



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE ARQUITECTURA, DISEÑO Y URBANISMO
MAESTRÍA EN CONSTRUCCIÓN DE OBRAS DE ARQUITECTURA

TESIS DE MAESTRÍA

CONTRIBUCIÓN A LA VALORIZACIÓN DE LODO DE
PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA BRUTA EN
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN CERÁMICOS

Arq. Madelón Iglesias Gordillo

Montevideo, Uruguay

Marzo, 2024



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

CONTRIBUCIÓN A LA VALORIZACIÓN DE LODO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA BRUTA EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN CERÁMICOS

Autor: Arq. Madelón Iglesias Gordillo

Tesis de Maestría presentada en el Programa de Posgrado de Maestría en Construcción de Obras de Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad de la República, como parte de los requisitos necesarios para la obtención del título de Magíster.

Tutor: Dra. Arq. Gemma Rodríguez de Sensale

Montevideo, Uruguay

Marzo, 2024

INTEGRANTES DEL TRIBUNAL DE DEFENSA DE TESIS

Dr. Ing. Gonzalo Cetrángolo

Mag. Arq. Iliana Rodríguez Viacava

Mag. Arq. Adriana Luisi Buchelli

Resumen

Los lodos de planta de tratamiento de agua bruta (LTAB), son residuos que se generan en los procesos de producción de agua para consumo humano, animal, o como insumo para la industria. En Uruguay se reporta la generación de entre 15 y 17 mil toneladas de LTAB (base seca), que son eliminados mediante disposición final en terrenos, vertido en cursos de agua superficial, en vertederos municipales, o en sitios de disposición final industriales. Debido a los potenciales impactos ambientales que puede provocar en agua, suelo y ecosistemas asociados, y desde el punto de vista económico y del uso de recursos no renovables, la disposición final debería ser la última opción para estos residuos.

El presente trabajo estudia una alternativa de valorización de los LTAB, a partir de la fabricación de un material de uso en la industria de la construcción, con el propósito de contribuir a evitar o minimizar su disposición final. Se profundizaron estudios realizados en el proyecto CTAgua, UPM-Facultad de Ingeniería "Alternativas de Valorización de Lodos, UPM" desarrollado por la Facultad de Ingeniería-UdelaR y la Fundación Ricaldoni, en el cual se investigaron alternativas para la valorización de LTAB.

La fabricación de cerámicos es la aplicación más frecuente en la literatura técnica para la valorización de estos residuos. En esta tesis se diseñó una investigación experimental para evaluar dicha aplicación en los LTAB de la planta industrial de UPM (Fray Bentos) en Uruguay. Se caracterizaron los materiales a emplear en mezclas cerámicas (LTAB, arcilla y arena). Se acondicionó el LTAB mediante secado y molienda. Se fabricaron prototipos cerámicos, con diferentes porcentajes de LTAB, y se cocieron a diferentes temperaturas con el propósito de evaluar estos dos parámetros en la calidad del producto cerámico. Los prototipos cocidos se ensayaron por distintos métodos para determinar sus propiedades. Se analizaron estadísticamente los resultados, y se compararon respecto a normas de calidad para ladrillos cerámicos.

La fabricación de productos cerámicos con LTAB es una alternativa de valorización promisoría para este residuo, y se han reportado resultados satisfactorios a escala de laboratorio. A partir del presente trabajo, se realizan sugerencias para continuar su estudio en Uruguay.

Palabras clave: residuos; valorización; lodos de planta de tratamiento de agua bruta; materiales cerámicos.

Abstract

Water Treatment Plant Sludge (WTPS) is a waste produced during the treatment of raw water for human and animal consumption, or as a consumable in industrial processes. Uruguay reports the generation of 15-17 thousand tons of WTPS (dry basis) per year, which are dumped in watercourses, directly disposed of in soil, in municipal landfills, or in industrial waste disposal facilities. Due to the potential environmental impacts it can cause in water, soil, and associated ecosystems, as well as from an economic and non-renewable resource use perspective, final disposal should be the last option for these wastes.

This thesis studies an alternative valorization of WTPS, by manufacturing a material for use in the construction industry, with the purpose of contributing to avoid or minimize final disposal. Studies carried out in the CTAguA project, UPM-Faculty of Engineering "Valorization Alternatives for Sludge, UPM" developed by the Facultad de Ingeniería - UdelaR and the Fundación Ricaldoni, which investigated alternatives for the valorization of WTPS, were further explored.

The production of ceramics is the most frequent application in the technical literature for the valorization of these wastes. This thesis designed an experimental investigation to evaluate said application in the WTPS from an industrial facility, UPM (Fray Bentos) in Uruguay. The materials comprising the ceramic mixture (WTPS, clay, and sand) were characterized. The WTPS was prepared through drying and grinding. Ceramic prototypes were manufactured, with different percentages of WTPS and were fired at different temperatures, to evaluate these two parameters in the quality of the ceramic body. The fired prototypes were tested by different methods to determine their properties.

The results of the prototype tests were statistically analyzed and compared to quality standards for ceramic bricks.

The manufacture of ceramic products with WTPS is a promising valorization alternative for this waste, and satisfactory results have been reported on a laboratory scale. Based on this work, suggestions are made to continue its study in Uruguay.

Keywords: waste; valorization; water treatment plant sludge; ceramic materials.

Agradecimientos

Hay muchas personas para agradecer, en particular, y de manera muy especial a mi familia, ya que sin ellos hubiese sido imposible llevarlo adelante, a mis padres por haberme incentivado al estudio y al crecimiento profesional además del personal durante todas las etapas de mi vida, dando el apoyo necesario para lograrlo; a mi hermana por acompañarme y darme soporte incondicional; y a Pablo por toda su contención día a día, a nivel personal y académico; y por incentivarme a seguir creciendo.

A los docentes de la maestría que han transmitido sus conocimientos y en especial a la Dra. Gemma Rodríguez de Sensale por haberme guiado y acompañado durante todo el proceso de investigación y formación. Así como también al equipo del Instituto de Ensayo de Materiales, quienes me recibieron y permitieron acceder a las instalaciones para el desarrollo de la parte experimental de esta tesis.

A la Fundación Ricaldoni y al Centro Tecnológico del Agua (CTAagua) por la oportunidad de participar en el proyecto “Alternativas de Valorización de Lodos, UPM”.

A UPM por la información y las muestras proporcionadas, y por autorizarme a la divulgación de los resultados de este trabajo.

Finalmente, a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII), quien me otorgó la beca de maestría de Posgrados Nacionales 2020, lo cual me permitió dedicarme a la misma.

Índice de Contenidos

1. Introducción	17
1.1. Motivación del estudio	17
1.2. Objetivos	19
1.3. Estructura de la tesis	20
1.4. Alcance de la investigación	21
2. Estado del Arte	22
2.1. Lodos de Planta de Tratamiento de Agua Bruta (LTAB)	22
2.1.1. Tecnologías y procesos	23
2.1.2. Generación de residuos	27
2.1.3. Composición de los LTAB	28
2.1.4. Potenciales impactos ambientales	30
2.2. Aplicaciones en materiales de construcción	31
2.2.1. Cerámicos	33
2.2.2. Cemento	59
2.2.3. Agregados para hormigón y productos en base a este material	64
2.2.4. Adición mineral	74
2.2.5. Suelo-cemento	82
2.2.6. Geopolímeros	85
2.3. Selección de la aplicación	92
2.4. Mezclas cerámicas	93
2.4.1. Composición granulométrica	93
2.4.2. Composición química	98
2.5. Propiedades de los cerámicos	100
2.5.1. Densidad	100
2.5.2. Pérdida de peso	101
2.5.3. Resistencia a la compresión	102
2.5.4. Contracción volumétrica	104
2.5.5. Absorción de agua	106
2.5.5.1. Succión capilar	106
2.5.5.2. Inmersión en agua fría	107
2.5.6. Porosidad	109
2.5.7. Ensayos de lixiviación	109

3. Investigación experimental	111
3.1. Introducción.....	111
3.2. Materiales.....	112
3.2.1. Lodo de tratamiento de agua bruta (LTAB).....	113
3.2.1.1. Origen del LTAB.....	113
3.2.1.2. Muestras de LTAB.....	119
3.2.1.3. Caracterización del LTAB crudo.....	121
3.2.1.3a. Determinación de pH.....	121
3.2.1.3b. Densidad y porcentaje de humedad.....	122
3.2.1.4. Acondicionamiento del LTAB.....	124
3.2.1.5. Caracterización del LTAB deshidratado.....	126
3.2.1.5a. Densidad.....	126
3.2.1.5b. Distribución y tamaño medio de partícula.....	127
3.2.1.5c. Composición mineral (DRX).....	130
3.2.1.5d. Composición química (FRX).....	131
3.2.1.5e. Pérdida por Calcinación.....	135
3.2.1.5f. Termogravimetría (TGA/DTGA).....	136
3.2.1.5g. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....	139
3.2.1.5h. Sulfato en Lixiviado.....	140
3.2.2. Arcilla.....	140
3.2.3. Arena.....	142
3.3. Fabricación de cerámicos.....	145
3.3.1. Preparación de la mezcla.....	147
3.4. Ensayos sobre los prototipos cerámicos.....	152
3.4.1. Densidad.....	152
3.4.2. Pérdida de peso.....	153
3.4.3. Resistencia a la Compresión.....	154
3.4.4. Contracción volumétrica.....	156
3.4.5. Absorción de agua.....	156
3.4.5.1. Absorción de agua por succión capilar.....	156
3.4.5.2. Absorción de Agua por el Método de la Pipeta.....	158
3.4.5.3. Absorción por Inmersión en Agua Fría.....	159
3.4.6. Porosidad.....	160
3.4.7. Colorimetría.....	161
3.4.8. Sulfato en lixiviado.....	166

3.4.9.	Análisis estadístico	167
4.	Resultados y discusión.....	170
4.1.	Densidad	170
4.2.	Pérdida de peso	173
4.3.	Resistencia a la Compresión	177
4.4.	Contracción volumétrica	183
4.5.	Absorción de agua.....	188
4.5.1.	Succión Capilar	188
4.5.2.	Método de la Pipeta.....	193
4.5.3.	Inmersión en agua fría.....	197
4.6.	Porosidad	202
4.7.	Colorimetría.....	206
4.8.	Sulfato en Lixiviado	210
4.9.	Correlación entre propiedades.....	214
4.9.1.	Resistencia a la Compresión – Densidad	214
4.9.2.	Resistencia a la Compresión – Pérdida de peso.....	215
4.9.3.	Resistencia a la Compresión – Contracción volumétrica	216
4.9.4.	Resistencia a la Compresión – Absorción de agua por capilaridad.....	216
4.9.5.	Resistencia a la Compresión – Absorción de agua por permeabilidad.	217
4.9.6.	Resistencia a la Compresión – Absorción de agua por inmersión.....	217
4.9.7.	Resistencia a la Compresión – Porosidad	218
4.9.8.	Resistencia a la Compresión – Lixiviación	219
4.9.9.	Absorción de agua por inmersión – Densidad.....	220
4.9.10.	Absorción de agua por inmersión – Pérdida de peso	221
4.9.11.	Absorción de agua por inmersión – Contracción volumétrica	222
4.9.12.	Absorción de agua por inmersión – Porosidad	223
5.	Conclusiones	224
	Bibliografía.....	228
	Anexos.....	238

Índice de Tablas

Tabla 1: Generación de LTAB y otros RSI, 2016-17.	17
Tabla 2: Ensayos de caracterización del LTAB (Cerámicos).....	56
Tabla 3: Composición química (FRX) y PPC (Cerámicos)	57
Tabla 4: Ensayos sobre los prototipos cerámicos	58
Tabla 5: Ensayos de caracterización del LTAB (Cemento)	63
Tabla 6: Composición química (FRX) y PPC (Cemento).....	63
Tabla 7: Ensayos de caracterización del LTAB (Agregados).....	73
Tabla 8: Composición química (FRX) y PPC (Agregados)	73
Tabla 9: Ensayos de caracterización del LTAB Adiciones minerales)	81
Tabla 10: Composición química (FRX) y PPC (Adiciones minerales).....	82
Tabla 11: Ensayos de caracterización del LTAB (Suelo-cemento)	84
Tabla 12: Composición química (FRX) y PPC (Suelo-cemento)	84
Tabla 13: Ensayos de caracterización del LTAB (Geopolímeros).....	90
Tabla 14: Composición química (FRX) y PPC (Geopolímeros)	91
Tabla 15: pH muestras de LTAB.....	122
Tabla 16: Porcentaje de humedad de LTAB (H%)	123
Tabla 17: Densidad: LTAB (crudo).....	124
Tabla 18: Densidad: lotes LTAB (deshidratados).....	127
Tabla 19: % de partículas de LTAB según su diámetro.....	128
Tabla 20: Tamaño Medio de Partículas: LTAB1.....	128
Tabla 21: LTAB: Composición Química (FRX).....	132
Tabla 22: Pérdida por Calcinación: LTAB	136
Tabla 23: Arcilla: Composición Química (FRX)	141
Tabla 24: Arcilla: distribución de tamaño de partícula	142
Tabla 25: Arena: Granulometría.....	142
Tabla 26: Arena: Densidad aparente, arena sin compactar	144
Tabla 27: Arena: Densidad aparente, arena compactada	144
Tabla 28: Nomenclatura de los prototipos cerámicos.....	146
Tabla 29: Clasificación de Consistencia (UNE 1015-6).....	147
Tabla 30: Dosificaciones de las mezclas cerámicas (en %)	148
Tabla 31: Dosificaciones de las mezclas cerámicas (en peso).....	149
Tabla 32: Espectrofotómetro: características básicas	162
Tabla 33: Cálculo de parámetros colorimétricos según Norma UNI EN 15886.....	165
Tabla 34: Correlación entre propiedades de acuerdo al R ²	169

Tabla 35: Análisis estadístico básico: Densidad (0 % LTAB)	171
Tabla 36: Análisis estadístico básico: Densidad (5 % LTAB)	171
Tabla 37: Análisis estadístico básico: Densidad (10 % LTAB)	171
Tabla 38: Análisis estadístico básico: Densidad (15 % LTAB)	171
Tabla 39: Análisis estadístico básico: Densidad (20 % LTAB)	172
Tabla 40: Análisis de varianza: Densidad de los prototipos cerámicos.	173
Tabla 41: Análisis estadístico básico: Pérdida de peso (0 % LTAB).....	174
Tabla 42: Análisis estadístico básico: Pérdida de peso (5 % LTAB).....	175
Tabla 43: Análisis estadístico básico: Pérdida de peso (10 % LTAB).....	175
Tabla 44: Análisis estadístico básico: Pérdida de peso (15 % LTAB).....	175
Tabla 45: Análisis estadístico básico: Pérdida de peso (20 % LTAB).....	175
Tabla 46: Análisis de la varianza: Pérdida de peso.	176
Tabla 47: Análisis estadístico básico: Resistencia a la compresión (0 % LTAB)	178
Tabla 48: Análisis estadístico básico: Resistencia a la compresión (5 % LTAB)	178
Tabla 49: Análisis estadístico básico: Resistencia a la compresión (10 % LTAB)	178
Tabla 50: Análisis estadístico básico: Resistencia a la compresión (15 % LTAB)	179
Tabla 51: Análisis estadístico básico: Resistencia a la compresión (20 % LTAB)	179
Tabla 52: Análisis de varianza: Resistencia a la compresión	179
Tabla 53: Resistencia a la Compresión en normas internacionales consultadas.....	180
Tabla 54: Análisis estadístico básico: Contracción volumétrica (0 % LTAB)	185
Tabla 55: Análisis estadístico básico: Contracción volumétrica (5 % LTAB)	185
Tabla 56: Análisis estadístico básico: Contracción volumétrica (10 % LTAB)	185
Tabla 57: Análisis estadístico básico: Contracción volumétrica (15 % LTAB)	186
Tabla 58: Análisis estadístico básico: Contracción volumétrica (20 % LTAB)	186
Tabla 59: Análisis de varianza: Contracción volumétrica.	187
Tabla 60: Análisis estadístico básico: Tasa inicial - succión capilar (0 % LTAB)	189
Tabla 61: Análisis estadístico básico: Tasa inicial - succión capilar (5 % LTAB)	189
Tabla 62: Análisis estadístico básico: Tasa inicial - succión capilar (10 % LTAB)	190
Tabla 63: Análisis estadístico básico: Tasa inicial - succión capilar (15 % LTAB)	190
Tabla 64: Análisis estadístico básico: Tasa inicial - succión capilar (20 % LTAB)	190
Tabla 65: Análisis de la varianza: Absorción de agua por succión capilar.....	191
Tabla 66: Análisis estadístico básico: Absorción (método de la pipeta) (5 % LTAB) .	194
Tabla 67: Análisis estadístico básico: Absorción (método de la pipeta) (10 % LTAB)	195
Tabla 68: Análisis estadístico básico: Absorción (método de la pipeta) (15 % LTAB)	195
Tabla 69: Análisis estadístico básico: Absorción (método de la pipeta) (20 % LTAB)	195
Tabla 70: Análisis de la varianza: Absorción (método de la pipeta).....	196
Tabla 71: Valores máximos de absorción en normas internacionales revisadas	198

Tabla 72: Análisis estadístico básico: Absorción (inmersión) (0 % LTAB)	199
Tabla 73: Análisis estadístico básico: Absorción (inmersión) (5 % LTAB)	199
Tabla 74: Análisis estadístico básico: Absorción (inmersión) (10 % LTAB)	200
Tabla 75: Análisis estadístico básico: Absorción (inmersión) (15 % LTAB)	200
Tabla 76: Análisis estadístico básico: Absorción (inmersión) (20 % LTAB)	200
Tabla 77: Análisis de la varianza: Absorción por inmersión en agua fría.....	201
Tabla 78: Análisis estadístico básico: Porosidad (0 % LTAB)	204
Tabla 79: Análisis estadístico básico: Porosidad (5 % LTAB)	204
Tabla 80: Análisis estadístico básico: Porosidad (10 % LTAB)	204
Tabla 81: Análisis estadístico básico: Porosidad (15 % LTAB)	204
Tabla 82: Análisis estadístico básico: Porosidad (20 % LTAB)	205
Tabla 83: Análisis de varianza: Porosidad de los prototipos cerámicos.....	205
Tabla 84: Diferencia total de color de los prototipos cerámicos.....	207
Tabla 85: Datos de azufre/ sulfatos del LTAB	213
Tabla 86: Compresión-Densidad: R ² para distintos modelos.	214
Tabla 87: Compresión-Pérdida de peso: R ² para distintos modelos.....	215
Tabla 88: Compresión-Contracción volumétrica: R ² para distintos modelos.....	216
Tabla 89: Compresión-Capilaridad: R ² para distintos modelos.....	216
Tabla 90: Compresión-Permeabilidad: R ² para distintos modelos.....	217
Tabla 91: Compresión-Inmersión de agua fría: R ² para distintos modelos.	217
Tabla 92: Compresión-Porosidad: R ² para distintos modelos.....	219
Tabla 93: Compresión-Lixiviación: R ² para distintos modelos.	220
Tabla 94: Absorción por inmersión-Densidad: R ² para distintos modelos.	221
Tabla 95: Absorción por inmersión-Pérdida de peso: R ² para distintos modelos.....	222
Tabla 96: Absorción por inmersión-Contracción: R ² para distintos modelos.....	222
Tabla 97: Absorción por inmersión-Porosidad: R ² para distintos modelos.....	223
Tabla 98: pH del LTAB.....	238
Tabla 99: Porcentaje de Humedad del LTAB	239
Tabla 100: Densidad del LTAB crudo	240
Tabla 101: Densidad del LTAB crudo	240
Tabla 102: Densidad del LTAB deshidratado	240
Tabla 103: Pérdida por calcinación del LTAB	241
Tabla 104: Calibración del volumen del recipiente: datos y ecuaciones.....	242
Tabla 105: Cálculo de la densidad de la arena sin compactar.	242
Tabla 106: Cálculo de la densidad de la arena compactada.	242
Tabla 107: Ensayos de Densidad (0 % LTAB)	243
Tabla 108: Datos de Densidad (5 % LTAB)	243

