente: Absorción.....	107
Figura 76. Pruebas de los efectos inter – sujetos. Variable dependiente: Contracción.....	108
Figura 77. Pruebas de los efectos inter – sujetos. Variable dependiente: Densidad Aparente.....	108

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Arreglo del diseño factorial con las interacciones entre los factores T, M y C. ....	41
Tabla 2. Modelos lineales multivariados de predicción de las propiedades de las unidades cerámicas macizas.....	43
Tabla 3 Concentración en porcentaje de cada componente hallado por FRX. . ....	46
<b>Tabla 4.</b> Composición de matriz cerámica malla 20 y mezcla 60% Arcilla - 40% Cascarón. Conteo de puntos. ....	74
<b>Tabla 5.</b> Composición de matriz cerámica malla 30 y mezcla 70% Arcilla - 30% Cascarón.....	76
<b>Tabla 6.</b> Composición de matriz cerámica malla 70 y mezcla 80% Arcilla - 20% Cascarón.....	77
<b>Tabla 7.</b> Composición de matriz cerámica malla 30 y mezcla 80% Arcilla - 20% Cascarón.....	78
<b>Tabla 8.</b> Propiedades físicas de las unidades de mampostería estructural. ....	83
<b>Tabla 9.</b> Propiedades físicas de las unidades de mampostería no estructural. ....	83
<b>Tabla 10.</b> Propiedades físicas de las unidades de mampostería estructural. ....	86
<b>Tabla 11.</b> Propiedades físicas de las unidades de mampostería no estructural. ....	86

## **LISTA DE ANEXOS**

**ANEXO 1. ARREGLO DE INTERACCIONES EN HOJA DE DATOS DE SPSS.....105**

**ANEXO 2. ANÁLISIS CON LOS EFECTOS PRODUCIDOS POR LAS INTERACCIONES ENTRE LOS FACTORES T, C Y M.....106**

## INTRODUCCIÓN

La producción de cerámica en la región Cundiboyacense data desde el año 1300 a.c (Prieto, 2010) con la elaboración, por parte de los muiscas, de ollas de barro y otros utensilios para la vida diaria. Sin embargo, con la llegada de los españoles la alfarería evolucionó notablemente, se fabricaron hornos para la cocción de arcilla y de esta forma, producir ladrillos que se utilizaban en la construcción de viviendas (Prieto, 2010).

Con el transcurso del tiempo, los diversos procesos de fabricación de ladrillos en la región boyacense han adquirido gran importancia, no sólo por su antigüedad e historia, también por la abundancia de minas de arcilla que se encuentran en la región. De acuerdo con el Sistema de Información Minero Colombiano (SIMCO) y el Informe de Geografía Cultural de Boyacá, el departamento es uno de los más ricos en minerales arcillosos ("SUELOS", 2017). Es así como la alfarería se ha convertido en una de las fuentes de sustento del departamento, lo que ha impulsado a las empresas tanto a nivel regional como nacional, a implementar avances tecnológicos que permitan la elaboración de productos cerámicos de excelente calidad superficial, de diversas configuraciones (bloque, ladrillo macizo, tableta, teja, baldosa, etc.) en menores tiempos y mejorar el uso de los recursos naturales. Cabe resaltar, que aunque la parte tecnológica se ha perfeccionado satisfactoriamente, la técnica por otro lado, permanece intacta con el pasar de los años. Tanto así, que en la actualidad la elaboración de piezas cerámicas se fundamenta en una combinación de arcillas rojas, en la mayoría de los casos ilitas y montmorillonitas, y desgrasantes o arenas silíceas, las cuales cumplen la función de disminuir la plasticidad de la matriz arcillosa y su contracción (Amado, 2011).



Con base en lo anterior, se puede concluir que existe una ausencia de avances en la mezcla para fabricar unidades cerámicas, lo cual ha impedido dar un valor agregado a la cadena productiva e incrementar la competitividad tanto a nivel departamental, como nacional e internacional. No obstante, en el presente proyecto se busca proponer una forma viable que sin lugar a dudas dará un toque innovador en el producto final, esta consiste en reemplazar una de las materias primas que se utilizan en la mezcla, por desechos industriales, los cuales después de respectivos análisis normalizados, se evidencie que dichos residuos cumplen en gran medida las mismas funciones que la materia prima original. Es el caso del cascarón cerámico, material desecho del proceso de microfundición en la Industria Militar Fábrica Santa Bárbara (INDUMIL) compuesto por cuatro tipos arenas de varios tamaños y un aglomerante. Dichas cáscaras cerámicas, actualmente no tienen un uso particular una vez han cumplido su objetivo en el proceso de microfundición, el cual es generar alta calidad superficial en micro piezas de acero que han sido coladas y permitir una apropiada evaporación de gases durante el proceso.

Por consiguiente en el presente proyecto se busca diseñar unidades cerámicas macizas a partir de la caracterización morfológica, química y estructural del desecho de cáscaras cerámicas, con el fin de reutilizarlo como desgrasante en la matriz de arcilla y de este modo, generar un avance en la técnica de fabricación de piezas cerámicas, logrando un producto que genere un impacto ambiental positivo que cumpla con los estándares para los cuales fue diseñado y a su vez, sea innovador.

## ANTECEDENTES

La investigación evalúa la viabilidad de conformación de ladrillos reforzados con residuos cerámicos. A continuación, se presentan algunas investigaciones de reutilizaciones de algunos desechos en la fabricación de unidades de mampostería.

La investigación de José Miguel Pimentel en 2014, realiza refuerzos de ladrillos con residuos de oro y plata utilizados en recubrimientos para motores y otros especímenes reforzados con cenizas volcánicas, todo esto para mejorar la refractariedad de las unidades. (Trinidad, J. L. S., & Medina, J. M. P 2014).

La investigación de Matthey en el año 2014, consiste en un estudio de la influencia del mezclado en dos etapas en la fabricación de ladrillos de mampostería tipo cementante, reforzados con ceniza de cascarilla de arroz como agregado fino que actúa como filler y puzolana. Este estudio arrojó que la cantidad óptima para agregar de ceniza es del 20%.

El estudio realizado por Granda Mesias, I. S., & Plaza Tapia, G. A. en el año 2012, utiliza los lodos residuales de una planta de Anodizado de Aluminio para la fabricación de ladrillos y adoquines también reforzados con caolín y diatomita.

La presente investigación menciona la utilización del cascarón de microfundición como desgrasante para la elaboración de unidades cerámicas, para ello se analiza el cascarón iniciando desde sus porosidades hasta sus composiciones. Londoño c. et al., 2014 estudió la posibilidad de controlar la porosidad de un revestimiento refractario utilizado en el proceso de microfundición

con la adición de tres agentes formadores de poros: Lauril sulfato de sodio, Polietilenglicol (PEG) y almidón de yuca.

Grandas et al., 2016 Realizaron una caracterización morfológica química y estructural del cascarón de microfundición y con los resultados postularon los posibles usos de este desecho como lo son: reutilización en el proceso de microfundición tratándolo y realizando un proceso de recuperación, el segundo uso consiste en fabricar elementos electrónicos, y el tercero y el cual nos lleva al presente estudio, consiste en elaborar unidades cerámicas a base de este desecho.

## **EL PROBLEMA**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La optimización de recursos de toda índole en el planeta es una necesidad plausible en todos los ámbitos del ser humano, ahora recuperar los recursos que se creían perdidos es aún más importante. Para lograr eso, cada proceso debe conocer sus materiales y estudiarlos de una manera responsable con el objetivo de buscar que se conviertan en materias reutilizables y alarguen su vida útil considerablemente para cuidar notablemente el planeta.

La mayoría de procesos alfareros carecen de técnica, no conocen la influencia de cada uno de los procesos que realizan sobre la materia prima y por esta razón, es importante ayudar a optimizar estos procesos desde la caracterización hasta la modelación de sistemas de influencias, todo esto para generar sistemas de control con los que puedan mejorar cada uno de los recursos empleados.

El departamento de Boyacá y Sogamoso se ha caracterizado por tener yacimientos arcillosos, que son utilizados para la fabricación de artesanías y a nivel industrial en la elaboración de materiales para el sector de la construcción, utilizando métodos tradicionales de fabricación de los productos. De acuerdo con la agenda interna departamental este sector minero y energético ocupaba en 1990 el tercer lugar en la estructura sectorial del PIB de Boyacá, sin embargo, en el año 2008 se posicionaba en último lugar. Por tal razón, es necesario brindar un nuevo impulso a esta actividad, lo que requiere la creación de estrategias basadas en investigación, para atraer inversión y de esta forma emprender proyectos con un alto componente tecnológico.

#### **FORMULACIÓN DE LA PREGUNTA PROBLEMA**

¿De qué manera contribuiría el diseño, elaboración y caracterización de unidades cerámicas macizas a base de arcilla de la región de Sogamoso y cascarón de microfundición de la empresa Industria Militar Fabrica Santa Bárbara INDUMIL FASAB?

## JUSTIFICACIÓN

La apuesta del gobierno Nacional para el 2018, plantea posicionar el conocimiento, la producción científica y tecnológica, y la innovación como el eje central de la competitividad plan de desarrollo 2016-2019 Ruiz, C. F. (2016). El fortalecimiento de las relaciones entre la universidad y la empresa demostrando la idoneidad de sus profesionales para llevar a la empresa a la nueva era de la innovación. La industria militar ha generado un desecho producto del proceso de microfundición por muchos años teniendo que gastar fondos para el manejo y disposición de estos recursos y subutilizando este recurso.

Esta investigación tiene como objetivo reutilizar un residuo subutilizado por la empresa indumil fabrica santa bárbara (FASAB) Sogamoso, Boyacá Colombia también evaluar un método para medir las implicaciones de algunos de los parámetros más importantes que intervienen en la fabricación de unidades cerámicas como lo son la absorción ,la densidad aparente la contracción la resistencia mecánica con respecto a algunos parámetros como lo son la granulometría de utilización la el porcentaje de utilización de desecho la temperatura de sinterización. Esto contribuirá a que no solo la empresa si no que también los alfareros de la región vean como contribuye cada uno de estos parámetros en la fabricación y puedan tener un mejor control de estos asegurando la calidad de los productos.

También demostrara la importancia de innovar en la parte técnica de la alfarería la cual se ha centrado en mejorar la tecnología dejando de un lado la innovación de producto impactando el medio ambiente y el diseño del mismo agregándole nuevas características y un mejor

aprovechamiento de sus materias primas y conocimiento sobre ellas las cuales no están debidamente caracterizadas en muchas de las empresas de la región. Este proyecto es pertinente por la innovación y cambio de mentalidad de reutilización y optimización de los recursos naturales y demostración de la empresa de un posible producto para la población civil y con una visión más llevada a la reconstrucción del país.

## ALCANCES Y LIMITACIONES

**Alcances:** Se caracterizará el cascaron de microfundición y las arcillas para diseñar un material compuesto para la fabricación de unidades de mampostería que cumpla las normas vigentes en la NTC 4205 ayudando a reutilizar eficazmente este recurso, además relacionar cada una de las variables como lo son: la resistencia mecánica, absorción, densidad, entre otras, con parámetros controlables como: temperatura, mezcla y malla, y de esta forma tener parámetros de fabricación que aseguren la calidad de los productos.

**Limitaciones:** Para este proyecto solo se evaluará el proceso de fabricación por medio de prensado uniaxial ladrillos con temperaturas de trabajo desde 850 a 1050 grados Celsius. La granulometría de grano oscila entre malla 20 a 70 ASTM. La zona de estudio está delimitada por una empresa alfarera y por la Industria Militar Fabrica Santa Bárbara Sogamoso INDUMIL FASAB.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar unidades cerámicas macizas a partir de la caracterización morfológica, química y estructural del cascarón desecho del proceso de microfundición en FASAB Sogamoso.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Describir los fundamentos de las unidades cerámicas macizas.
- Diseñar una metodología para la caracterización de materias primas y elaboración de especímenes cerámicos.
- Caracterizar las materias primas a utilizar para la elaboración de unidades cerámicas macizas.
- Elaborar unidades cerámicas macizas con matriz de arcilla y refuerzo de cascarón cerámico desecho del proceso de microfundición.
- Estructurar y solucionar modelos lineales multivariados de influencias para las propiedades de estudio de las unidades cerámicas macizas.
- Simular las unidades cerámicas macizas por medio del software SolidWorks.
- Analizar los resultados obtenidos.



# 1. FUNDAMENTACIÓN

## 1.1. DESCRIPCIÓN DE MATERIAS PRIMAS

### 1.1.1. ARCILLAS COMUNES

Por “arcilla común” o “common clay” (“miscellaneous clay”) se sobreentiende a toda materia prima arcillosa de amplia distribución de afloramiento, que, por sus propiedades físicas y sus no muy exigentes especificaciones químico mineralógicas, se utiliza, principalmente, en el sector cerámico de la construcción y en alfarería. Su constitución mineralógica es muy variada y posee minerales arcillosos fundamentalmente del grupo de las micas (illitas, moscovitas, etc.) y en menores proporciones los de los grupos del caolín, cloritas, esmécticas y hornitas. La presencia de desgrasantes, como el cuarzo, los carbonatos, etc., y sus diferentes tamaños de grano hace que sus propiedades cerámicas sean muy variadas, tendiendo hacia plasticidades bajas y puntos de vitrificación inferiores a los 1100°C.

Los principales usos a los que se destinan estas arcillas son para la industria de la construcción, como ladrillos huecos o cara vista, tejas, y azulejos para pavimentos y revestimientos. También se emplean en el sector de la alfarería, en las industrias del cemento y como agregados ligeros. El color del producto acabado lleva una componente roja característica, originada por los altos contenidos en óxidos de hierro que suelen estar por encima del 2-2,5%.(Rodríguez & Torrecillas, 2002).

### *1.1.2. CASCARÓN DE MICROFUNDICIÓN*

El cascarón de microfundición es el residuo cerámico del proceso de microfundición conformado por diferentes arenas especiales y aglomerante después de un sinterizado y desmoldado.

## **1.2. CLASIFICACIÓN DE UNIDADES DE MAMPOSTERÍA**

Se distinguen tres tipos básicos de unidades de mampostería de arcilla cocida, según la disposición de sus perforaciones y del volumen que éstas ocupen: perforación vertical (ladrillos y bloques) (PV); perforación horizontal (ladrillos y bloques) (PH) y macizos (M).

La aplicación de cada tipo de unidad de mampostería dentro de la edificación debe estar acorde con los cálculos y requisitos que para ello establezca la norma NSR-98, con el fin de que se garantice la estabilidad de la estructura (NORMA, N. (2000). 4205.)

### *1.2.1. UNIDAD DE MAMPOSTERÍA DE PERFORACIÓN VERTICAL (LADRILLOS Y BLOQUES) (PV)*

Unidad cuyas celdas o perforaciones son perpendiculares a la cara o superficie en que se asientan en el muro.

### *1.2.2. UNIDAD DE MAMPOSTERÍA DE PERFORACIÓN HORIZONTAL (LADRILLOS Y BLOQUES) (PH)*

Unidad cuyas celdas o perforaciones son paralelas a la cara o superficie en que se asientan en el muro.

### *1.2.3. UNIDADES MACIZAS (LADRILLOS) (M)*

Mampuestos aligerados con pequeñas perforaciones que ocupan menos del 25 % de su volumen o, también, que no contienen ninguna perforación. (NORMA, N. (2000). 4205.)

### **1.3. PROCESOS DE CONFORMACIÓN**

#### *1.3.1. PRENSADO*

El prensado es la compactación y conformado simultáneos de un polvo cerámico o material granular (premezclado con los ligantes y lubricantes adecuados y pre consolidado de tal modo que tenga una fluidez elevada) y se lleva a cabo confinando el material en un molde rígido o flexible y aplicando una presión elevada para lograr la compactación. (Jaramillo, 2013.)

#### *1.3.2. COLADO*

El moldeo por colado es una técnica de modelado que consiste en verter dentro de un molde poroso, una barbotina líquida. En este molde, (normalmente de escayola y que puede estar formados por varias piezas), se realiza un fenómeno de intercambio electrolítico (osmosis) como consecuencia el agua y materiales solubles pasan a la escayola, dejando una capa de arcilla en estado sólido. (Avgustinik, 1983)

#### *1.3.3. EXTRUSIÓN*

La extrusión es un proceso utilizado para crear objetos con sección transversal definida y fija. El material se empuja a través de un troquel de una sección transversal deseada. las piezas finales se forman con una terminación superficial de alta calidad. (Oberg et al., 2000)

### **1.4. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN**

#### *1.4.1. DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)*

La técnica de rayos X puede ser utilizada para identificar las fases presentes en la muestra, desde materia prima de partida hasta un producto final. Esta técnica ha sido utilizada durante muchas décadas con gran éxito para proporcionar información precisa sobre la estructura de los materiales.

La calidad del patrón de difracción suele ser limitado por la naturaleza y la energía de la radiación disponible, por la resolución del instrumento y por las condiciones físicas y químicas de la muestra.

#### *1.4.2. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)*

Es una técnica de análisis superficial, que consiste en enfocar sobre una muestra electro densa (opaca a los electrones) un fino haz de electrones acelerado con energías de excitación desde 0.1kV hasta 30kV. El haz de electrones se desplaza sobre la superficie de la muestra realizando un barrido que obedece a una trayectoria de líneas paralelas. La variación morfológica de la muestra entrega diversas señales (electrones secundarios, electrones retrodispersados, emisión de rayos X, etc.) que son recogidas por distintos detectores; los cuales permiten la observación, caracterización y microanálisis superficial de materiales tanto orgánicos como inorgánicos.

#### *1.4.3. MICROSCOPIA ÓPTICA*

Un microscopio óptico es un microscopio basado en lentes ópticos. También se le conoce como microscopio de luz, o microscopio de campo claro.

#### *1.4.4. FLUORESCENCIA DE RAYOS X (FRX):*

Consiste en emisión de rayos X secundarios (o fluorescentes) característicos de un material que ha sido excitado al ser «bombardeado» con rayos X de alta energía o rayos gamma.

#### *1.4.5. CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC):*

Es una técnica termo analítica en la que la diferencia de calor entre una muestra y una referencia es medida como una función de la temperatura. La muestra y la referencia son mantenidas aproximadamente a la misma temperatura a través de un experimento.

#### *1.4.6. TERMOGRAVIMETRÍA (TGA)*

Es un método de análisis en el que se lleva a cabo el registro continuo de los cambios en la masa de una muestra, en una atmósfera controlada y en función de la temperatura o el tiempo.

#### *1.4.7. ABSORCIÓN*

Fenómeno por el cual un sólido o un líquido atrae y retiene en su superficie gases, vapores, líquidos o cuerpos disueltos.

#### *1.4.8. ENSAYO UNIVERSAL DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.*

Es la resultante de las tensiones o presiones que existe dentro de un sólido deformable o medio continuo, caracterizada porque tiende a una reducción de volumen del cuerpo, y a un acortamiento del cuerpo en determinada dirección.

## 2. INDUSTRIA MILITAR FÁBRICA SANTA BÁRBARA: GENERALIDADES

### 2.1. UBICACIÓN

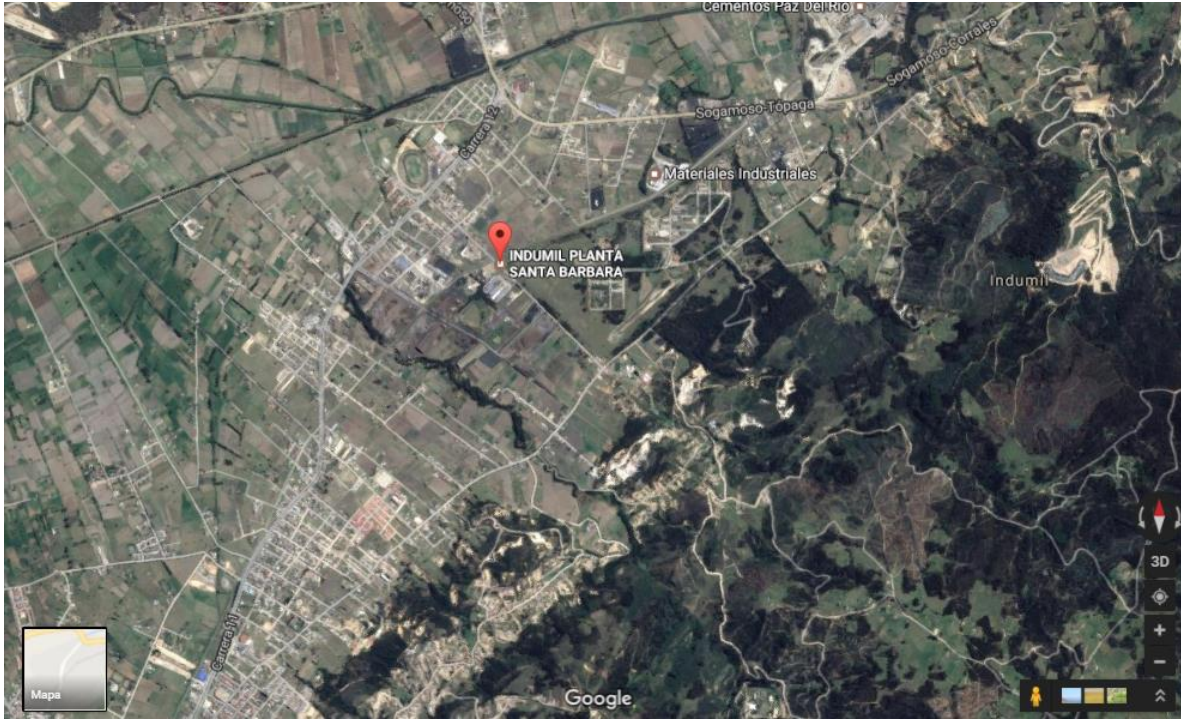


Figura 1. La Fábrica Metalúrgica “Santa Bárbara” está ubicada en la Calle 54 No. 10D-10 Sogamoso (Boyacá).

### 2.2. OBJETIVO DE LA INDUSTRIA MILITAR FASAB

La Fábrica Metalúrgica y Metalmecánica, tiene como objetivo principal el suministro de municiones para artillería con destino a las Fuerzas Militares, dedica su capacidad instalada en gran parte a la fabricación de productos metalmecánicos tanto en fundición convencional como en micro fundición, para diferentes empresas dentro del ámbito nacional e internacional, contando para esto con una infraestructura que le permite elaborar piezas fundidas, mecanizadas y micro fundidas en diferentes tipos de materiales metálicos. Esta planta desarrolla sus actividades específicas, tanto administrativas, como operativas, siempre bajo el concepto de calidad.

### 2.3. LÍNEAS DE PRODUCCIÓN

Dentro de las diferentes líneas de producción y servicios originadas en esta factoría, mencionamos algunas de las siguientes:

- Producción productos militares (MGL), Munición para artillería. -Servicios de laboratorio.
- Mantenimiento armamento mediano y mayor como Cañones de 90 mm.
- Bombas aéreas IM de 125 Lb – Propósito General.
- Bombas IMC XUE de 125, 250 y 500 Lb – Pre fragmentadas.
- Fundición en: Aceros aleados, Inoxidables, al Manganeso, Refractarios, al Carbono.
- Hierros Nodulares, Aleados, Alto Cromo, Grises y No Ferrosos.
- **Microfundición en: Aceros al Carbono, Inoxidables, Hierro Gris y No Ferrosos.**

Servicios de: Mecanizado, Tratamientos Térmicos y Superficiales, pintura electroestática, servicios de laboratorio.

### 2.4. PROCESO DE MICROFUNDICIÓN

La microfundición o fundición a la cera perdida es un proceso de producción de piezas de acero y aleaciones que permite obtener partes con diseño intrincado y que requieran muy poco o ningún maquinado. Este proceso, conocido también como fundición de precisión y entrega de piezas cercanas a lo neto, tiene aplicación en la fabricación de piezas de poco peso y formas geométricas complejas.

La microfundición permite el empleo de cerca de 200 materiales. Esto, combinado con el adecuado tratamiento térmico, brinda una excelente condición de poder y resistencia a las piezas. En los países industrializados esta técnica se utiliza para fabricar más de 35.000 piezas para diferentes sectores industriales.

La microfundición ofrece dos ventajas esenciales: libertad de diseño y economía en la fabricación. Se pueden obtener piezas desde 5 x 5 x 5 milímetros hasta 250 x 250 x 250 milímetros, con masas que oscilen entre uno y tres mil gramos. El proceso parte de un modelo en bismuto del cual se realizan en cera la cantidad de piezas que se quiera producir. Estas se agrupan en un racimo que, mediante inmersión, se recubre en material cerámico.

Luego, en un horno se derrite la cera para dejar libre el molde que va recibir el acero líquido. El molde se calienta previamente a 900 grados centígrados, con lo que se evitan varios problemas de la fundición corriente. En seguida de la fundición se deja enfriar el material, se rompe el revestimiento cerámico y se realiza un granallado de desbaste. En esta forma, el racimo inicial de cera queda con piezas de acero u otras aleaciones iguales a las que se inyectaron. Las piezas son separadas del racimo y se retocan con la ayuda de utillajes. Se efectúa un tratamiento térmico de recocido y normalizado, según las exigencias de cada pieza, un granallado fino y un control final de dimensiones, estructura y composición de las piezas. EL TIEMPO 1991.



### 3. DISEÑO METODOLÓGICO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS Y ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES

#### 3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación en sus primeras etapas es exploratorio, ya que según el objetivo de este, es estudiar un tema o problema que no revela numerosos antecedentes o estado del arte, y de esta forma, la profundización en este tipo de temáticas permitirá identificar los usos que se le pueden dar al producto a nivel industrial dependiendo de las características deseadas y la función que vaya a desempeñar en los diversos tipos de construcciones. Por otra parte, el proyecto en sus demás etapas se caracteriza por ser una investigación de tipo descriptivo conforme lo reportado en (Jaramillo, 2006) porque se analizan los resultados obtenidos, describiendo de forma precisa las propiedades y características morfológicas, estructurales, químicas, mecánicas y superficiales tanto de las materias primas utilizadas como del producto terminado (unidades cerámicas macizas).

#### 3.2. FASES PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

El logro de los objetivos del proyecto se diseñó en 4 fases, las cuales se describen a continuación:

- **Primera fase:** En esta etapa se realiza la recolección, preparación y caracterización de las materias primas que se van a utilizar, tales como: arcilla y cascarón cerámico desecho del proceso de microfundición (ver figura 2).

- **Segunda fase:** Se definen todas las variables a trabajar, las cuales son: mezcla, malla o tamaño de partícula para cada una de las mezclas y por último, temperatura de sinterización (ver figura 3). Es relevante mencionar que la presión de conformado es constante y fue seleccionada de acuerdo a lo reportado por (NTC 4205). Así mismo, las dimensiones de cada unidad se

establecieron de acuerdo a la norma técnica que requiere cada ensayo en particular. La cantidad de agua adicionada a cada tipo de mezcla para el conformado de las probetas fue del 15% de acuerdo a los límites de plasticidad de la arcilla. En total se elaboraron 216 probetas de las cuales 81 se elaboraron con dimensiones de 35x15 mm y se utilizaron para analizar la absorción, densidad aparente y contracción. Por otra parte, las probetas restantes se elaboraron con dimensiones de 35x70 mm, siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C 39 y ASTM C 1113-90. Por último, las 162 probetas se separaron en 6 grupos, cada uno de 27 especímenes de acuerdo a las temperaturas de sinterización que fueron establecidas.

- **Tercera fase:** En esta etapa se realiza la caracterización morfológica con Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), composición química elemental con Espectroscopia por Dispersión de Energía (EDS), análisis petrográfico con Microscopía Óptica, resistencia mecánica con máquina universal de ensayos, densidad aparente, contracción y absorción. Cada ensayo se realiza conforme a las normas relacionadas (ver figura 4).

Primera fase. Recolección y caracterización de las materias primas a utilizar.

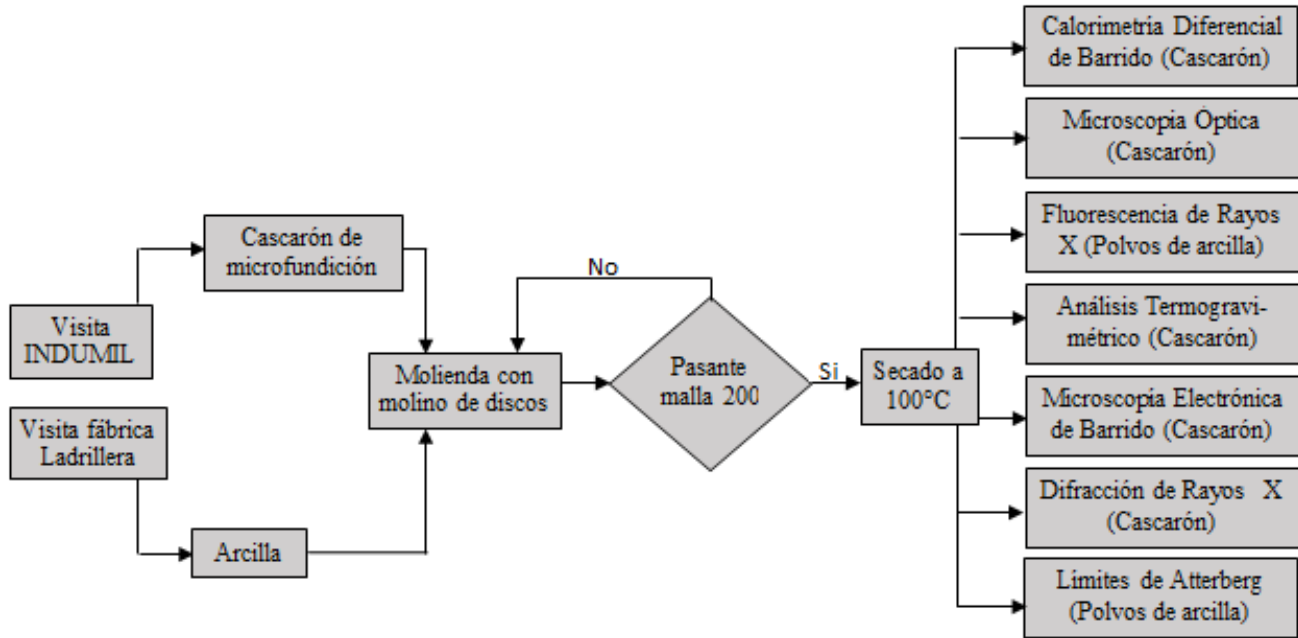


Figura 2. Diagrama de recolección, preparación y caracterización de materias primas.  
Fuente: (Autores, 2017)

Segunda fase: Definición de variables y elaboración de especímenes.

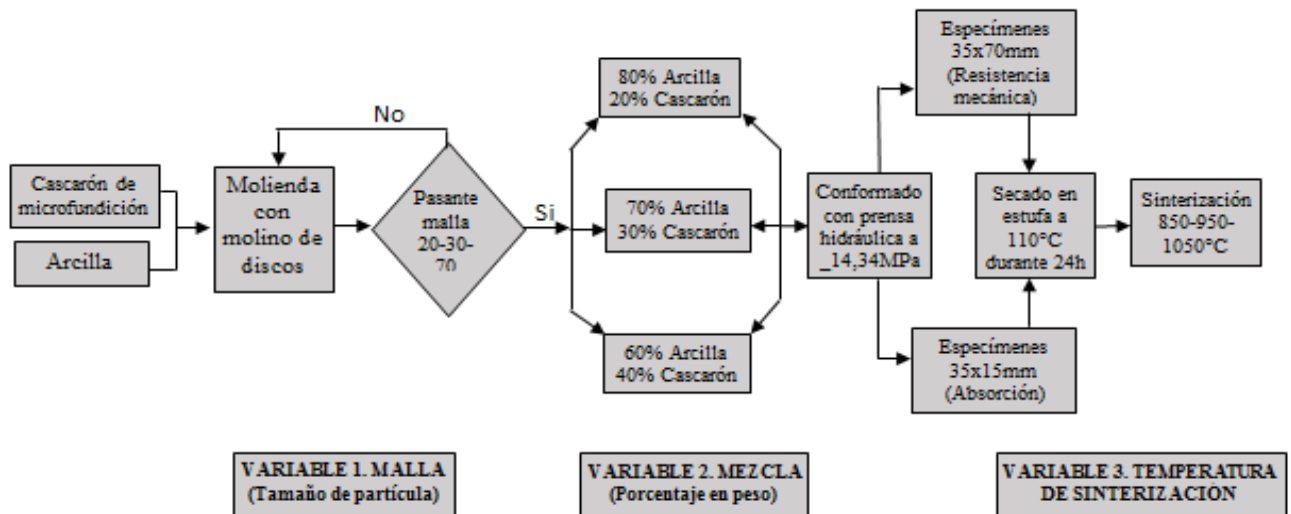


Figura 3. Diagrama definición de variables y proceso de preparación de especímenes.  
Fuente: (Autores, 2017)

Tercera fase. Caracterización de las unidades cerámicas.

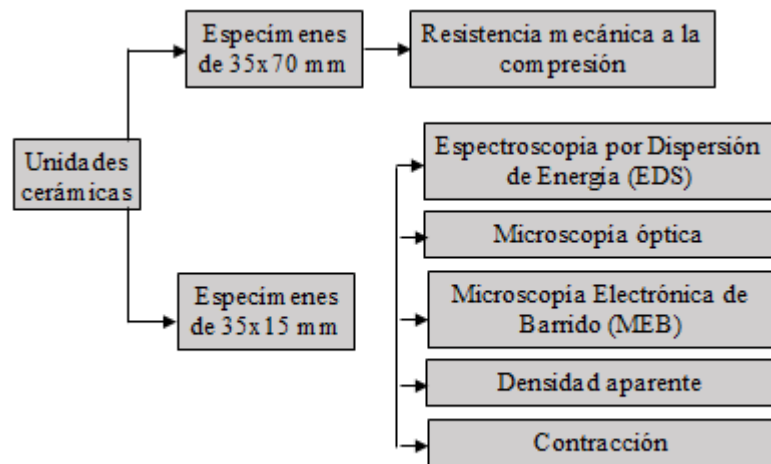


Figura 4. Diagrama de los ensayos a realizar para caracterizar las unidades cerámicas.  
Fuente: (Autores, 2017)

### 3.3. DESCRIPCIÓN DE LA POBLACIÓN DE ESTUDIO

La población de estudio en el presente proyecto corresponde a los especímenes cerámicos de 35x70 mm y 35x15mm elaborados a partir de arcilla y cascarón de microfundición. Dicha población se valora bajo las tres variables seleccionadas, que son: El tipo de malla o tamaño de partícula, el cual tiene tres niveles: malla 20, 30 y 70. Por otro lado, se encuentra la mezcla utilizada, la cual varía en composiciones de 60% Arcilla - 40% Cascarón, 70% Arcilla – 30% Cascarón y 80% Arcilla – 20% Cascarón, nótese que en todas las mezclas la matriz es el componente arcilloso y el elemento desgrasante o refuerzo, es el cascarón. Finalmente, se tiene como tercera variable las temperaturas de sinterización, las cuales son: 850°C, 950°C y 1050°C, dichas temperaturas se formularon con base en los cambios que puede sufrir tanto la arcilla como la sílice presente en el cascarón, según lo reportado por la literatura. En la figura 5 se puede observar la curva de cocción que se estableció para todos los especímenes.

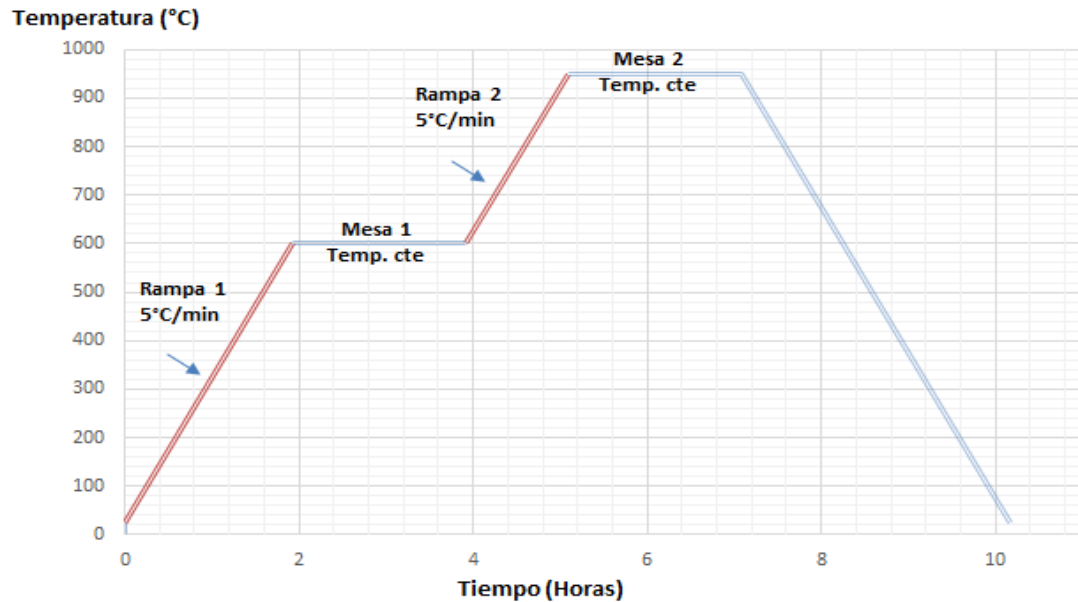


Figura 5. Curva de cocción diseñada para la sinterización de los especímenes a base de arcilla y cascarón de microfundición. Fuente: (Autores, 2017).

### 3.4. SELECCIÓN DEL TAÑAMO DE MUESTRA

Para seleccionar un tamaño de muestra representativo que refleje las características de la población, se debe tener en cuenta el tamaño de esta última (ad). En el presente proyecto el tamaño de la población es pequeño, por ende, se hace la muestra igual a la población.

### 3.5. DEFINICIÓN DE HIPÓTESIS, VARIABLES E INDICADORES

#### 3.5.1. HIPÓTESIS

Los factores como la temperatura de sinterización, la malla y el tipo de mezcla influyen en la resistencia a la compresión, absorción, densidad aparente y contracción de los especímenes a base de arcilla y desecho de cascarón de microfundición.

### *3.5.2. VARIABLES DE ESTUDIO*

En el presente proyecto se distinguen las siguientes variables respuesta a analizar:

- Resistencia a la compresión
- Absorción
- Densidad aparente
- Contracción

### *3.5.3. INDICADORES*

Por medio de indicadores de variabilidad se compara la información obtenida en cada una de las variables de estudio y de esta forma evaluar el grado de concentración o dispersión que presentan los datos respecto a su promedio.

## 4. ESTRUCTURA DE LOS MODELOS DE INFLUENCIAS PARA LAS PROPIEDADES DE ESTUDIO DE LAS UNIDADES CERÁMICAS MACIZAS

### 4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS LINEALES MULTIVARIADOS

Debido a que en el presente proyecto se identificaron varios factores de interés, para el desarrollo de modelos multivariados de predicción, se seleccionó un diseño experimental factorial del orden  $3^k$  con factores fijos. En el diseño factorial, se procede a analizar todas las posibles combinaciones de los niveles de cada uno de los factores del experimento, y de esta forma poder estudiar el efecto conjunto de estos sobre una respuesta (Hernández, 2014).

Como es sabido, los experimentos son usados para estudiar el desempeño de procesos y sistemas (Montgomery, 1991) con el fin de mejorarlos, reducir la variabilidad, aumentar su calidad, entre otros. El esquema de entradas, salidas, procesos y factores se presenta a continuación en la figura

6:

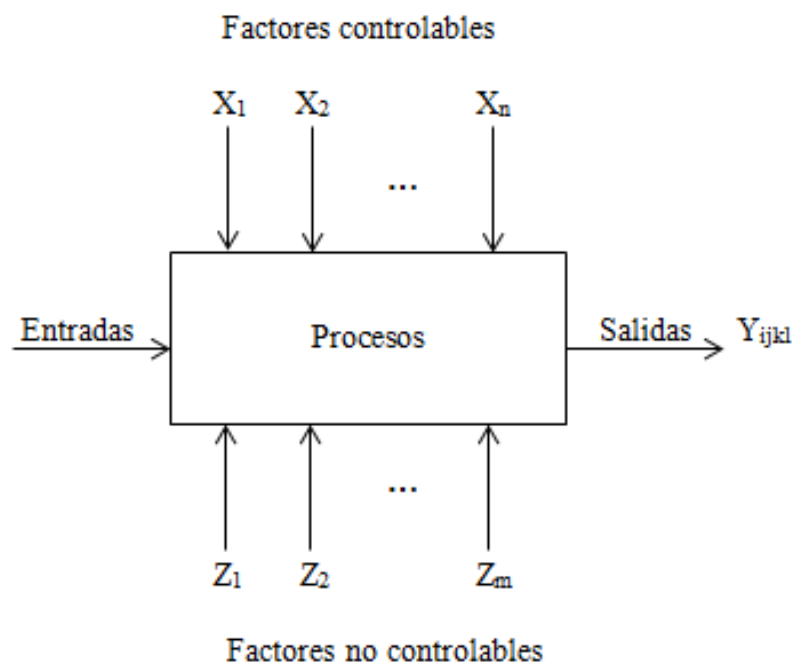


Figura 6. Modelo general de un proceso o sistema. Fuente: (Montgomery, 1991)

En el experimento las entradas, factores controlables, factores no controlables y salidas, son:

- **Entradas:** Arcilla y cascarón de microfundición.
- **Salidas:** Resistencia a la compresión ( $Y_1$ ), Absorción ( $Y_2$ ), Densidad aparente ( $Y_3$ ) y Contracción ( $Y_4$ ).
- **Factores controlables:** Temperaturas de sinterización, porcentajes de arcilla y cascarón (mezcla), tamaño de grano (malla), presión de compactación, tiempo de sinterización, tiempo de secado, porcentaje de agua, dimensiones de los especímenes, rapidez de cocción.
- **Factores no controlables:** Respuestas observadas entre cada interacción entre los niveles de los factores.
- **Procesos:** Proceso de conformado de los especímenes con matriz de arcilla y refuerzo de cascarón de microfundición.

#### 4.2. ARREGLO DE LOS MODELOS LINEALES MULTIVARIADOS

A continuación, se describen los factores seleccionados para los modelos multivariados, cada uno consta de tres niveles:

- Factor T: Temperatura de sinterización
  - T1: 850 °C
  - T2: 950 °C
  - T3: 1050 °C
- Factor M: Malla o tamaño de partícula
  - M1: 20
  - M2: 30
  - M3: 70
- Factor C: Mezcla
  - C1: 60% Arcilla – 40% Cascarón de microfundición
  - C2: 70% Arcilla – 30% Cascarón de microfundición
  - C3: 80% Arcilla – 20% Cascarón de microfundición



Se procede a calcular el número de interacciones entre los niveles de los factores T, C y M por medio del arreglo que se observa en la tabla 1:

	C1			C2			C3		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
T1	Y <sub>111</sub>	Y <sub>121</sub>	Y <sub>131</sub>	Y <sub>112</sub>	Y <sub>122</sub>	Y <sub>132</sub>	Y <sub>113</sub>	Y <sub>123</sub>	Y <sub>133</sub>
T2	Y <sub>211</sub>	Y <sub>221</sub>	Y <sub>231</sub>	Y <sub>212</sub>	Y <sub>222</sub>	Y <sub>232</sub>	Y <sub>213</sub>	Y <sub>223</sub>	Y <sub>233</sub>
T3	Y <sub>311</sub>	Y <sub>321</sub>	Y <sub>331</sub>	Y <sub>312</sub>	Y <sub>322</sub>	Y <sub>332</sub>	Y <sub>313</sub>	Y <sub>323</sub>	Y <sub>333</sub>

Tabla 1. Arreglo del diseño factorial con las interacciones entre los factores T, M y C.

El modelo estadístico para este diseño es:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + u_{ijk}$$

$$\text{con } i = 1, 2, \dots, a ; j = 1, 2, \dots, b ; k = 1, 2, \dots, c$$

Dónde:

$Y_{ijkl}$  : Respuesta observada entre cualquier interacción entre los niveles de los factores.

$\mu$  : Media global de los efectos

$\tau_i$  : Efecto producido por el nivel i-ésimo del factor T

$\beta_j$  : Efecto producido por el nivel j-ésimo del factor M

$\gamma_k$  : Efecto producido por el nivel k-ésimo del factor C

$\tau\beta_{ij}$  : Efecto producido por la interacción entre los factores T y M

$\tau\gamma_{ik}$  : Efecto producido por la interacción entre los factores T y C

$\beta\gamma_{jk}$  : Efecto producido por la interacción entre los factores C y M

$u_{ijkl}$  : Error aleatorio

Para el diseño seleccionado se obtuvo un total de 27 interacciones entre los factores. En el caso de la resistencia a la compresión por norma NTC 4205 se establece como mínimo 5 unidades de

análisis para determinar el promedio, por ende, se tiene un total de 135 probetas o especímenes con dimensiones de 35x70 mm. Para los ensayos de absorción, densidad aparente y contracción se elaboraron 3 unidades por cuestiones de disponibilidad de materiales, es decir, un total de 81 probetas con dimensiones de 35x15 mm. Así, en total suman 216 especímenes a base de arcilla y refuerzo de cascarón de microfundición.

Es importante resaltar que el experimento sólo cuenta con una réplica, debido a que los recursos eran limitados. Las condiciones externas al momento de realizar el experimento eran las siguientes:

- Temperatura Ambiente: 18 – 20 °C
- Humedad relativa: 55 – 60 %

#### **4.3. SOLUCIÓN DE LOS MODELOS LINEALES MULTIVARIADOS USANDO LA HERRAMIENTA ESTADÍSTICA SPSS**

Según el modelo estadístico planteado en la sección 4.2 una vez se ha calculado el número de interacciones entre los niveles de los factores T, C y M, se ingresa el arreglo en una hoja de datos del programa SPSS (Ver Anexo 1)

Después de realizar el análisis multivariado en el programa, se estableció las constantes de las ecuaciones lineales de predicción para cada propiedad, tal como se observa en la tabla 2. Es importante tener en cuenta que allí sólo se describen los efectos principales de cada factor. El análisis con los efectos producidos por las interacciones entre los factores T, C y M, a saber: TxC, TxM, CXM y TxCxM, se describen en el anexo 2.

<i>Propiedad</i>	<i>Modelo lineal propuesto</i>	<i>Unidad</i>	<i>Coef. de correlación</i>
------------------	--------------------------------	---------------	-----------------------------

Resistencia a la compresión	$Y_r = 1033,82 + 919,58 * T + 45,58 * C + 68,64 * M + 235,267$	MPa	$r = 0,82$
Absorción	$Y_a = 89,41 + 1,756 * T + 3,72 * C + 83,93 * M + 10,242$	%	$r = 0,89$
Contracción	$Y_c = 28,55 + 27,623 * T + 0,293 * C + 0,636 * M + 2,183$	%	$r = 0,93$
Densidad aparente	$Y_d = 156064,46 + 2273,87 * T + 16459,84 * C + 137330,74 * M + 28740,449$	Kg/m <sup>3</sup>	$r = 0,85$

Tabla 2. Modelos lineales multivariados de predicción de las propiedades de las unidades cerámicas macizas Fuente: (Autores, 2017).

Debido a que la significancia de cada uno de los factores no superó el 5%, se concluye que la hipótesis planteada en la cual se establece que los factores como: la temperatura de sinterización, la malla y el tipo de mezcla influyen en las propiedades es verdadera.

Por otra parte, la dispersión de estos parámetros fue evaluada mediante el coeficiente de correlación  $r$ , definido como un indicador de la intensidad de la relación lineal entre los valores estimados y los datos experimentales. Con base en los valores  $r$  de las ecuaciones, se puede afirmar que los modelos de predicción propuestos son adecuados, ya que estos valores varían entre 0,82 – 0,93; es decir, son cercanos a 1. Lo anterior indica que existe una estrecha relación entre los parámetros observados y los calculados.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. CARACTERIZACIÓN DE POLVOS DE ARCILLA

#### 5.1.1. POSIBLES COMPONENTES

La arcilla utilizada para el proceso investigativo se recolectó de una empresa alfarera del sector de Morcá, a la muestra seleccionada se realizó fluorescencia de rayos X (FRX) para hallar su proporción de sílice, alúmina y óxido de hierro. Componentes que están presentes como hematita, magnetita, goethita y pirita. Las tres primeras, son las principales responsables del color de la arcilla y de sus productos. (Bernal, I. et al, 2003). A continuación se describen cada componente:

- **Sílice** ( $\text{SiO}_2$ ) en forma de Cuarzo constituye el mineral más abundante en la naturaleza, de cristalización perfecta y de gran pureza. Es el principal constituyente de las arenas. Los cristales de Cuarzo cambian su estructura cristalina a  $573^\circ\text{C}$  produciendo cambios de volumen lo cual afecta el producto cerámico. Por eso debe programarse una menor velocidad de calentamiento entre  $500$  y  $600^\circ\text{C}$  cuando se efectúa el proceso cerámico para que la pasta que los contiene no sufra rupturas por esa situación. . (Bernal, I. et al, 2003)
- **Hematita  $\alpha$**  ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) Se presenta en cristales laminares, romboédricos, su color varía entre el negro, rojo intenso y gris acero con brillo semimetálico. No es magnético y es químicamente estable en ambiente oxidante.
- **Magnetita** ( $\text{Fe}^{2+}(\text{Fe}^{3+})_2\text{O}_4$ ) Es una piedra magnética natural que se encuentra relativamente pura en forma de cristales cúbicos de color negro-amarillo. Sus propiedades magnéticas desaparecen por calentamiento y si no hay transformación, reaparecen por enfriamiento. En ambiente oxidante se convierte en Hematita y pierde sus características magnéticas.

- **Goethita** ( $\alpha\text{-FeO(OH)}$ ) Se presenta en masas continuas compactas o en masas pulverulentas de color pardo oscuro a negro acompañado de la limonita que es su forma hidratada.
- **Pirita** ( $\text{FeS}_2$ ) Se presenta en forma de pequeños cristales o en granos redondeados de color amarillo latón y brillo metálico intenso. También existe otra forma de sulfuro de hierro llamado marcasita.
- **Óxidos hidratados de hierro y aluminio** Son abundantes en suelos tropicales. Los más importantes son la Limonita  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  y la Gibsita  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ . Las concentraciones naturales de hidróxidos de hierro son por lo común mezclas de Goethita con Limonita y sustancias arcillosas que presentan color pardo.

#### 5.1.2. RESULTADOS FLUORESCENCIA DE RAYOS X

En la composición de la arcilla observamos óxidos de hierros hidratados en un 4,57% en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y alúmina que mineralógicamente podría ser Gibsita, por los entornos hidrotermales encontrados cerca del sitio de extracción. Esta arcilla es de tipo corriente. Al ser sometidas a la acción del fuego adquieren un color rojo claro.

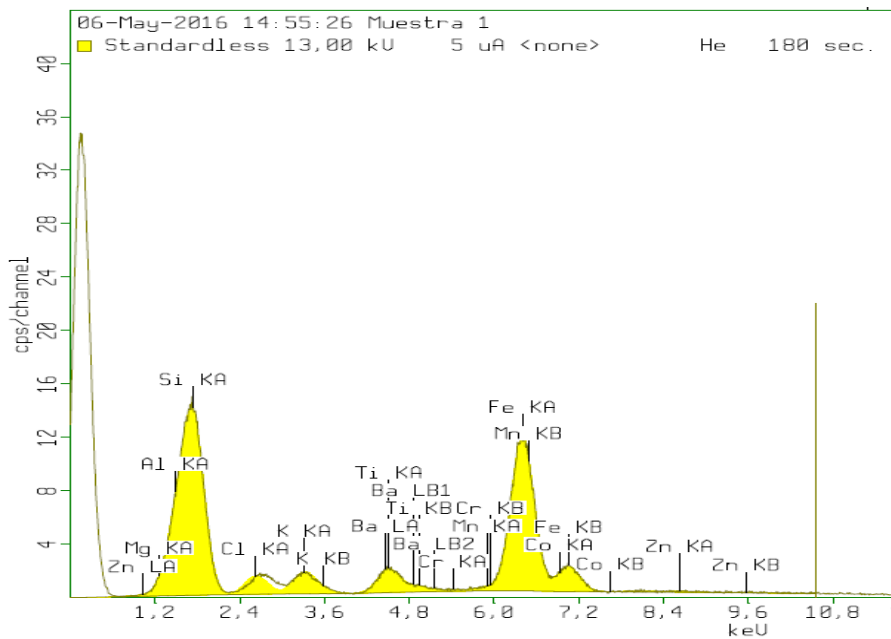


Figura 7. Fluorescencia de Rayos X de arcilla. Fuente: (Autores, 2017).

Compound	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	ZnO	BaO
Conc	0,5	29	61,8	1,1	1,3	0,90	0,04	0,096	4,57	0,03	0,05	0,3
Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%

Tabla 3 Concentración en porcentaje de cada componente hallado por FRX. Fuente (Autores, 2017).

Las arcillas comerciales o arcillas empleadas como material crudo en las construcciones están entre los más importantes recursos minerales no metálicos. El valor de estas arcillas está estrechamente relacionado con sus composiciones mineralógicas y químicas, especialmente las arcillas que contienen los minerales caolinita, montmorillonita, illita y atapulgita, La presencia de otros minerales o impurezas de sales solubles restringe sus usos. Las impurezas más comunes son cuarzo, carbonatos, óxido de hierro, sulfatos y feldespato.

## 5.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS ARENAS UTILIZADAS PARA ELABORAR EL CASCARÓN DE MICROFUNDICIÓN

Para caracterizar el cascarón de microfundición se realizaron pruebas de difracción de rayos x, con el fin de determinar su composición química, sus fases cristalinas y cómo influyen éstas en el comportamiento final para su reutilización para ello se caracterizó no solo el cascarón final sino también el cascarón en proceso y cada una de las arenas utilizadas en el procesos, para ver su posible relevancia en cada parámetro final de las unidades.

El cascarón de microfundición está compuesto por capas secas y húmedas de arenas y aglomerante, por tal razón, se realiza la caracterización a cada una de las arenas utilizadas las cuales son importadas de la compañía Laguna Clay Company.

### 5.2.1. ARENA MALLA 20

- **Microscopía electrónica de barrido:** En la figura 8 se muestra la Microscopía electrónica de barrido de la arena malla 20 a 23X, allí se observan granos redondos y angulares, es decir, de forma subangular. Dicha forma tiene propiedades intermedias entre los granos redondeados y los angulares, los granos angulares se aplican para moldeo en cáscara, produciendo unas piezas de un excelente acabado superficial.

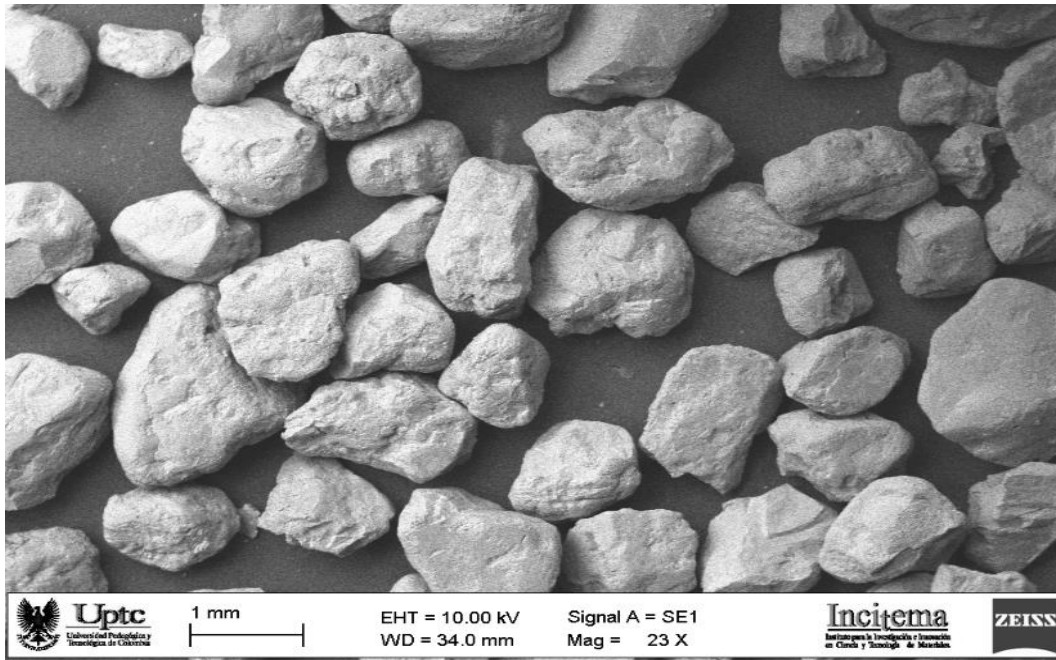


Figura 8. Microscopía Electrónica de Barrido de muestra de arena malla 20 a 23. Fuente: (Autores, 2017).