Tabla 109: Datos de Densidad (10 % LTAB)	244
Tabla 110: Datos de Densidad (15 % LTAB)	245
Tabla 111: Datos de Densidad (20 % LTAB)	246
Tabla 112: Datos de Pérdida de Peso (0 % LTAB)	247
Tabla 113: Datos de Pérdida de Peso (5 % LTAB)	248
Tabla 114: Datos de Pérdida de Peso (10 % LTAB)	249
Tabla 115: Datos de Pérdida de Peso (15 % LTAB)	250
Tabla 116: Datos de Pérdida de Peso (20 % LTAB)	250
Tabla 117: Datos de Resistencia a la Compresión (0 % LTAB)	252
Tabla 118: Datos de Resistencia a la Compresión (5 % LTAB)	253
Tabla 119: Datos de Resistencia a la Compresión (10 % LTAB)	254
Tabla 120: Datos de Resistencia a la Compresión (15 % LTAB)	255
Tabla 121: Datos de Resistencia a la Compresión (20 % LTAB)	256
Tabla 122: Contracción Volumétrica (0 % LTAB)	257
Tabla 123: Contracción Volumétrica (5 % LTAB)	258
Tabla 124: Contracción Volumétrica (10 % LTAB)	259
Tabla 125: Contracción Volumétrica (15 % LTAB)	261
Tabla 126: Contracción Volumétrica (20 % LTAB)	262
Tabla 127: Absorción por Succión Capilar (0 % LTAB, 30min)	265
Tabla 128: Absorción por Succión Capilar (0 % LTAB, 35-75 min)	267
Tabla 129: Absorción por Succión Capilar (5 % LTAB, 30 min)	269
Tabla 130: Absorción por Succión Capilar (5 % LTAB,35-75 min)	270
Tabla 131: Absorción por Succión Capilar (10 % LTAB, 30 min)	271
Tabla 132: Absorción por Succión Capilar (10 % LTAB, 35-75 min)	272
Tabla 133: Absorción por Succión Capilar (15 % LTAB, 30 min)	273
Tabla 134: Absorción por Succión Capilar (15 % LTAB, 35-75 min)	274
Tabla 135: Absorción por Succión Capilar (20 % LTAB, 30 min)	275
Tabla 136: Absorción por Succión Capilar (20 % LTAB, 35-75 min)	276
Tabla 137: Datos de Absorción por Método de la Pipeta (5 % LTAB)	279
Tabla 138: Absorción por Método de la Pipeta (10 % LTAB)	280
Tabla 139: Absorción por Método de la Pipeta (15 % LTAB)	281
Tabla 140: Absorción por Método de la Pipeta (20 % LTAB)	282
Tabla 141: Absorción por Inmersión en Agua Fría (0 % LTAB).....	285
Tabla 142: Absorción por Inmersión en Agua Fría (5 % LTAB).....	285
Tabla 143: Absorción por Inmersión en Agua Fría (10 % LTAB).....	286
Tabla 144: Absorción por Inmersión en Agua Fría (15 % LTAB).....	286
Tabla 145: Absorción por Inmersión en Agua Fría (20 % LTAB).....	287

Tabla 146: Datos de Porosidad (0 % LTAB)	288
Tabla 147: Datos de Porosidad (5 % LTAB)	288
Tabla 148: Datos de Porosidad (10 % LTAB)	289
Tabla 149: Datos de Porosidad (15 % LTAB)	289
Tabla 150: Datos de Porosidad (20 % LTAB).....	290
Tabla 151: Datos de Colorimetría (0 % LTAB, 700°C)	291
Tabla 152: Colorimetría (0 % LTAB, 800°C).....	292
Tabla 153: Colorimetría (0 % LTAB, 900°C).....	293
Tabla 154: Datos de Colorimetría (0 % LTAB, 1000°C)	294
Tabla 155: Colorimetría (5 % LTAB, 700°C).....	295
Tabla 156: Colorimetría (5 % LTAB, 800°C).....	296
Tabla 157: Colorimetría (5 % LTAB, 900°C).....	297
Tabla 158: Colorimetría (5 % LTAB, 1000°C).....	298
Tabla 159: Colorimetría (10 % LTAB, 700°C).....	299
Tabla 160: Colorimetría (10 % LTAB, 800°C).....	300
Tabla 161: Colorimetría (10 % LTAB, 900°C).....	301
Tabla 162: Colorimetría (10 % LTAB, 1000°C).....	302
Tabla 163: Colorimetría (15 % LTAB, 700°C).....	303
Tabla 164: Colorimetría (15 % LTAB, 800°C).....	304
Tabla 165: Colorimetría (15 % LTAB, 900°C).....	305
Tabla 166: Colorimetría (15 % LTAB, 1000°C).....	306
Tabla 167:.. Colorimetría (20 % LTAB, 700°C).....	308
Tabla 168: Colorimetría (20 % LTAB, 800°C).....	309
Tabla 169: Colorimetría (20 % LTAB, 900°C).....	310
Tabla 170: Colorimetría (20 % LTAB, 1000°C).....	311
Tabla 171: Colorimetría. Cálculos. Prototipos 0 % LTAB	313
Tabla 172: Colorimetría. Cálculos. Prototipos 0 % LTAB	314
Tabla 173: Colorimetría. Cálculos. Prototipos 5 % LTAB	315
Tabla 174: Colorimetría. Cálculos. Prototipos 5 % LTAB	316
Tabla 175: Colorimetría. Cálculos. Prototipos 10 % LTAB	317
Tabla 176: Colorimetría. Cálculos. Prototipos 10 % LTAB	318
Tabla 177: Colorimetría. Cálculos. Prototipos 15 % LTAB	319
Tabla 178: Colorimetría. Cálculos. Prototipos 15 % LTAB	320
Tabla 179: Colorimetría. Cálculos. Prototipos 20 % LTAB	321
Tabla 180: Colorimetría. Cálculos. Prototipos 20 % LTAB	322
Tabla 181: Ensayo de Lixiviación (0-15 % LTAB y 700-1000 °C).....	323

Índice de Figuras

Figura 1: Diagrama de Flujo de una Planta de Tratamiento por Filtración.....	24
Figura 2: Residuos generados en el tratamiento de agua bruta.	24
Figura 3: Diagrama original propuesto por Winkler.	95
Figura 4: Diagrama triangular de Winkler (Pracidelli & Melchiades, 1997)	96
Figura 5: Diagrama triangular de composiciones químicas de los lodos	99
Figura 6: Mapa de planta, proceso productivo UPM Fray Bentos.....	114
Figura 7: Esquema del tratamiento de agua bruta, UPM Fray Bentos.....	115
Figura 8: Cascada (aireador)	116
Figura 9: Sistema de bombeo	116
Figura 10: Clarificadores de Contacto.....	117
Figura 11: Cámara de Distribución.....	117
Figura 12: Filtros de Arena, luego de la etapa de clarificación del agua bruta.....	118
Figura 13: Tanque de Lodo Clarificado, recepción del lodo “A”	118
Figura 14: Bombeo lodo “A” (Tanque Lodo Clarificado a Espesador Circular)	118
Figura 15: Tanque Espesador Circular (producción del lodo “B”).....	118
Figura 16: Centrífuga, espesamiento del lodo “B” para producir el lodo “C” (LTAB)..	119
Figura 17: Tolda a la salida de la Centrífuga, recibe el lodo “C” (LTAB).....	119
Figura 18: Lote LTAB.....	119
Figura 19: Muestras y análisis del LTAB crudo	120
Figura 20: Muestras y análisis del LTAB deshidratado y molido	121
Figura 21: Agitador marca Fisatom Modelo 753A	122
Figura 22: pH-metro Tester HI98103 Checker de la marca HANNA.....	122
Figura 23: Molde para fabricación de probetas	123
Figura 24: Primera capa de llenado + compactadora.....	123
Figura 25: Segunda capa de llenado + compactadora	123
Figura 26: Mesa compactadora	123
Figura 27: Enrasado	123
Figura 28: Desmolde de probetas	123
Figura 29: Pesada de cada una de las probetas	124
Figura 30: Probetas a 105 °C hasta llegar a peso constante.....	124
Figura 31: Probetas recién fabricadas y posteriores al secado.	124
Figura 32: Lodo seco previo a ser pesado y embolsado	125
Figura 33: Interior de molino	125
Figura 34: Exterior del molino	125

Figura 35: Lodo seco previo a la molienda.....	125
Figura 36: Lodo post molienda en el recipiente del molino.....	125
Figura 37: Lodo post molienda.....	125
Figura 38: Limpieza de bolas del molino para recuperar todo el material molido	125
Figura 39: Embolsado de lodo molido para la fabricación	125
Figura 40: 1600 gr de lodo para la fabricación con sustitución de 20 %	125
Figura 41: Frasco de Le Chatelier con queroseno	127
Figura 42: Control de la temperatura del agua	127
Figura 43: Frasco sumergido con queroseno por 30 min mínimo.....	127
Figura 44: LTAB: Curva de Distribución de Tamaño de Partículas.....	128
Figura 45: Diagrama de Winkler: LTAB y lodos de referencias bibliográficas.....	129
Figura 46: DRX: Difractograma del LTAB	131
Figura 47: Diagrama triangular composición (LTAB y referencias).....	133
Figura 48: Composición química y PPC: LTAB y referencias.....	136
Figura 49: Curvas TGA/DTGA del análisis térmico de LTAB.....	137
Figura 50: Microscopía Electrónica de Barrido (MEB),del lote de LTAB.....	139
Figura 51: Arena: Curva granulométrica	143
Figura 52: Recipiente cilíndrico, con agua ocupando el 100 % de su volumen	144
Figura 53: Control de T del agua para cálculo de densidad	144
Figura 54: Placa transparente para eliminar el aire y el exceso de agua.....	144
Figura 55: Llenado del recipiente con arena (densidad sin compactar).....	145
Figura 56: Enrasado con varilla compactadora para eliminar exceso de material	145
Figura 57: Masa de arena total para el cálculo de densidad sin compactar	145
Figura 58: Primera capa + 10 golpes con varilla 16 mm para compactación.....	145
Figura 59: Segunda capa y compactación sólo de esta	145
Figura 60: Tercera capa de arena, para compactar y enrasar.....	145
Figura 61: Masa de arena total para el cálculo de densidad compactada	145
Figura 62: Esquema de fabricación de los prototipos cerámicos.....	147
Figura 63: Tamizado de la arena	150
Figura 64: Pesada del LTAB	150
Figura 65: Pesada de la arcilla.....	150
Figura 66: Materiales secos	150
Figura 67: Previo a mezcla	150
Figura 68: Mezcladora	150
Figura 69: Mezcla con 5 % de lodo.....	150
Figura 70: Mesa de sacudidas	150
Figura 71: 2do llenado	150

Figura 72: Enrasado	151
Figura 73: Desmolde.....	151
Figura 74: Medición de diámetros	151
Figura 75: Traslado del diámetro	151
Figura 76: Molde prismático previo al llenado	151
Figura 77: Enrasado	151
Figura 78: Desmolde.....	151
Figura 79: Fabricación de los 24 prototipos con 5 % LTAB.....	151
Figura 80: Secado a 60 °C y a 105 °C previo a cocción	151
Figura 81: Cerámicos con 5 % LTAB previo a la cocción.....	151
Figura 82: Mufla para cocción.....	151
Figura 83: Cerámicos posterior a la cocción a 900°C.....	151
Figura 84: Dispositivo para el ensayo de densidad	152
Figura 85: Inmersión del prototipo (masa saturada) en el agua.	152
Figura 86: Prototipo suspendido en agua.....	152
Figura 87: Cálculo del área de la cara	154
Figura 88: Prensa PILOT modelo 4 - C47C02.....	154
Figura 89: Prototipo cerámico luego del ensayo (5 % LTAB, 700°C)	155
Figura 90: Interior del prototipo cerámico (5 % LTAB, 700°C).....	155
Figura 91: Bandeja con algodón embebido en agua, balanza y prototipos.....	158
Figura 92: Prototipos cerámicos durante el ensayo de absorción por capilaridad	158
Figura 93: Registro de masa durante el ensayo.....	158
Figura 94: Adhesión de la pipeta Karsten al prototipo	159
Figura 95: Prototipos luego del secado con pipeta Karsten adherida.....	159
Figura 96: Llenado de la columna de agua de la pipeta Karsten.	159
Figura 97: Cubeta y soporte de apoyo inferior para los prototipos	160
Figura 98: Absorción por Inmersión en Agua Fría (10 y 20 % de LTAB1)	160
Figura 99: Representación del espacio de color Ciel*a*b* (Talens Oliag, 2019)	163
Figura 100: Posiciones para las tomas de color.....	164
Figura 101: Enfoque para toma de color.....	164
Figura 102: Primera toma de color con espectrofotómetro.....	164
Figura 103: Espectrofotómetro con los resultados de L', a*, b*, C*, y h*	164
Figura 104: Densidad de los prototipos cerámicos.....	170
Figura 105: Pérdida de peso de los prototipos cerámicos posterior a la cocción.....	174
Figura 106: Resistencia característica a la Compresión.....	177
Figura 107: Diagrama de Winkler: prototipos cerámicos y arcillas nacionales.....	182
Figura 108: Contracción Volumétrica posterior a la cocción.....	183

Figura 109: Tasa inicial de Absorción de Agua por Succión Capilar	188
Figura 110: Succión capilar a t = 75 min. (en condiciones de saturación de agua) ...	193
Figura 111: Absorción de Agua por Método de la Pipeta (700 °C)	194
Figura 112: Absorción de Agua por Inmersión durante 48 horas	197
Figura 113: Porosidad de los prototipos cerámicos.....	203
Figura 114: Plano cromático a*b*, del espacio CIE L*a*b* (1000°C).....	208
Figura 115: Plano cromático L*a* (1000°C)	209
Figura 116: Sulfato en Lixiviado: LTAB y prototipos cerámicos.....	212
Figura 117: Correlación: Resistencia a la compresión – Densidad.....	215
Figura 118: Correlación: Resistencia a la compresión – Inmersión.....	218
<i>Figura 119: Correlación: Resistencia a la compresión – Porosidad.....</i>	<i>219</i>
Figura 120: Correlación: Resistencia a la compresión – Lixiviación	220
<i>Figura 121: Correlación: Inmersión – Densidad</i>	<i>221</i>
Figura 122: Correlación: Inmersión – Pérdida de peso	222
Figura 123: Correlación: Inmersión – Porosidad	223
Figura 124: Absorción de agua por succión capilar (700°C).....	277
Figura 125: Absorción de agua por succión capilar (800°C).....	277
Figura 126: Absorción de agua por succión capilar (900°C).....	278
Figura 127: Absorción de agua por succión capilar (1000°C).....	278
Figura 128: Absorción de agua por permeabilidad (700°C).....	283
Figura 129: Absorción de agua por permeabilidad (800°C).....	283
Figura 130: Absorción de agua por permeabilidad (900°C).....	284
Figura 131: Absorción de agua por permeabilidad (1000°C).....	284

Siglas y abreviaciones

AAS	Espectrometría de absorción atómica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
Al ₂ O ₃	Óxido de Aluminio
ASTM	American Society for Testing and Materials
BSI	British Standards Institution
CaO	Óxido de Calcio
CTAguá	Centro Tecnológico del Agua
DRX	Difracción de Rayos X
DTGA	Differential Thermogravimetric Analysis
DTP	Distribución de tamaño de partícula
ETP	Effluent Treatment Plant
Fe ₂ O ₃	Óxido Férrico
FRX	Fluorescencia de Rayos X
IRAM	Instituto Argentino de Normalización y Certificación
ICONTEC	Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación
ID	Identificación del prototipo
IEM	Instituto de Ensayos de Materiales
IET	Instituto de Estructuras y Transporte
IIQ	Instituto de Ingeniería Química
INEN	Servicio Ecuatoriano de Normalización
INN	Instituto Nacional de Normalización
ISO	International Organization for Standardization
K ₂ O	Óxido de Potasio
MEB	Microscopio electrónico de barrido
MgO	Óxido de Magnesio
MnO	Óxido de Manganeso
Na ₂ O	Óxido de Sodio
LATU	Laboratorio Tecnológico del Uruguay
LTAB	Lodo de tratamiento de agua bruta
P ₂ O ₅	Óxido de Fósforo
PPC	Pérdida por Calcinación
SiO ₂	Dióxido de Silicio
SO ₃	Trióxido de Azufre

TGA	Thermogravimetric Analysis
TiO ₂	Dióxido de Titanio
UNE	Asociación Española de Normalización
UNIT	Instituto Uruguayo de Normas Técnicas
UPM	UPM-Kymmene Corporation
U.S. EPA	United States Environmental Protection Agency
WTPS	Water Treatment Plant Sludge

1. Introducción

1.1. Motivación del estudio

Los lodos de planta de tratamiento de agua bruta (LTAB), son residuos que se generan en los procesos de producción de agua para consumo humano, animal, o como insumo para la industria.

En Uruguay se reporta la generación de entre 15 y 17 mil toneladas de LTAB, en base seca, según los datos publicados por el Observatorio Ambiental (Ministerio de Ambiente, 2021). Estos residuos están descriptos por la autoridad ambiental como: “Lodos de potabilización: arena, tierra, material orgánico e inorgánico arrastrado por el agua, sulfato de aluminio”, en la Tabla 1 se presenta un extracto de la misma. Aunque este valor representa sólo el 1 % de los residuos sólidos industriales en el país (en toneladas de generación, base seca), está entre los veinte residuos industriales más importantes por volumen físico generado. En esta tabla como referencia se incluye la generación de los residuos Categoría I (los que presentan características de peligrosidad), y los Categoría II (no peligrosos o asimilables a residuos sólidos urbanos). Los LTAB son considerados dentro de la Categoría II.