- **Microscopía Óptica:** Los granos redondos representan un grano “ideal”, mezclando las mejores propiedades para moldeo y acomodación. De esta manera, los granos subangulares presentan características de ambos tipos, tienen buena resistencia a la compresión, buena conformabilidad, permeabilidad en su compactación se comprimen nos con otros con menor fuerza teniendo una mayor permeabilidad. La figura 9 y 10 muestra las Microscopías ópticas de las arenas a 20X y 40X donde vemos los granos subangulares.



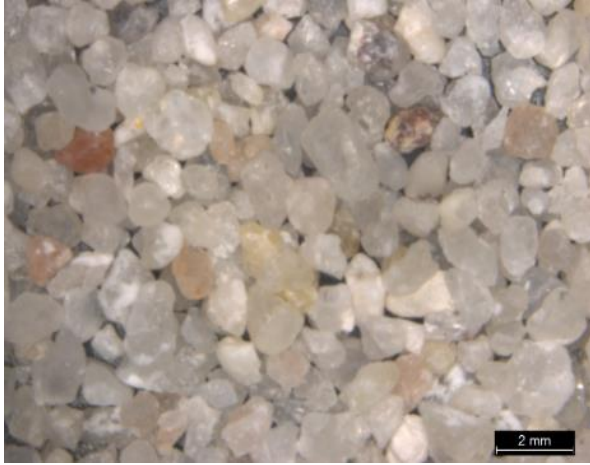


Figura 9. Microscopía óptica de arena malla 20 a 20X. Fuente: (Autores, 2017).



Figura 10. Microscopía óptica arena malla 20 a 40X. Fuente: (Autores, 2017).

En la figura 11 muestra un grano de arena malla 20 a 87X en la cual se observan las fracturas concoideas las cuales son propias del cuarzo, además se detecta la no presencia de aglomerante arcilloso sobre la superficie del grano. En la figura 12 se detallan los granos de arena malla 20 a 256X donde podemos ver mejor la fractura y morfología superficial la cual es muy limpia de arcillas coloidales

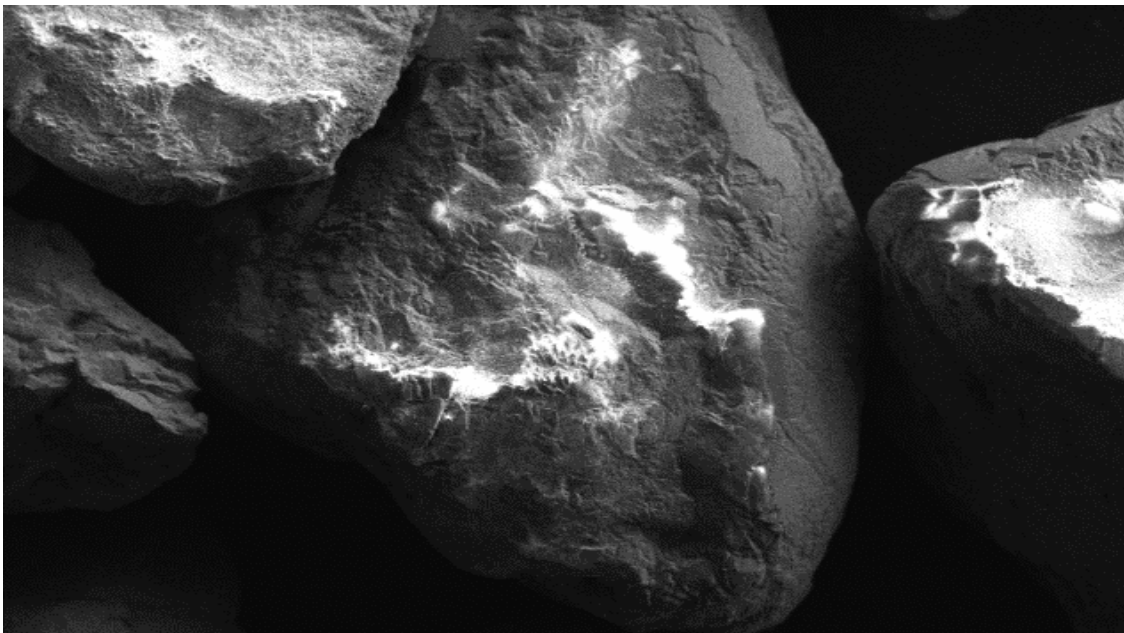


Figura 11 MEB grano arena malla 20 a 87X. Fuente: (Autores, 2017).

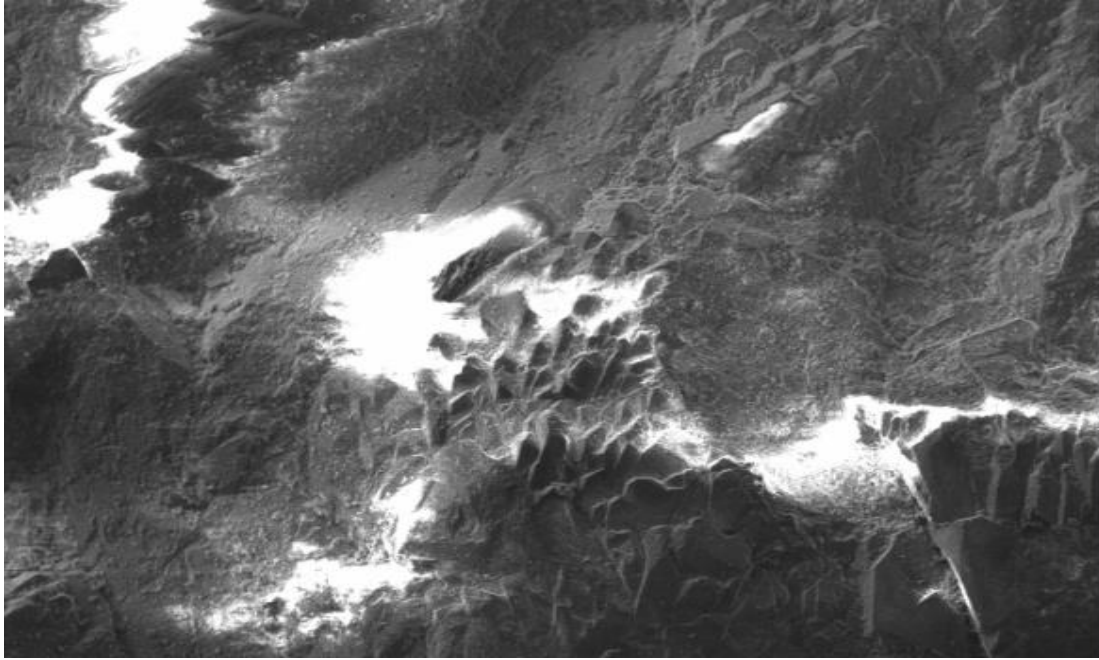


Figura 12. MEB grano arena malla 20 a 296X. Fuente: (Autores, 2017).

**Difracción de Rayos X:** En la figura 13 se muestra la difracción de rayos x de la arena 20 la cual es el grano más grueso del cascarón de microfundición para la cual el análisis semi-cuantitativo de las fases mineralógicas se evidencia vemos que un 99% de la arena son óxidos de silicio polimorfos como la *Coesita*, con un porcentaje en la arena 20 del 16%. Es un polimorfo del cuarzo que se origina cuando este es sometido a una alta presión (de 2 a 3 giga-pascales) y a una temperatura ligeramente alta (700 °C). (Morales, 2014).

Además de la coesita, se encuentra el cuarzo sintético y moganita con un 53% y 30% respectivamente, este último es un mineral de la clase de los minerales óxidos de silicio y aparece en la mayoría de las rocas de la sílice, aunque en principio es independiente de la génesis o el ambiente de formación de la roca sílicea. (Bustillo, 2002).

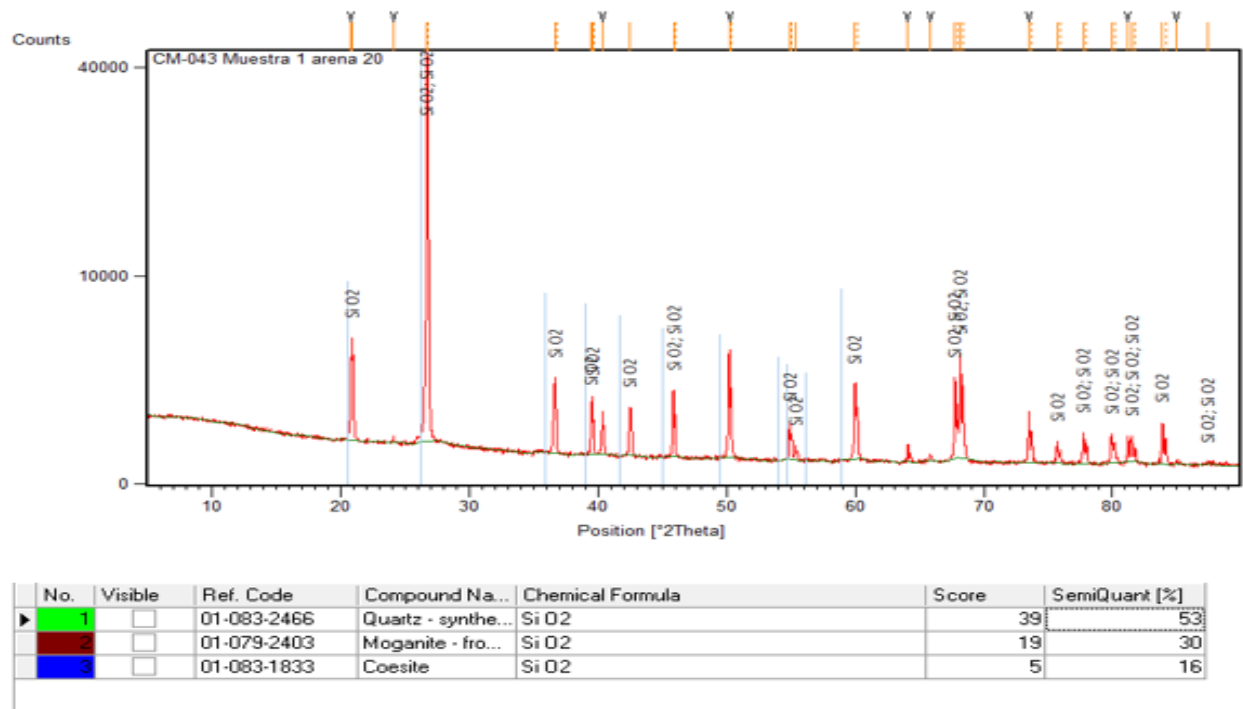


Figura 13. Difracción de rayos X arena malla 20. Fuente: (Autores, 2017).

### 5.2.2. ARENA MALLA 30

**Microscopía electrónica de barrido (MEB) y Microscopía Óptica:** En la Microscopía electrónica de barrido de la figura 14 y en las figuras 15 y 16 en las cuales se detallan las microscopías ópticas a 20X y 40X respectivamente, se observa la forma del bulk angular, lo cual ayuda al acabado superficial de la pieza fundida con baja presencia de aglomerantes como arcillas y demás.

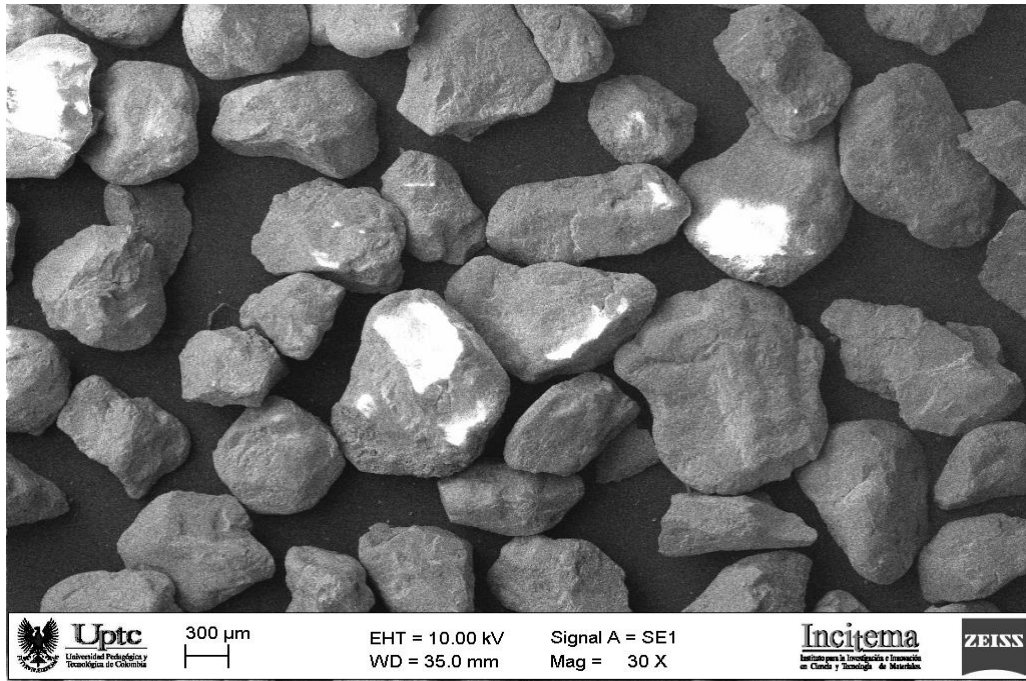


Figura 14. MEB arena malla 30 a 30X. Fuente: (Autores, 2017).

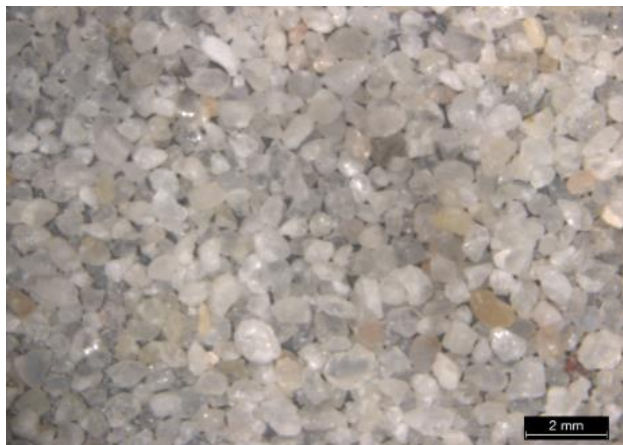


Figura 15. Microscopía óptica de arena malla 30 a 20X. Fuente: (Autores, 2017).



Figura 16. Microscopía óptica de arena malla 30 a 40X. Fuente: (Autores, 2017).

En la figura 17 y 18 se observan los coloides de óxido de silicio recubriendo el grano, además se muestran las micro fracturas concoideas que se presentan en los granos angulares.

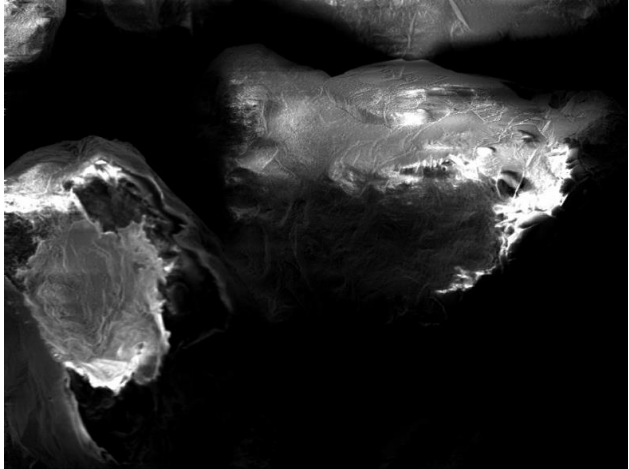


Figura 17. MEB de grano arena malla 30 a 114x. Fuente: (Autores, 2017).

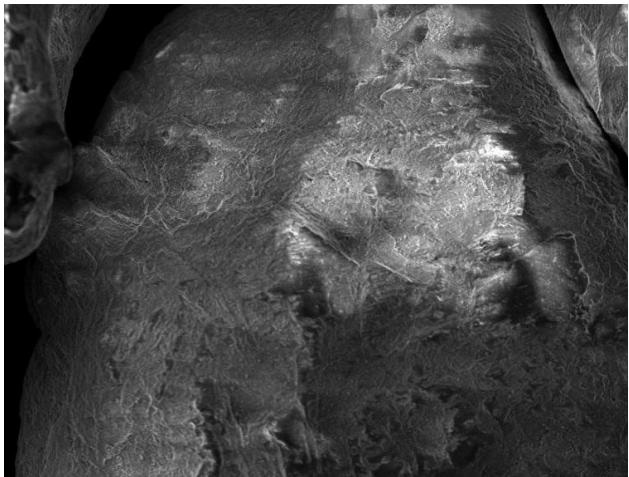


Figura 18. MEB de grano arena malla 30 a 229X. Fuente: (Autores, 2017).

- ***Difracción de Rayos X:*** En la figura observamos la difracción de rayos x (DRX) de la arena 30 para la cual el análisis semi cuantitativo de las fases mineralógicas se evidencia una mayoría de óxido de silicio con un 67% siguiendo con un 28% de cuarzo y un 5% de Coesita que es otro polimorfo del cuarzo que se origina cuando este es sometido a una alta presión (2–3 gigapascuales) y a una temperatura ligeramente alta (700 °C).

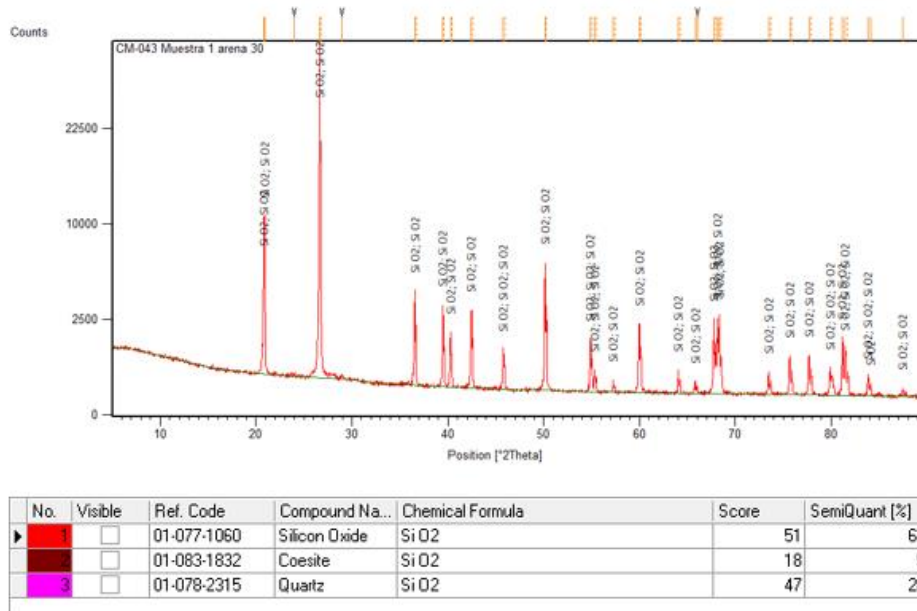


Figura 19. Difracción de rayos X de arena malla 30. Fuente: (Autores, 2017).

### 5.2.3. ARENA MALLA 70

- **Microscopía electrónica de barrido y Microscopía Óptica:** En la figura 20 se observa la Microscopía electrónica de barrido de los granos de arena 70 a 46 X y en la figura 21 y 22 se presenta la Microscopía óptica a 20X y 40X respectivamente los granos presentan forma redondeada lo cual ayuda a la dispersión normal y la forma ideal del bulk para la conformación del cascarón esta malla permite mejor acomodación para la permeabilidad del molde.

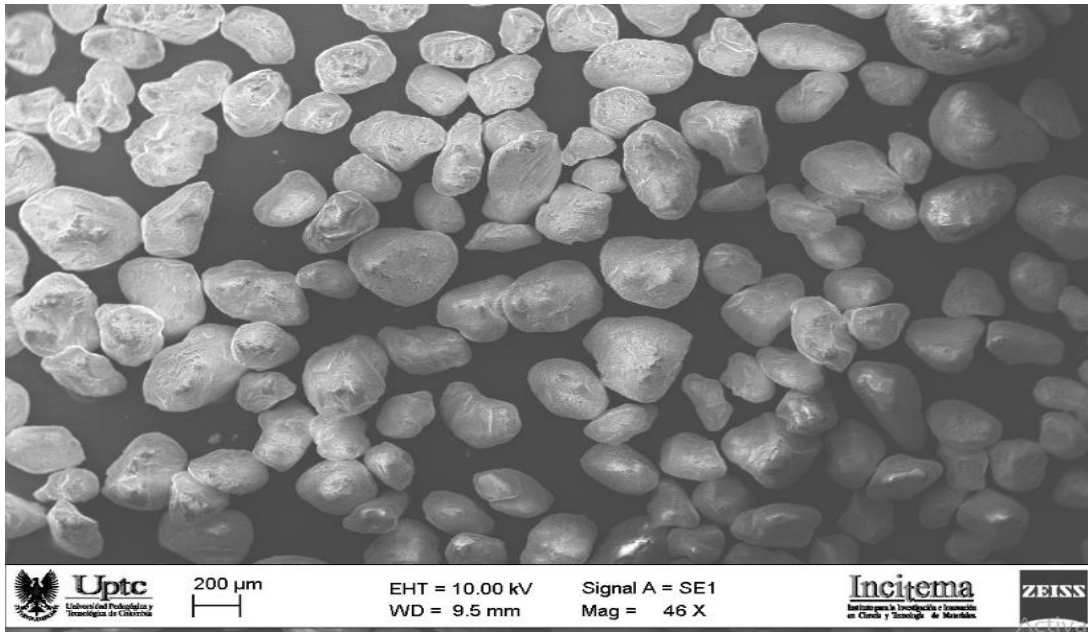


Figura 20. MEB de arena malla 70 a 46X. Fuente: (Autores, 2017).



Figura 21. Microscopía óptica de arena 70 a 20X. Fuente: (Autores, 2017).

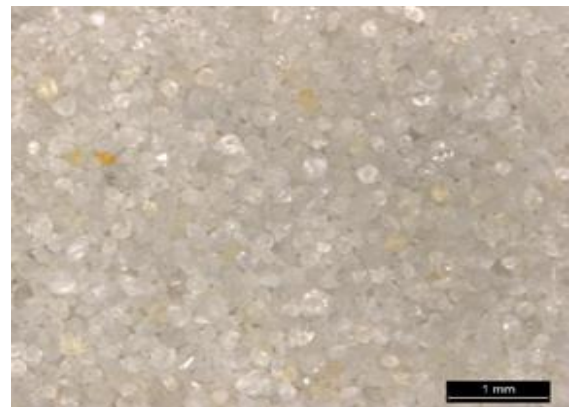


Figura 22. Microscopía óptica de arena 70 a 40X. Fuente: (Autores, 2017).

En la figura 23 se observa la misma arena a 229x en donde se corrobora la forma redondeada y se observan fracturas concoideas en la figura 24 el grano a 639x en el cual alcanzamos a detectar coloides de  $\text{SiO}_2$ .

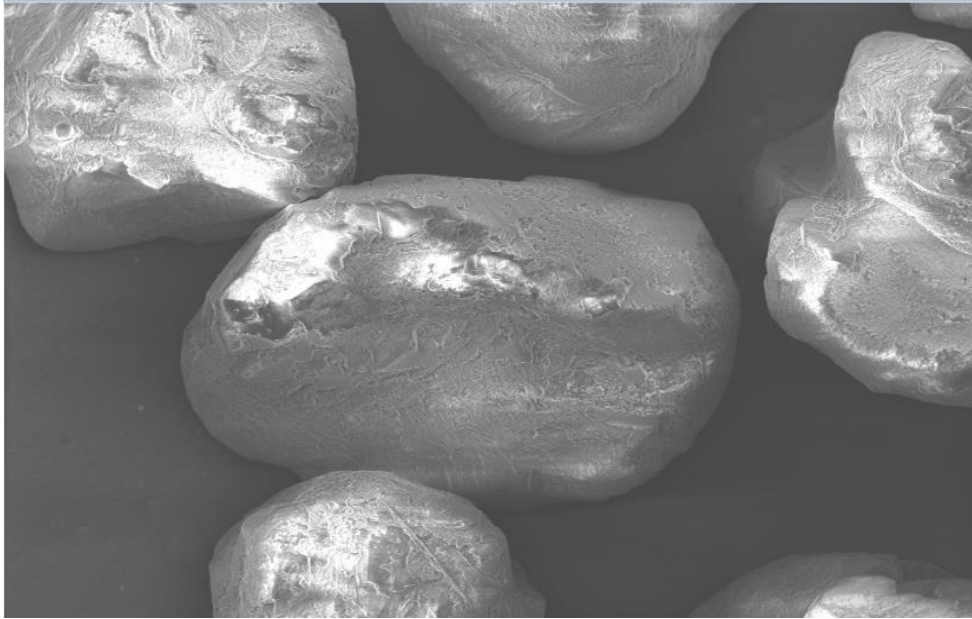


Figura 23. MEB grano de arena malla 30 a 229X. Fuente: (Autores, 2017).

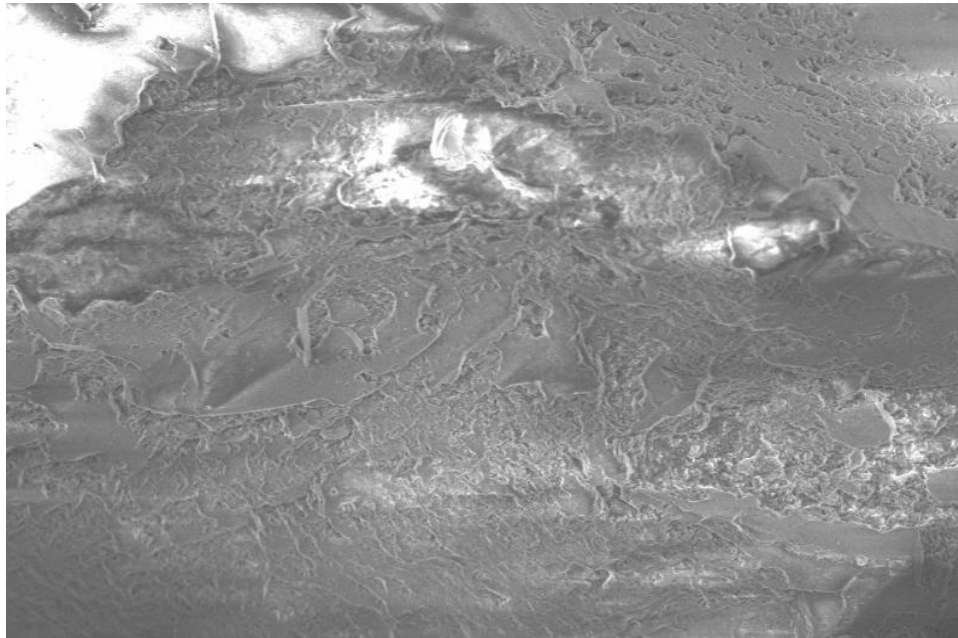


Figura 24. MEB grano de arena malla 70 a 639X. Fuente: (Autores, 2017).

***Difracción de rayos X:*** En la figura 25 se presenta la difracción de rayos X de la arena malla 70 ensayo en el cual por medio del análisis semi-cuantitativo de las fases mineralógicas, evidencia



100% de óxidos de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) con diferentes polimorfos del cuarzo como moganita con un 35%, también encontramos cuarzo con un 29%, óxido de silicio con un 25% y cuarzo alpha el cual es el polimorfo más estable a temperaturas bajas.