Tabla 1: Generación de LTAB y otros RSI, 2016-17. Fuente: Ministerio de Ambiente (2021)

Año	Descripción	Generación (Ton B.S.)
2016	Lodos de potabilización: arena, tierra, material orgánico e inorgánico arrastrado por el agua, sulfato de aluminio	15.528
	Subtotal Categoría I	35.861
	Subtotal Categoría II	1.504.388
2017	Lodos de potabilización: arena, tierra, material orgánico e inorgánico arrastrado por el agua, sulfato de aluminio	15,880
	Subtotal Categoría I	37.925
	Subtotal Categoría II	1.545.165
2018	Lodos de potabilización: arena, tierra, material orgánico e inorgánico arrastrado por el agua, sulfato de aluminio	17.130
	Subtotal Categoría I	36.936
	Subtotal Categoría II	1.598.609

Las características fisicoquímicas, peligrosidad y potenciales impactos ambientales de los LTAB dependen de varios factores asociados a su origen, generación y destino, tales como la composición del agua bruta sujeta a tratamiento, los procesos y productos químicos involucrados en este tratamiento, y de la gestión de dichos residuos (manejo y disposición final). No obstante, el Ministerio de Ambiente clasifica a estos residuos como Categoría II, en aplicación del reglamento para la gestión ambientalmente adecuada de los residuos sólidos industriales y asimilados (Decreto N° 182/013. Reglamentación Del Artículo 21 de La Ley 17.283 (Ley General de Protección Del Medio Ambiente), 2013). Los residuos Categoría II no presentan características de alta peligrosidad, tal como inflamabilidad, corrosividad, reactividad, toxicidad crónica o aguda, ecotoxicidad, riesgo biológico o lixiviación de metales pesados.

En tal sentido, según consultas a referentes en la materia (com. pers. Mag. Ing. Quím. Pablo Gristo), prácticamente todos los LTAB que se generan en Uruguay son gestionados actualmente mediante disposición final en terrenos, vertido en cursos de agua superficial, en vertederos municipales, o en sitios de disposición final industriales.

La agencia ambiental federal de EEUU condujo un estudio de las plantas de potabilización de porte mediano a grande en el país, y de la gestión de los residuos generados en estas plantas, estimando que para ese año que alrededor del 31 % de 2151 plantas descargaban los lodos directamente a cursos de agua, y otro 7 % indirectamente por disposición final en sistemas de saneamiento (U.S. EPA, 2011). A la vez, realizó una revisión de la literatura sobre potenciales impactos ambientales derivados de la descarga de LTAB a cursos de agua, reportando los siguientes:

- Impactos en la comunidad bentónica por acumulación de residuos sólidos en el lecho del curso que cubren y colmatan el lecho.
- El aluminio y otros metales presentes en el LTAB pueden ser tóxicos para los organismos acuáticos.
- Cuando los lodos se descargan en forma discontinua, en lotes, puede aumentar la magnitud de los impactos ambientales.
- Los impactos dependen del caudal y volumen del cuerpo receptor, siendo que a caudales menores los lodos sedimentan rápidamente luego de la descarga y se acumulan en el lecho.

A pesar de su clasificación en Uruguay como residuos Categoría II, el contenido de los LTAB en materia orgánica y en minerales inorgánicos naturales (provenientes del agua

bruta, concentrados durante el tratamiento), y en contaminantes inorgánicos (introducidos durante el tratamiento), supone un riesgo para el ambiente vinculado a su disposición final (Dourado da Cunha et al., 2019). En definitiva, existe cierto consenso en que el vertido directo a cursos de agua de los LTAB, o directamente al terreno en condiciones no controladas, es una práctica ambientalmente inadecuada.

Por otro lado, teniendo en cuenta los conceptos de economía circular y de jerarquía en la gestión de los residuos sólidos, la disposición final de los LTAB, aún en condiciones controladas y de seguridad (relleno sanitario industrial), es la última alternativa a considerar cuando no existen otras posibles o disponibles. De acuerdo a los principios rectores establecidos por la normativa vigente para la gestión de residuos (Decreto N° 182/013. Reglamentación Del Artículo 21 de La Ley 17.283 (Ley General de Protección Del Medio Ambiente, 2013):

“a) En la gestión de los residuos se priorizará la minimización de la generación en origen frente a cualquier otra alternativa, a través de la búsqueda de la eficacia de los procesos productivos, la aplicación de las mejores tecnologías disponibles, las mejores prácticas ambientales y la producción y el consumo sustentables.

b) En forma subsidiaria, se promoverán los siguientes procesos, priorizándolos en el orden en el que aparecen: reuso, reciclado y otras formas de valorización de residuos, como la valorización energética.

c) Las alternativas de tratamiento y disposición final se considerarán como opciones de última instancia, minimizando los efectos ambientales que de ellas puedan derivarse.

d) La gestión de los residuos tenderá a la búsqueda de los mejores resultados ambientales de alcance general, mediante soluciones integrales, viables y sustentables, desde el punto de vista económico, social y ambiental.”

Por todo lo anterior, es necesario promover el estudio y desarrollo de alternativas de valorización de los LTAB que se generan en Uruguay, en conjunto con otras alternativas de gestión ambientalmente adecuadas, y en el presente trabajo se propone contribuir en tal sentido.

1.2. Objetivos

El objetivo general de la presente tesis es estudiar una alternativa de valorización de los lodos de planta de tratamiento de agua bruta (LTAB), a partir de la fabricación de un

producto de uso en la industria de la construcción, para evitar o minimizar la disposición final de estos residuos.

En virtud de lo anterior, se definieron los siguientes objetivos específicos para el estudio:

- Identificar y analizar las alternativas de valorización de los LTAB a partir de literatura técnica nacional e internacional.
- Seleccionar una alternativa de valorización orientada a la fabricación de un producto de uso en la industria de la construcción, considerando las características fisicoquímicas y otras condiciones de los LTAB de una planta de tratamiento de agua bruta en Uruguay.
- Elaborar prototipos a escala de laboratorio y evaluar su desempeño.

1.3. Estructura de la tesis

La Tesis de Maestría se organiza en cinco capítulos, el primero de ellos abarca la motivación frente al estudio y la situación actual del residuo a nivel nacional, los objetivos, la estructura de la tesis y el alcance de la investigación.

En el segundo capítulo se realiza el estado del arte en tres secciones. La primera aborda las tecnologías y procesos de tratamiento de agua, la generación, características, y potenciales impactos ambientales de los LTAB. En la segunda, se desarrollan las principales aplicaciones del residuo a nivel internacional para la fabricación de cerámicos, cementos, agregados para hormigón y productos en base a este material, adiciones minerales, y geopolímeros, y al final se presenta el análisis y argumentos para la selección de cerámicos como aplicación a estudiar. En la tercera y última sección del capítulo, se analizan las dos características más importantes de los materiales utilizados en la mezcla cerámica: composición granulométrica y química.

En el tercer capítulo se describe la metodología seguida en la investigación, desde la caracterización y el acondicionamiento del lodo estudiado, la fabricación de los prototipos y ensayos. Posteriormente, en el cuarto capítulo se plantean los resultados obtenidos de la investigación experimental junto con el análisis y discusión de los mismos. En el quinto capítulo se plantean las conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones, a continuación, se indican las referencias bibliográficas analizadas. Finalmente, en los Anexos se agregan datos y resultados complementarios de la investigación.

1.4. Alcance de la investigación

En función de la revisión bibliográfica realizada, que se presenta en la sección 2.2, se seleccionó la alternativa de valorización de LTAB mediante la fabricación de productos cerámicos (ladrillos). Para el estudio de esta alternativa, se utilizó lodo de tratamiento de agua bruta de una planta industrial de celulosa en Uruguay (UPM Fray Bentos). Para la preparación del producto también se utilizaron arcilla y arena disponibles en el mercado, y agua de red. El LTAB, la arcilla y la arena se caracterizaron física y químicamente.

Se elaboraron prototipos con diferentes porcentajes de lodo deshidratado y molido (5 %,10 %,15 %y20 %), y la referencia sin lodo (0 %). Estos porcentajes de lodo, y la cantidad de prototipos fabricados, se definieron en base a las investigaciones citadas en la bibliografía de referencia.

Los prototipos fabricados se sometieron a ensayos de colorimetría, absorción de agua por diferentes métodos, densidad y porosidad, contracción volumétrica, pérdida de peso, resistencia a la compresión y sulfato en lixiviado.

Se analizaron estadísticamente los resultados de los ensayos, y se compararon respecto a normas de calidad para ladrillos cerámicos, para determinar la aptitud del LTAB en esta aplicación.

2. Estado del Arte

El objetivo del presente capítulo es realizar, en una primera instancia, una revisión del estado del conocimiento de los lodos de planta de tratamiento de agua bruta: los procesos que le dan origen, su composición y los aspectos y potenciales impactos ambientales asociados a su disposición final.

En una segunda instancia, se realiza una revisión bibliográfica para identificar las alternativas de valorización del lodo generado en las plantas de tratamiento de agua bruta. Se analizan en particular las aplicaciones del lodo en la producción de materiales de construcción, vinculadas a la fabricación de productos cerámicos, cemento, agregados para hormigón y productos elaborados en base a dicho material, adiciones minerales, suelo – cemento y geopolímeros.

Como resultado de esta revisión, y realizando un análisis comparativo de las seis aplicaciones mencionadas, se selecciona la alternativa de valorización mediante fabricación de materiales cerámicos por ser la más comúnmente estudiada en la bibliografía y con buenos resultados a escala de laboratorio. A continuación, se estudian las propiedades de las mezclas cerámicas y se presentan los resultados de las principales propiedades de los cerámicos analizadas por los autores.

2.1. Lodos de Planta de Tratamiento de Agua Bruta (LTAB)

El tratamiento de agua bruta (p. ej.: agua obtenida de fuentes naturales, como cursos de agua superficial o acuíferos) es un proceso físico o fisicoquímico que permite obtener agua que cumple determinadas condiciones o especificaciones para el consumo humano, animal, o como insumo para la industria.

En estos procesos se remueven componentes no deseados presentes en el agua bruta, y en contrapartida, se generan corrientes residuales: efluentes líquidos y residuos sólidos. Los componentes que se desean remover del agua bruta pueden ser de origen natural o humano, y al ser removidos, se incorporan a las corrientes residuales. A la vez, cuando el tratamiento del agua bruta utiliza productos químicos, estos también pueden incorporarse a las corrientes residuales.

Los lodos de tratamiento de agua bruta (LTAB) son uno de los residuos sólidos más comunes y más importantes en volumen que se generan durante el tratamiento, y su naturaleza y composición depende fuertemente de los procesos involucrados.

2.1.1. Tecnologías y procesos

Existen diferentes tecnologías para el tratamiento de agua bruta, y a la vez, diferentes escalas de operación para cada una (U.S. EPA 2011). Las tecnologías disponibles pueden combinarse para alcanzar los estándares de calidad deseados en el agua, y en forma sintética, consisten en los siguientes:

- Filtración convencional, filtración directa y filtración simple.
- Ablandamiento por precipitación.
- Separación con membranas
- Intercambio iónico
- Carbón activado
- Desinfección.
- Otros tratamientos químicos.

A continuación, se presenta un resumen de las tecnologías de tratamiento de agua bruta más comúnmente utilizadas y que están vinculadas con el objeto de esta tesis.

La filtración convencional es el tratamiento más común para el agua bruta, y consiste en una serie de procesos que incluyen coagulación, floculación, sedimentación y filtración para una remoción sustancial de los sólidos en el agua bruta. Cuando el proceso no incluye la etapa de sedimentación, la tecnología se denomina filtración directa (los flóculos son removidos en la filtración sin necesidad de una pileta de sedimentación). Las plantas que no necesitan de una etapa de coagulación o floculación, se denominan de filtración simple. Las aguas brutas con un alto contenido de sólidos suspendidos o espumas, pueden requerir una etapa de pre-tratamiento para su separación, y la optimización de las etapas posteriores. En la Figura 1 se presenta un esquema del proceso convencional de tratamiento de agua bruta, los efluentes líquidos y los residuos sólidos generados, y en la Figura 2, un esquema de los residuos sólidos que se generan durante el tratamiento, ambos modificados de U.S. EPA (2011).

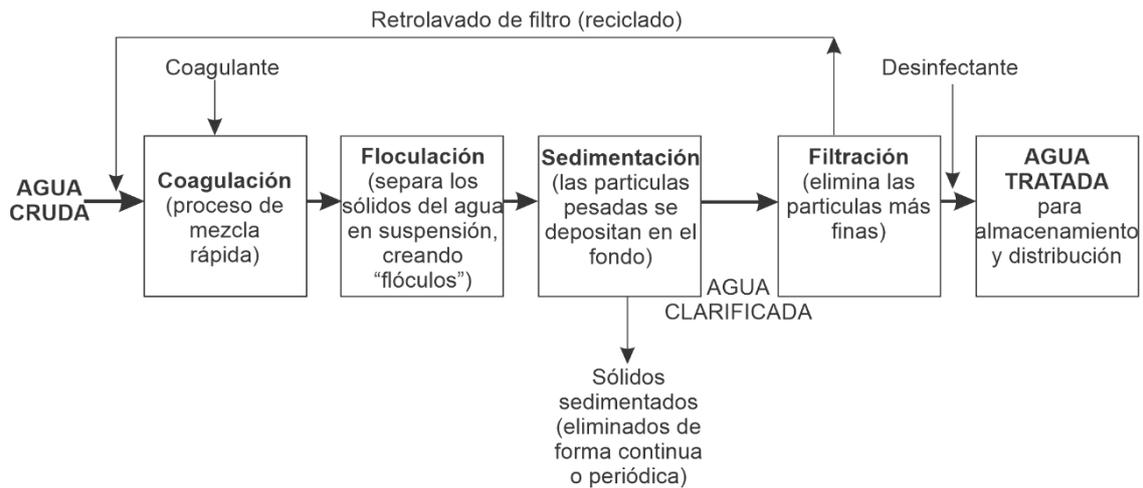


Figura 1: Diagrama de Flujo de una Planta de Tratamiento por Filtración. Modificado de U.S. EPA (2011)

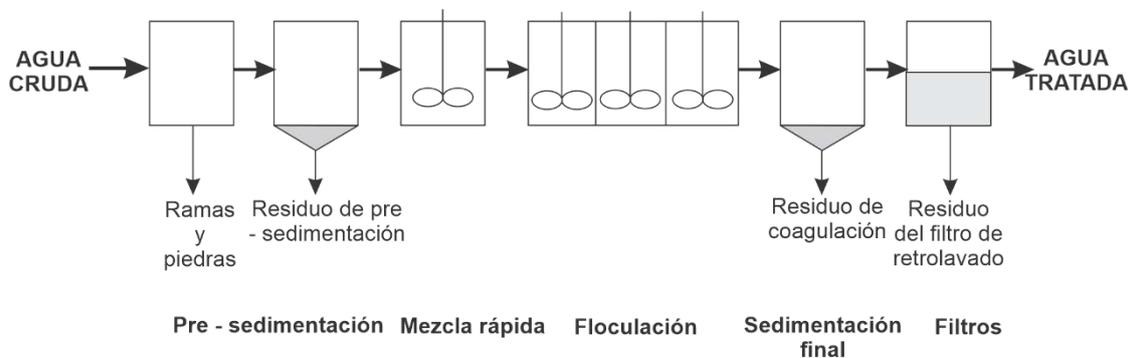


Figura 2: Residuos generados en el tratamiento de agua bruta. Modificado de U.S. EPA (2011)

En la etapa de coagulación y floculación se agregan productos químicos (p. ej.: agentes de coagulación y floculación) que permiten la formación de partículas sólidas de mayor tamaño, que sedimentan por gravedad en la etapa de sedimentación. Estas etapas se pueden desarrollar por separado o en un mismo reactor (p. ej.: sedimentador), y conjuntamente se denomina “clarificación” del agua. Como resultado de esta clarificación, se obtiene un residuo sólido con alto grado de humedad que se denomina comúnmente lodo de tratamiento de agua bruta (LTAB). Estos residuos contienen los sólidos removidos del agua bruta, coagulantes, floculantes y otros productos químicos agregados en las etapas anteriores de tratamiento. Para reducir el volumen de estos residuos, en ocasiones se agrega una etapa de tratamiento o clarificación de los lodos, para obtener un LTAB final con menor contenido de humedad.

Las partículas en suspensión o coloidales, presentes en el agua bruta, están formadas principalmente por arcillas, materia orgánica, algas, microorganismos y otras partículas

muy pequeñas y livianas. Poseen carga negativa en su superficie, y por ello se repelen y no forman partículas mayores (IEM 2021). La etapa de clarificación permite que estos coloides colisionen y se agrupen formando partículas de mayor tamaño, para lo cual deben agregarse agentes coagulantes, floculantes, y en ocasiones un ajuste del pH del agua bruta para optimizar el proceso, además de condiciones fluido-dinámicas adecuadas.

Los coagulantes más utilizados son productos químicos inorgánicos como el sulfato de aluminio, cloruro de aluminio, sulfato ferroso o cloruro ferroso. Los iones Al^{3+} o Fe^{3+} se dispersan en el agua bruta, formando productos de hidrólisis que ofrecen una carga positiva multivalente que neutraliza las cargas negativas en la superficie de las partículas suspendidas, reduciendo la repulsión electrostática entre estas partículas y permitiendo que se acerquen y combinen entre ellas (formación de coágulos o coagulación).

Luego de la coagulación, debe promoverse la formación de los flóculos, que son aglomeraciones de mayor tamaño y peso, visibles al ojo humano, y capaces de sedimentar por sí mismas (IEM 2021). Esta etapa se realiza mediante agitación controlada para favorecer el agregado de partículas, pero evitando romper las aglomeraciones formadas. Se agregan productos auxiliares de la floculación que son generalmente polímeros orgánicos, y comprende una variedad de productos comerciales: poliacrilamida, poli-aminas y cloruro de poli-dimetil-amonio (U.S. EPA 2011).

Posteriormente a la clarificación, el agua clarificada ingresa a una etapa de filtración que permite remover las partículas más finas (sólidos suspendidos, coloides y flóculos de menor tamaño que no sedimentaron en la clarificación). En forma regular los sólidos retenidos en los filtros son eliminados por lavado, generando un “agua de lavado de filtros” (o aguas de retro-lavado) que se circula a etapas anteriores de tratamiento. Los filtros más comúnmente utilizados son de arena, de diatomeas, compuestos (arena, grava y carbón antracita de diferentes tamaños de partícula) o de membrana (U.S. EPA 2011).

De acuerdo a las especificaciones requeridas para el agua tratada, y las características del agua bruta, pueden ser necesarias otras tecnologías de tratamiento. La más común para potabilización es la desinfección, con el objetivo de eliminar o inactivar

microorganismos presentes en el agua bruta. El agente desinfectante más usado en la historia ha sido el cloro, pero recientemente se usan otros productos químicos como el dióxido de cloro, las cloraminas y ozono, o métodos no químicos de desinfección como el calor o radiación (p. ej., luz ultravioleta). Las dosis utilizadas para la desinfección del agua bruta procuran una acción primaria de eliminación o inactivación de microorganismos (generalmente se dosifica previo a la clarificación), y una acción secundaria (generalmente se dosifica al final del tratamiento), para alcanzar una concentración residual del desinfectante en el agua tratada, y prevenir crecimientos posteriores de microorganismos durante su distribución.