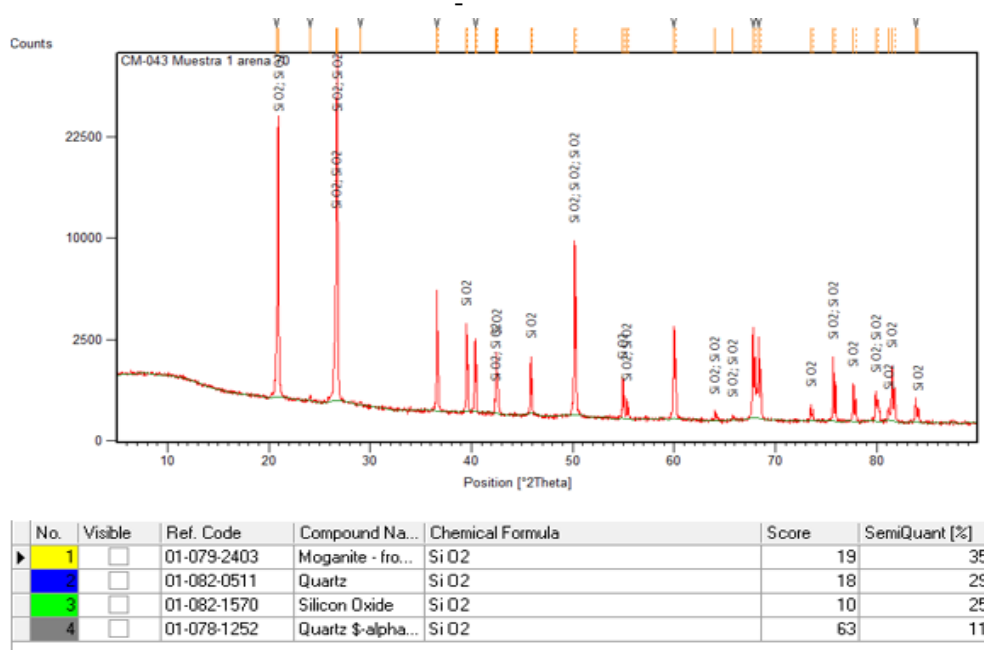


Figura 25. Difracción de rayos x de arena malla 70. Fuente: (Autores, 2017).

#### 5.2.4. ARENA MALLA 200

- **Microscopía electrónica de barrido y Microscopía Óptica:** En la figura 26 se presenta la Microscopía electrónica de barrido de los granos de arena malla 200 a 176 X. En las figuras 29 y 30 se presentan las microscopías ópticas a 20X y 40X respectivamente. Podemos observar que los granos presentan forma angular, la cual es ideal para las arenas de moldeo. Esta es la arena más importante por ser la arena aglomerante y la cual está en contacto con el material fundido y el aglomerante, además de estar presente entre las arenas de granulometrías superiores.

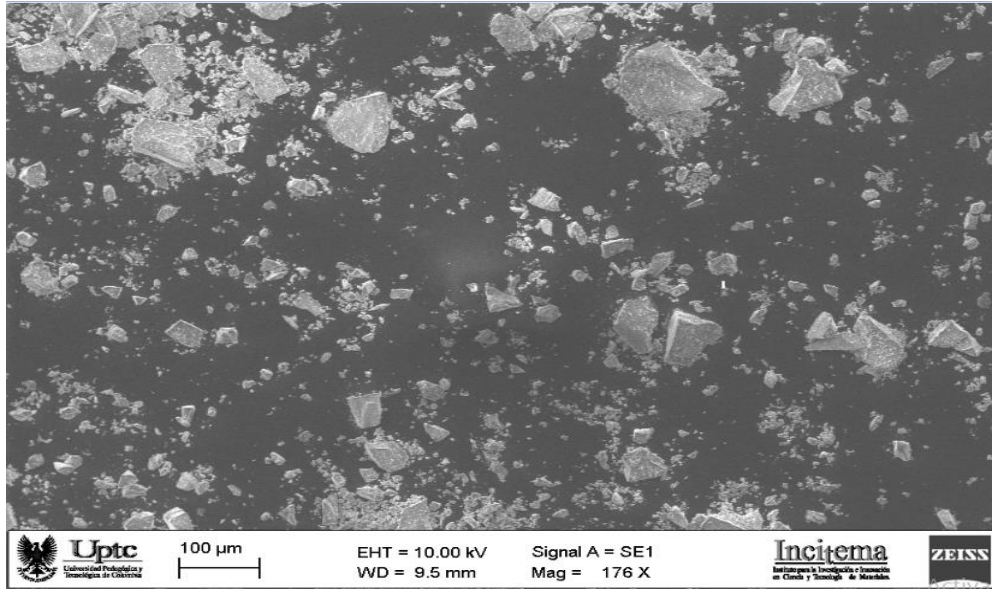


Figura 26. MEB arena malla 200 a 176X. Fuente: (Autores, 2017).

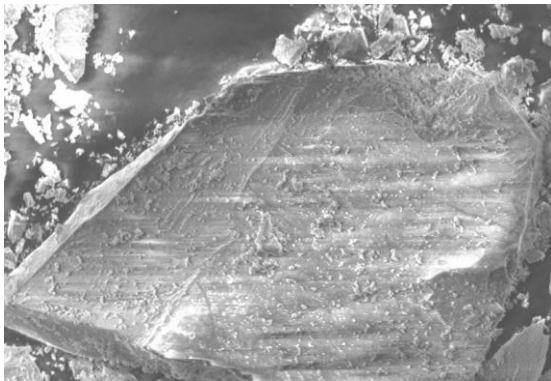


Figura 27. MEB de grano arena malla 200 a 1170X. Fuente: (Autores, 2017).

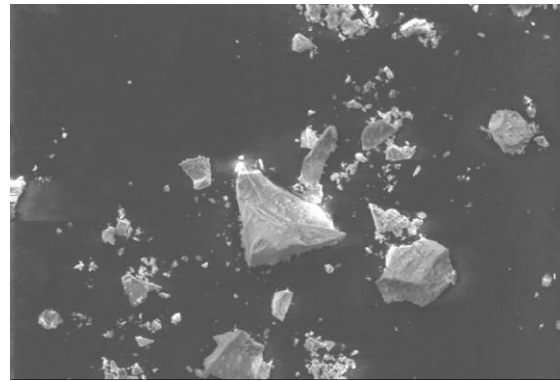


Figura 28. MEB de grano arena malla 200 a 928X. Fuente: (Autores, 2017).

En la figura 27 y 28 se muestran las Microscopías electrónicas de barrido de los granos a 1170X y 928X en los que se ven los granos angulares y las fracturas concoideas de los granos además se ve un recubrimiento coloidal mucho más notable en cada uno de los granos y también suelto en las fotografías.

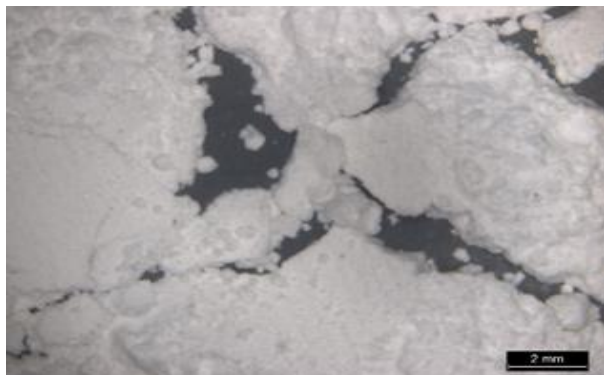
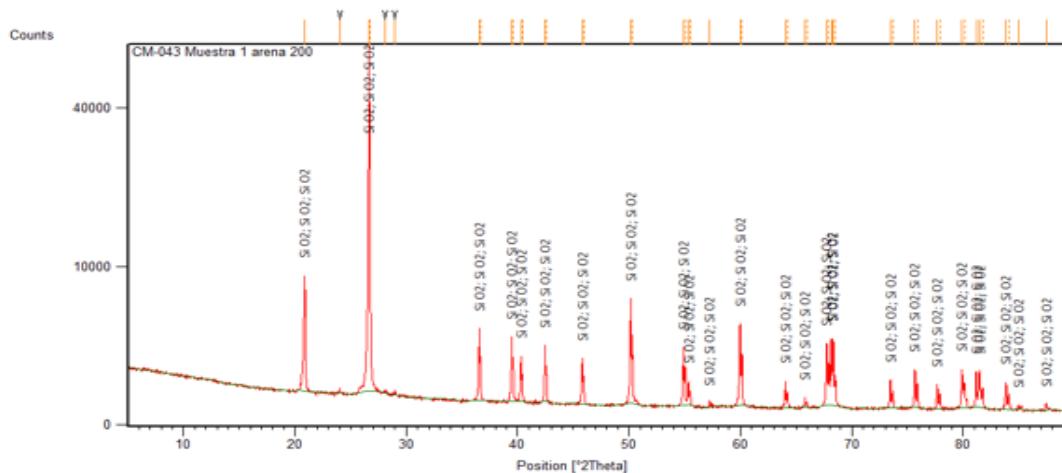


Figura 29. Microscopía óptica de arena malla 200 a 20X. Fuente: (Autores, 2017).



Figura 30. Microscopía óptica arena 200-40X Fuente: (Autores, 2017).

**Difracción de rayos X:** En la difracción de rayos de la figura 31 según el análisis semi-cuantitativo de las fases mineralógicas se evidencia una mayoría de cuarzo alfa en la arena con un 38% de cuarzo alfa sintético y un 27 % de cuarzo alfa además de un 35% de cuarzo.



No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	SemiQuant [%]
1	<input type="checkbox"/>	01-078-2315	Quartz	Si O2	89	35
2	<input type="checkbox"/>	01-078-1253	Quartz $\alpha$ -synthetic	Si O2	85	38
3	<input type="checkbox"/>	01-075-0443	Quartz - $\alpha$	Si O2	74	27

Figura 31. . Difracción de rayos X de arena malla 200. Fuente: (Autores, 2017).

### 5.3. CARACTERIZACIÓN DEL CASCARÓN DE MICROFUNDICIÓN EN VERDE

- *Microscopía electrónica de barrido y Microscopía Óptica:* En la figura 32 se puede observar la Microscopía electrónica de barrido del cascarón de micro-fundición en verde (sin aplicación de precalentamientos solo capaz de arena y aglomerante) a 56X y en la figura 33 se observa la microscopía óptica del cascarón en verde a 50X.

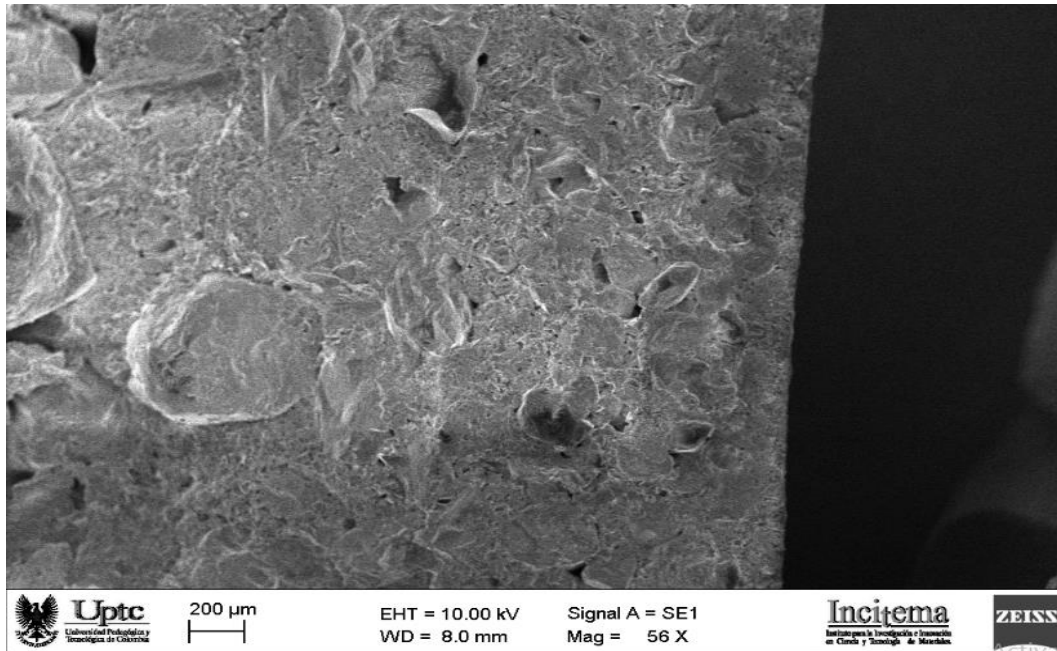


Figura 32. MEB del cascarón en verde a 56X. Fuente: (Autores, 2017).

La distribución entre el aglomerante y las arenas ordenadas descendientemente según su granulometría, se muestra en la Figura 33. Allí se presenta una microfotografía de microscopía óptica a 70X, en la cual podemos apreciar granos con diámetros entre: 0.86 y 0.84mm, que corresponden a la arena malla n.º 20 ASTM(A), 0.63 y 0.59mm pertenecientes a la arena malla n.º 30 ASTM (B), entre 0.20 y 0.19mm de la arena malla n.º 70 ASTM (C) y los diámetros referentes a la arena malla n.º 200 ASTM ubicados en la región (D).

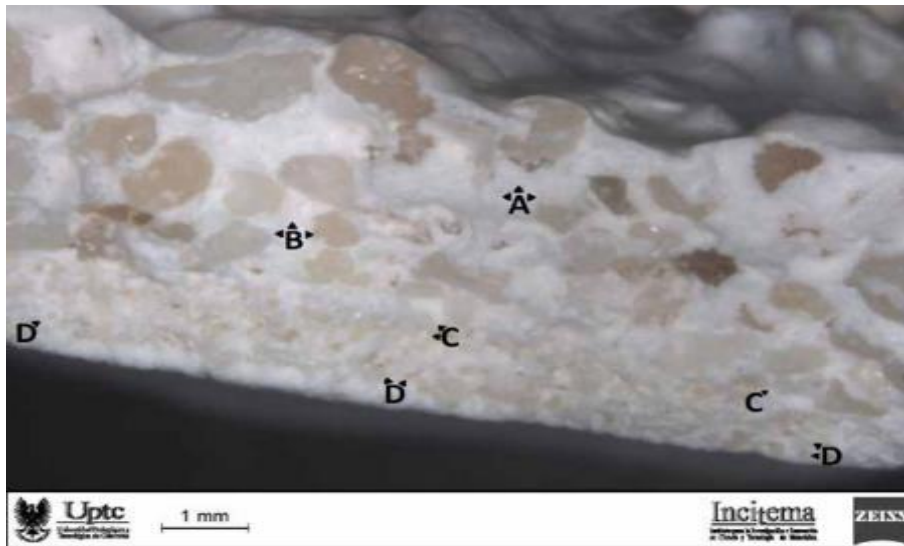
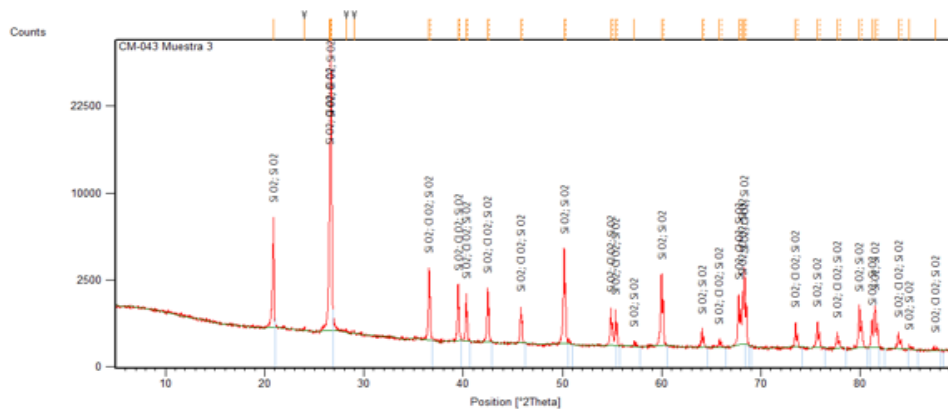


Figura 33. Microscopía óptica cascañón en verde. Fuente: (Grandas et al., 2016).

- **Difracción de rayos X:** En la difracción de rayos x del cascañón en verde de la figura 34 según el análisis semi-cuantitativo de las fases mineralógicas se evidencia una mayoría de óxido de silicio con un 25% perteneciente a la arena 70 seguido de cuarzo alpha perteneciente a la arena 200 y oxido de cloro 21% perteneciente a los elementos utilizados en las aguas industriales.



No.	Visible	Ref. Code	Compound Na...	Chemical Formula	Score	SemiQuant [%]
1	<input type="checkbox"/>	01-078-1253	Quartz \$-alpha...	Si O2	82	25
2	<input type="checkbox"/>	01-079-2399	Chlorine Oxide	Cl O2	15	21
3	<input type="checkbox"/>	01-077-1060	Silicon Oxide	Si O2	75	54

Figura 34. Difracción de rayos X del cascañón en verde. Fuente: (Autores, 2017).

## CARACTERIZACIÓN DEL CASCARÓN DE MICROFUNDICIÓN CON PRECALENTAMIENTO

**Microscopía electrónica de barrido:** La Figura 35, corresponde a la microscopía electrónica de barrido del cascarón cerámico a 122X después del sinterizado, allí se observa el tránsito de aglomerante hacia la superficie en contacto con la pieza.

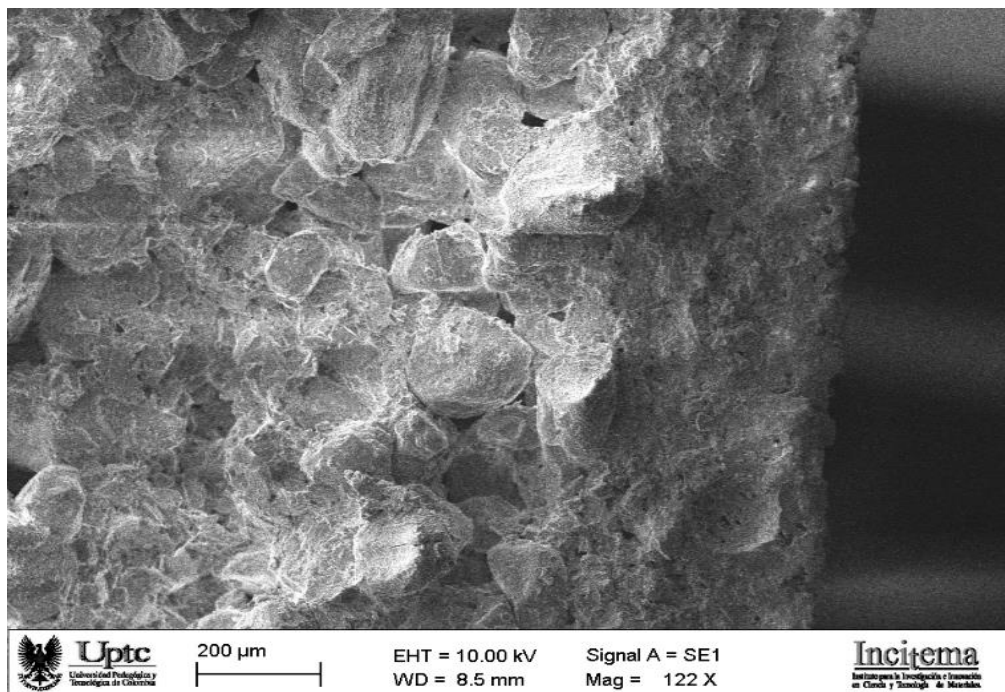


Figura 35. MEB del cascarón con precalentamiento a 122X. Fuente: (Grandas et al., 2016).

La circulación del aglomerante elimina los poros generados por las granulometrías más grandes (arenas n.º 20, 30, 70). De esta forma, se puede mejorar el acabado superficial de la pieza fundida disminuyendo la permeabilidad del cascarón, lo que ocasiona un aumento de las temperaturas de preparación al pre-colado del molde y colado de la pieza, previniendo defectos de fundición característicos de moldes con baja permeabilidad (Carter, 2004).

- **Difracción de rayos X:**

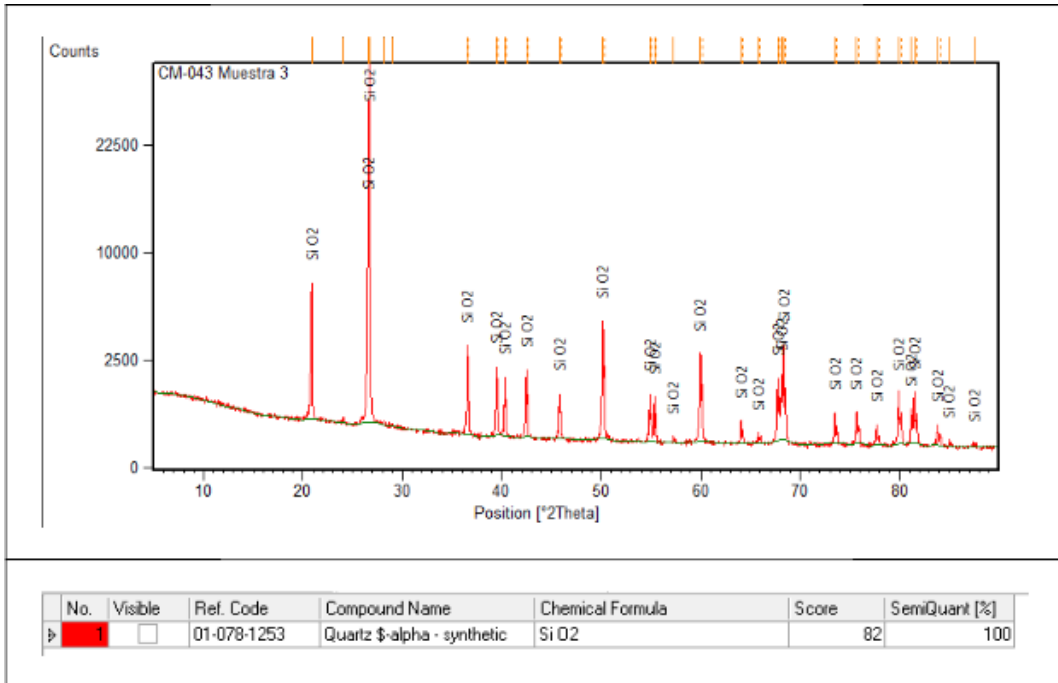


Figura 36. Difracción de rayos X del cascarón con precalentamiento. Fuente: (Autores, 2017).

En la difracción de rayos x de la figura 36 del cascarón precalentado según El análisis semi-cuantitativo de las fases mineralógicas se evidencia una mayoría cuarzo alpha con un 100% causado por el precalentamiento por encima de los 575 grados para la transformación total del cascarón que era diferentes clases mineralógicas de óxido de silicio también se observa una evaporación del óxido de cloro por las elevadas temperaturas.

- **Análisis Termogravimétrico TGA:** Se realizó análisis Termo gravimétrico y calorimetría diferencial de barrido a una muestra de cascarón con precalentamiento para ver la pérdida de peso y la afectación del cascarón con respecto a temperatura empleando una velocidad de calentamiento de 20<sup>0</sup>C/min hasta llegar a una temperatura de 1500<sup>0</sup>C.

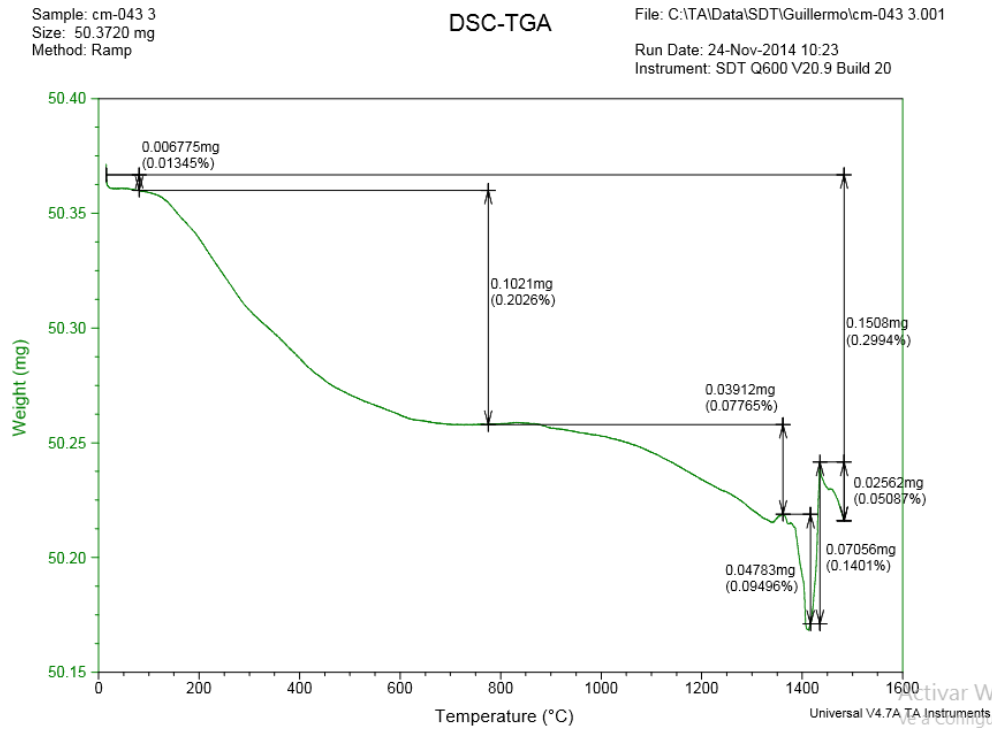


Figura 37. TGA del cascarón precalentado. Fuente: (Autores, 2017).

La curva TGA del cascarón precalentado mostrada en la figura 37 nos presenta una pérdida total de masa de 0.1508mg correspondiente al 0.2994% del peso inicial hasta una temperatura de 1500°C la cual no es muy significativa ya que se pueden presentar residuos medioambientales en la aplicación del ensayo. Se observan seis etapas donde hay pérdida y ganancia de material.

La primera etapa ocurre entre 15 y 100°C aproximadamente y la pérdida es de 0,006775 mg perdida de humedad residual, correspondiente al 0.01345% del peso inicial. La segunda etapa ocurre entre 100°C y 800°C aproximadamente y la pérdida es de 0.1021mg correspondiente a elementos intersticiales y al cambio de fase del cuarzo a cuarzo alpha, correspondiente al 0.2026% del peso inicial. La tercera etapa ocurre entre 800°C y 1370°C aproximadamente y la pérdida es de 0.03912mg, debido al cambio a cristobalita correspondiente al 0.07765% del peso inicial. La cuarta etapa ocurre entre 1370°C y 1410°C aproximadamente y la pérdida es de 0.04783mg,



correspondiente al 0.09496% del peso inicial. La quinta etapa ocurre entre 1410°C y 1420°C aproximadamente con una ganancia es de 0.07056mg, correspondiente al 0.1401% del peso inicial y la última etapa ocurre entre 1420°C y 1440°C aproximadamente y la pérdida es de 0.02562mg, correspondiente al 0.05087% del peso inicial.

- **Calorimetría diferencial de barrido DSC:** La curva DSC del cascarón precalentado mostrada en la figura 38 del cascarón precalentado muestra tres zonas en las cuales se presentan reacciones endotérmicas; la primera con una temperatura de 71.40°C y con un valor de Entalpía de 110.2 J/g, en la segunda etapa a 570.97°C y Entalpía de 6.909 J/g y en la última zona se genera la reacción a 1374.01°C con Entalpía de 1301.96°C.