Para aguas brutas con alto contenido de sales de magnesio y/o calcio, puede requerirse una etapa de “ablandamiento” que reduce la concentración de estas sales y previene la incrustación o precipitación de sales de estos cationes.

El ablandamiento por precipitación consiste en aumentar el pH del agua, y promoviendo la precipitación en medio alcalino de sales insolubles de magnesio ($Mg(OH)_2$) y de calcio ($CaCO_3$). Se realiza por dosificación de cal (óxido de calcio) en el agua, y en otros y en otros casos se dosifica soda cáustica (carbonato de sodio). Luego del ablandamiento y separación de los precipitados, se reduce nuevamente el pH usando CO_2 , para eliminar el exceso de $Ca(OH)_2$ como $CaCO_3$. Los precipitados son eliminados por sedimentación, generando otra corriente de residuos sólidos denominados lodos de ablandamiento.

Otras tecnologías como la separación por membranas, intercambio iónico, o tratamiento con carbón activado son menos comunes en las plantas de potabilización, y se utilizan en casos donde el agua bruta contiene componentes naturales indeseados o en altas concentraciones (p. ej.: flúor, arsénico, hierro, manganeso) o contaminantes difíciles de eliminar por las tecnologías anteriores, y/o se tienen especificaciones particulares para el agua tratada.

También pueden realizarse dosificaciones de productos químicos al agua bruta con fines específicos, como prevenir la corrosión e incrustación en las cañerías de distribución (p. ej.: fosfatos, zinc), mejorar el proceso de clarificación, ajustar el pH, o impartir propiedades particulares al agua. Estos productos químicos también se pueden incorporar a las corrientes residuales producidas en el tratamiento, por ejemplo, a los LTAB.

2.1.2. Generación de residuos

Tal como se indicó anteriormente, los LTAB son residuos sólidos que sedimentan en la etapa de clarificación, y son removidos del sedimentador en forma continua o en lotes (U.S. EPA 2011).

Los sedimentadores con remoción continua de lodos, cuentan con elementos mecánicos (rascadores o paletas) que conducen el lodo hacia un punto de salida del sedimentador. En el caso de remoción por lotes, generalmente el sedimentador llega a un punto de colmatación o nivel de lodos, y se drena el sedimentador. La frecuencia de remoción por lotes varía de unas pocas semanas hasta meses. El volumen de LTAB generado en una planta de tratamiento depende de su escala, de la cantidad de coagulantes y otros productos químicos utilizados en el tratamiento, y de la cantidad de sólidos suspendidos presentes en el agua bruta.

De acuerdo a un estudio realizado en el año 1993 en plantas potabilizadoras municipales en Estados Unidos, la generación de LTAB se ubica entre 100 y 200 litros de LTAB por millón de metros cúbicos de agua bruta tratada (U.S. EPA 2011), con una tendencia de menor generación de LTAB para plantas más grandes, pero también con una alta variabilidad entre plantas de tamaños similares.

También en dicho estudio se determinó que el LTAB predominantemente contiene los hidróxidos metálicos del coagulante utilizado (aluminio o hierro), materia orgánica, sólidos suspendidos, microorganismos, radionucleidos y otros constituyentes orgánicos e inorgánicos. Los metales encontrados en los LTAB incluyeron aluminio, arsénico y ocasionalmente cadmio, cromo, cobre, hierro, plomo, manganeso, níquel y zinc.

Cuando la planta cuenta con un pretratamiento del agua bruta, que opera eficientemente, gran parte de la arena y otras partículas sólidas de gran tamaño y peso son separadas al principio, y no se integran al agua bruta que ingresa a la clarificación, y por tanto tampoco a los LTAB.

Si el agua bruta contiene una alta concentración de sólidos suspendidos, entonces los LTAB van a contener un alto porcentaje de precipitados de hidróxido gelatinoso (U.S. EPA 2011). Los LTAB que se separan en la clarificación son difíciles de compactar, y contienen un bajo porcentaje de sólidos (entre el 0,5 % y el 2 %). Por este motivo, los

LTAB generalmente requieren de un tratamiento posterior, tal como espesamiento, deshidratación o secado previo a su disposición final, pero debido a su bajo contenido de sólidos, esta eliminación de agua es compleja. Los LTAB son biológicamente inertes, generalmente tiene un bajo contenido orgánico, y poco valor como mejoradores de suelos.

Para reducir los volúmenes de LTAB a gestionar, en algunas plantas se agrega una o varias etapas de espesamiento o eliminación de agua de los lodos (*thickening* o *dewatering*). Las tecnologías incluyen la separación física por gravedad o por flotación de aire, la separación física por medios mecánicos (uso de filtros de banda, de filtros prensa o centrífuga), por evaporación natural (en lagunas o lechos de secado), o por tratamiento térmico o evaporación.

A la salida de los clarificadores, un LTAB puede tener una concentración de sólidos entre el 1% y el 3 % (5 % al 30 % para aguas brutas con una alta o excepcional concentración de sólidos suspendidos), y luego de la primera etapa de espesamiento pueden alcanzar una concentración del 2 % al 5 % (U.S. EPA 2011). En la siguiente etapa, de separación por medios mecánicos puede alcanzarse una concentración del 20 % a 30 % en el caso de una centrífuga, o de 35 % a 45 % en el caso de filtros prensa. Estos valores representan una reducción drástica del volumen de LTAB a gestionar, y permite reducir los costos de capital y de operación para su gestión. A la vez, los procesos de espesamiento significan inversiones y gastos operativos adicionales, así que, en ausencia de consideraciones ambientales o regulatorias, su inclusión en la planta de tratamiento resulta de una decisión económica.

Los procesos de espesamiento de los LTAB pueden involucrar el agregado de productos químicos: agentes coagulantes y floculantes, y otros para optimizar el proceso. Por esta vía se está también modificando la composición final de los LTAB luego del espesamiento.

2.1.3. Composición de los LTAB

De acuerdo a Gregory et al (2002), el volumen y características de los LTAB dependen de: a) las características fisicoquímicas del agua bruta, b) los productos químicos usados para el tratamiento, y, c) la eficiencia con que dichos productos se utilizan. Teniendo en cuenta que la gestión de los LTAB puede contribuir significativamente en

los costos operativos de plantas de tratamiento, este autor propone medidas específicas para reducir la generación de LTAB, tales como mejoras en el abastecimiento de agua bruta, optimización del uso de productos químicos, y tratamiento de los LTAB.

El primero de los factores que afecta la composición de los LTAB es la naturaleza del agua bruta, que varía estacionalmente (cíclicamente) y/o incidentalmente, por cambios naturales que se producen en el caudal y calidad de la fuente de agua, o por modificaciones incidentales debidas a fenómenos naturales o antrópicos. Ejemplo de condiciones naturales que afectan la composición del agua bruta son el clima, la geología, el tipo y cobertura del suelo, la hidrología, régimen de lluvias y escorrentía, y la vida silvestre. Los factores humanos incluyen las prácticas de manejo del suelo y los vertidos desde fuentes puntuales o difusas (U.S. EPA 2011). Los usos del suelo como la agricultura, el desarrollo urbano e industrial y las prácticas de manejo de las cuencas hidrográficas, afectan en forma significativa las características del agua bruta a lo largo del tiempo.

Por ejemplo, algunas prácticas de manejo de suelo durante la agricultura pueden promover procesos de erosión del suelo en la cuenca hidrográfica, y provocar un aumento del contenido de arcilla y limo en el agua bruta obtenida en esa cuenca. Esto requiere un ajuste en el tratamiento, para la remoción de mayor cantidad de sólidos del agua bruta, y, por lo tanto, la generación de una mayor cantidad de residuos sólidos y efluentes líquidos en el proceso (U.S. EPA 2011). También tiene un efecto en un mayor costo de tratamiento para remover estos sólidos adicionales en el agua bruta: aumenta la escala de los procesos, el uso de productos químicos, y los requerimientos de gestión de las corrientes residuales.

Esta variación de las características del agua bruta con el tiempo conlleva ajustes en los procesos de tratamiento, con el objetivo de obtener agua tratada dentro de estándares pre-establecidos. A la vez, estos ajustes (por ejemplo: variaciones en la cantidad y tipo de productos químicos utilizados), afectan las características de los LTAB generados.

Los sólidos presentes en el LTAB provienen primariamente del agua bruta, pero el tratamiento con productos químicos puede incrementar este contenido de sólidos en forma significativa, en particular compuestos de aluminio y hierro utilizados como coagulantes.

Asimismo, el tratamiento de los LTAB puede modificar significativamente su composición, no sólo en contenido de agua (o porcentaje de sólidos), sino en la composición química por el agregado de productos durante su tratamiento (p. ej.: coagulantes, floculantes, ajuste de pH).

2.1.4. Potenciales impactos ambientales

La gestión de los LTAB, incluyendo su manejo y disposición final, puede provocar impactos en el ambiente; la magnitud de dichos impactos depende del volumen y las características de los LTAB, así como de la capacidad o resiliencia del cuerpo receptor o sitio de disposición final.

Cuando los LTAB son descargados directamente en cursos de agua, los sólidos pueden sedimentar en el cuerpo receptor formando acumulaciones que generan condiciones anaeróbicas locales debido a la demanda de oxígeno por descomposición de la materia orgánica presente en los LTAB. Los sólidos suspendidos presentes en el LTAB también aumentan la turbidez en el cuerpo receptor, y reducen la penetración de luz en la columna de agua, limitando el crecimiento de vegetación acuática y, por ende, reduciendo el hábitat para peces, moluscos, y otros organismos acuáticos. Asimismo, los sólidos suspendidos proveen un medio para la adsorción y el transporte de contaminantes que llegan al cuerpo receptor, incluyendo nutrientes, patógenos, metales y compuestos orgánicos tóxicos, que se van acumulando en los sedimentos. Esta carga contaminante en los sedimentos del cuerpo receptor, promovida por la sedimentación de los sólidos presentes en el LTAB, no es estática, y está sujeta a la interacción con la columna de agua por los ciclos naturales de sedimentación, re-suspensión y re-deposición.

Un aumento significativo en la concentración de sólidos suspendidos en el cuerpo receptor de los LTAB puede provocar obstrucción de las branquias en peces, lo que conduce a su asfixia en situaciones graves, o a un incremento de su susceptibilidad a infecciones.

Por otro lado, los sólidos disueltos presentes en el LTAB, cuando son descargados al cuerpo receptor, pueden afectar su calidad, e impactar negativamente en los usos del agua corriente abajo del vertido. Los sólidos disueltos también tienen el potencial de

alterar la química de las aguas naturales a tal punto que afecten la biota acuática, en particular en el entorno del vertido.

El vertido de LTAB de plantas de tratamiento que usan coagulantes de aluminio es otro aspecto a considerar, ya que este metal es potencialmente tóxico para el ambiente acuático. Si bien existe una concentración natural de aluminio en los cursos de agua, un aumento significativo de su concentración, por efecto de los LTAB, puede llegar a niveles tóxicos para varias especies de peces, invertebrados, bacterias y algas.

2.2. Aplicaciones en materiales de construcción

En vista del gran número de trabajos identificados, vinculados a investigaciones sobre alternativas de valorización de LTAB en materiales de construcción, se revisaron y filtraron los resultados de esta búsqueda. Con el objetivo de identificar solamente los trabajos relevantes, se seleccionaron aquellos que cumplieran los siguientes criterios: 1) trabajos publicados en revistas arbitradas desde el año 2001 a la fecha; 2) que partieran de un lodo de planta de tratamiento de agua bruta (se descartaron los trabajos realizados con lodos de planta de tratamiento de efluentes domésticos o industriales); 3) que incluyera datos básicos de la caracterización de dichos lodos; y, 4) que comprendieran una parte experimental de elaboración y ensayo de materiales a partir de los lodos. Esta selección arrojó treinta y tres (33) artículos relevantes para elaborar el presente estado del arte.

De esta selección, se observa que la investigación aplicada reciente para la valorización de LTAB en materiales de construcción se dirige a seis tipos fundamentales de aplicaciones:

- Cerámicos.
- Cemento
- Agregados para hormigón y otros productos en base a este material
- Adiciones minerales
- Suelo-cemento
- Geopolímeros.

En el proyecto de CTAguá, UPM-Facultad de Ingeniería “Alternativas de Valorización de Lodos, UPM” desarrollado por la Facultad de Ingeniería-UdelaR y la Fundación

Ricaldoni (IEM, 2021) se evaluaron algunas de estas aplicaciones, y a continuación se resumen sus principales conclusiones.

La aplicación que obtuvo mejores resultados en el proyecto, consistente con la bibliografía estudiada, es la valorización de lodos crudos y deshidratados en la fabricación de materiales cerámicos. En el informe final del proyecto se indica que la adición de 10 % de lodos deshidratados y molidos cocidos durante 1 hora a 1.000 °C permitió la elaboración de materiales cerámicos macizos cuya resistencia a compresión está dentro de los rangos determinados para ladrillos de campo elaborados en nuestro país.

A la vez, los cerámicos fabricados con lodo molido y deshidratado presentaron mejores indicadores de calidad que los fabricados con lodo crudo. Estos últimos presentaron valores mayores de porosidad y absorción de agua, y menores valores de resistencia a la compresión, por lo que se concluye que el acondicionamiento previo del lodo es determinante en la calidad del cerámico.

Se reporta que el porcentaje de lodos en la mezcla cerámica es determinante en la calidad de los prototipos ensayados; se trabajó con 10 % y 20 % de adición de lodos, además de la serie de referencia sin adición de lodo (0 %). A mayor porcentaje de lodo, mayor es la porosidad y absorción de agua, y menor es la resistencia a la compresión obtenida. Las condiciones de cocción de los prototipos cerámicos también se señalan como un factor determinante, siendo necesario lograr una estructura homogénea a los efectos de obtener mejores prestaciones en dichos materiales (mayores resistencias a compresión, menor porosidad y absorción de agua, también menor sulfato en lixiviado).

Otras aplicaciones estudiadas en este proyecto comprenden la valorización en materiales cementicios, como sustitución parcial de cemento por lodo y como sustitución parcial de agregado fino. Se descartó la aplicación del lodo como adición al cemento portland por los altos porcentajes de humedad que presentan los lodos crudos (próximos al 80 %), y en el caso que se trabaje con lodos deshidratados, se obtienen valores muy altos de pérdida por calcinación (superando el 36 %).

Para el micro-hormigón fabricado utilizando lodos como sustitución parcial de agregado fino los resultados no fueron alentadores. Esto se atribuye en el proyecto al hecho de que los lodos presentan altos valores de materia orgánica, alto porcentaje de materiales

arcillosos (> 1,5 %), dosis altas de sulfato de aluminio (> 1,2 %), lo que influye negativamente en la hidratación del cemento. Se indica que los componentes del lodo mencionados absorben gran cantidad de agua y no permiten la completa hidratación de los compuestos principales del cemento, afectando la resistencia a compresión del micro-hormigón fabricado, su fraguado y endurecimiento.

Para la aplicación en materiales en base a suelo-cemento (p. ej., ladrillos, bloques, ticholos, entre otros), el proyecto también evaluó la viabilidad del empleo del lodo como parte de la mezcla de suelo, cemento portland y agua (se esperaba que estos materiales compactados obtengan resistencia mediante las reacciones de hidratación del cemento). Si bien se obtuvieron valores de absorción de agua dentro de los límites definidos por la norma brasilera NBR 10836, no se alcanzaron valores mínimos de resistencia a la compresión fijados por la misma. En este caso, se pudo concluir, tal como se mencionaba anteriormente, que a pesar de que los materiales en base a suelo-cemento tienen contenidos de cemento muy bajos, la incorporación de los lodos, origina disminución de la resistencia y de la absorción de agua a medida que se aumenta el porcentaje de lodo empleado, aumentando también considerablemente el contenido de sulfatos en lixiviado.

Para cada aplicación, a continuación, se realiza una síntesis de los artículos relevantes, ordenados cronológicamente por año de publicación.

2.2.1. Cerámicos

Los siguientes autores estudiaron la aplicación de lodos de planta de tratamiento de agua bruta a la fabricación de cerámicos: Toya et al. (2007), Monteiro et al. (2008), Ramadan et al. (2008), Chiang et al. (2009), Teixeira et al. (2011), Kizinievič et al. (2013), Benlalla et al. (2015), Da Silva et al., 2015), Wolff et al. (2015), Ewais et al. (2017), Ling et al. (2017), Algamal et al. (2018), Cremades et al. (2018), Petterle et al. (2018), Pokhara et al. (2019) y Sarabia Guarín et al. (2020).

Teniendo en cuenta el alto contenido de minerales inorgánicos en lodos de potabilización de agua en Tokio, y con el objetivo de desarrollar aplicaciones alternativas de valorización de estos residuos, **Toya et al. (2007)** investigaron su posible uso en la fabricación de materiales vitrocerámicos. Los autores informan que este residuo de la ciudad se utilizaba como mejorador de suelos y en la fabricación de ladrillos y cementos,

pero alrededor de un tercio del mismo todavía no era re-utilizado. En esta publicación no se especifican las normas utilizadas para los ensayos citados.

Se presenta una caracterización química inorgánica del lodo, por fluorescencia de rayos X (FRX), que varía estacionalmente en forma significativa (enriqueciéndose en SiO_2), y con los siguientes principales constituyentes expresados en masa: 45 % SiO_2 , 39,6 % Al_2O_3 , y 6,1 % Fe_2O_3 .

La parte experimental consistió en la fabricación de prototipos de vitro-cerámica a partir de una mezcla de lodos de la planta de potabilización Asake, en Tokio (36,4 %), CaCO_3 (43,3 %) y vidrio sodio-cálcico residual (20,3 %). Los porcentajes de cada componente, expresados en masa, fueron seleccionados para producir una mezcla eutéctica del sistema CaO (38 %) – Al_2O_3 (20 %) – SiO_2 (42 %) (esto refiere a una mezcla homogénea de componentes que solidifican a una misma temperatura, menor que el punto de fusión de cada uno de sus componentes). Previa molienda y secado, la mezcla de materiales se funde a 1300 °C durante 2 horas para la obtención de vidrio granular, seguido de molienda y re-fundición por encima de 900 °C. Se obtuvieron prototipos de vitrocerámica con un característico color amarronado debido al significativo contenido de Fe_2O_3 y una pequeña cantidad de MnO .

Se estudiaron las propiedades mecánicas, el comportamiento térmico, químico y la durabilidad de la vitrocerámica fabricada, y se compararon con los datos reportados por otros materiales vitrocerámicos (cuatro elaborados con diferentes residuos y uno comercial). Con los lodos se obtuvieron una mayor densidad aparente, resistencia a la flexión y durabilidad química para solución alcalina. Por el contrario, la dureza, el coeficiente de dilatación térmica y la durabilidad química para la solución ácida resultaron menores.

Monteiro et al. (2008) investigaron la sustitución de arcilla en la fabricación de cerámica roja, por lodos provenientes de la decantación en el proceso de potabilización de agua en Brasil (sin indicar origen específico). Según los autores, las ventajas de esta alternativa de valorización de lodos, frente a otras posibles, son la descomposición del contenido orgánico, y la completa inmovilización de los contaminantes inorgánicos presentes en el lodo, por su exposición a altas temperaturas. Específicamente se estudió la posibilidad de sustituir una parte de la arcilla de la región de Campos dos

Goytacazes, Rio de Janeiro, que es usada corrientemente para la fabricación de ladrillos y tejas. Esta investigación se realizó bajo las normas brasileñas.

El lodo, luego de una etapa de secado a 110 °C, se caracterizó mineralógica, química y físicamente por difracción de rayos X (DRX), por distribución de tamaño de partícula, y analizado químicamente por espectrometría de fluorescencia. El lodo seco también se estudió mediante Termogravimetría (TG) y análisis termo-diferencial (DTA). Presenta composición mineral similar a la arcilla: materia orgánica, caolinita, cuarzo, goethita y gibbsita, y se compone principalmente de SiO₂ (24,68 %), AlO₂ (30,39 %) y FeO₂ (11,59 %).

Se prepararon mezclas con diferentes proporciones de sustitución de arcilla por lodo (0 %, 3 %, 5 % y 10 %), se prepararon especímenes prismáticos de 115 mm x 25 mm x 10 mm de cada proporción, con un 8 % de humedad, y se secaron a 110°C en horno a peso constante. Los especímenes se cocinaron en horno eléctrico de laboratorio a temperaturas de 700 °C, 900 °C y 1100 °C.

Los autores concluyen que, debido al contenido de materia orgánica y minerales de arcilla, cuyas partículas son finas, los lodos presentaron alta plasticidad, principalmente cuando son secados al natural. La sustitución de hasta un 10 % de arcilla por lodo aumenta ligeramente la absorción de agua y disminuye la resistencia mecánica de la arcilla luego de la etapa de cocción. Sugieren la sustitución de arcilla con lodos en baja proporción para evitar daños en el procesamiento y la calidad de la cerámica.

Ramadan et al. (2008) estudiaron el uso de lodos de planta de tratamiento para la fabricación de ladrillos cerámicos, como una alternativa de gestión del residuo, pues la mayoría de estas plantas potabilizadores en Egipto descargaban los lodos directamente al río Nilo. Indican que esta práctica puede provocar la acumulación de concentraciones de aluminio (proveniente del tratamiento) en el curso de agua, organismos acuáticos y en seres humanos. Destacan una composición mineralógica similar entre el lodo y la arcilla utilizada para la fabricación de ladrillos. En esta investigación se usaron normas británicas y egipcias.

Para el estudio se utilizaron lodos de la planta de tratamiento de Giza en el sur de El Cairo, provenientes de los tanques de clarificación y coagulación de agua (resultado del

agregado de sulfato de aluminio como coagulante). Este lodo está compuesto originalmente por 1 % de sólidos suspendidos y 99 % de agua, y son difíciles de deshidratar.

Se realizó una caracterización química completa del lodo filtrado (contenido de agua final no menor al 20 %), resultando los siguientes componentes principales: SiO_2 (43,12 %), Al_2O_3 (15,97 %) y Fe_2O_3 (5,26 %).

El acondicionamiento del lodo incluyó, además del filtrado y secado, una última etapa de eliminación del contenido de materia orgánica, quemando el lodo a un rango moderado de temperaturas entre 150 °C y 350 °C por 2 horas, observándose un valor relativamente alto de pérdida por ignición. Con el lodo acondicionado, se elaboraron prototipos de laboratorio de 50 mm x 50 mm x 50 mm, mediante la mezcla de los componentes secos (arcilla comúnmente utilizada para ladrillos, y distintas proporciones de lodo sustituyendo arcilla), la mezcla mecánica con un volumen de agua para armar el ladrillo crudo, el secado por exposición a aire y sol durante no menos de 6 días, y finalmente la cocción en horno eléctrico a diferentes temperaturas: 950 °C, 1000 °C, 1050 °C y 1100 °C. En total se estudiaron 16 tipos de prototipos, según las 4 proporciones de adición de lodo (50 %, 60 %, 70 % y 80 % en el peso total de la mezcla lodo-arcilla), y las 4 temperaturas de cocción indicadas.

Los resultados muestran que los ladrillos presentan mejores propiedades físicas y químicas que los presentes en el mercado, con una adición óptima del 50 % de lodo en la mezcla lodo-arcilla. Para mayores porcentajes de sustitución de la arcilla en el ladrillo (llegando incluso a sustitución total), se requieren temperaturas de sinterización más altas, debido al bajo contenido de sílice y alto de alúmina en los lodos. Los autores indican que es necesario el acondicionamiento de los lodos mediante la quema a temperaturas moderadas con el objetivo de eliminar la mayor parte de su contenido orgánico.

Motivados por el aumento en la generación de residuos de plantas de potabilización en Taiwán, que se disponen en rellenos sanitarios, sumado a los importantes volúmenes de generación de residuos en la agricultura, y los impactos ambientales derivados, **Chiang et al. (2009)** estudiaron la fabricación de ladrillos alivianados mediante la adición de lodos secos (LTAB) y cáscara de arroz. En esta investigación se usaron normas taiwanesas y americanas ASTM.

Se utilizaron lodos de la planta de potabilización de Fong-Yuan ubicado en la región central de Taiwán, provenientes de la etapa de coagulación y floculación que utiliza cloruro de polialuminio (PAC) como coagulante, y deshidratados en camas de secado de la planta. Estos lodos fueron acondicionados en laboratorio mediante molienda y tamizado para obtener tamaños de partícula entre 74 y 300 μm . Se acondicionó la cáscara de arroz en forma similar. Se determinó el contenido de humedad de los lodos, la composición química por fluorescencia de rayos X (FRX), y la composición mineral por difracción de rayos X (DRX). Asimismo, se determinó el contenido de metales pesados y la toxicidad del lixiviado (ensayo TCLP). Estos lodos están compuestos principalmente por SiO_2 (53,36 %), Al_2O_3 (15,28 %) y Fe_2O_3 (21,01 %), porcentajes expresados en masa, base seca. A partir de la interpretación de los resultados de DRX, Chiang et al. (2009) identifican la sílice como principal fase cristalina del lodo, con picos de intensidad relativamente baja correspondientes a Al_2O_3 y Fe_2O_3 .

Para el estudio se prepararon especímenes mezclando lodo acondicionado con cantidades variables de cáscara de arroz, también acondicionada, para lograr mezclas homogéneas de 0 %, 5 %, 10 %, 20 % y 25 % de cáscara de arroz en peso base seca. Se agregó agua a estas mezclas para armar especímenes cilíndricos (crudos) de 20 mm de diámetro y aproximadamente 55 mm de altura. Luego se sinterizaron en horno eléctrico programado a 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, con una pausa a 105 $^{\circ}\text{C}$ para eliminar la humedad, otra a 600 $^{\circ}\text{C}$ para eliminar la materia orgánica, hasta llegar a una temperatura de 800 a 1100 $^{\circ}\text{C}$ (diferentes experimentos) la cual se mantuvo por 180 minutos.

Se examinaron las características de los especímenes sinterizados, y se observó que la densidad aparente disminuyó significativamente con el aumento de la adición de cáscara de arroz y la disminución de la temperatura de sinterización. En la temperatura de sinterización de 1100 $^{\circ}\text{C}$ con 15 % de cáscara de arroz, las muestras sinterizadas obtuvieron una densidad aparente menor a 1,8 g/cm^3 . Al aumentar la adición de cáscara de arroz disminuyó considerablemente la densidad aparente de los productos sinterizados debido a la mayor cantidad de poros abiertos de los mismos.

La resistencia a la compresión del ladrillo alivianado, con una temperatura de sinterizado en 1100 $^{\circ}\text{C}$ y una proporción de adición de cáscara de arroz inferior al 15 %, cumple con el requisito del código de ladrillos de construcción correspondiente (100 kgf/cm^2). La cantidad de poros abiertos en la fabricación de productos sinterizados debido a la

adición de LTAB y cáscara de arroz, aumenta en comparación con los ladrillos hechos únicamente de LTAB. Debido a la gran cantidad de poros abiertos, los productos sinterizados tienen buenas propiedades de aislamiento térmico.

El estudio de **Teixeira et al. (2011)** indica que existían más de 7500 plantas potabilizadoras en Brasil, y que en general el lodo producido en estas plantas era vertido directamente a cursos de agua, ocasionando un significativo impacto ambiental, comprometiendo la calidad del agua de consumo, y la salud humana y animal. Investigaron el uso de LTAB en sustitución parcial de arcilla para la fabricación de ladrillos, realizando experimentos a escala laboratorio. Los autores indican la importancia de la industria cerámica en Brasil, y la posibilidad de reducir el consumo de materias primas (arcilla) con esta alternativa, además de hacer un aporte a la valorización de los residuos de potabilización. Esta investigación utiliza normas brasileñas y chinas.

Para los experimentos, utilizaron lodos obtenidos de la etapa de decantación, a continuación de la coagulación y floculación, tomando muestras mensualmente durante 10 meses en la planta de potabilización de la compañía SABESP, ubicada en el condado de Presidente Prudente a 558 km de la ciudad de San Pablo. En dicho período la planta utilizó diferentes coagulantes: sulfato de aluminio, cloruro férrico y PAC. Las muestras se secaron en horno a 110 °C, se molieron, y se tamizaron con tamaño de malla 0,42 mm. Luego se determinó la concentración de materia orgánica, y de las fracciones de arena, arcilla y limo de las muestras (previa eliminación de la materia orgánica por oxidación con H₂O₂). Se realizó difracción de rayos X (DRX) para determinar el contenido mineral del lodo, espectrometría de absorción atómica (AAS) para determinar la presencia de metales pesados, y caracterización mediante ensayos termogravimétricos y termo-calorimetría diferencial. Se observaron diferencias estacionales en la composición de los lodos, y en su granulometría (no en el contenido de materia orgánica). Los minerales más comunes encontrados en la fracción arcilla del lodo, en orden, son: caolinita (predominante), mica, goetita y cuarzo. Se indica que los componentes elementales principales del lodo son Fe (Hierro), Si (Silicio), Al (Aluminio) y Ti (Titanio) con una pequeña concentración de Ca, pero no se presentan los resultados del FRX. Relacionaron la concentración estimada de hierro (130,800 ppm) con el coagulante férrico utilizado para el tratamiento de agua bruta.

Se fabricaron probetas cerámicas (no se informan las dimensiones) con una arcilla comúnmente utilizada por la industria en la región, y un porcentaje de sustitución variable de esta arcilla con LTAB entre 0 % y 30 % en peso. Las probetas se cocinaron en horno de cocción de laboratorio a 5 diferentes temperaturas entre 800 y 1200 °C. Las probetas cocidas se ensayaron de acuerdo a normas brasileras para control de calidad de productos cerámicos, incluyendo absorción de agua, porosidad aparente, masa específica aparente, contracción lineal, y otros ensayos de resistencia de materiales.

Con respecto a la resistencia a flexión y la absorción de agua, se observó que es posible agregar un 10 % de los lodos tratados con sulfato de aluminio, y un 20 % de lodos tratados con cloruro férrico, a partir de temperaturas de quema de 950 °C. Un mayor porcentaje de incorporación de lodos, generalmente, empeora las propiedades físicas y tecnológicas del cerámico. Los cerámicos obtenidos con lodos en base de Al tienen propiedades cerámicas menores que los obtenidos con lodos en base de Fe (asociado con el tipo de floculantes utilizados en el tratamiento, observaron que los lodos obtenidos a base de alúmina son más perjudiciales para las propiedades cerámicas que aquellos obtenidos a partir de tratamientos de agua con compuestos férricos.). Se concluye que el porcentaje máximo de sustitución de lodos por arcilla, sin pérdida significativa de propiedades cerámicas, depende de la temperatura de cocción, las propiedades de los lodos, y fundamentalmente, las propiedades de la arcilla.

Kizinievič et al. (2013) observan que el uso de residuos en la producción de materiales de construcción permite reducir el uso de materias primas tradicionales, el consumo de energía y recursos naturales y tiene un impacto positivo en el ambiente. En este artículo estudian las propiedades físicas, mecánicas, parámetros estructurales de cerámicos elaborados con lodos de potabilización provenientes de Lituania. Estos lodos tienen un contenido prevalente de Fe_2O_3 amorfo debido al alto contenido de hierro en la fuente de agua subterránea, el cual debe ser removido en la potabilización para cumplir estándares nacionales (otros componentes menores incluyen SiO_2 , P_2O_5 , CaO y otros óxidos que no superan el 1,5 %). Se plantea además que esta composición del lodo puede ayudar a sustituir (o complementar) los colorantes que se agregan a la cerámica, típicamente óxidos de hierro, que le dan una coloración característica y atractiva. Se hace referencia a estudios anteriores y las dificultades encontradas al utilizar LTAB en cerámicos: aumento de la demanda de agua en el proceso de formación, deterioro de las propiedades de resistencia y la densidad, aumento de la porosidad, y la impregnación de agua. Esta investigación utiliza normas lituanas.

Se utilizaron lodos producidos en el proceso de remoción de hierro, en la potabilización, que son obtenidos luego del pasaje del agua tratada por filtros de arena. Se secaron a 100 °C y 105 °C, molieron y tamizaron con tamaño de malla 0,63 mm, para realizar las mezclas con la materia prima tradicional (mezcla de arcilla y arena). Se utilizaron varios porcentajes de sustitución de materia prima: 0 %, 5 %, 10 %, 20 %, 30 % y 40 %. Estas mezclas se humedecieron para formar la mezcla final, que se mantuvo por 3 días en ambiente de 95 % ± 5 % humedad, para lograr humedad homogénea en la masa. Luego se fabricaron prototipos de 70 mm x 70 mm x 70 mm, que se cocinaron a 1000 °C y 1050 °C durante 34 horas, manteniéndose a la temperatura máxima durante 4 horas.

Los prototipos cocidos fueron sometidos a diversos análisis y ensayos: densidad, compresión, impregnación de agua, porosidad. Se observa que la sustitución de materia prima con lodo es eficaz, influyendo en las propiedades físicas y mecánicas, así como en los parámetros estructurales del cuerpo cerámico, y en lograr una coloración más atractiva de los cerámicos (aún con una pequeña cantidad del 5 %).

Benlalla et al. (2015) resaltan que el uso de LTAB para la fabricación de cerámicas estructurales puede ser tecnológica, económica y ambientalmente atractiva porque produce materiales con mejores resistencias a la flexión, a la vez que provee una alternativa para la gestión de estos residuos. En su estudio utilizan lodos colectados de la planta potabilizadora de Bouregreb en la ciudad de Rabat, Marruecos. En esta planta el agua es tratada con sulfatos de aluminio y electrolitos poli-catiónicos. Se tomaron muestras semanales del tanque de coagulación/ floculación durante 12 meses, se secaron al sol durante 72 horas, molidas y tamizadas a través de una malla de 0,6 mm para obtener un tamaño de partícula uniforme. Posteriormente, tanto el lodo como la arcilla (obtenida de la industria de ladrillos local) se deshidrataron en horno eléctrico durante 48 horas a 105 °C, para determinar sus propiedades fisicoquímicas y composición. Esta investigación utiliza normas francesas y americanas.

Se determinó la composición química del lodo y la arcilla por fluorescencia de rayos X (FRX), y el contenido de metales pesados por espectrometría de plasma acoplado inductivamente (ICP). La composición principal de los lodos es: SiO₂ (27,12 %), Al₂O₃ (62,66 %) y FeO₂ (1,16 %), expresado como porcentaje en masa, base seca.

Verificaron el cumplimiento de los estándares para metales pesados en el lodo mediante ICP-MS: Fe (< 5 ppm), Ni (< 0,5 ppm), Cr6+ (< 0,1 ppm), Pb (36 ppm), Cd (5 ppm), Cr (31 ppm), Zn (35 ppm), y Ni (15 ppm).

Se fabricaron ladrillos con la mezcla de arcilla y lodo acondicionados, sustituyendo cantidades variables de arcilla por lodo: 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 % y 30 % en peso. La mezcla se homogeneizó en una mezcladora de cocina comercial por 60 min, se agregó agua para humedecer al 10 % en peso, y se dejó reposar en bolsas plásticas durante 1 día para lograr una distribución homogénea de la humedad. Las mezclas humedecidas fueron luego moldeadas a la geometría de los prototipos (80 x 30 x 20 mm), al día siguiente se secaron en horno a 105 °C hasta lograr peso constante. Estos prototipos crudos se cocinaron en horno eléctrico a 3 diferentes temperaturas: 800 °C, 900 °C y 1000 °C, con una programación de 5 °C/min, y cocción por 2 horas al llegar a la temperatura objetivo.

Los ladrillos producidos luego se sometieron a una serie de pruebas: contracción, pérdida de peso por ignición, absorción de agua, densidad aparente y la porosidad abierta se realizaron de acuerdo con las normas de referencia, y de resistencia a la compresión para determinar la calidad de los ladrillos. Todos los valores resultaron aptos para la fabricación de ladrillos.

El análisis de MEB sobre los productos cerámicos; observan un material de matriz denso en los cerámicos sinterizados a 1000 °C, con buenas características superficiales, compuesto principalmente de cristales de cuarzo redondeados y de forma rómbica, con cristales cúbicos y de malla de arcilla.

Como resultado de estos ensayos, se observó que la resistencia de los ladrillos aumenta con la temperatura de cocción. Con hasta un 30 % de lodo en los ladrillos a 1000 °C, la resistencia es aún mayor que el de los ladrillos de arcilla normales. La proporción de lodos en la mezcla y la temperatura de cocción son los dos factores clave que afectan la calidad del ladrillo. Los autores reportaron que la proporción de lodos óptima es del 20 %, con una humedad del 30 %, preparado en mezclas moldeadas y cocido entre 900 °C y 930 °C para producir un ladrillo de buena calidad.

En el trabajo de **Da Silva et al. (2015)** se indica que la mayoría de los LTAB en países en desarrollo son descargados a cursos de agua, lo que conlleva el deterioro de esos

cuerpos y efectos adversos en la biota acuática, enviados a disposición final en vertederos, lo cual es una alternativa costosa que ocupa grandes áreas y puede contaminar el suelo y agua subterránea, o bien son descargados en sistemas de saneamiento, los que no están diseñados para ello y puede ocasionarle problemas operativos. El uso de LTAB como materias primas puede ser beneficioso, y, además, cumplir las regulaciones cada vez más exigentes para la gestión de los LTAB. Sin embargo, a pesar que existen buenos antecedentes de estudios a escala laboratorio, las aplicaciones a escala industrial y comercial son limitadas. Se utilizan normas brasileñas en esta investigación.