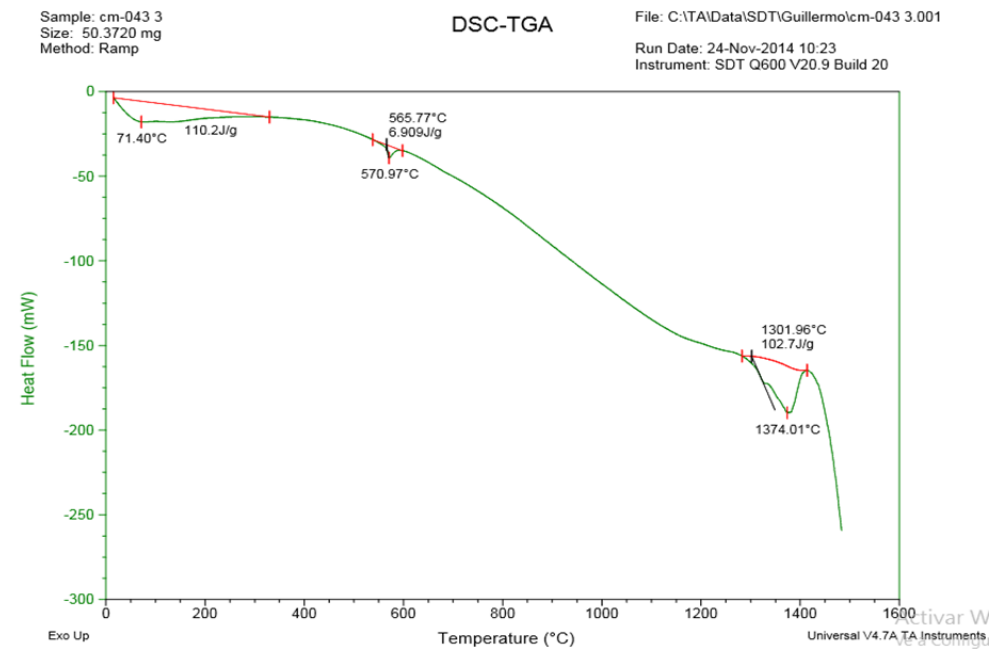


Figura 38. DSC de cascarón precalentado. Fuente: (Autores, 2017)

#### 5.4. CARACTERIZACIÓN DEL CASCARÓN DE MICROFUNDICIÓN DESECHO

- *Microscopía electrónica de barrido:* En la Microscopía electrónica de barrido de la figura 39 se observa el cascarón de microfundición desecho a 116x se observa una cascara irregular formada por las altas temperaturas del colado con una medida de 346.9 micras también observamos granos angulares y la ausencia casi total de aglomerante por lo tanto se observan mucho más poros causados por la salida de gases producido en el proceso de colado.

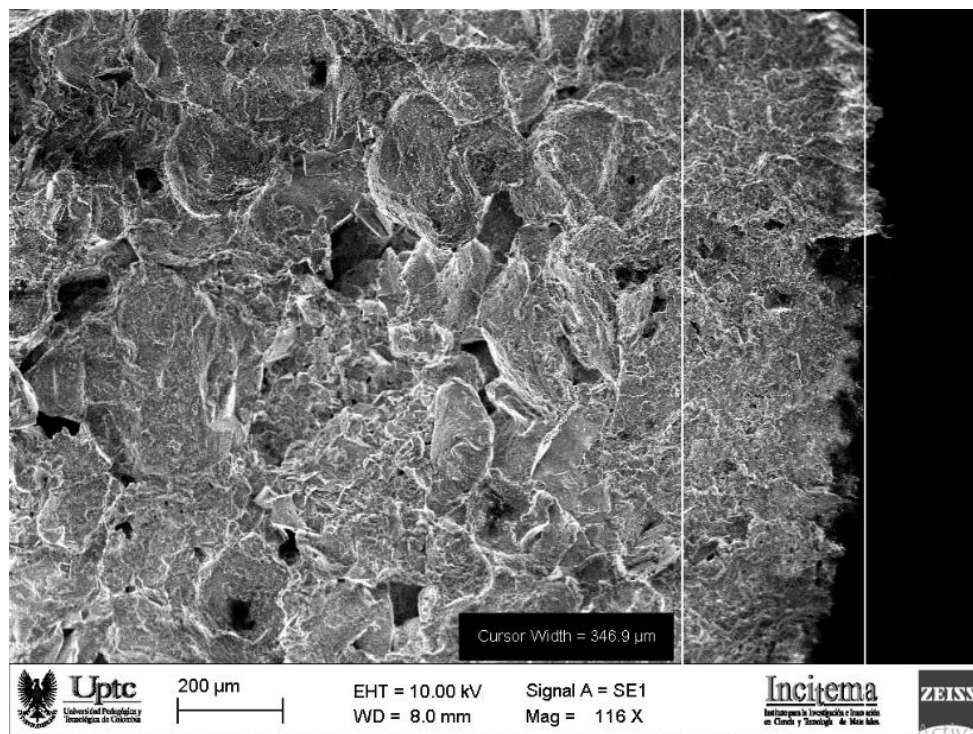


Figura 39. MEB de cascarón desecho a 116X. Fuente: (Autores, 2017).

En la Microscopía electrónica de barrido del cascarón desecho a 44x de la figura 40 Se presentan grietas en el cascarón por acción del desmolde y la dilatación térmica durante el colado. Microscópicamente, estas fracturas son consecuencia del cambio en la separación media entre sus átomos o moléculas, según el coeficiente promedio de dilatación lineal (Wilson & Buffa, 2003).

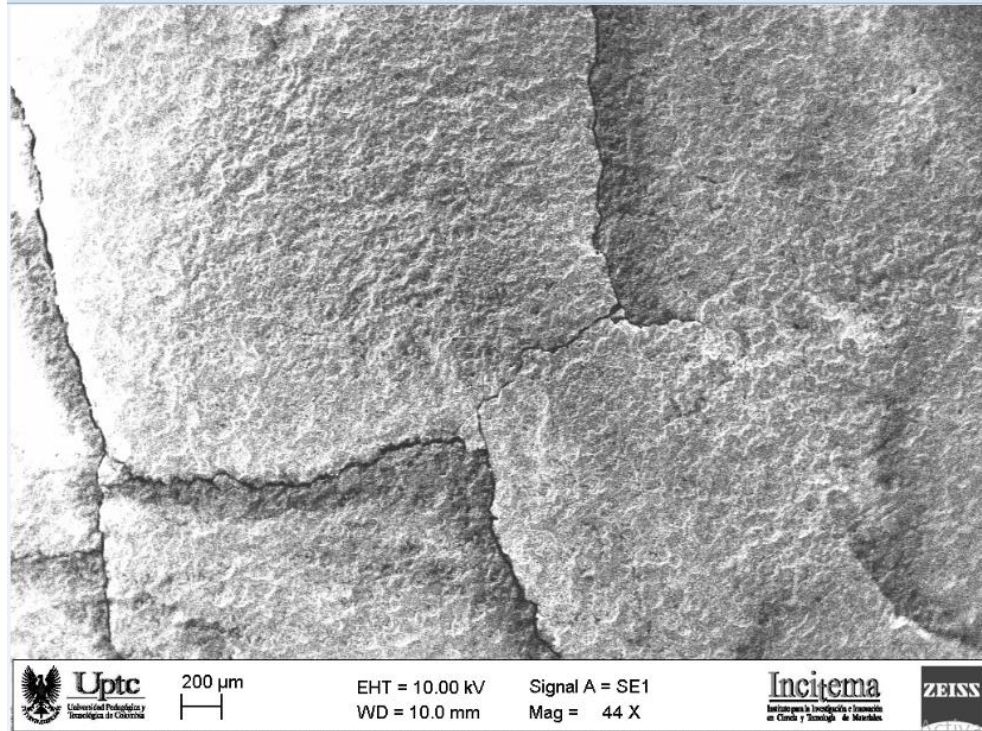


Figura 40. MEB de cascarón desecho a 44X. Fuente: (Autores, 2017).

En la Microscopía electrónica de barrido de la figura 41 del cascarón desecho a 280x podemos identificar la presencia de pequeños poros causados por la evacuación de gases (Londoño, Baquero & Córdoba, 2014). Esta superficie del cascarón es la más afectada por los drásticos cambios de temperatura que suceden durante el proceso de micro fundición, los cuales pueden llegar a superar los 1200 °C.

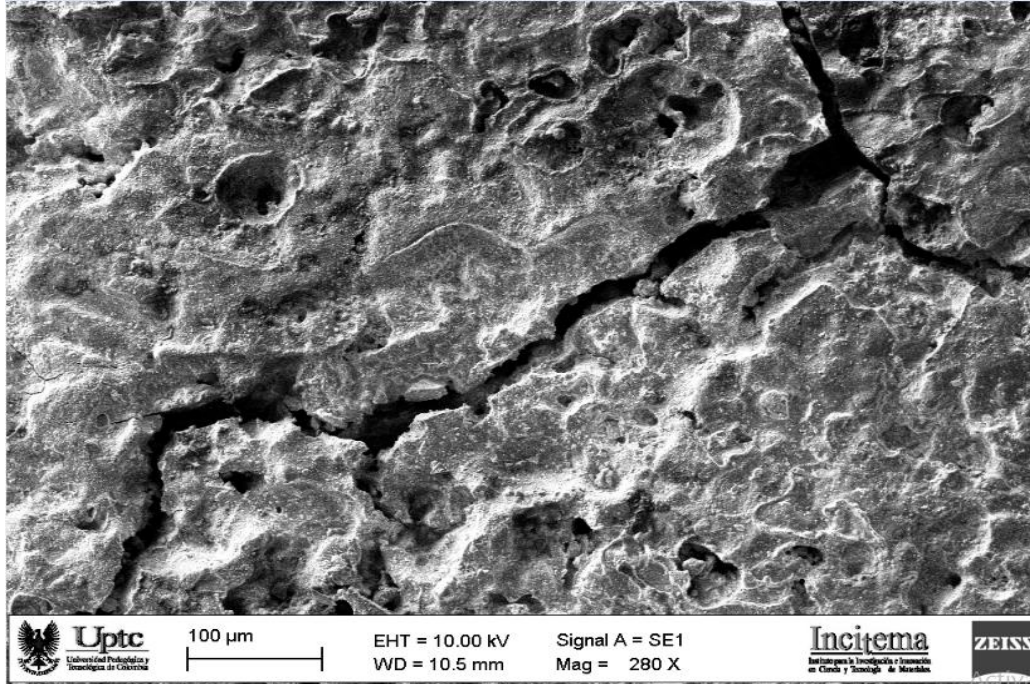
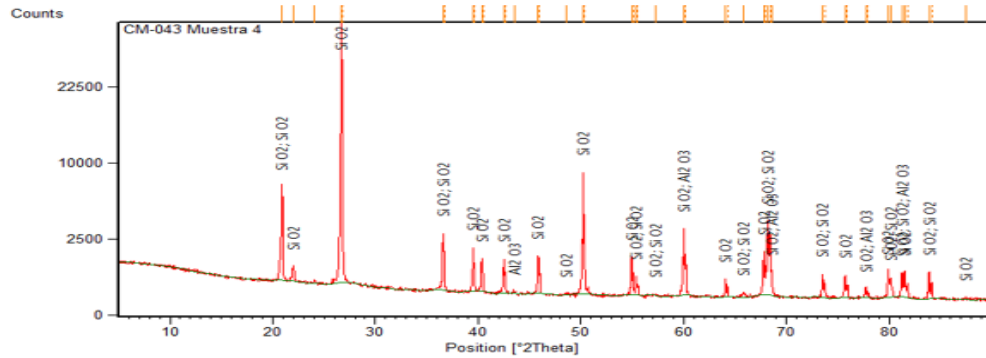


Figura 41. . MEB de cascarón desecho a 280X. Fuente: (Autores, 2017).

*Difracción de rayos X:* Con el fin de determinar las fases presentes en el cascarón desecho se muestra en la Figura 42 el difractograma del material. En esta figura, se puede identificar la presencia de fases como el cuarzo alfa, cuarzo sintético, cristobalita baja y corindón, siendo esta última fase un óxido originado por la reacción del oxígeno con el aluminio (Perea, 2001).



No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	SemiQuant [%]
1	<input checked="" type="checkbox"/>	01-078-1253	Quartz $\alpha$ -synthetic	Si O <sub>2</sub>	63	86
2	<input type="checkbox"/>	01-075-0923	Cristobalite low	Si O <sub>2</sub>	28	1
3	<input type="checkbox"/>	01-083-2468	Quartz - synthetic	Si O <sub>2</sub>	20	12
4	<input type="checkbox"/>	01-071-1127	Corundum	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	1

Figura 42 Difracción de rayos X del cascarón desecho. Fuente: (Autores, 2017).

Los parámetros cristalográficos de la fase mayoritaria cuarzo alfa hallada con el patrón de referencia n.º 01-078-1253, tiene las siguientes medidas de celda unitaria:  $a = b = 4.9120 \text{ \AA}$ ,  $c = 5.4020 \text{ \AA}$ ,  $\alpha = \beta = 90^\circ$ ,  $\gamma = 120^\circ$ , densidad calculada de  $2,65 \text{ g/cm}^3$  y un volumen de celda de  $112.8 \times 10^6 \text{ pm}^3$ . La anterior información confirma lo reportado en la literatura, en donde se describe dicha fase como una estructura correspondiente a una serie de tetraedros con el Si en el centro y los oxígenos en los vértices, de tal forma que cada oxígeno está asociado a dos átomos de silicio (Bilurbina & Liesa, 2000). A su vez, al presentar una densidad baja de  $2,65 \text{ g/cm}^3$  se comprueba que su estructura es relativamente compleja (Callister, 2007), con un factor de empaquetamiento de 0.60 podemos evidenciar que sus átomos no están empaquetados al máximo (Grandas et al., 2016).

Con base en la información obtenida en el difractograma podemos verificar que las fases presentes se encuentran dentro de las 22 conocidas: cuarzo alfa y cristobalita baja (Bilurbina & Liesa, 2000). El análisis semicuantitativo de las fases mineralógicas del cascarón desecho del proceso de microfundición se evidencia en la Figura 43. En este caso, el cuarzo alfa es la fase más representativa del material con un 86%, seguida del cuarzo sintético con un 12 % en peso.

Finalmente, la cristobalita baja y la fase corindón se encuentran en una mínima concentración del 1 % cada una, por lo tanto, se consideran trazas (Grandas et al., 2016).

Para determinar el índice de cristalinidad podemos detallar en la Figura 43 una ampliación del difractograma en los ángulos 26 y 27°, rango en el cual se encuentra el pico más alto con una intensidad de 49472 (u.a) seguida de un pico de menor intensidad con 841.03 (u.a).

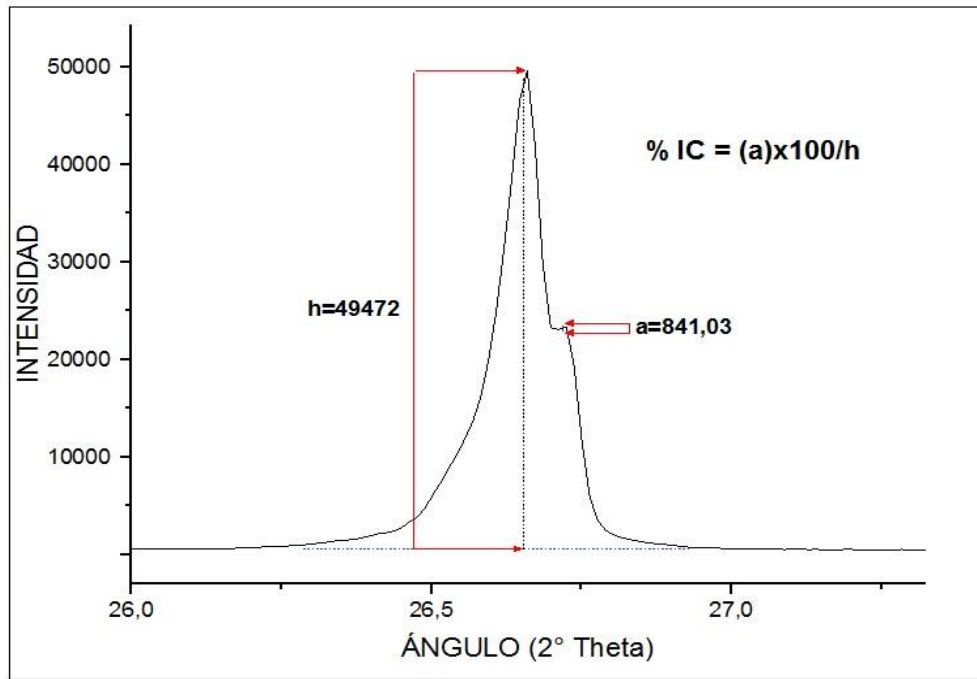


Figura 43. Ampliación del pico con mayor intensidad del difractograma de rayos X (DRX) de desecho de cascarón cerámico. Fuente: (Grandas et al., 2016)

Mediante el programa OriginPro 2016 se encontró un índice de cristalinidad (IC) de 1,7 %, el cual indica que la muestra es polimórfica formada por una fase cristalina de 1.7 % y un 98.3 % de fase amorfa. El alto porcentaje de fase amorfa también se puede concluir al observar el difractograma de la Figura 43, donde se puede ver la precaria formación de picos bien definidos, los cuales no son representativos. Los parámetros cristalográficos y las medidas de celda unitaria, al ser

modelados en el software CrystalMaker, proyectaron la estructura representada en la Figura 44 (Grandas et al., 2016).

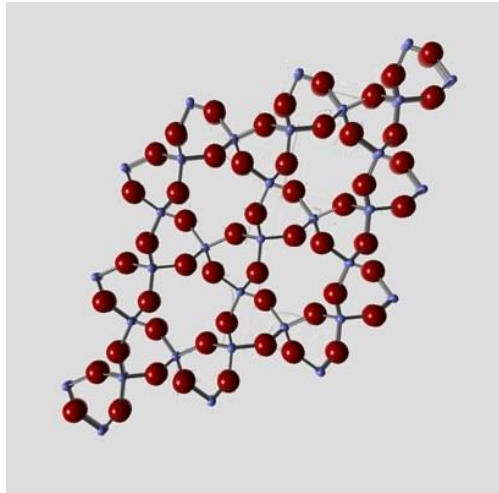


Figura 44. Estructura de la fase cuarzo alfa modelada en el software CrystalMaker.  
Fuente: (Grandas et al., 2016)

Como podemos observar, la estructura es amorfa, lo que corrobora un índice de cristalinidad (IC) bajo. Y se puede afirmar que existe una carencia de estructura cristalina ordenada, lo que conduce a la ausencia de contornos de grano, dislocaciones y fractura miento (Medina, 2010), como podemos ver en la microfotografía de la Figura 45.

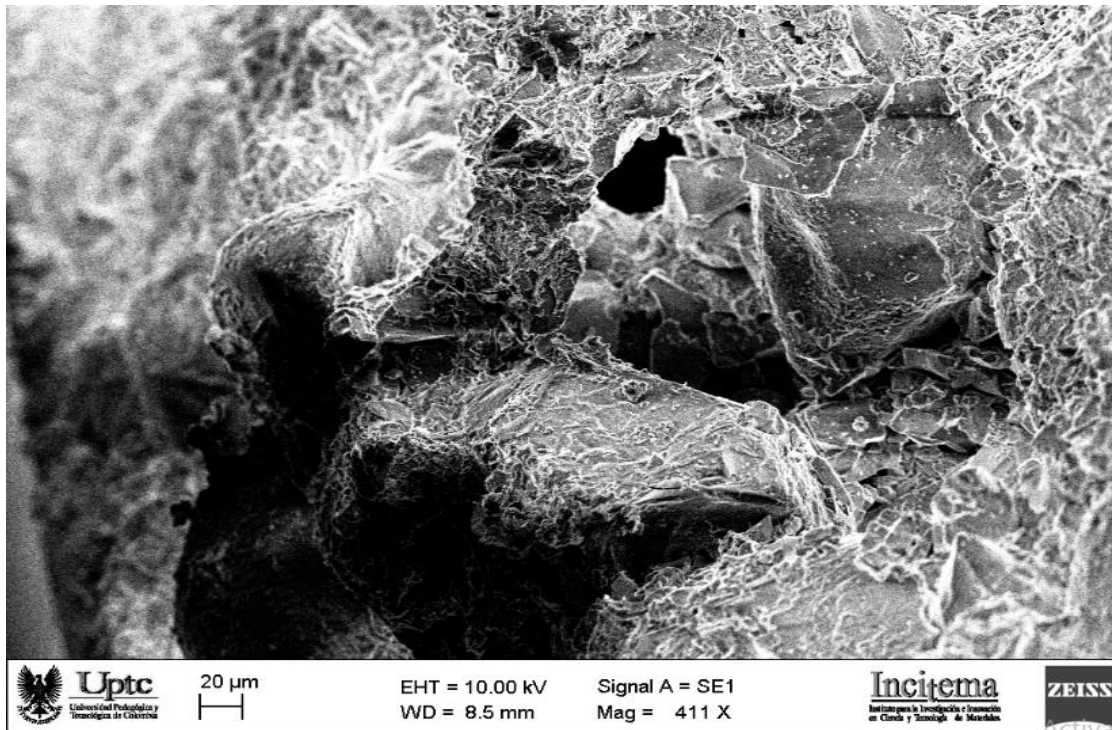


Figura 45. MEB de cascarón desecho a 411X. Fuente: (Autores, 2017).



## 5.5. CARACTERIZACIÓN UNIDADES CERÁMICAS MACIZAS FINALES

### 5.5.1. MICROSCOPIA ÓPTICA

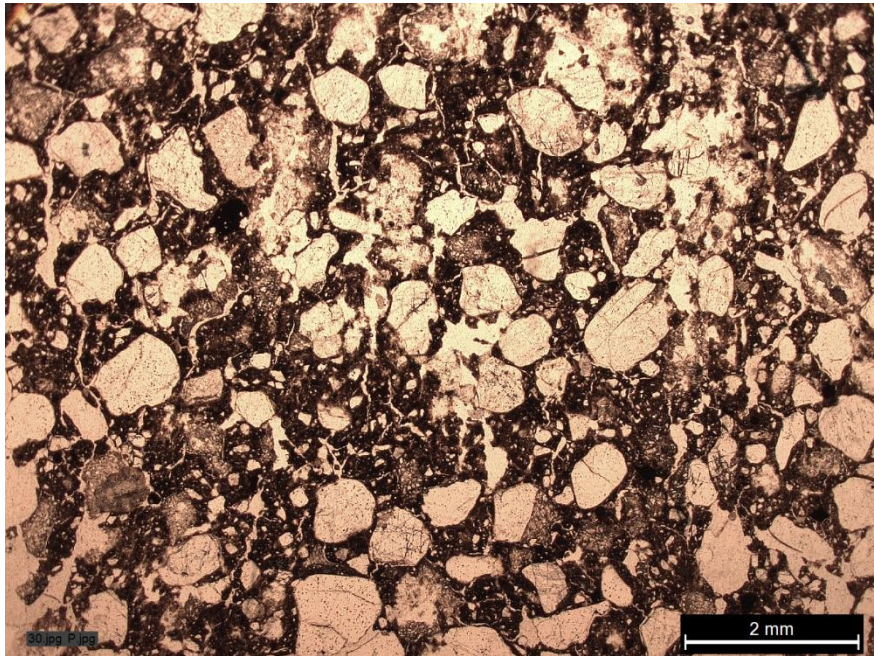


Figura 46 Microscopía óptica de matriz cerámica composición de arcilla 60% y cascara de microfundición 40% con granulometría malla 20. Fuente: (Autores, 2017).

En la microscopía óptica de la figura 46 a se muestra una composición de arcilla 60% y cascara de microfundición 40% con granulometría arena 20 donde la distribución es normal del grano en la matriz y también se presentan granos de cuarzo de tamaños inferiores por lo que en el proceso de tamizaje se hizo solo pasante por ello encontramos solo un límite de tamaño máximo de grano arena 20.

En la figura 47 a 10x 6 se observa la misma superficie cerámica (A) muestra grano de cuarzo de la arena 20 (B) se observa la matriz arcillosa (C) partículas de goethita las cuales son una de las formas mineralógicas del óxido de hierro. Se presentan cuarzos micro fracturados (D)

formando granos de arena 20 lo cual podría mejorar la propiedad de adsorción de la unidad cerámica se observan varios granos fracturados en las unidades cerámicas.

Los granos micro fracturados son formados por arenas de inferior granulometría con aglomerante también Las micro fracturas se generan, durante los procesos de contracción de volumen (en general, enfriamiento), ya que la resistencia a la tensión de las rocas es, aproximadamente, un orden de magnitud menor que su resistencia a la compresión (Cultrone, 2013).

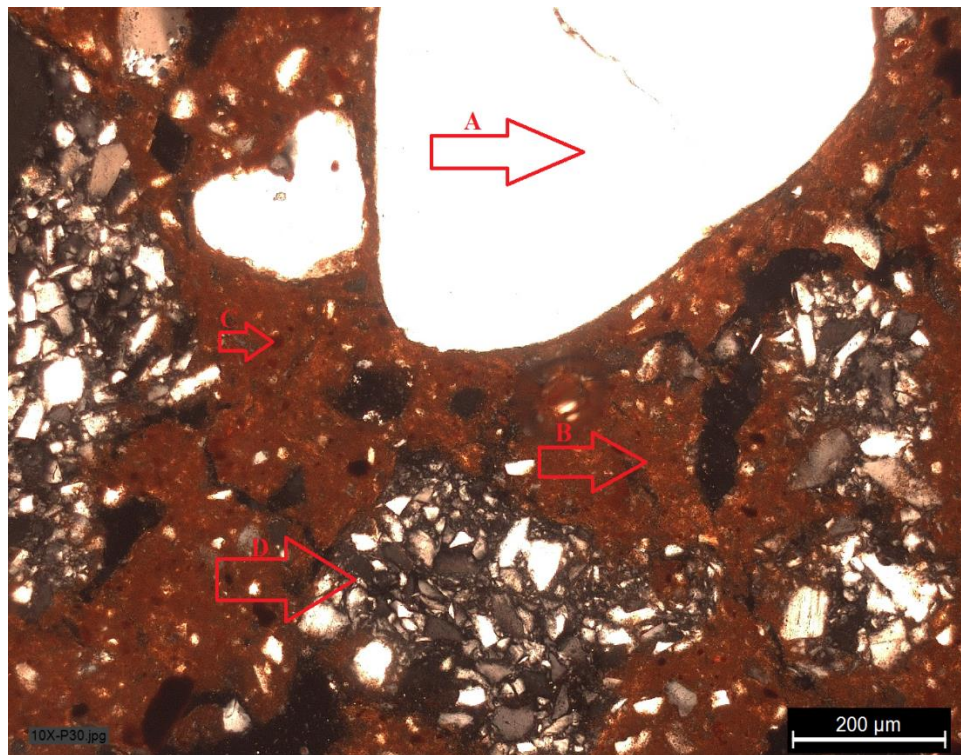


Figura 47. Microscopía óptica superficie cerámica a 10X. Fuente: (Autores, 2017).

TIPO DE COMPUESTO MINERALÓGICO ENCONTRADO	PORCENTAJE
Matriz de arcilla	37.99%
Goethita	9.4%
Cuarzo	52.55%

**Tabla 4.** Composición de matriz cerámica malla 20 y mezcla 60% Arcilla - 40% Cascarón. Cuento de puntos. Fuente: (Autores, 2017).

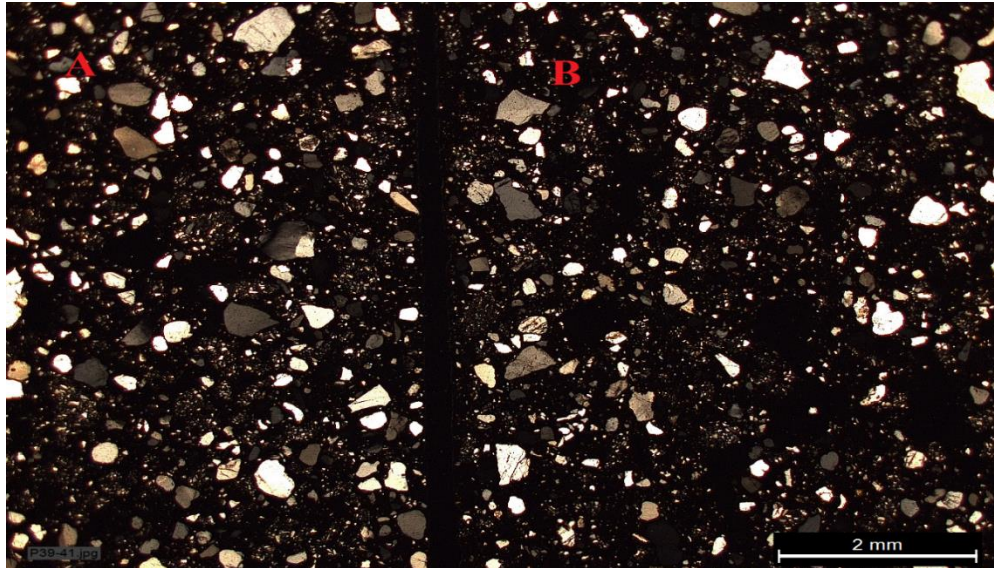


Figura 48. Microscopia óptica con filtro polarizado, A: Granulometría malla 30, composición 60% Arcilla - 40% Cascarón. B: 70% Arcilla - 30% Cascarón. Fuente: (Autores, 2017).