Para el estudio se utilizó lodo de la planta potabilizadora de Bolonha, ubicada en la región metropolitana Belén, Brasil, que en dicho momento se descargaba directamente a curso de agua (lagos). Se instalaron 2 unidades de deshidratación de lodos para la obtención de las muestras, que se tomaron de un lote de lodo deshidratado acumulado durante unas semanas (una muestra en cada unidad). Se siguieron normas nacionales para caracterizar las muestras de lodo, y la arcilla usada normalmente para la fabricación de cerámicos (una mezcla de 8 partes de arcilla “liviana” y 2 partes de arcilla “gruesa”), incluyendo difracción de rayos X (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX), densidad, humedad y carbono orgánico total, microscopía electrónica de barrido (MEB). Como resultado de la DRX indican que los principales minerales del lodo corresponden a caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) y la gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), y un predominio de fase amorfa. En base a que las arcillas que contienen caolinita e illita producen cerámicas livianas con alto aislamiento térmico y adecuada resistencia mecánica, estos lodos pueden ser utilizados como sustituto de la arcilla en la fabricación de productos cerámicos de buena calidad.

Los resultados de la MEB muestran que el lodo presenta partículas con dimensiones micrométricas ($<2 \mu\text{m}$). Generalmente, estos son aglomerados con texturas extremadamente similares a las observadas en minerales arcillosos. El análisis con espectroscopia dispersiva de energía (EDS) muestra la presencia de altos niveles de Al, Si y Fe también como pequeñas proporciones de los elementos Mg, K, Ca y Ti en el lodo. Las pruebas de caracterización física y mineralógica realizadas sobre las materias primas cerámicas y lodos, permitieron verificar la compatibilidad entre los materiales, lo que llevó a la producción de ladrillos cerámicos de calidad adecuada de acuerdo con las especificaciones de las normas técnicas brasileñas.

Los ensayos granulométricos del lodo sugieren que es rico en minerales de arcilla, con una pequeña cantidad de limo y ausencia de arena, pero un alto contenido de material orgánico, típico de la región de Amazonas. Se determinó la humedad de los componentes, y se elaboraron distintas mezclas de lodo y arcilla: 0 (control), 10, 12 y 20 % en volumen. Estas mezclas expresadas en peso, para los lodos de la unidad de deshidratación 1 corresponden a: 7,6 % y 9,0 %, mientras que para lodos de la unidad 2 corresponden a: 11,7 %, 13,9 % y 23,5 %. Las mezclas se homogeneizaron y luego se elaboraron cerámicos huecos mediante extrusión en un equipo industrial (fabricación de ticholos de tamaño estándar), luego se secaron al aire por 7 días, y finalmente se quemaron a 500 °C por un período de 48 horas. Luego del quemado, los ticholos se enfriaron en el mismo horno por 24 horas.

Los resultados presentados en este trabajo, muestran que es posible incorporar hasta un 13,9 % de lodo en cerámicos, y cumplir con las normas técnicas. La absorción de agua aumentó con la incorporación de lodos, debido al aumento de la porosidad, los ladrillos tenían una estructura menos consolidada, y consecuentemente menor resistencia mecánica, sin embargo, los ladrillos todavía satisfacen las especificaciones de norma técnica brasileña.

Wolff et al. (2015) proponen el uso de LTAB de la planta de tratamiento de agua y otros residuos industriales (*dregs*, *grits* y los lodos de cal), producidos en una planta de producción de celulosa en Brasil (Belo Oriente, Minas Gerais), para la fabricación de ladrillos cerámicos. Esta alternativa permitiría la reducción del consumo de arcilla en la industria cerámica, preservando este recurso mineral y reduciendo el gasto de rehabilitación ambiental de los yacimientos, y también reducir la cantidad de residuos de la industria celulosa que actualmente son eliminados en vertederos industriales. También propone utilizar polvo de granito o de roca granítica, un residuo producido en la región, como insumo en las mezclas cerámicas. En esta investigación se utilizaron normas brasileñas.

Se realizaron 8 mezclas con distintos porcentajes de residuos, una de ellas es el control con 100 % de LTAB, las demás se componen desde 50 % a 85 % de LTAB en peso y la adición en distintas proporciones de *dregs*, *grits*, lodo de cal y polvo de granito completando el 100 % en peso de las mezclas. Para la composición de estas mezclas, se hicieron los ensayos de granulometría de todas las materias primas y se utilizó el diagrama de Winkler (1954), donde se define la composición granulométrica adecuada

para las mezclas cerámicas: 25 % de arcilla, 40 % de limo y 35 % de arena. Por otra parte, utilizaron un método matemático de combinación de variables para optimizar el diseño de las mezclas.

Se determinó la composición química del LTAB por FRX, encontrando principalmente SiO_2 (37,5 %), Al_2O_3 (30,1 %) y Fe_2O_3 (12,3 %), con una pérdida por calcinación de 17,1 %. Indican que los LTAB pueden ser sustitutos potenciales de la arcilla para la fabricación de ladrillos, porque su composición química es muy similar a la de la arcilla. Analizaron los elementos que se consideran esenciales para la calidad del cerámico: elementos alcalinos por sus propiedades fundentes, y elementos alcalinotérreos, ya que el calcio y el magnesio confieren buenas propiedades mecánicas a la cerámica estructural. En tal sentido, encontraron un contenido relativamente bajo de óxido de calcio en los LTAB (0,2 %). También se hizo el ensayo de DRX, TGA y DTGA.

La presencia en la mezcla cerámica de fases minerales del sistema ternario $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ son necesarias para un buen acabado del producto (cerámica estructural). Ejemplos de estas fases minerales son la Anortita ($\text{CaAl}_2\text{-Si}_2\text{O}_8$) y la Gehlenita ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$), que implican una concentración de alrededor del 10 % y 20 % de óxido de calcio, respectivamente.

Las mezclas se dejaron reposar durante 30 días envueltas en plásticos y dentro de una cámara húmeda. Luego se fabricaron prototipos por extrusión de la mezcla reposada, de tamaño: 70 mm x 25 mm x 15 mm (70 especímenes de cada una de las mezclas). Los prototipos se secaron al aire durante 72 horas y luego en horno a 110 °C durante 24 horas. Finalmente se cocieron en un horno de mufla a 850 °C, 950 °C y 1050 °C, con velocidades de calentamiento y enfriamiento de 2,5 °C/min.

Se ensayaron las propiedades mecánicas de los prototipos cocidos: contracción lineal, pérdida por ignición, resistencia a la flexión, absorción de agua, porosidad aparente y densidad.

Los autores concluyen que el LTAB puede ser utilizado como sustituto de la arcilla en la formulación de mezclas cerámicas. La proporción de lodo y la temperatura de cocción, son los dos factores claves para determinar la calidad del ladrillo, y la concentración de lodo a incorporar dependerá de las propiedades del mismo. En términos generales el aumento de la proporción del lodo, resultó en un aumento de la contracción lineal,

disminución de la densidad aparente y la resistencia a la compresión. Para estas mezclas, los autores sostienen que no pueden ser utilizadas para la producción de ladrillos macizos o huecos, siendo más adecuadas para la producción de cerámicos de revestimiento o ladrillos acústicos. Sin embargo, el mismo equipo, en el año 2017, vuelve a investigar con las mismas mezclas, y proponen que tres de esas mezclas, podían utilizarse para la fabricación de tejas cerámicas (Wolff et al., 2017).

Ewais et al. (2017) demostraron que en condiciones adecuadas pueden utilizarse lodos provenientes de planta de tratamientos de agua y cáscara de arroz en el procesamiento de ladrillos refractarios aislantes livianos. En la introducción del artículo se expresa que diariamente se generan grandes cantidades de LTAB en Egipto, y que la práctica común es su descarga al cuerpo de agua más próximo, que provocan el aumento y acumulación de aluminio en agua y consecuentemente en humanos. Al respecto, mencionan que la acumulación de aluminio en el cerebro ocasiona enfermedad de Alzheimer en adultos y desórdenes intelectuales en niños. Por otro lado, como país productor de arroz, se generan también grandes cantidades de cáscara de arroz que son dispuestos en vertederos, ocasionando contaminación del suelo, o quemados, lo cual produce cenizas y emisiones a la atmósfera. Para esta investigación se utilizaron normas americanas.

Para la parte experimental se usó lodo de la planta de tratamiento de agua de la central eléctrica El-Kureimat, en Giza, y ceniza de la quema de cáscara de arroz, que se utiliza en la fabricación de ladrillos refractarios livianos. Se tomaron muestras representativas semanales de lodo sin filtrar y filtrado, durante un período de 3 meses. Se caracterizaron todos los materiales por fluorescencia de rayos X (FRX) y difracción de rayos X (DRX). El análisis químico del lodo crudo, base seca expresado en peso, identificó los siguientes componentes principales: SiO_2 (34,43 %), Al_2O_3 (16,55 %), Fe_2O_3 (8,20 %), CaO (4,539 %), similar a la arcilla que se utiliza como materia prima para cerámicos, pero con un contenido mayor de aluminio. En el patrón de DRX identifican la presencia de dos fases cristalinas principales: cuarzo (SiO_2) y albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$).

Se usaron dos tipos de tecnologías de fabricación de cerámicos: el moldeado directo para las mezclas de lodo con cenizas de la quema de cáscara de arroz (en moldes de madera de 200 mm x 200 mm x 200 mm, que luego fueron vibrados), y el prensado utilizando sólo lodo (en este caso provienen de una "torta" de lodo del proceso). Los moldes fueron secadas al aire y a la sombra (para evitar la formación de fracturas), y

luego se cortaron al tamaño de ladrillos de laboratorio con una sierra. Ambos tipos de ladrillos fueron secados a 95 °C por 24 horas, y luego cocinados en una mufla a diferentes temperaturas por 2 horas: 800 °C, 900 °C, 1000 °C, 1100 °C y 1200 °C.

Se realizaron diversos ensayos y análisis a los productos cerámicos obtenidos, observándose que el contenido de cáscara de arroz en la mezcla y la temperatura de cocción son los factores principales que afectan la calidad de los ladrillos moldeados. Una relación de adición de cáscara de arroz más alta aumenta el volumen de porosidad y disminuye la densidad aparente de las muestras sinterizadas, disminuyendo consigo la resistencia de estas y aumentando la absorción de agua. Para el aumento de temperatura se observan resultados opuestos.

En el artículo de **Ling et al. (2017)** se estudia la utilización de LTAB como sustituto de la arcilla mineral para la fabricación de cerámicos (piezas de porcelana). Reportan que el rápido aumento de la urbanización y la población en las ciudades de Malasia, y la consiguiente demanda de agua potable, ha derivado en un aumento de la generación de LTAB, cuya disposición final se realiza comúnmente en cuerpos de agua, sin tratamiento, lo cual contraviene las regulaciones ambientales del país. En esta publicación no se especifican las normas utilizadas.

Colectaron muestras de lodo de una planta de potabilización en la localidad de Sungai Dua Penang, las secaron en horno a 100 °C durante 24 horas, las molieron (mortero y molino de bolas, en condiciones controladas), y las tamizaron a tamaño de malla 425 µm. Se estudió la morfología de estas muestras acondicionadas mediante microscopía de barrido de electrones (MEB), se realizó espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS) para análisis elemental, se determinó la distribución del tamaño de partícula, composición química por fluorescencia de rayos X (FRX) y pérdida por calcinación, análisis de minerales por difracción de rayos X (DRX), análisis químico estructural por espectrometría infrarroja (FTIR), análisis comportamiento térmico por Termogravimetría (TG) y calorimetría diferencial (DSC), y estudio de superficie y poros de la muestra de lodos. El análisis químico encontró los siguientes componentes principales en el lodo, expresado en peso: SiO₂ (40,33 %), Al₂O₃ (31,84 %) y Fe₂O₃ (6,43 %), con una pérdida por calcinación (LOI) del 18,50 %. El alto porcentaje de aluminio en el lodo se asocia al coagulante utilizado en la potabilización: Al₂(SO₄)₃.

Se observa que el LTAB está compuesto básicamente por 5 elementos químicos principales: Oxígeno, Silicio, Aluminio, Hierro y Carbono. El Oxígeno es el de mayor concentración, debido a la presencia de óxidos minerales. Silicio y Aluminio provienen de los silicatos y aluminosilicatos naturales presentes en el agua, y parcialmente del alumbre $[Al_2(SO_4)_3]$, el coagulante utilizado para el tratamiento de agua en este caso. El Carbono está asociado a la materia orgánica del agua bruta. La existencia del Hierro y otros metales minoritarios (Potasio, Magnesio, Titanio), sugieren la capacidad de intercambio catiónico de los LTAB. Indican que, en definitiva, la composición química de los lodos está determinada por las propiedades del agua bruta, los procesos involucrados en su tratamiento, y el volumen total de agua tratada.

El análisis mineralógico, identifica los tipos de fases o minerales presentes en el LTAB a través de su estructura cristalina. Se identificaron 4 minerales principales: el 90 % del LTAB está constituido por fase Caolinita ($Al_2Si_2O_5$), que corresponde a las intensidades máximas de DRX, la segunda fase es Cuarzo (SiO_2), seguida de otras fases minoritarias de Zeolita cúbica y Hematites (Fe_2O_3). Estas fases minerales en el lodo fueron confirmadas a través de su estructura química y grupos funcionales, mediante análisis FTIR.

En base a las propiedades del lodo, se fabricaron piezas de porcelana con diferentes porcentajes de sustitución de la arcilla por LTAB. No se reporta el procedimiento para fabricación de estas piezas. Se realizaron piezas con una mezcla tradicional de materias primas (55 % arcilla, 40 % en feldespato y 15 % en arena fina, expresado en peso), y una mezcla con sustitución de arcilla por LTAB (también expresado en peso: 20 % de lodo, 35 % de arcilla, 30 % de feldespato, y 15 % de arena fina y agua en una relación en peso de 1:1).

Los autores concluyen que el porcentaje óptimo de sustitución de arcilla para la fabricación de las piezas de porcelana es de un 20 % en peso de lodo, ya que el cuerpo de arcilla todavía ofrece flexibilidad capaz de dar forma y capaz de conservar su forma después del moldeado. Los productos a base de lodos evidenciaron una contracción uniforme, pigmentados en color rojizo, sin fisuras evidentes y con relativa dureza.

Algamal et al. (2018) investigan el uso de los lodos de planta de tratamiento de agua proveniente de la planta de tratamiento de agua Al-Mogran, en Jartum, Sudan. Los autores afirman que el aumento de las concentraciones de aluminio que se produce por

la descarga de este lodo en el agua de los arroyos afecta a los organismos acuáticos y al cuerpo humano. El objetivo de este estudio es el uso de los lodos desperdiciados durante el tratamiento de aguas residuales para fabricar ladrillos de construcción mejorados mediante la adición de algún polvo nanomineral. En esta investigación se utilizaron normas chinas, egipcias y británicas.

El lodo se recogió, se deshidrató, se secó al aire bajo la luz del sol y se calentó a 110°C durante 3 horas. Luego se pulverizó usando un molino de bolas y se tamizó a través de un tamiz de 75 μm . Los principales componentes que constituyen el lodo son sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y óxido férrico (Fe_2O_3), con una pérdida por calcinación de 3,21 %. En el DRX realizado, identifican con certeza la presencia de las siguientes fases cristalinas principales del LTAB: Nontronita, Albita [$\text{Na}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8$] y Anortita [$(\text{Ca},\text{Na})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$].

Se prepararon cinco lotes a partir del lodo sin aditivos (referencia) y con una adición constante (5 % en masa) de nanopolvo de MgO , Cr_2O_3 , Al_2O_3 o Fe_2O_3 , mediante un agitador mecánico para lograr una mezcla homogénea. Los cinco lotes mezclados se moldearon individualmente, y se comprimieron en una forma cilíndrica mediante el uso de un pistón hidráulico. A continuación, los ladrillos se secaron y hornearon a cuatro temperaturas de cocción diferentes; 900°C, 1000°C, 1100°C y 1200°C.

Los autores concluyen que la producción de ladrillos con dichos lodos es viable, y pueden ser utilizados directamente sin molienda adicional y con una cocción relativamente baja de temperatura. La adición de nanopartículas de óxidos metálicos generalmente aumenta las propiedades mecánicas y la densidad aparente de los ladrillos, disminuyendo la porosidad de los mismos. La muestra que contiene aditivos de nanopolvo especialmente el Cr_2O_3 presenta una mejora pronunciada en las propiedades mecánicas y de sinterización en comparación con la referencia (muestra sin adición).

Cremades et al. (2018) estudian la adición de lodo de planta de tratamiento de agua potable, deshidratado y atomizado (menos de 5 % de humedad, con bajo contenido orgánico y alto contenido calcáreo micronizado), para la fabricación de tejas cerámicas. Las mezclas se realizaron con 20 %, 30 %, 40 % y 70 % de LTAB, además de la referencia sin adición del mismo. En esta investigación se utilizaron normas europeas.

La arcilla procede de una de las canteras de Piera y El Papiol, ubicadas en Cataluña, España. Los lodos son extraídos de la planta de tratamiento de agua potable de Sant Joan Despí, Barcelona, España.

La composición química de la arcilla es principalmente SiO_2 (59,4 %), Al_2O_3 (17,3 %), Fe_2O_3 (6,8 %). El LTAB tienen una composición similar a la misma, con SiO_2 (53,7 %), Al_2O_3 (15,8 %), y Fe_2O_3 (5,0 %). Reportan un alto contenido de CaO (14,4 %) en el LTAB, en comparación con la arcilla (2,6 %). Por otro lado, la relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ es de 3,4 tanto en arcilla como en el LTAB, que es superior a los valores medios encontrados en minerales puros, que van desde 0,92 para Clorita a 2,64 para Montmorillonita. Por lo tanto, sugieren la presencia de sílice libre en forma cristalizada o amorfa, u otras fases minerales ricas en SiO_2 ; lo cual se evidencia en el análisis de composición mineral por DRX.

Encontraron concentraciones de metales pesados en lodo que cumplen la legislación holandesa para suelos no contaminados, sin embargo, ciertos metales como (Ba, Cd, Cu, Zn), exceden estos valores de referencia, y otros metales (Cr, Ni) están muy cerca del valor límite. Por esta razón, los autores indican que los lodos no pueden ser dispuestos en suelo sin tratamiento previo.

A partir de la interpretación del DRX identifican la presencia de sílice libre en el lodo, en forma cristalizada o amorfa. A 650 °C se puede observar que la primera fase principal sigue siendo cuarzo y la segunda calcita. A 1000 °C identifican la ausencia de calcita y dolomita, y lo explican por la descomposición de los carbonatos, que tienen lugar entre 800 °C y 900 °C. También identifican la formación de fases como anortita, diópsido, gehlenita y wollastonita, comunes en la cocción de pastas calcáreas. Se indica que el cuarzo libre sigue siendo la fase principal, se trataría del tridimita, que es un estado polimórfico de la sílice a partir de los 870 °C. Realizaron DRX en la muestra de arcilla utilizada para la mezcla cerámica, identificando una disminución de la intensidad de los picos de clorita y cuarzo, y la aparición de la anortita como una nueva fase cristalina a los 650 °C.

Las mezclas se extruyeron en secciones transversales de 70 mm x 10 mm, y luego se secaron en estufa a 105 °C por 24 horas. La cocción de las mismas se realizó en un horno a gas, a 980 °C como temperatura de cocción, y un tiempo de exposición de 3

horas a esa temperatura. Posterior a la cocción, se dejaron enfriar por 12 horas hasta alcanzar temperatura ambiente.

Para la caracterización de las probetas cerámicas, se realizaron ensayos de contracción, densidad aparente, pérdida de peso, absorción de agua, coeficiente de saturación, succión, resistencia a la flexión, dureza, coeficiente de expansión lineal y porosidad.

Concluyeron que es factible la aplicación de lodos en la fabricación de tejas cerámicas con algunas limitaciones. Debido a la alta porosidad de las mismas, tejas con adiciones mayores a un 40 % de lodo no deberían usarse al exterior sin un material de recubrimiento (por ejemplo: esmaltes). Adiciones mayores a 70 %, directamente deberían evitarse para el exterior, debido a su excesiva absorción de agua, ya que, en ambientes con posibilidades de heladas, estas piezas podrían romperse cuando el agua se congela y se expande en los poros.

En cuanto a la resistencia a la flexión, el porcentaje máximo de lodo si estas piezas cerámicas quisieran ser utilizadas para pavimentos, es de 15 % a 20 %. Si las mismas serán utilizadas para revestimiento de muros, el porcentaje de adición de LTAB puede ser mayor.

Desde el punto de vista ambiental, los ensayos de lixiviación realizados sobre las probetas cerámicas no indicaron ninguna restricción a la adición de lodo. Los autores señalan que esta alternativa de valorización del lodo evita su disposición final en vertederos, dándole un valor agregado, y además lo utiliza como materia prima, evitando el consumo de recurso virgen (arcilla para la fabricación de las tejas).

Petterle et al. (2018) mostraron que es posible la aplicación de lodos obtenidos de plantas de tratamiento y ceniza de cáscara de arroz en la fabricación de cerámicos rojos. El objetivo del trabajo es combinar las propiedades de la sílice amorfa (mediante quema de cáscara de arroz a temperatura controlada), como lo son la baja onda térmica y su estabilidad dimensional, con el LTAB y su efecto estabilizador de fase y su alto contenido de alúmina; desarrollando mezclas de CCA + LTAB. La arcilla caolín utilizada fue suministrada por la empresa Helager Industria y Comercio Ltda, la sílice de cáscara de arroz, de la empresa Sílica Verde do Arroz LTDA, y el LTAB, recolectado de la estación

de tratamiento de agua de la ciudad de Alegrete, en Rio Grande del Sur, Brasil. En esta investigación se utilizan normas brasileñas.

La sílice de cáscara de arroz utilizada se compone principalmente de óxido de silicio (91,48 %) y los óxidos fundentes, como el calcio (0,36 %) y el potasio (1,40 %). El valor de pérdida por calcinación del 3,50 % se debe al alto contenido de carbono residual presente.

La arcilla de caolín utilizada consiste básicamente en óxido de silicio (57,83 %), alúmina (27,52 %), óxidos fundentes, como óxido de hierro (2,25 %) y óxido de potasio (1,87 %), que es una buena fase vítrea. Presenta una pérdida por calcinación del 8,63 %, probablemente debido a la presencia de compuestos orgánicos.

El LTAB es un compuesto sílice-aluminoso constituido básicamente por óxido de silicio (36,11 %), en forma de cuarzo, alúmina (32,31 %), óxido de hierro (18,58 %), óxido de magnesio (0,48 %), óxido de calcio (0,42 %), formadores de fase vítrea. Presenta una pérdida por calcinación de aproximadamente un 16,88 % debido a la presencia de caolinita y materia orgánica. CCA + ARCILLA + LTAB, en suma, presentan una pérdida por calcinación de 29,01 %.

En la DRX, identificaron picos característicos de fases cristalinas referentes a la Caolinita [$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$], Sílice (SiO_2), Gibsita [$\text{Al}(\text{OH})_3$], Hematita (Fe_2O_3), Goethita [$\text{FeO}(\text{OH})$], Moscovita [$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$] y Rutilo (TiO_2), entre otros.

Las placas cerámicas se realizaron en formato 135 mm x 135 mm, con espesor de 15 mm, mediante prensado uniaxial de 300kg/cm², a partir de diferentes porcentajes de mezcla de la sílice obtenida de la combustión con temperatura controlada de la cascarilla de arroz, lodos de ETA y arcilla caolín. Excepto para la resistencia a la compresión, que se moldeó un cubo de 25 mm de lado.

Después de dar forma, las muestras se secaron en un horno a una temperatura de 110 ± 10 °C durante 24 h. Después del secado, las muestras se sinterizaron a una temperatura de 1300 °C. Se hicieron ensayos de caracterización física, absorción de agua, porosidad aparente, densidad, resistencia a la compresión y de conductividad térmica de las placas cerámicas.

Observaron que se pueden obtener placas de cerámica prensada a partir de la sílice residual de la cascarilla de arroz y LTAB. Que las placas cerámicas con contenido de un 80 % de arcilla caolín y 20 % de sílice de cáscara de arroz presenta mayor fase vítrea, menor conductividad térmica, menor concentración de poros y mayor resistencia mecánica. Las placas cerámicas con adiciones de lodos de plantas de tratamiento presentaron un aumento de la conductividad acompañado con un aumento tanto de la porosidad como de la absorción de agua. Además de pérdidas en la resistencia a la compresión. Las placas cerámicas con 64 % de arcilla caolín, 16 % de sílice de cascarilla de arroz y 20 % de LTAB fueron las que lograron buenas propiedades termo-mecánicas con 172,12 MPa de resistencia a la compresión y 0.2574 W/m-1 K-1 de conductividad térmica.

Pokhara et al. (2019) plantean el uso de los lodos de alúmina activada como sustituto parcial de los áridos finos en la fabricación de ladrillos. El estudio tiene como objetivo determinar el impacto de sustituir parcialmente el suelo con cantidades variables de lodo alúmina activada (AA) en las propiedades estructurales, no estructurales y de lixiviación de ladrillos, y lograr la proporción óptima del lodo que se puede utilizar. Para ello sustituyen parcialmente el suelo arcilloso con cantidades variables de lodo de AA (0 %, 5 %, y 10 % en peso). El lodo de alúmina activada empleado en este trabajo, se obtuvo de la planta de Jhunjhunu, Rajasthan, India, que recibe AA de las plantas para la eliminación de flúor en agua (alúmina activada como tecnología, por ser económica y alta en fluoruro), ubicadas en Angasar, Abusar, Bhimsar y Rasoda. La arcilla para hacer ladrillos se recolectó de un horno de ladrillos ubicado en Chaubepur, Kanpur. En esta investigación se utilizaron normas de India.

La composición del lodo de AA fue significativamente diferente de la composición del suelo arcilloso convencionalmente utilizado en la fabricación de ladrillos, determinado mediante análisis FRX. Mientras que el Na y el Ca, las concentraciones en el lodo (en porcentaje) fueron 10 veces más altas que las concentraciones en el suelo, Al y Mg fueron solo marginalmente más altas. Por el contrario, las concentraciones de Si y K fueron comparativamente mucho más bajo en el lodo. El contenido de Fe en el lodo fue 50 % menor que el contenido de Fe en el suelo. Dado que el lodo AA tiene comparativamente más cantidades de alúmina (26 %) y menores cantidades de sílice (12 %) es un buen candidato para mezclarse con suelo arcilloso.

Como se menciona anteriormente, se determinaron las concentraciones de los siguientes metales pesados en lodo, que cumplen los estándares máximos para reciclaje de residuos: Pb (0,42 ppm), Cr (4,60 ppm), Zn (31 ppm), Mn (121 ppm), Al (0,43 ppm) y Cu (15 ppm). Por otro lado, estos autores indican que los metales pesados pueden incorporarse en la estructura cristalina de las fases vítreas formadas durante el proceso de sinterización de las cerámicas (inertización). Por otro lado, encontraron concentraciones de fluoruros, cloruros, nitratos y sulfatos en lodo significativamente superiores a los del suelo arcilloso, que es indicativo del impacto acumulativo de varios ciclos de regeneración de alúmina activada utilizada para el tratamiento.

Presentan una composición química por FRX significativamente diferente a la de la arcilla convencional utilizada para la fabricación de ladrillos. No obstante, desde el punto de vista de la composición química, entienden posible la sustitución de un porcentaje menor de la arcilla con lodo (5 % a 10 %) para la fabricación de productos cerámicos. Mientras que las concentraciones de Na y Ca en el LTAB resultaron 10 veces más altas que en la arcilla, las concentraciones de Al y Mg fueron mucho más bajas para el LTAB (lo mismo para el Fe). En tal sentido, indican que, para aplicaciones convencionales, en los ladrillos manufacturados se recomienda tener la siguiente composición en la mezcla cerámica:

- 50 % a 60 % de sílice,
- 20 % a 30 % de alúmina,
- 10 % de cal,
- Menos de 10 % de álcalis,
- Menos de 7 % de óxido de hierro,
- Menos de 1 % de magnesio,
- Trazas de trióxido de azufre, dióxido de carbono y agua.

De acuerdo a las referencias de los autores (Dayaratnam, 1987) (Chowdhuri, 1965) (Duggal, 2009), la sílice proporciona forma uniforme y resistencia a los ladrillos crudos contra el agrietamiento, la deformación y la contracción, mejorando así su durabilidad, y la alúmina imparte plasticidad que ayuda en su moldeado.

A partir de DRX, identificaron $\text{Al}(\text{OH})_3$, calcita y cuarzo como las principales fases minerales presentes en el lodo.

Para la reparación y caracterización de muestras, el lodo se secó en una campana extractora en habitación de temperatura controlada. La muestra de lodo seco, se pulverizó con un mortero (5 L) y se dejó pasar a través de un tamiz de 425 μm para una mejor mezcla y fusión con el suelo arcilloso durante la cocción.

Se hicieron muestras de ladrillos, aumentando las proporciones de mezcla de lodo-arcilla de 0 % (control), 5 % y 10 % en peso, se prepararon en el horno a una temperatura de 20 °C. La mezcla se realizó durante 15 min. Cada mezcla fue puesta con marco de madera en un molde de 230 mm x 110 mm x 70 mm. Esta mezcla se secó al sol durante 3 días. Posteriormente, todas las mezclas secas se colocaron cuidadosamente en el horno durante 21 días a una temperatura aproximada de 900 °C para hornear.

Esta investigación mediante el análisis MEB, identifica partículas granulares y de forma irregular en los lodos, que a mayores magnificaciones parecen contener capas de superficies desgastadas de forma desigual. No encontraron diferencias en la morfología entre el 0 % y 10 % en el cerámico lodo - arcilla.

Se hicieron ensayos de densidad aparente y porosidad, absorción, resistencia a los ácidos, pruebas de eflorescencia, de lixiviación de los ladrillos y conductividad térmica. También ensayos de resistencia a compresión, tracción en condiciones de carga sísmica y resistencia a la flexión.

Como resultado obtienen, que con un máximo de 10 % de reemplazo de suelo arcilloso convencional por lodos de plantas de tratamiento de agua a base de alúmina activada (AA) como materia prima, se obtienen ladrillos estructurales. Como contra parte, la sustitución parcial de lodos AA en ladrillos de arcilla resultó en un aumento de la porosidad del ladrillo en relación con ladrillos convencionales. El aumento de la porosidad es consistente con la disminución de la resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y la conductividad térmica de los ladrillos resultantes. Sin embargo, a pesar de esta reducción, los ladrillos cumplían con los criterios mínimos para su fabricación. La incorporación de un 10 % de lodo a los ladrillos no alteró significativamente la relación de composiciones identificadas en DRX del LTAB, pero no se encontró calcita. Asocian esto a una posible degradación térmica de la calcita a CaO, y fusiones sucesivas con los minerales durante la cocción. No se identificaron impurezas de fases menores en el DRX de los ladrillos fabricados con 10 % de lodos, las cuales

están relacionadas con el lodo, indicativo de una eficiente fusión de dichas fases durante la cocción.

Sarabia Guarín et al. (2020) quienes proponen la elaboración de ladrillos refractarios de aluminosilicatos. Debido a que la composición química del lodo generado por el tratamiento de agua, es similar a la arcilla, se propuso evaluar el efecto de su incorporación como un sustituto parcial de los materiales arcillosos tradicionales. Las materias primas utilizadas se caracterizaron por DRX y FRX. Esta investigación utiliza normas colombianas.

El lodo proviene de la planta de tratamiento de agua potable de la municipalidad de Cúcuta, en Colombia. La composición química del mismo es mayoritariamente SiO_2 (54,42 %), Al_2O_3 (14,90 %) y Fe_2O_3 (3,14 %), y una pérdida por calcinación de 24,03 %. En menores proporciones está compuesto por K_2O (1,60 %), CaO (1,36 %), Na_2O (0,86 %), TiO_2 (0,57 %) y MgO (0,55 %).

Las mezclas se realizaron con distintos porcentajes en peso de arcilla (65 % y 60 %), caolín (valor constante de un 30 %) y lodo de planta de tratamiento de agua (5 % y 10 % en sustitución de la arcilla). Se fabricaron probetas con un molde rectangular de 41 mm x 10 mm x 110 mm. Se dejaron secar por 24 horas a temperatura de laboratorio controlada, y luego se secaron hasta peso constante en horno a 110 °C. Luego se quemaron en una mufla por 9 horas y 40 minutos, hasta llegar a la temperatura máxima de 1200 °C. Se dejaron enfriar a temperatura controlada.

Se ensayaron la porosidad aparente, la absorción de agua, densidad, peso específico y la contracción lineal, además del porcentaje de humedad, la pérdida por calcinación, la resistencia a la flexión, y el ensayo de ruptura de probetas bajo el esfuerzo de la compresión.

Sus resultados demostraron que la adición de un 10 % de lodos residuales del tratamiento de agua industrial contribuyó a elevar el punto de reblandecimiento de la arcilla obteniendo un ladrillo refractario capaz de soportar temperaturas de hasta 1430 °C.

A continuación, se realiza una breve síntesis del conjunto de los trabajos y sus resultados, mediante cuadros comparativos de los análisis y ensayos relevantes. En la

Tabla 2 se presenta una síntesis de los tipos de análisis físico-químicos y ensayos realizados a los lodos en la bibliografía de referencia. Se observa que todos los estudios, caracterizan químicamente el lodo por fluorescencia de rayos X (FRX). Asimismo, la difracción de rayos X (DRX), la pérdida por calcinación (PPC) y la distribución del tamaño de partícula se realizan en la mayoría de los estudios.

Tabla 2: Ensayos de caracterización del LTAB (Cerámicos)

	pH	Humedad	Densidad	DTP	DRX	FRX	PPC	TGA/DTGA	MEB	LIXIVIADO
Toya (2007)										
Monteiro (2008)										
Ramadan (2008)										
Chiang (2009)										
Kisinievic (2013)										
Benlalla (2015)										
Wolff (2015)										
Ewais (2017)										
Ling (2017)										
Algamal (2018)										
Cremades (2018)										
Petterle (2018)										
Pokhara (2019)										
Sarabia (2020)										

En la Tabla 3, se presenta un cuadro comparativo indicando los resultados de composición química por FRX y PPC reportados para lodos en la bibliografía de referencia. En la sección 2.3.2 más adelante, se realiza un análisis detallado de la composición química de los lodos en base a los datos presentados en esta tabla. Los

componentes químicos detallados en la tabla son Dióxido de Silicio (SiO_2), Óxido de Aluminio, (Al_2O_3), Óxido Férrico (Fe_2O_3), Dióxido de Titanio (TiO_2), Óxido de Calcio (CaO), Óxido de Magnesio (MgO), Óxido de Sodio (Na_2O), Óxido de Potasio (K_2O), Pentóxido de Fósforo (P_2O_5), Trióxido de Azufre (SO_3) y Óxido de Manganeseo (MnO).

Tabla 3: Composición química (FRX) y PPC (Cerámicos)

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	SO_3	MnO	P.P.C (%)
Toya (2007)	45,0	39,6	6,1	-	1,5	1,8	1,1	1,5	1,7	-	1,6	-
Monteiro(2008)	24,7	30,4	11,6	0,9	0,2	0,2	-	0,4	-	-	-	30,7
Ramadan(2008)	43,1	16,0	5,3	-	5,6	0,9	-	0,3	-	1,5	-	26,8
Chiang (2009)	53,4	15,3	21,0	1,4	1,2	-	-	5,4	0,8	-	0,7	-
Kisinievic(2013)	10,9	1,3	68,7	-	8,2	0,6	-	-	9,4	0,9	-	-
Benlalla (2015)	27,1	62,7	1,2	0,2	1,3	0,4	0,2	0,8	0,2	-	-	5,1
Wolff (2015)	37,5	30,1	12,3	1,0	0,2	0,4	0,2	0,9	-	-	0,3	17,1
Ewais (2017)	34,4	16,5	8,2	0,9	4,5	0,7	0,2	0,4	0,7	2,6	0,2	30,2
Ling (2017)	40,3	31,8	6,4	0,5	0,1	0,5	0,0	1,3	0,2	0,1	-	18,5
Algalal (2018)	51,2	15,7	8,1	4,1	2,6	1,3	2,9	1,1	-	-	-	13,0
Cremades(2018)	53,7	15,8	5,0	0,4	14,4	3,6	0,4	3,2	0,4	-	0,1	2,7
Petterle (2018)	36,1	32,3	11,6	1,0	0,4	0,5	0,0	0,6	0,4	-	0,1	16,9
Pokhara (2019)	11,8	35,1	5,4	0,1	7,3	4,1	42,9	-	-	-	0,1	-
Sarabia (2020)	65,7	11,5	1,9	0,4	5,9	1,2	2,2	2,1	-	-	-	4,3
Sarabia (2020)	54,4	14,9	3,1	0,6	1,4	0,6	0,9	1,6	-	-	-	24,0

Como resultado de estos análisis se puede observar que todos los lodos investigados tienen composiciones químicas diferentes. Como se mencionó en la sección 2.1.3., las características de los lodos dependen de las características fisicoquímicas del agua bruta y de los productos químicos usados para el tratamiento.

Finalmente, en la Tabla 4 se presenta un cuadro sintético de los ensayos realizados sobre los prototipos cerámicos en los estudios de referencia, observándose que en todos ellos se realizó resistencia a la compresión, y en la mayoría de los estudios, se determinó la densidad, porosidad, y la absorción de agua por inmersión de los prototipos. Se observa además que los autores analizan los resultados y la calidad de

los cerámicos fabricados con lodo en función de las propiedades mencionadas, utilizando en general normas locales, o internacionales de aplicación en el país.