En la microscopia óptica de la figura 48 se presenta la comparación de dos superficies cerámicas la superficie (A) con composición 60% arcilla 40% cuarzo de granulometría arena 30 y en la superficie (B) se observa una superficie con composición de 70% arcilla y 30% cuarzo con la misma granulometría pasante máxima.

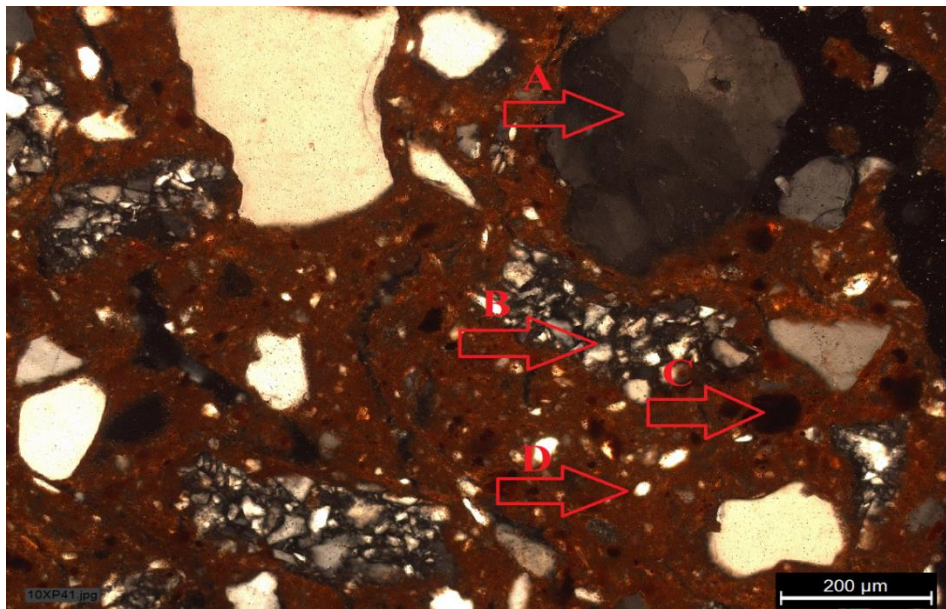
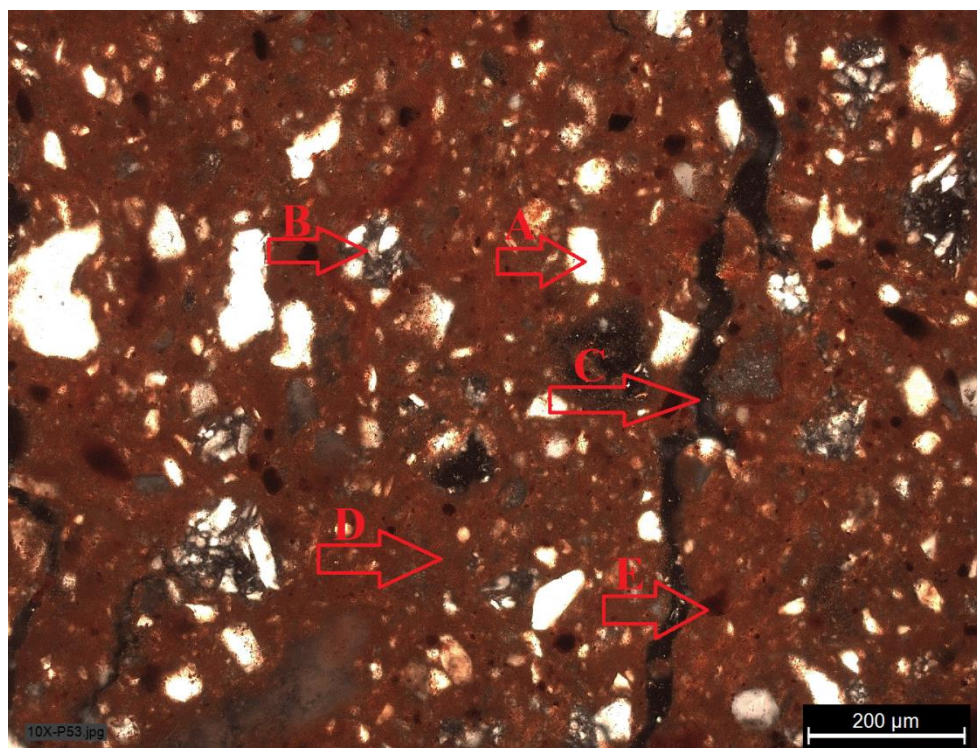


Figura 49. Microscopia óptica superficie cerámica malla 30 y composición 70% Arcilla - 30% Cascarón. Fuente: (Autores, 2017).

En la microscopía óptica de la figura 49a 10x de la superficie cerámica con composición de 70% arcilla 30% cuarzo granulometría arena 30. Se observa que el punto (A) es un grano de cuarzo el punto (B) es un punto de cuarzo compuesto el punto (C) es un punto de goethita y el punto (D) es un punto de matriz arcillosa

TIPO DE COMPUESTO MINERALÓGICO ENCONTRADO	PORCENTAJE
Matriz de arcilla	48.16%
Goethita	10.82%
Cuarzo	41.01%

**Tabla 5.** Composición de matriz cerámica malla 30 y mezcla 70% Arcilla - 30% Cascarón. **Fuente:** (Autores, 2017).



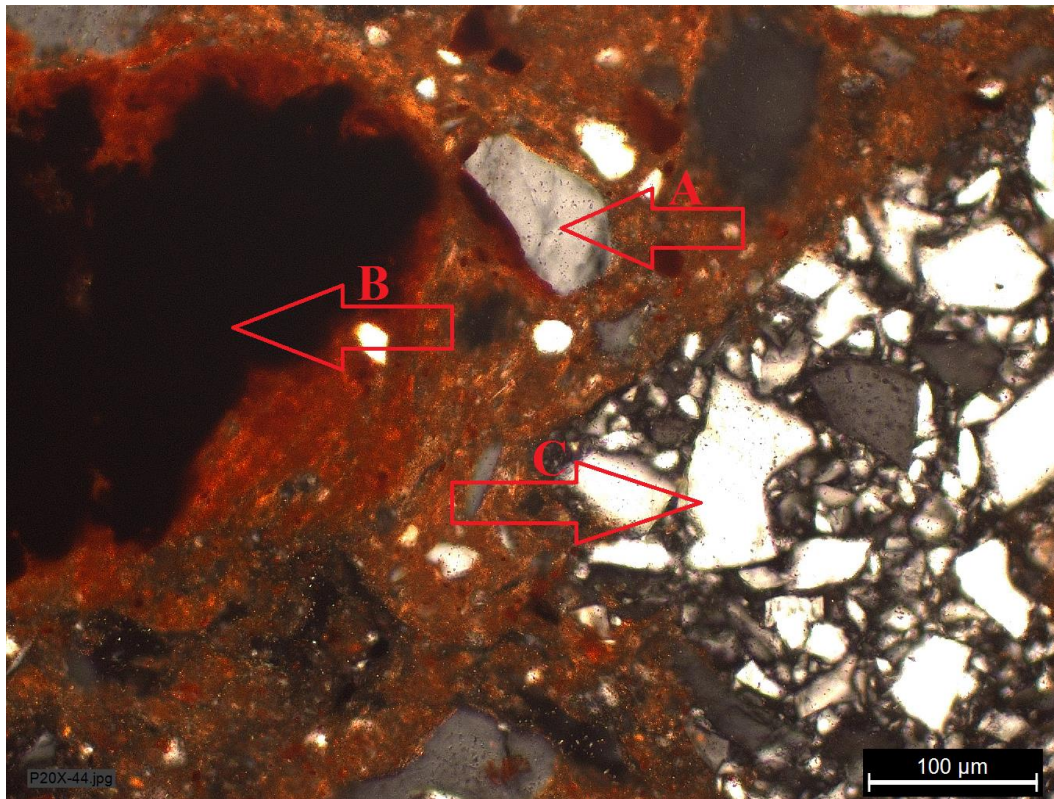
**Figura 50.** Microscopía óptica superficie cerámica malla 70 y composición 80% Arcilla - 20% Cascarón. **Fuente:** (Autores, 2017).

En la microscopía óptica de la figura 50 a 10x de la superficie cerámica con composición de 80% arcilla 20% cuarzo granulometría arena 70. en el punto (A) se observa un grano de cuarzo granulometría 70

pasante, en el punto (B) se observa un grano micro fisurado de pasante arena 70 en el punto (C) se observa una fisura en el punto (D) se observa la matriz arcillosa y en el punto (E) se observa un óxido de hierro goethita

TIPO DE COMPUESTO MINERALÓGICO ENCONTRADO	PORCENTAJE
Matriz de arcilla	57.79%
Goethita	7.65%
Cuarzo	34.56%

**Tabla 6.** Composición de matriz cerámica malla 70 y mezcla 80% Arcilla - 20% Cascarón.  
**Fuente:** (Autores, 2017).



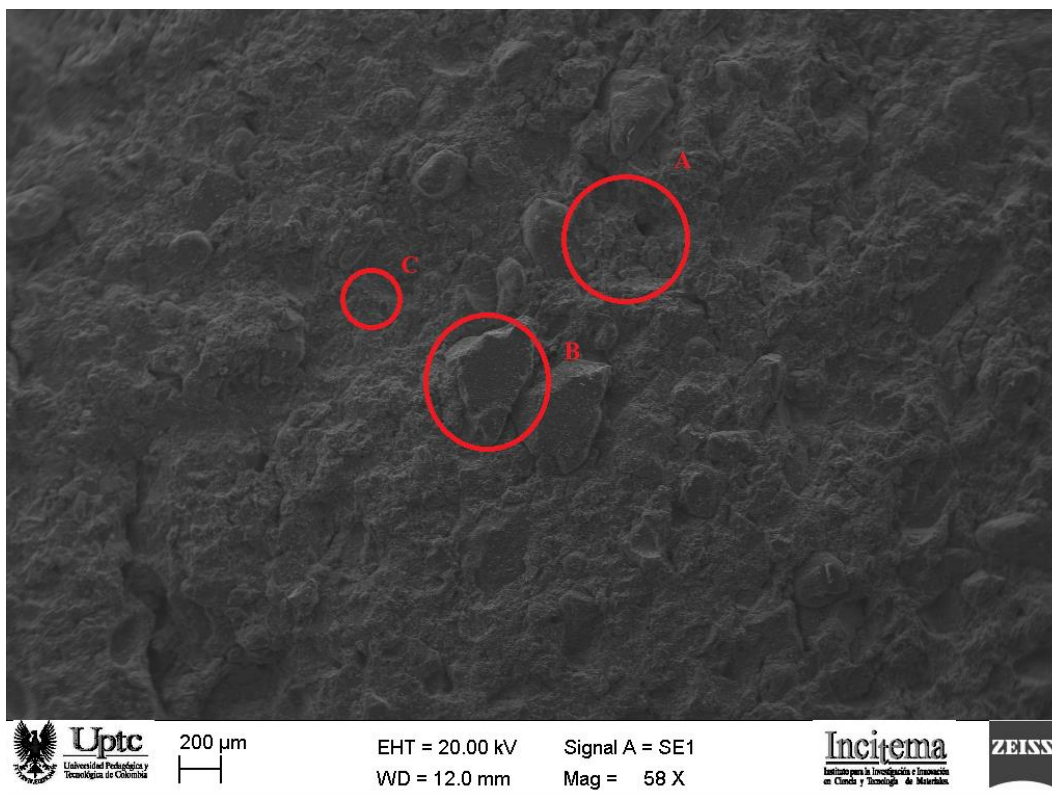
**Figura 51.** Microscopia óptica superficie cerámica malla 30 y composición por 80% Arcilla - 20% Cascarón. Fuente: (Autores, 2017).

En la microscopía óptica de la figura 51 a 20x de la superficie cerámica con composición de 80% arcilla 20% cuarzo granulometría arena 30.en el punto (A) se observan granos de cuarzo en el punto (B) se observan manchas de óxido de hierro goethita y en el punto (C) se observa granos micro fracturados.

TIPO DE COMPUESTO MINERALÓGICO ENCONTRADO	PORCENTAJE
Matriz de arcilla	53.79%
Goethita	7.58%
Cuarzo	38.62%

**Tabla 7.** Composición de matriz cerámica malla 30 y mezcla 80% Arcilla - 20% Cascarón.  
**Fuente:** (Autores, 2017).

### 5.5.2. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO



**Figura 52.** MEB superficie matriz cerámica malla 30 y composición 70% Arcilla - 30% Cascarón. Fuente: (Autores, 2017).

En la microscopía electrónica de barrido de la figura 52 se presenta la superficie de la matriz cerámica composición 70% arcilla y 30% cascaron desecho de microfundición y granulometría arena 30 a 57x en la cual se observa algunos desgarres de granos muy pequeños y una superficie muy homogénea con muy pocas grietas observables a este aumento en el círculo (A) observamos microgramos compuestos en (B) observamos granos de sílice y en (C) matriz arcillosa.

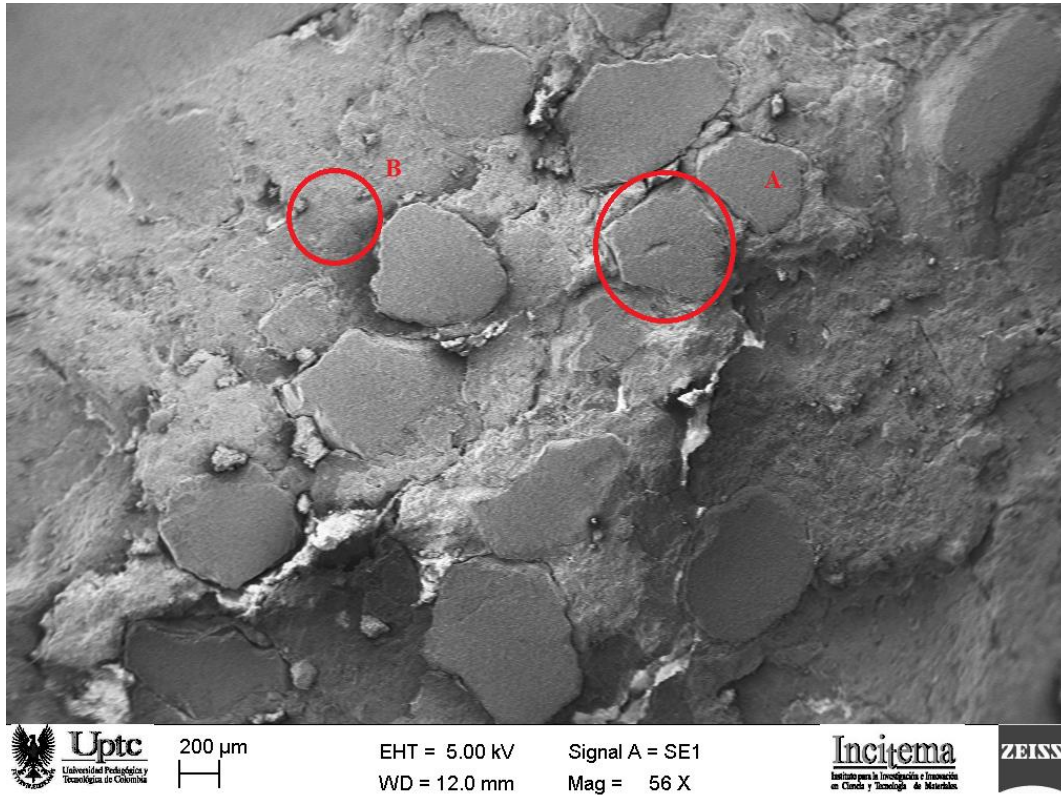


Figura 53. MEB superficie a 56X de matriz cerámica malla 20 y composición 60% Arcilla - 40% Cascarón. Fuente: (Autores, 2017).

En la microscopía electrónica de barrido de la figura 53 a 56X se muestra una composición de arcilla 60% y cascaron de microfundición 40%, con granulometría malla 20 se muestra la forma del grano angular (A) del desecho de microfundición y su distribución en la superficie con la matriz arcillosa (B). se observa también granos desprendidos.

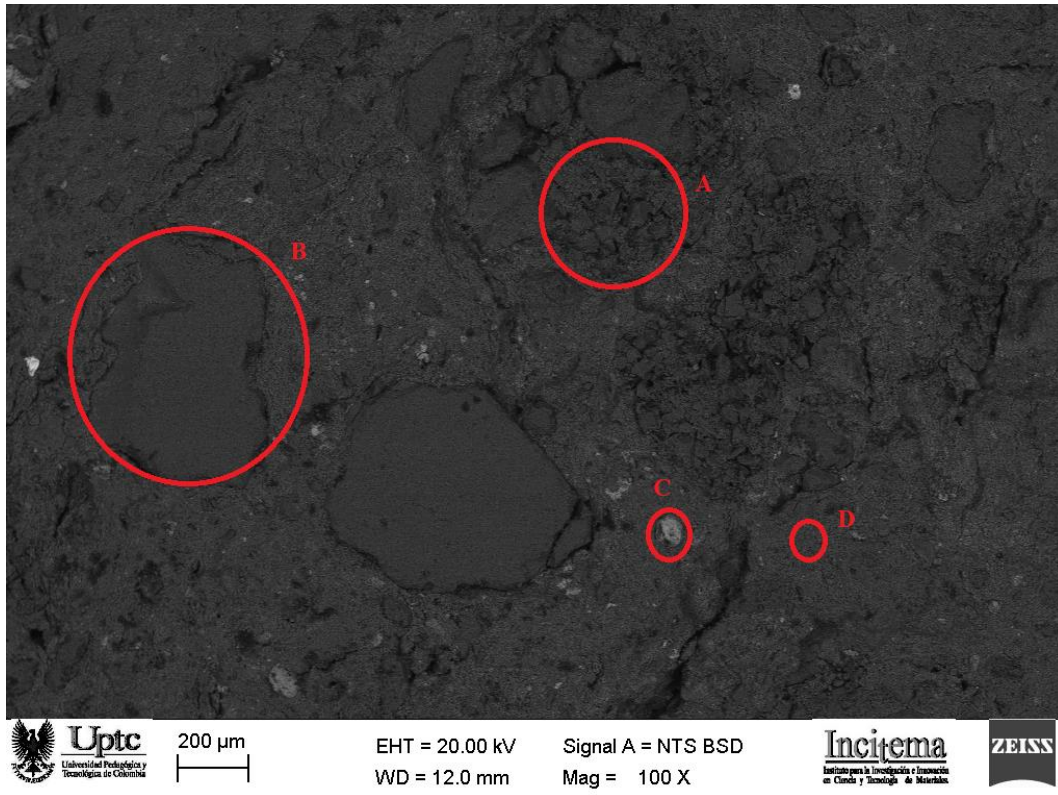


Figura 54. MEB superficie cerámica reforzada con cascara de microfundición 100X.  
Fuente: (Autores, 2017).

En la microscopía electrónica de barrido de la figura 54 a 100x se muestra la unidad cerámica compuesta por arcilla 70% y desecho de microfundición 30% de granulometría 30 en donde se observa (A) microgramos compuestos por aglomerante y granos de cuarzo, (B) granos de cuarzo, (C) óxido de hierro que le da la coloración rojiza a las unidades y (D) la cual es la matriz arcillosa.



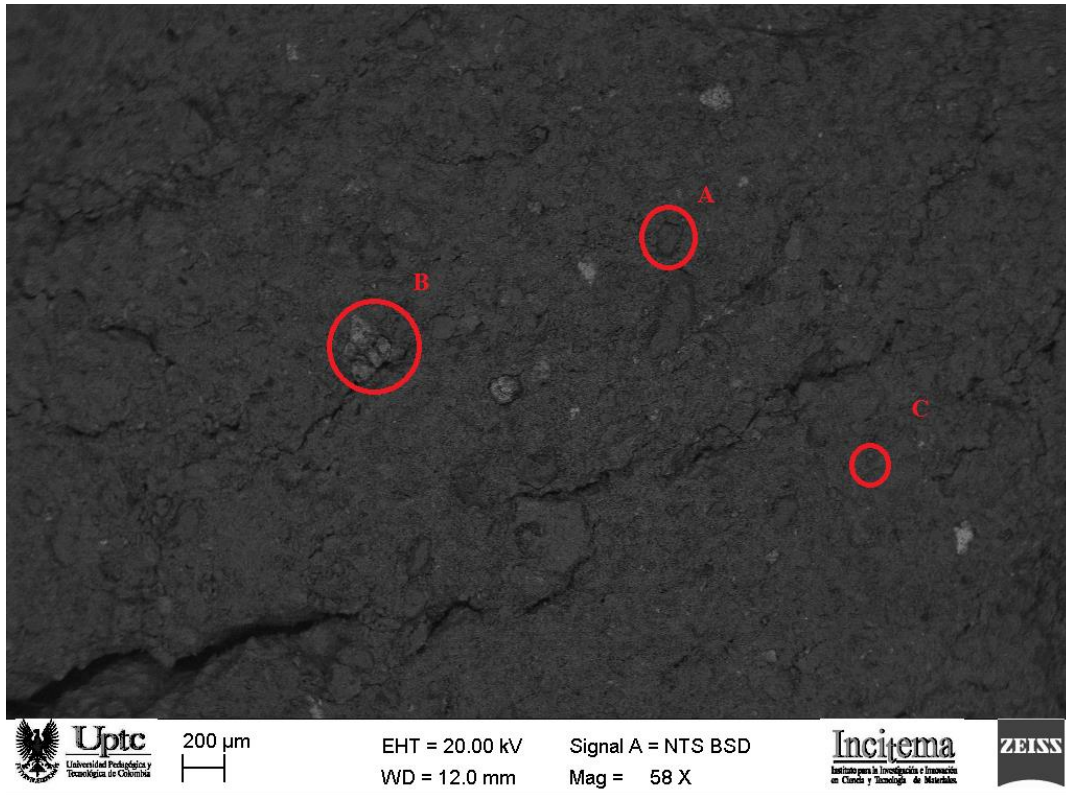


Figura 55. MEB superficie cerámica reforzada con cascarón de microfundición a 58X.  
Fuente: (Autores, 2017).

En la microscopía electrónica de barrido de la figura 55 a 58 x se muestra la unidad cerámica compuesta por arcilla 80% y desecho de microfundición 20% de granulometría 70 observan algunas grietas se observan los granos de cuarzo (A) los derivados de los óxidos de hierro (B) y la matriz arcillosa cocida (C).

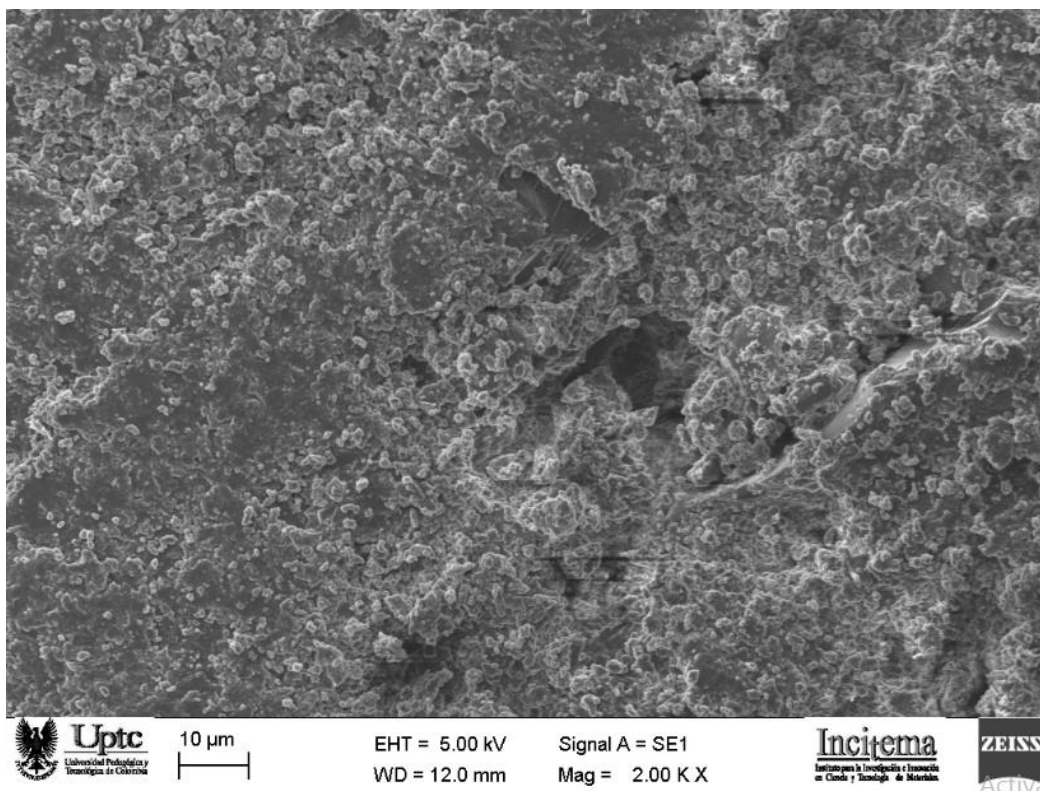


Figura 56. MEB superficie cerámica reforzada con cascarón de microfundición a 2000X.  
Fuente: (Autores, 2017).

En la microscopía electrónica de barrido de la figura 56 a 2000x se muestra una composición de arcilla 60% y cascaron de microfundición 40% con granulometría arena 20 se observa un microporo y la superficie coloidal por la presencia de óxidos.

### 5.5.3. RESISTENCIA MECÁNICA A LA COMPRESIÓN

La resistencia mecánica a la compresión (ver montaje en la figura 57) junto con la absorción son las propiedades más importante para los ladrillos los clasifica entre estructurales y no estructurales según la NTC 4205 en la figura 58 se muestra la gráfica de comportamiento de resistencia mecánica en función de la temperatura de sinterizado de la granulometría de desgrasante de la composición y la cantidad de desgrasante.

Tipo	Resistencia mínima <sup>1)</sup> a la compresión MPa (kgf/cm <sup>2</sup> )	
	Prom 5 U	Unidad
PH	5,0 (50)	3,5 (35)
PV	18,0 (180)	15,0 (150)
M	20,0 (200)	15,0 (150)

**Tabla 8.** Propiedades físicas de las unidades de mampostería estructural. **Fuente:** (NTC 4205)

Tipo	Resistencia mínima <sup>1)</sup> a la compresión MPa (kgf/cm <sup>2</sup> )	
	Prom 5 U	Unidad
PH	3,0 (30)	2,0 (20)
PV	14,0 (140)	10,0 (100)
M	14,0 (140)	10,0 (100)

**Tabla 9.** Propiedades físicas de las unidades de mampostería no estructural. **Fuente:** (NTC 4205)

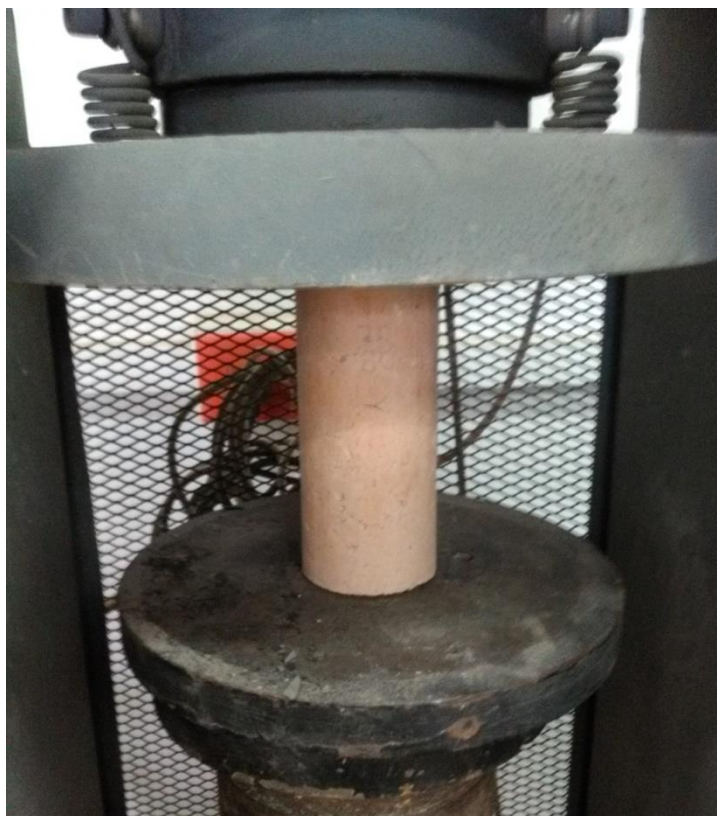


Figura 57. Montaje ensayo universal de resistencia mecánica a la compresión de cilindro con matriz de arcilla y refuerzo de cascarón de microfundición. Fuente: (Autores, 2017).

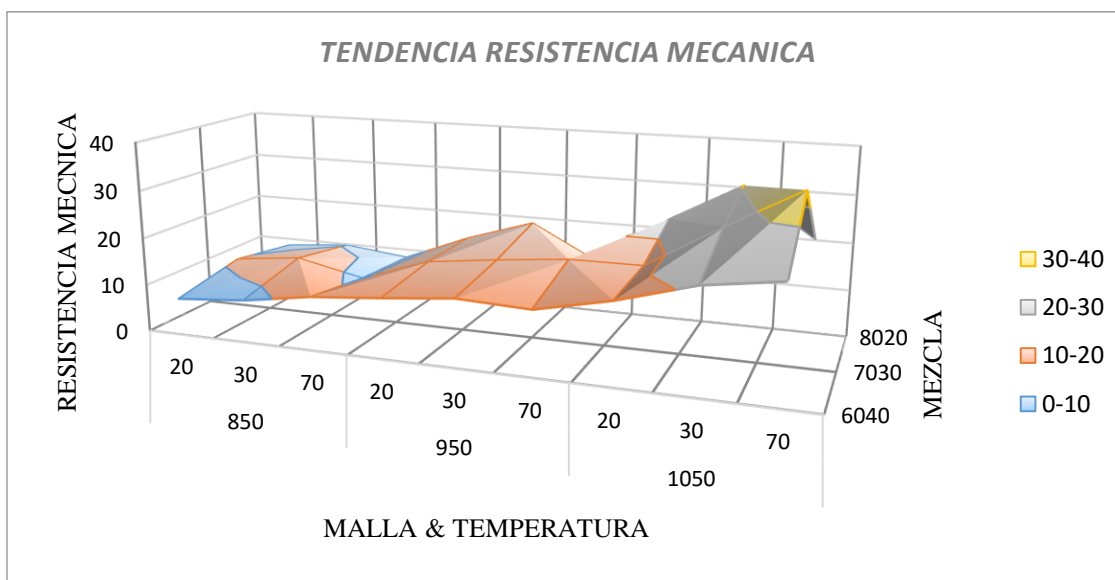


Figura 58. Gráfico de tendencia de la propiedad resistencia mecánica a la compresión de unidades cerámicas. Fuente: (Autores, 2017).

En la gráfica 59 se muestra el Grafica de comportamiento de contracción frente a malla & temperatura ya que fueron las más influyentes según el modelo estadístico podemos observar que a medida que aumenta la temperatura también aumenta la resistencia mecánica además muestra que algunas unidades no superan la norma ntc 4205 las cuales son las membranas de composición 60% arcilla 40% arena granulometría arena 20 a temperatura de sinterización de 850 grados Celsius.

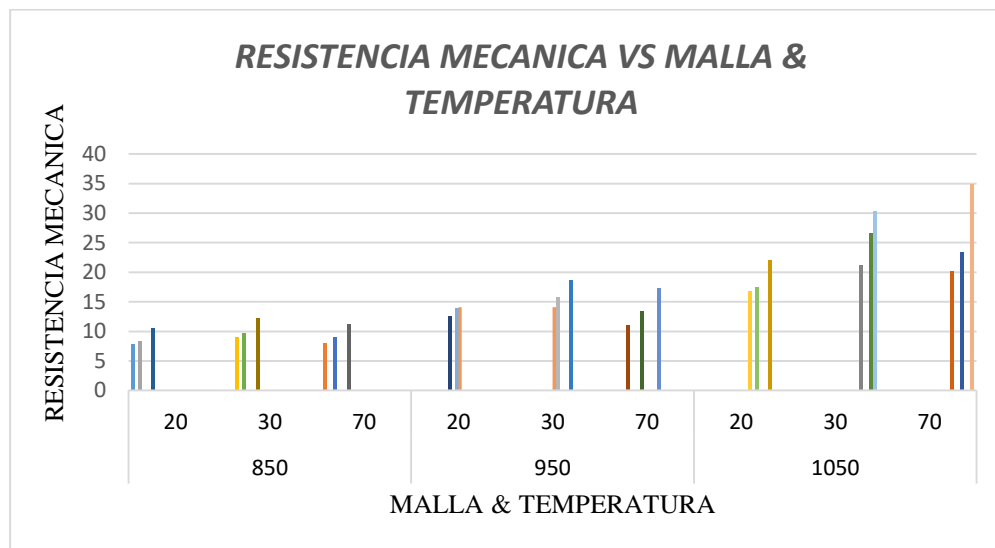


Figura 59. Gráfica de comportamiento de resistencia mecánica a la compresión frente a malla y temperatura. Fuente: (Autores, 2017)

#### 5.5.4. ABSORCIÓN

La absorción es muy importante en la fabricación de ladrillos por que permite la cohesión por su porosidad con los morteros pero no puede ser muy alta porque afecta la resistencia mecánica y deshidrata el mortero.

En la figura 60 se muestra como varía la absorción con respecto a la temperatura mezcla y porcentaje de composición se observa que la variación más grande de absorción ocurre con la malla y la mezcla lo que corrobora el modelo planteado en el capítulo 4 donde se ve que la mayor influencia sobre la absorción es la malla o granulometría. En las tablas 10 y 11 se encuentran los parámetros máximos de porcentaje de absorción de los ladrillos ya sean estructurales o no estructurales usados para interiores o exteriores.

Tipo	Absorción de agua máxima en %			
	Interior *		Exterior	
	Prom 5 U	Unidad	Prom 5 U	Unidad
PH	13	16	13,5	14
PV	13	16	13,5	14
M	13	16	13,5	14

**Tabla 10.** Propiedades físicas de las unidades de mampostería estructural. **Fuente:** (NTC 4205)

Tipo	Absorción de agua máxima en %			
	Interior		Exterior	
	Prom 5 U	Unidad	Prom 5 U	Unidad
PH	17	20	13,5	14
PV	17	20	13,5	14
M	17	20	13,5	14

**Tabla 11.** Propiedades físicas de las unidades de mampostería no estructural. **Fuente:** (NTC 4205)

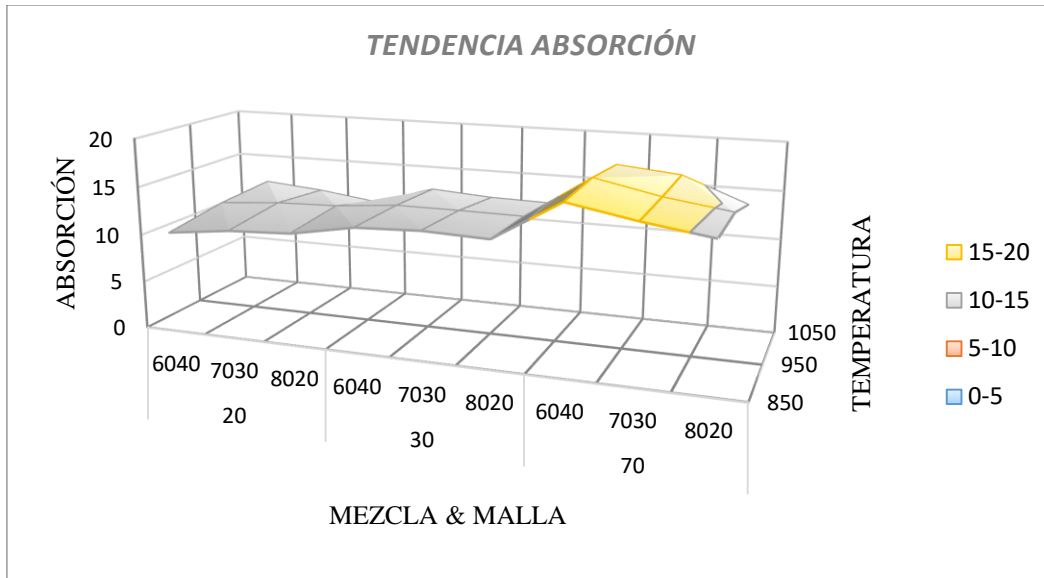


Figura 60. Gráfico de tendencia de la propiedad absorción de las unidades cerámicas.  
Fuente: (Autores, 2017).

En la figura 61 se observa como varia la absorción con respecto a la mezcla arrojando que la mezcla cuando su contenido de desgrasante (cascaron de microfundición) aumenta la absorción disminuye causado por la poca porosidad de los granos de cuarzo pero mitigado por los granos micro fracturados.

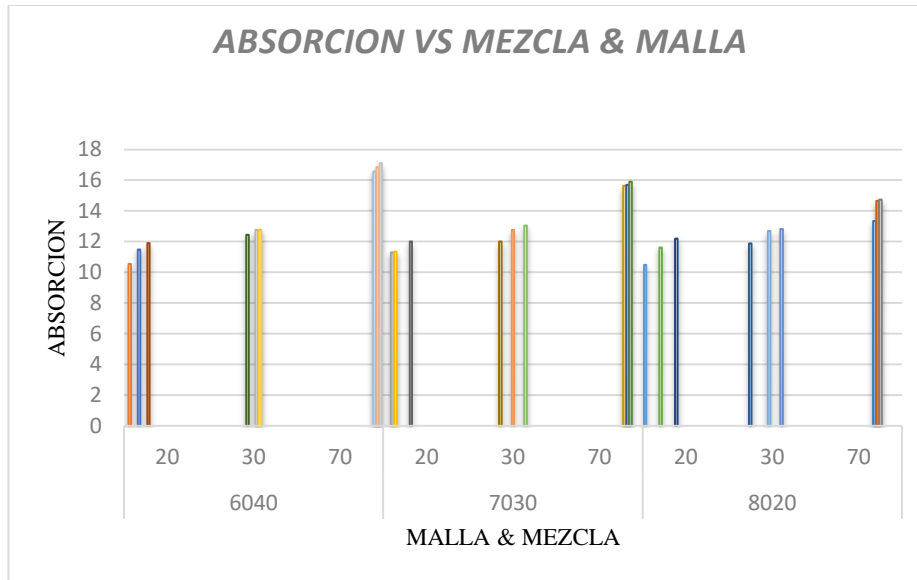


Figura 61. Gráfica de comportamiento de absorción frente a mezcla y malla. Fuente: (Autores, 2017).

CONTRACCIÓN



Las contracciones en los cerámicos se presentan por la pérdida de agua en secado y cocción también se presentan por los cambios mineralógicos que ocurren cuando se elevan las temperaturas. En la figura 62 se observa la contracción en función de la temperatura la malla y la composición se observa que la contracción se afecta más con malla y temperatura si la temperatura aumenta la contracción aumenta y cuando el grano es más fino también aumenta.

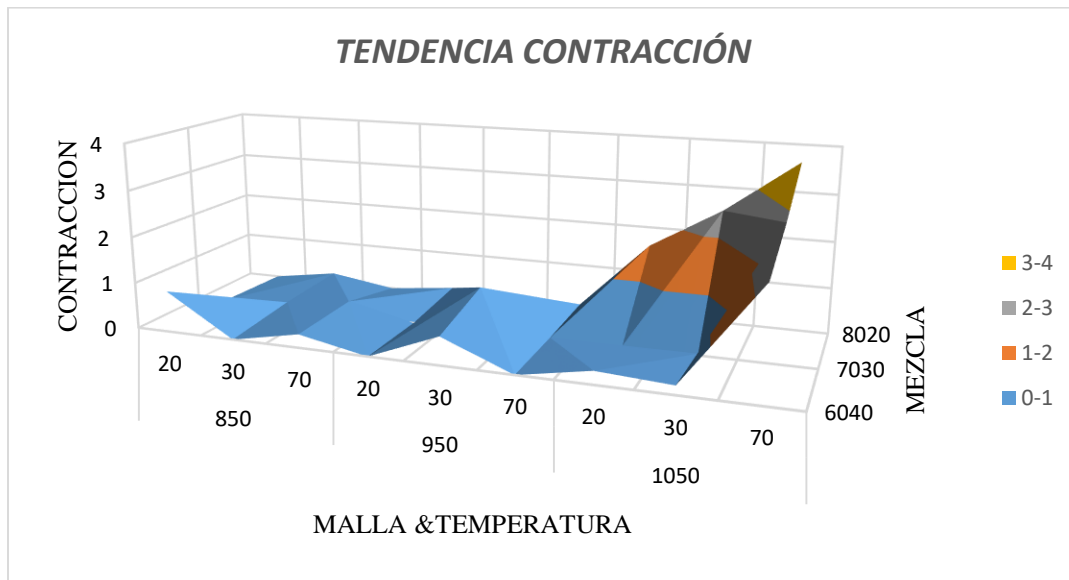


Figura 62. Gráfico de tendencia de la propiedad contracción de las unidades cerámicas.  
Fuente: (Autores, 2017).

En la grafica 63 vemos la grafica contraccion vs malla&temperatura que fueron las mas influyente según el modelo estadístico en el cual podemos ver como al aumentar la temperatura la contraccion es mas grande y cuando aumenta la cantidad de cascara aumenta la contraccion.

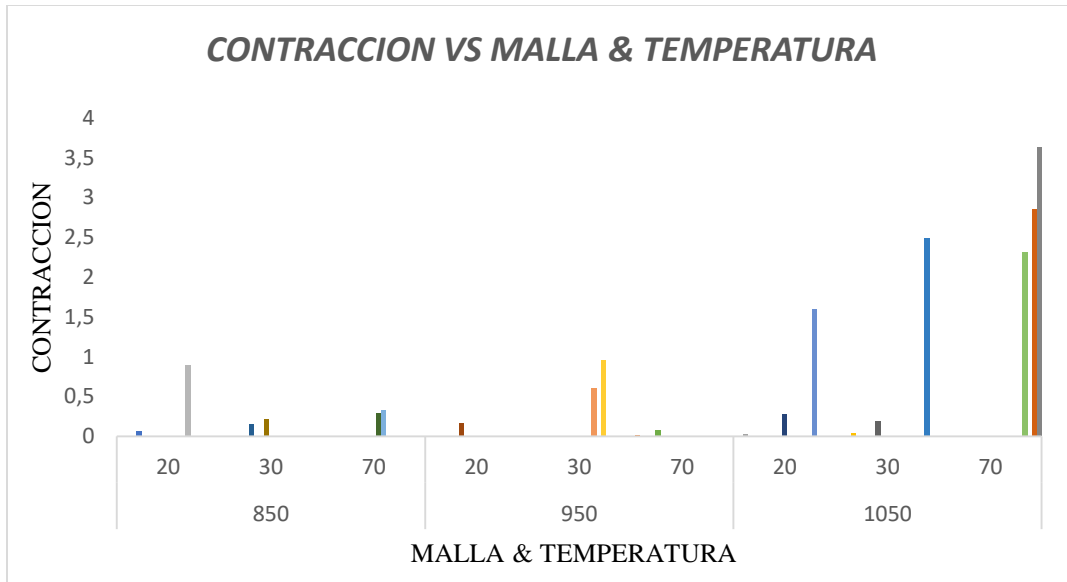


Figura 63. Grafica de comportamiento de contracción frente a malla y temperatura  
Fuente: (Autores, 2017).

#### 5.5.5. DENSIDAD APARENTE

La densidad aparente es la relación entre el peso y el volumen del material en este caso el ladrillo viene estrechamente relacionada con la porosidad del material y por ende relaciona también propiedades del material como la conductividad térmica y sonora en la figura 64 se Grafica de comportamiento de densidad aparente frente a malla composición y temperatura y se ve la completa relación de la densidad aparente con el tamaño de grano del material desgrasante entre menor tamaño del grano mayor densidad. En la figura 65 se muestra la gráfica de comportamiento de la propiedad densidad aparente frente a malla y composición ya que estas fueron influyentes en el modelo estadístico. Se muestra que la malla ejerce la mayor influencia sobre la densidad aparente. Y que la composición 80-20 tiene un efecto contrario con la granulometría disminuye la densidad.

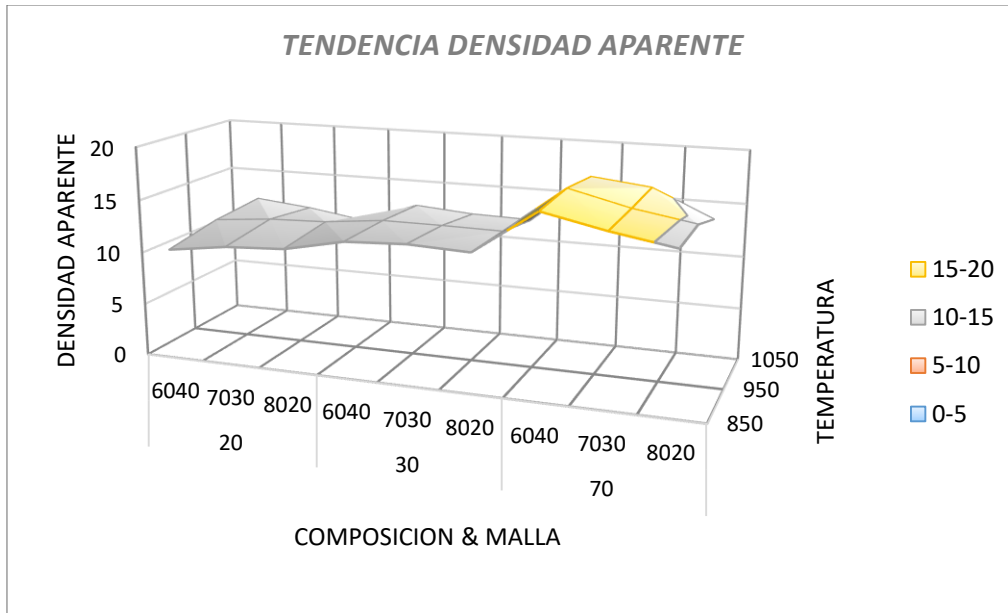


Figura 64. Gráfico de tendencia de la propiedad densidad aparente de las unidades cerámicas. Fuente: (Autores, 2017)

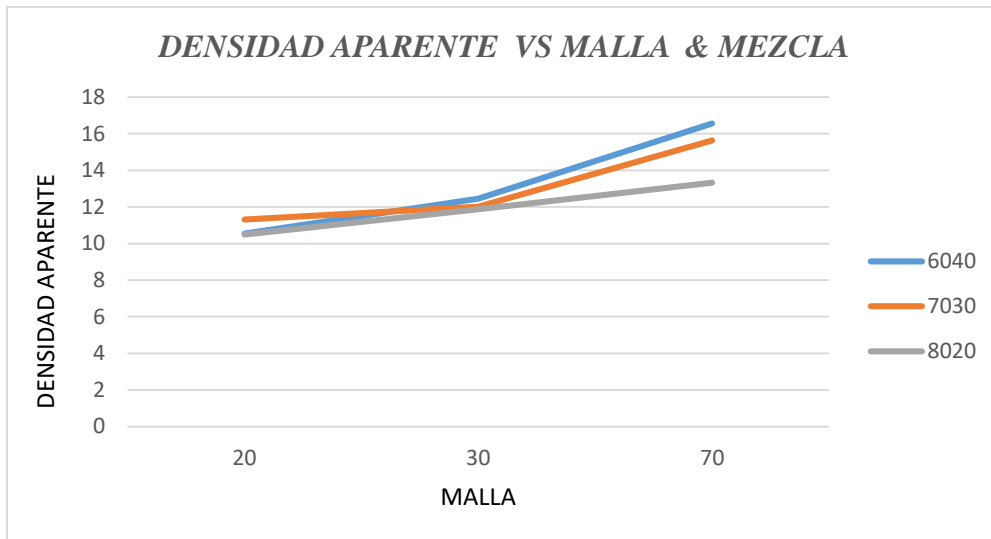


Figura 65. Grafica de comportamiento de densidad aparente frente a malla y mezcla Fuente: (Autores, 2017).

## 6. SIMULACIÓN DE LAS UNIDADES CERÁMICAS MACIZAS EN SOLIDWORKS

### 6.1. BOCETO DE LA UNIDAD CERÁMICA MACIZA

En primer lugar, en el plano Alzado de la plantilla se trazó una superficie rectangular con medidas especificadas por norma técnica para el ladrillo macizo, a dicha superficie se le aplicó la función extruir para darle la respectiva altura (ver figura 66). Las dimensiones de la pieza fueron 100 x 210 x 70 mm, la cara superficial tiene un área de 21000 mm<sup>2</sup>.

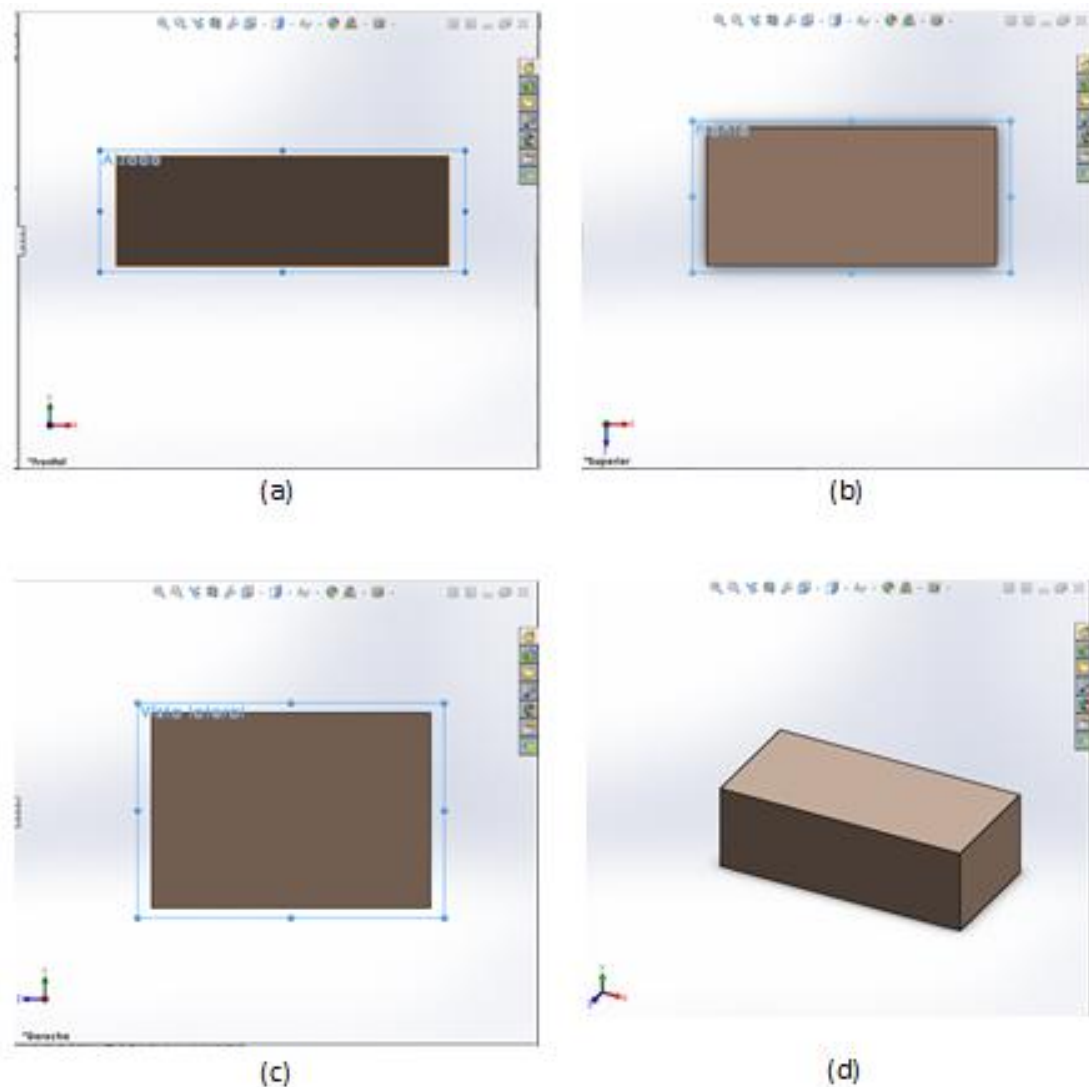


Figura 66. Vista frontal (a), vista superior (b), vista lateral (c) y vista isométrica (d) de la unidad cerámica maciza simulada en Solidworks. Fuente: (Autores, 2017).

## 6.2. CONFIGURACIÓN DEL NUEVO MATERIAL CONFORME LAS PROPIEDADES FÍSICAS ENCONTRADAS

La simulación de la unidad cerámica maciza se realizó con la mezcla 60% Arcilla – 40% Cascarón de microfundición, malla 30 y temperatura de sinterización 950°C. Se seleccionó esta composición debido a que es una que presentó buen comportamiento mecánico y porcentajes de absorción admisibles por norma.

A continuación se presenta en la figura 67 las propiedades que se tuvieron en cuenta para simular el comportamiento de la unidad cerámica maciza, la cual fue etiquetada con el nombre 60A - 40 C. Cabe resaltar que algunas de las propiedades allí reportadas, se determinaron por literatura debido a que para su cálculo real requería de otros ensayos que no estaban contemplados en la caracterización como tal de la unidad.

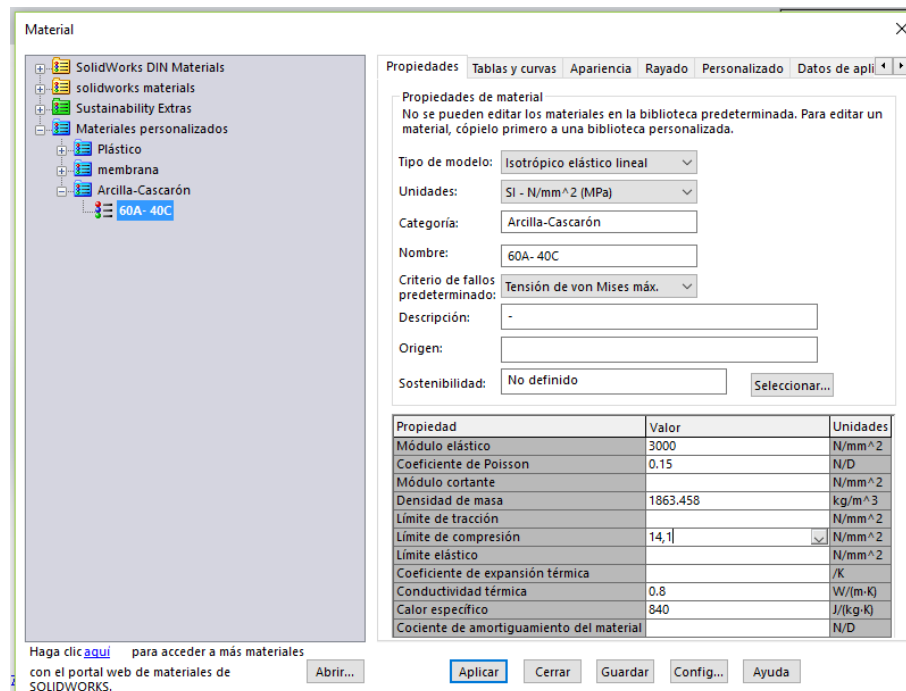


Figura 67. Ventana del programa Solidworks donde se registran las propiedades del nuevo material. Fuente: (Autores, 2017).

Una vez se han aplicado las características del material 60A – 40 C, se procede a realizar un nuevo estudio, el cual en este caso se denominó: Análisis Estático (60A – 40C). Se aplica una sujeción fija en la cara que tiene contacto con el plato inferior donde se apoya la pieza cuando se realiza el ensayo de resistencia a la compresión. Tal como se muestra en la figura 68, los vectores verdes indican la cara con geometría fija en la pieza.

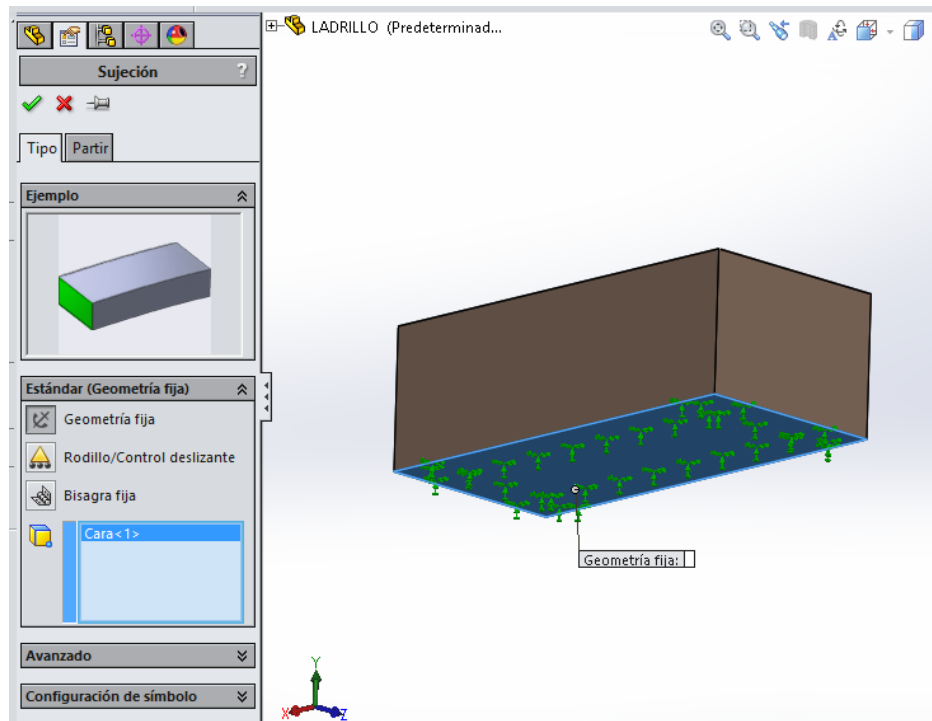


Figura 68. Sujeción de geometría fija en la cara inferior de la unidad cerámica maciza.  
Fuente: (Autores, 2017).

Respecto a las cargas internas de la pieza, se seleccionó Fuerza en la dirección vertical, en este caso, en la cara superior. Las unidades que se manejaron para la fuerza fueron del Sistema Internacional, con un valor de 315000 N en un área de 21000 mm<sup>2</sup>. La fuerza aplicada hace referencia a la carga de rotura estipulada en la norma NTC 4205, para que el ladrillo sea estructural, en este caso, 15 MPa por unidad (ver figura 69).

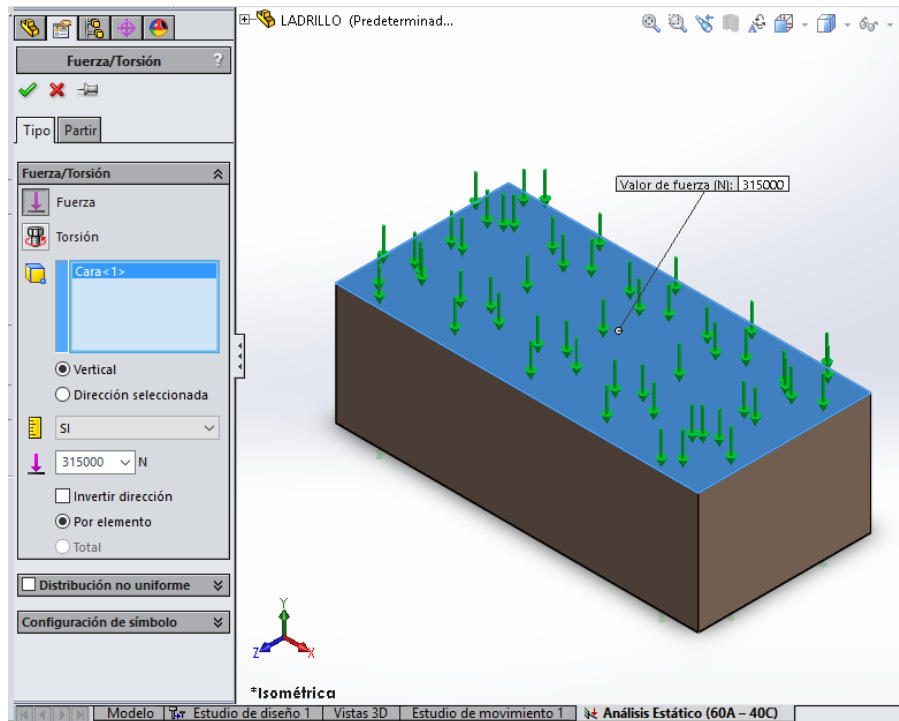


Figura 69. Vectores de fuerza sobre la cara superior de la unidad cerámica maciza.  
Fuente: (Autores, 2017).

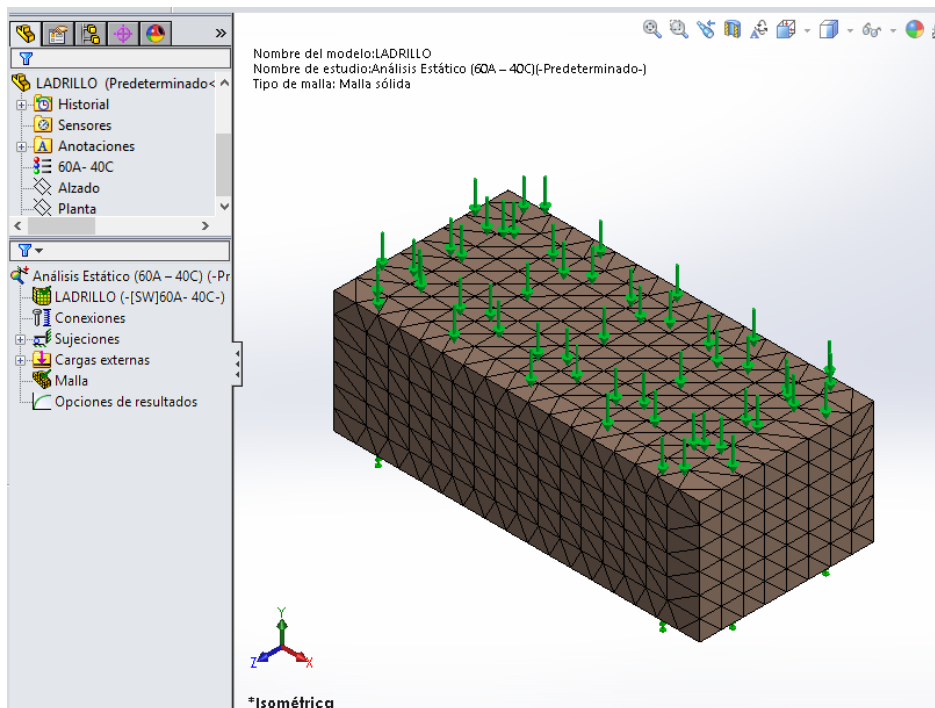


Figura 70. Unidad cerámica maciza con malla gruesa. Fuente: (Autores, 2017).

### 6.3. ANÁLISIS DE TENSIONES

Con el fin de determinar donde falla la unidad cerámica o en donde se encuentran sus puntos débiles, se procede a enmallar el material, tal como se observa en la figura 70. A continuación se ejecuta el análisis con todos los parámetros anteriormente seleccionados.

En la figura 71 se presenta el análisis de tensiones, allí podemos observar que las partes más tensionadas son la cara inferior y las esquinas de la unidad cerámica maciza (ver figura 72). La zona sombreada con azul oscuro, es la zona en la que menos va a sufrir el material.

Del presente, análisis se deduce que el material resiste la carga necesaria para caracterizarse como ladrillo estructural, debido a que el material no presenta puntos representativos donde sufra o no resista el material.

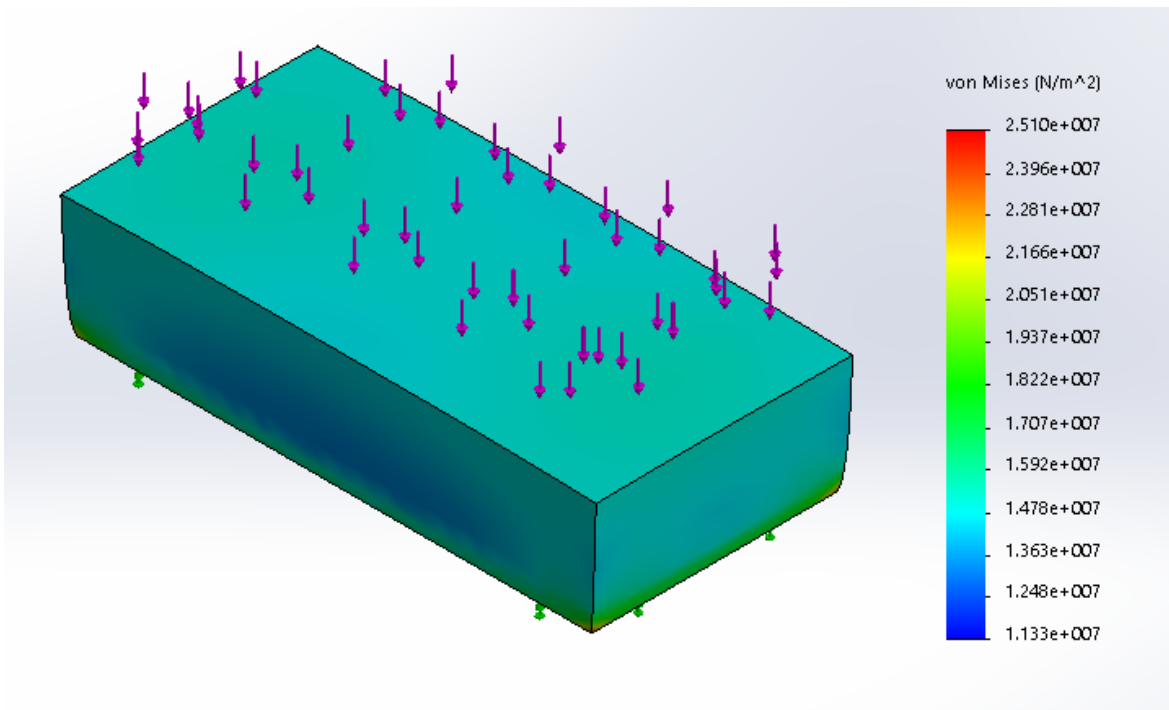


Figura 71. Análisis de tensiones de la unidad cerámica maciza. Fuente: (Autores, 2017).



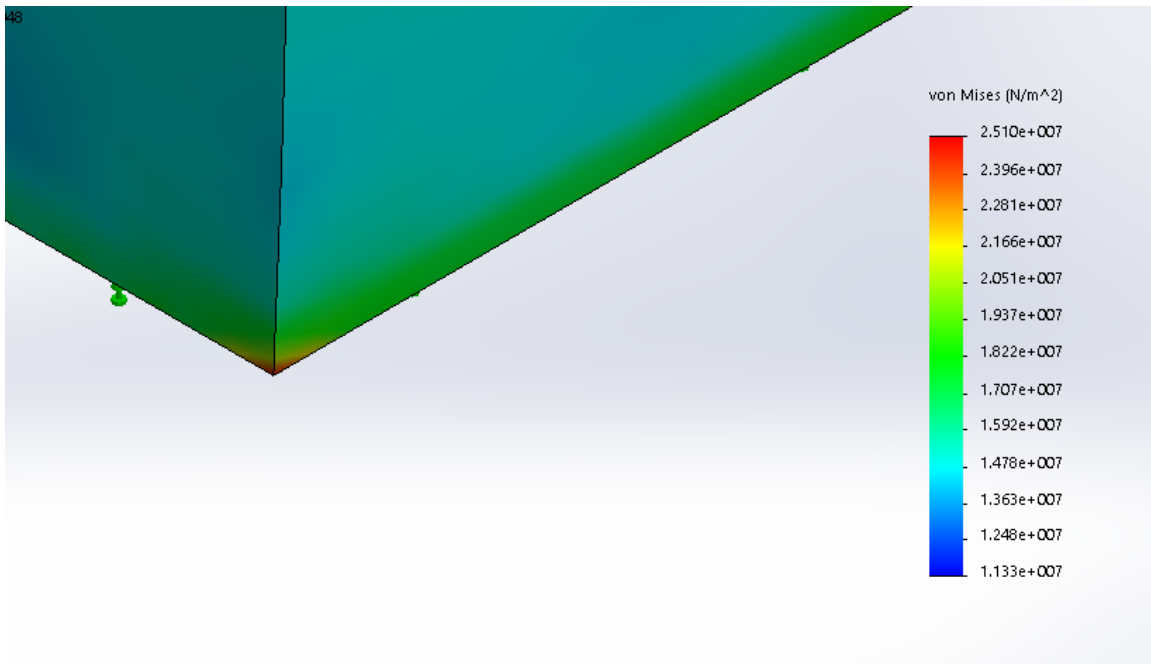


Figura 72. Aproximación esquina tensionada de la unidad cerámica maciza. Fuente: (Autores, 2017).

## 7. CONCLUSIONES

- Se describieron los principales parámetros del proceso de elaboración de unidades cerámicas, como son: la temperatura de sinterización, mezcla, granulometría del desgrasante, tipo de conformación. Adicionalmente, las variables correspondientes como lo son: densidad, resistencia mecánica y absorción.
- Se diseñó una metodología para caracterizar las materias primas no solo en su disposición final, también durante el proceso de elaboración de especímenes cerámicos.
- Se concluye que la arcilla es de tipo común con un 4,57% de óxido de hierro, 61,8% silicatos y 29% alúmina, caracterizándola como una arcilla apta para la alfarería
- Las arenas de microfundición arrojaron una forma angular y redondeada en sus diferentes granulometrías, esta característica permite gran calidad superficial y mejora la permeabilidad. En las arenas predominan las fases mineralógicas del óxido de silicio tales como: Moganita, Cuarzo alpha, Coesita, entre otras.
- En el cascaron desecho se presentan diferentes fases mineralógicas y nuevos componentes, esto es debido a la interacción del cascaron con el acero colado, así como la velocidad de enfriamiento del cascaron con la colada. Todo esto generó granos angulares por la acción de la temperatura y la presión generada.
- Se elaboraron y caracterizaron especímenes en los cuales se observó la generación de granos micro fracturados por acción del enfriamiento y el intercambio mecánico de esfuerzos durante la molienda.
- La significancia de cada uno de los factores no superó el 5%, se concluye que la hipótesis planteada en la cual se establece que los factores como: la temperatura de sinterización, la malla y

el tipo de mezcla influyen en las propiedades, es verdadera. Esto se cumplió para todos los modelos lineales multivariados de predicción.

- Por medio del coeficiente de correlación  $r$ , definido como un indicador de la intensidad de la relación lineal entre los valores estimados y los datos experimentales, se concluye que los modelos de predicción propuestos son adecuados, ya que estos valores varían entre 0,82 – 0,93; es decir, son cercanos a 1. Lo anterior indica que existe una estrecha relación entre los parámetros observados y los calculados.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abad Jaramillo, M. P. (2013). Guía del proceso industrial para la fabricación de baldosas cerámicas (Bachelor's thesis, Loja/UIDE/2013).
- Amado, J. D. S., Villafrades, P. Y. M., & Tuta, E. M. C. (2011). Caracterización de arcillas y preparación de pastas cerámicas para la fabricación de tejas y ladrillos en la región de Barichara, Santander. *Dyna*, 78(167), 50-58.
- Avgustinik, A. I. (1983). *Cerámica*. Reverté. PAG 348
- Ballesteros, M. N. S. (2005). *Tecnología de proceso y transformación de materiales*. Univ. Politèc. de Catalunya.
- Bernal, I., Cabezas, H., Espitia, C., Mojica, J., & Quintero, J. (2003). Análisis próximo de arcillas para cerámica. *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 27(105), 569-578.
- Bilurbina, L. & Liesa, F. (2000). *Materiales no metálicos resistentes a la corrosión*. Barcelona: Marcombo.
- Bustillo, M. A. (2002). Aparicion y significado de la moganita en fas rocas de la sílice: una revision. *Journal of Iberian Geology*, 28, 157-166.
- Callister, W. (2007). *Materials science and engineering*. New York: John Wiley & Sons.
- Cárdenas Pulido, J., Lizarazo-Marriaga, J., & Aperador Chaparro, W. (2016). **COMPORTAMIENTO MECANICO DE SISTEMAS CEMENTANTES TERNARIOS**

(CEMENTO PORTLAND-CENIZA VOLANTE-ESCORIA DE ALTO HORNO). La Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, RLMM, 36(2).

Carter, R. (2004). ¿Does investment permeability impact jewelry castings? Proceedings of The Eighteenth Santa Fe Symposium on Jewelry. New México-USA: Eddie Bell.

COMPRESION, E. (2017). ENSAYOS DE COMPRESION. Sanchez-carrillo.blogspot.com.co. Retrieved 6 June 2017, from <http://sanchez-carrillo.blogspot.com.co/p/ensayos-de-compresion.html>

Cultrone, G., & Sebastián, E. (2009). Fly ash addition in clayey materials to improve the quality of solid bricks. Construction and Building Materials, 23(2), 1178-1184.

EL TIEMPO. (2017). Qué es microfundición, p. Redacción ELTIEMPO. Retrieved from <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-181317%201991>

Fonseca, P.L, Elaboración de ladrillos cerámicos alivianados a partir de mezclas de arcilla diatomita, (Proyecto de Investigación de Maestría). Universidad Pedagógica Y Tecnológica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Maestría en Metalurgia y Ciencias De Los Materiales. Tunja (2009).

Granda Mesias, I. S., & Plaza Tapia, G. A. (2012). Artículo científico-Utilización de lodos residuales de una planta de Anodizado de Aluminio para la fabricación de ladrillos y adoquines.

Hernández, I. J. G. (2014). Diseño de experimentos y su aplicación en la industria. Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior de Cd. Sahagun, 1(1).

- Jaramillo, I. D. T. (2006). Método y conocimiento: metodología de la investigación: investigación cualitativa/investigación cuantitativa. Universidad Eafit.
- Londoño, C., Baquero, A. & Córdoba, E. (2014). Evaluación del efecto de la distribución del tamaño de poros sobre la permeabilidad y la textura de moldes cerámicos utilizados en el proceso de microfundición. *Revista Colombiana de Materiales*, 5, 238-243.
- Londoño, C., Baquero, A. A., & Córdoba, E. M. (2014). Evaluación del efecto de la distribución del tamaño de poros sobre la permeabilidad y la textura de moldes cerámicos utilizados en el proceso de microfundición. *Revista Colombiana de Materiales*, (5), 238-243.
- Mattey, P. E., Robayo, R. A., Díaz, J. E., Delvasto, S., & Monzó, J. (2015). Aplicación de ceniza de cascarilla de arroz obtenida de un proceso agro-industrial para la fabricación de bloques en concreto no estructurales. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 35(2), 285-294.
- Mckeer, I. (2004). Stone-in-place casting: the investment perspective. *Proceedings of The Eighteenth Santa Fe Symposium on Jewelry*. New México-USA: Eddie Bell.
- Medina, J. (2010). Estudio de las fases amorfas y nanocristalinas del sistema Fe<sub>2</sub>Zr obtenidas por técnicas de mecano-síntesis. Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Montgomery, D. C. (1991). Diseño factorial 2<sup>k</sup>, Diseño y Análisis de Experimentos, edición en español, 367-369, editorial Iberoamericana S. A de C. V, México DF, México.
- Montgomery, D. C., Runger, G. C., & Medal, E. G. U. (1996). Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. McGraw Hill.

- Morales García, Á. (2014). Química cuántica de polimorfos inducidos por presión: óxidos binarios y ternarios de silicio y carbono (Doctoral dissertation, Universidad Complutense de Madrid).
- Namakforoosh, M. N. (2000). Metodología de la investigación. Editorial Limusa.
- NORMA, N. (2000). 4205. Ladrillos y bloques cerámicos, Normas Técnicas Colombianas (ICONTEC), Bogotá.
- Pablo, T. R. (2008). Metodología para el Diseño de Experimentos (Doe) en la Industria. Tesis Doctoral. Universidad de Navarra. España.
- Perea, A. (2001). El tesoro visigodo de Guarrazar. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas
- Prieto, L. F. M. (2010). Alfarería y urbanismo. Los chircales de Santafé (hoy Bogotá) y su impronta en la arquitectura y el desarrollo urbano de la ciudad colonial. *Nodo: Arquitectura. Ciudad. Medio Ambiente*, 4(8), 31-58.
- Rincón, I. A. G., González, L. Á. L., Roa, R. A. P., & Bohórquez, K. L. R. (2016). Caracterización morfológica y estructural del cascarón cerámico desecho del proceso de microfundición en FASAB Sogamoso (Morphological and structural characterization of ceramic shell waste in the investment casting process in FASAB Sogamoso). *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16(1), 14-20.
- Rochow, E. (2007). *An introduction chemistry of the Silicones*, S.l.: Macnutt Press.
- Rodríguez, L. D., & Torrecillas, R. (2002). Arcillas cerámicas: una revisión de sus distintos tipos, significados y aplicaciones. *Boletín de la Sociedad española de Cerámica y Vidrio*, 41(5).

Ruiz, C. F. (2016). Plan Estratégico Departamental de Ciencia, Tecnología e Innovación de Boyacá.

SUELOS. (2017). Boyacacultural.com. Retrieved 6 June 2017, from [http://www.boyacacultural.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=24&Itemid=25](http://www.boyacacultural.com/index.php?option=com_content&view=article&id=24&Itemid=25)

Tamayo Tamayo, M. (1987). El proceso de la investigación científica (1st ed.). México: Limusa.

Trinidad, J. L. S., & Medina, J. M. P. (LACCEI'2014). Aplicación de Compuestos de Matriz Cerámica Reforzados con Residuos. latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology

Vepraskas, MJ y Cassel, DK (1987) esfericidad y redondez de la arena de las zonas costeras Los suelos y las relaciones con propiedades físicas del suelo. Soil Sci. Soc. A.m. J. 51: 1108-1112

Vian, A. (2012). Introducción a la química industrial (2a. ed.). Barcelona: Reverté.

Wilson, J. & Buffa, A. (2003). Física. (5 ed.). México: Pearson.

World Atlas of Sands » Blog Archive » Shape of sand grains. (2017). Sand-atlas.com. Retrieved 6 June 2017, from <http://www.sand-atlas.com/en/shape-of-sand-grains/>



# ANEXOS

## **1. ANEXO WW. ARREGLO DE INTERACCIONES EN HOJA DE DATOS DE SPSS:**

A continuación se presenta en la figura 73 la base de datos con todas las posibles interacciones entre los factores y los niveles para cada propiedad física de las unidades cerámicas macizas.

	Temperatura	Mezcla	Malla	Absorción	ResistenciaMecanica	Contracción	DensidadAparente	var
1	850	6040	20	10,5518	7,80	,00	1938,75	
2	850	6040	30	12,7844	9,00	,00	1842,01	
3	850	6040	70	16,8505	11,30	,00	1695,98	
4	850	7030	20	11,3050	10,60	,00	1963,92	
5	850	7030	30	13,0483	12,20	,00	1825,73	
6	850	7030	70	15,6306	9,10	,00	1714,07	
7	850	8020	20	11,6126	8,40	,00	1909,51	
8	850	8020	30	12,8208	9,70	,00	1872,81	
9	850	8020	70	14,6559	8,10	,00	1788,78	
10	950	6040	20	11,4915	12,60	,42	1853,46	
11	950	6040	30	12,7676	14,10	,23	1880,67	
12	950	6040	70	17,1128	13,50	,55	1650,68	
13	950	7030	20	11,9980	14,10	,60	1893,94	
14	950	7030	30	12,7611	15,90	,43	1826,25	
15	950	7030	70	15,7059	17,40	,55	1709,88	
16	950	8020	20	12,1890	14,00	,69	1899,41	
17	950	8020	30	12,6882	18,70	,87	1856,84	
18	950	8020	70	14,7369	11,00	,90	1776,01	
19	1050	6040	20	11,8965	16,80	2,28	1828,81	
20	1050	6040	30	12,4452	21,20	2,19	1829,37	
21	1050	6040	70	16,5587	23,40	2,31	1685,23	
22	1050	7030	20	11,3436	17,50	2,04	1880,93	
19	1050	6040	20	11,8965	16,80	2,28	1828,81	
20	1050	6040	30	12,4452	21,20	2,19	1829,37	
21	1050	6040	70	16,5587	23,40	2,31	1685,23	
22	1050	7030	20	11,3436	17,50	2,04	1880,93	
23	1050	7030	30	12,0112	26,60	2,00	1897,87	
24	1050	7030	70	15,9130	34,90	2,86	1727,26	
25	1050	8020	20	10,4919	22,10	1,59	1912,68	
26	1050	8020	30	11,8807	30,40	2,49	1901,94	
27	1050	8020	70	13,3312	20,20	3,63	1838,70	
28								
29								
30								

Figura 73. Base de datos con todas las interacciones de los factores influyentes en las propiedades físicas de las unidades cerámicas macizas. Fuente: (Autores, 2017).

## 2. ANEXO PP. ANÁLISIS CON LOS EFECTOS PRODUCIDOS POR LAS INTERACCIONES ENTRE LOS FACTORES T, C Y M.

Los efectos de cada factor, junto con la suma de cuadrados, grados de libertad, prueba F y su significancia se encuentran a continuación:

**Pruebas de los efectos inter-sujetos**

Variable dependiente: ResistenciaMecanica

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	1033,820 <sup>a</sup>	6	172,303	14,647	,000
Intersección	6867,273	1	6867,273	583,784	,000
Temperatura	919,587	2	459,794	39,087	,000
Mezcla	45,587	2	22,794	1,938	,170
Malla	68,645	2	34,323	2,918	,077
Error	235,267	20	11,763		
Total	8136,360	27			
Total corregida	1269,087	26			

a. R cuadrado = ,815 (R cuadrado corregida = ,759)

Figura 74. Pruebas de los efectos inter – sujetos. Variable dependiente: Resistencia mecánica. Fuente: (Autores, 2017).

**Pruebas de los efectos inter-sujetos**

Variable dependiente: Absorción

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	89,414 <sup>a</sup>	6	14,902	29,100	,000
Intersección	4709,316	1	4709,316	9196,126	,000
Temperatura	1,756	2	,878	1,714	,206
Mezcla	3,724	2	1,862	3,636	,045
Malla	83,934	2	41,967	81,951	,000
Error	10,242	20	,512		
Total	4808,972	27			
Total corregida	99,656	26			

a. R cuadrado = ,897 (R cuadrado corregida = ,866)

Figura 75. Pruebas de los efectos inter – sujetos. Variable dependiente: Absorción. Fuente: (Autores, 2017).

**Pruebas de los efectos inter-sujetos**

Variable dependiente: Contracción

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	28,551 <sup>a</sup>	6	4,759	43,600	,000
Intersección	26,265	1	26,265	240,654	,000
Temperatura	27,623	2	13,811	126,547	,000
Mezcla	,293	2	,146	1,341	,284

Malla	,636	2	,318	2,913	,078
Error	2,183	20	,109		
Total	56,999	27			
Total corregida	30,734	26			

a. R cuadrado = ,929 (R cuadrado corregida = ,908)

Figura 76. Pruebas de los efectos inter – sujetos. Variable dependiente: Contracción. Fuente: (Autores, 2017).

**Pruebas de los efectos inter-sujetos**

Variable dependiente: DensidadAparente

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	156064,465 <sup>a</sup>	6	26010,744	18,100	,000
Intersección	90425718,528	1	90425718,528	62925,753	,000
Temperatura	2273,877	2	1136,938	,791	,467
Mezcla	16459,846	2	8229,923	5,727	,011
Malla	137330,743	2	68665,371	47,783	,000
Error	28740,449	20	1437,022		
Total	90610523,442	27			
Total corregida	184804,914	26			

a. R cuadrado = ,844 (R cuadrado corregida = ,798)

Figura 77. Pruebas de los efectos inter – sujetos. Variable dependiente: Densidad Aparente. Fuente: (Autores, 2017).