Tabla 4: Ensayos sobre los prototipos cerámicos

	Densidad	Pérdida de Peso	Resistencia a la Compresión	Contracción Volumétrica	Succión Capilar	Permeabilidad	Inmersión	Porosidad	Colorimetría	Lixiviado
Toya (2007)	■		■							
Monteiro (2008)			■				■			
Ramadan (2008)	■		■		■		■			
Chiang (2009)	■		■	■			■	■		
Kisinievic (2013)	■		■		■		■	■		
Benlalla (2015)	■	■	■	■			■	■		
Wolff (2015)	■	■	■	■			■	■		
Ewais (2017)		■	■	■			■	■		
Ling (2017)	■		■	■					■	
Algamal (2018)	■		■				■	■		
Cremades (2018)	■	■	■	■	■		■	■		■
Petterle (2018)	■		■				■	■		
Pokhara (2019)	■		■				■	■		■
Sarabia (2020)	■		■	■			■	■		

En los trabajos de investigación anteriormente citados, los autores coinciden en que los LTAB son similares a la arcilla utilizada para la fabricación de cerámicos en su composición mineralógica, química y granulométrica. En tal sentido, los autores indican

que la sustitución de arcilla con LTAB permitiría la reducción del consumo de este recurso mineral en la industria cerámica, al mismo tiempo que se genera una alternativa de valorización para los residuos de las plantas de tratamiento de aguas, reduciendo su disposición final en vertederos industriales.

El porcentaje de LTAB a incorporar a las mezclas cerámicas, sin afectar las propiedades ni la calidad de los cerámicos, depende de las propiedades del LTAB (que a su vez depende del agua bruta, del tipo de tratamiento del agua, y de los procesos de obtención del mismo), de las propiedades de la arcilla que será sustituida, y de la temperatura de cocción. Para esta valorización, según algunos autores, la posibilidad de sustitución de LTAB por arcilla es de hasta un 20 %; otros lograron sustituciones mayores de hasta un 70%, para fabricación de cerámicos con requerimientos menos exigentes (por ejemplo, para usos interiores, por su alta porosidad).

El porcentaje de sustitución se ve limitado por los requerimientos de calidad de los cerámicos, y a mayor sustitución los autores reportan disminución de las propiedades físicas y mecánicas del producto (principalmente disminución de la resistencia a la compresión y la densidad), aumento de la porosidad y de la absorción de agua.

2.2.2. Cemento

Pan et al. (2004), Chen et al. (2010), Husillos Rodríguez et al. (2011) evaluaron el uso de lodos de planta de tratamiento de agua en la fabricación de cemento.

Pan et al. (2004) mostraron que es posible sustituir arcilla por lodo de alúmina, provenientes de dos plantas de tratamiento de agua de Taiwán (planta Zhi-Tan y Feng-Shan), como materia prima del clínker para fabricación de cemento. Las mismas utilizan como coagulante sulfato de aluminio, en el proceso de tratamiento del agua.

Ambos contienen más del 50 % de Al_2O_3 y SiO_2 con cantidades menores de Fe_2O_3 , MgO , K_2O , TiO_2 , SO_3 , P_2O_5 , CaO , Na_2O , MnO y Cl , y trazas de Br y As . El elemento más abundante de Zhi -Tan FWS fue el silicio, seguido del aluminio. Esta investigación trabaja con normas chinas.

Los lodos y el cemento se sometieron a un proceso de secado hasta peso constante y se molieron por debajo de 200 μm . La mezcla con la arcilla se realizó en varios

porcentajes, del 0 % al 100 %. Después de mezclado, estas muestras se prensaron (la fuerza de presión fue de 4 toneladas, el tiempo de retención fue de 30 segundos) en un molde metálico para formar una muestra cilíndrica de 15 mm de diámetro y 20 mm de altura. Luego estas muestras se colocaron en un horno cuya temperatura máxima de sinterización fue de 1450 °C. En el primer período, la temperatura subió a 1000 °C a 10 °C/min, en el segundo período de a 1450 °C a 5 °C/min y posteriormente se mantuvieron a esta temperatura durante 30 min. El enfriamiento se realizó mediante el modo de enfriamiento por aire y se enfrió en 30 min hasta temperatura ambiente.

El cemento elaborado a partir de la sustitución de arcilla con lodo, disminuyó su finura, aumentó los tiempos de fraguado inicial y final, pero dentro de los valores máximos previstos por la norma de referencia. Su resistencia a la compresión aumentó a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de LTAB. Los autores explican este aumento de resistencia a la disminución de CaO libre en el cemento a medida que se adiciona el LTAB. El $\text{Ca}(\text{OH})_2$ producto de la reacción del CaO libre, aumenta el volumen y disminuye la resistencia a la compresión del hormigón. La incorporación de lodos no cambió la forma de fase del CaO libre en el cemento. Todos los productos de cemento obtenidos con lodos en distintas proporciones cumplen con la Norma Nacional China de Cemento Portland de primer grado.

Chen et al. (2010) estudian el uso de lodos como sustituto del material silíceo en la producción de clínker para cemento portland, mediante la adición de distintas proporciones de LTAB, fabricando cinco muestras distintas desde 4 %, 5,5 %, 7 %, 8,5 %, 10 %, y la de referencia sin adición de lodo. Este lodo proviene de una planta de tratamiento en China, y se compone principalmente de SiO_2 (52,18 %), Al_2O_3 (19,90 %) y Fe_2O_3 (6,29 %). Esta investigación trabaja normas chinas.

Se realizaron probetas en moldes de 40 mm x 40 mm x 160 mm, donde se volcaron los morteros preparados, se vibraron para eliminar las burbujas de aire. Se mantuvieron a 20 ± 2 °C y humedad relativa superior al 90 % durante 24 h. Luego de desmoldadas se curaron en un tanque de agua a 20 ± 2 °C.

En los resultados de los ensayos de DRX de los clínker sinterizados con adición de lodo, observan que son similares a los del control y no se detecta una nueva fase. Los componentes principales del clínker de referencia están también presentes en los clínker de las mezclas con lodo.

En cuanto a la resistencia a la compresión, a los 28 días, solo los reemplazos de LTAB <7 % dieron como resultado resistencias superiores a las del control (0 % de LTAB). Sustituciones mayores dan buenos resultados a 3 y 7 días, pero decaen a los 28 días.

Además, el resultado de la prueba de lixiviado indica que los metales pesados en el clínker casi todos se incorporaron a los minerales del clínker. Del ensayo de TLCP (ensayo de toxicidad, contenido de metales pesados), demuestran que es factible utilizar LTAB como sustituto del material silíceo en la producción de cemento. Los metales pesados (Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) en LTAB fueron casi completamente incorporado en clínker, los mismos no fueron detectados en los lixiviados hasta 28 días. Por lo tanto, el ecocemento no presentaría una amenaza inmediata de metales pesados para el medio ambiente.

Husillos Rodríguez et al. (2011) se plantearon como objetivo de la investigación, determinar la idoneidad de lodos secados por aspersión (atomizados) de una planta de tratamiento de agua como materia prima para la fabricación de clínker. Estudiaron la sustitución parcial de arcillas y piedra caliza en la fabricación de clínker. Esta investigación trabaja con normas europeas.

El lodo utilizado proviene de la planta de Sant Joan Despí, en Barcelona, España. Este lodo está compuesto químicamente por SiO₂ (29,63 %), Al₂O₃ (17,57 %) y Fe₂O₃ (5,18 %), y con una pérdida por calcinación a 1000 °C de 22,70 %.

Para evaluar el uso de lodos como materia prima en los cementos Portland, se comparó la combustibilidad en dos mezclas crudas: una (el control) elaborada con materias primas industriales (piedra caliza, arcilla, arena) y la otra (mezcla M2) con las mismas materias primas a excepción de la arcilla, que fue reemplazada por lodos. El Fe₂O₃ utilizado en ambos casos fue un reactivo de laboratorio. Las dos mezclas se diseñaron con el mismo módulo de sílice (Ms = 2,30) y fundente (Mf = 1,50) y el mismo factor de saturación de cal (LSF = 0,98). La piedra caliza utilizada para hacer las mezclas crudas se molió a menos de 125 lm y la arena y arcilla a menos de 45 lm.

Una vez distribuidas las materias primas, (el control contenía 82,32 % caliza, 16,14 % arcilla, 0,6 % arena y 0,94 % Fe₂O₃; el M2, 80,13 % caliza, 12,81 % lodo atomizado, 5,8 % arena y 1,23 % Fe₂O₃) y se prepararon probetas cilíndricas, de 20 mm de diámetro y pesaban aproximadamente 4 gr. Se sometieron a tres tratamientos isotérmicos a 1400

°C, 1450 °C y 1500 °C durante 30 min. Después de los tratamientos, las muestras se sacaron del horno y se enfriaron al aire a temperatura ambiente. Los clinkers obtenidos se trituraron y se determinó su contenido en cal libre según especifica la norma española de referencia.

Como resultado de la investigación, concluyen que la fracción orgánica del lodo atomizado arde a alrededor de 300 °C, liberando 678 J/g de lodo. En las presentes condiciones experimentales, la materia orgánica continuó ardiendo hasta una temperatura de 500 °C. Estas temperaturas de combustión son lo suficientemente altas como para garantizar la ausencia de combustión espontánea y explosiones en el molino de harina cruda.

Por otro lado, la combustibilidad de la mezcla cruda que contiene lodos atomizados es algo menor que en la mezcla de control. Esto se puede atribuir al mayor contenido de cuarzo en el primero, ya que se encontró que la reactividad del lodo era alta.

El clínker obtenido después de quemar la mezcla cruda con 12 % de lodo atomizado a 1450 °C durante 30 min, contenía más de 75 % de silicatos y 22 % de fase intersticial.

Los lodos atomizados estudiados pueden utilizarse como materia prima de mezcla en la fabricación de cemento, como sustituto de la arcilla y sustituto parcial de la piedra caliza.

A continuación, se realiza una breve síntesis del conjunto de los trabajos y sus resultados, mediante cuadros comparativos de los análisis y ensayos relevantes. En la Tabla 5 se presenta una síntesis de los tipos de análisis físico-químicos y ensayos realizados a los lodos en la bibliografía de referencia. Se observa que todos los estudios, caracterizan químicamente el lodo por FRX. Asimismo, DRX, PPC y distribución del tamaño de partícula realizan en la mayoría de los estudios.

Tabla 5: Ensayos de caracterización del LTAB (Cemento)

	pH	Humedad	Densidad	DTP	DRX	FRX	PPC	TGA/DTGA	MEB	LIXIVIADO
Pan (2004)										
Chen (2010)										
Husillos (2011)										

En la Tabla 6, se presenta un cuadro comparativo indicando los resultados de composición química por FRX y pérdida por calcinación reportados para lodos en la bibliografía de referencia. En la sección 2.3.2 más adelante, se realiza un análisis detallado de la composición química de los lodos en base a los datos presentados en esta tabla.

Tabla 6: Composición química (FRX) y PPC (Cemento)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	MnO	P, P, C (%)
Pan (2004)	51,0	26,0	6,0	-	-	2,0	1,0	4,0	-	0,5	-	12,3
Pan (2004)	16,0	37,0	3,0	-	3,0	-	0,5	1,0	-	1,0	-	38,0
Chen (2010)	52,2	19,9	6,3	-	1,7	1,4	1,0	2,9	-	-	-	-
Husillos(2011)	29,6	17,6	5,2	0,6	11,8	2,2	6,1	2,9	0,9	0,3	0,1	22,7

Como resultado de estos análisis, se puede observar que todos los lodos investigados presentan una composición química significativamente diferente. Como se mencionó en la sección 2.1.3., las características de los lodos dependen las características fisicoquímicas del agua bruta y de los productos químicos usados para el tratamiento.

Como resumen de los trabajos presentados para esta aplicación, la sustitución del LTAB por arcilla como materia prima del clínker para la fabricación de cemento, presentó mayores tiempos de fraguado, aumento de la demanda de agua, disminución de la resistencia a la flexión y a la compresión (a altos porcentajes de sustitución), aunque en general dentro de las normas utilizadas por los autores.

El porcentaje de LTAB se vio limitado a un valor máximo de 7 %, ya que, para valores mayores, las resistencias a la compresión de los hormigones fabricados con este cemento estaban por debajo de las normas de referencia. Una posible explicación es que el alto contenido de materia orgánica en el LTAB interfiere en la hidratación del cemento y genera una estructura más porosa del hormigón.

2.2.3. Agregados para hormigón y productos en base a este material

Hoppen et al. (2005), Yagüe et al. (2005), Huang & Wang (2013), Wang et al., (2018), Liu et al., (2020), evaluaron el uso de lodos de planta de tratamiento de agua en la fabricación de agregados para hormigón y productos en base a hormigón.

Hoppen et al. (2005) demostraron que es posible implementar el LTAB como sustituto de árido fino en la fabricación de hormigones. Los lodos provienen de la planta de tratamiento de Passaúna, localizada en la región metropolitana de Curitiba, Brasil. Esta investigación trabaja con normas brasileñas.

Los principales componentes químicos de estos LTAB, son SiO_2 (16,55 %), Al_2O_3 (13,07 %) y Fe_2O_3 (4,16 %). La pérdida por calcinación es de 49,79 %. Los áridos utilizados en la fabricación del hormigón fueron arena natural lavada, cuya composición química revela SiO_2 (90,24 %), Al_2O_3 (4,34 %), K_2O (1,51 %) y Fe_2O_3 (0,94 %). y piedra triturada de dimensión máxima característica de 19 mm, SiO_2 (71,54 %), Al_2O_3 (14,91 %), Na_2O (5,27 %) y Fe_2O_3 (0,93 %). Como se puede ver, la composición química de los lodos y de los áridos utilizados es muy similar.

Se fabricaron cuatro hormigones incorporando LTAB (en estado natural) en contenidos del 3 %, 5 %, 7 % y 10 % en relación al peso seco del árido fino (arena), sustituyéndolo. Y el hormigón de referencia sin adición de LTAB. La cantidad de agua de amasado en cada mezcla se corrigió de acuerdo con la masa y el contenido de humedad del lodo agregado, ya que fue incorporado con cierto porcentaje de humedad, sin previo secado. Para la adición del lodo, se mezcló con el agua de mezcla esperada, con la ayuda de un mezclador helicoidal.

Como resultado de la investigación, observaron que el calor de reacción de los hormigones que contienen lodos, es más exotérmico que el del hormigón de referencia; sin embargo, el aumento de temperatura obtenido para dosificaciones con 10 % de lodos

fue inferior a 3 °C, y no debería influir en el aumento de fisuración, como consecuencia de una retracción más intensa.

A medida que el contenido de lodos aumenta del 0 % al 10 % (consumo de lodos de 70 kg/m³), se produce una reducción de alrededor del 4 % en el consumo de cemento, debido a la sustitución parcial de materiales (áridos, aglomerados y agua de amasado).

La consistencia del hormigón, expresada por el asentamiento, mostró una reducción muy significativa para la mezcla con 3 % de lodos. A partir de este porcentaje de adición, la disminución fue prácticamente lineal, hasta alcanzar el valor mínimo (asentamiento de cero) con la adición del 10 % de residuo. Esto se debe a que el lodo está formado por finos que tienen una superficie específica mayor que la arena reemplazada, lo que aumenta la absorción de agua y reduce la trabajabilidad del hormigón.

Las mezclas con 7 % y 10 % de lodos mostraron gran dificultad en su elaboración, incluso con el uso de vibradores de inmersión, debido a su alta consistencia (asentamientos de 6 mm y 0 mm, respectivamente). En estos casos, fue necesario trabajar sobre una mesa vibratoria.

Considerando únicamente el criterio de trabajabilidad, se pueden utilizar mezclas con hasta un 5 % de lodo para su aplicación en bloques y piezas de hormigón, incluidas geometrías más complejas, ya que no se necesitan vibradores mecánicos. Por encima de este contenido, el hormigón es más adecuado para aplicaciones que no dependen de la compactación manual y cuyo formato no presente complejidad.

Hay una disminución sustancial en el valor resultante de la resistencia a compresión media con el aumento de la cantidad de lodo. La mayor pérdida de resistencia, en relación al hormigón de referencia, se obtuvo para la mezcla con 10 % de LTAB. Para el resto de contenidos de lodos (hasta un 7 %), la reducción de la resistencia fue menor, siendo del 18 %, a los 7 días, y cercana al 25 %, a los 28 días. Incluso a los 7 días, la resistencia a la compresión ya alcanza valores superiores a 20 MPa, salvo la dosificación con 10 % de lodos.

Es posible el uso de mezclas que incorporen hasta un 5 % de LTAB, cuyas resistencias resultaron superiores a 30 MPa, a los 28 días, en aplicaciones y producción de piezas de hormigón armado.

Por último, concluyen que la absorción aumenta considerablemente con el aumento de la cantidad de lodos en la masa, lo que limita la durabilidad ante ambientes agresivos, ya que permite la entrada de elementos nocivos al hormigón. El índice de vacíos, junto con el contenido de absorción de agua, también mostró un marcado aumento en los valores para los contenidos de lodos por encima del 5 %. En cuanto a la masa específica, hubo una reducción entre el 5,9 % y el 8,9 % en los valores que presenta la composición que contiene un 10 % de lodos, en comparación con el hormigón de referencia.

Yagüe et al. (2005) evaluaron la adición de lodos LTAB deshidratados al hormigón en masa, (en sustitución de los áridos finos) tanto en su resistencia mecánica, como en su durabilidad, por lo que someten al hormigón a varios tipos de agresión acelerada para deducir el desempeño a largo plazo. Esta investigación usa normas europeas.

El lodo LTAB proviene de la planta de tratamiento de agua de Sabadell, Barcelona, España. Sus principales componentes químicos son SiO_2 (29,7 %), Al_2O_3 (12,9 %) y Fe_2O_3 (10,1 %). Su curva granulométrica es equivalente al de arena fina utilizada.

Estos LTAB, a pesar de que, en la fase final del proceso de tratamiento, se someten a un proceso de secado térmico, lo que reduce sustancialmente su volumen, facilitando así su manipulación y eliminando los microorganismos patógenos que pudieran estar presentes, los lodos tienen una humedad residual (alrededor del 15 %). Humedad que se considera para la dosificación del hormigón.

Se prepararon tres probetas, con la dosificación de un hormigón de 25 MPa de resistencia característica, y se ensayaron en ciclos de 28 días cada uno, bajo las siguientes pruebas: Curado, ciclos húmedo-seco en agua dulce, agua de mar y agua que contiene 5 % de K_2SO_4 , ciclos de envejecimiento acelerado en autoclave y carbonatación acelerada. Estos ciclos se repitieron siete veces para cada ensayo y luego se rompieron bajo simple compresión.

Los resultados obtenidos demuestran que todos los tratamientos (ensayos) redujeron la resistencia a la compresión del hormigón en comparación con las probetas de referencia, que permaneció en la cámara de humedad durante todo el experimento. Este aumento fue mayor en las muestras sumergidas en la solución de sulfato.

Las peores resistencias mecánicas se obtuvieron para las probetas con un 10 % de contenido de LTAB sometidos a curado estándar, que alcanzaron resistencias de 20 MPa a los 7 meses, con un incremento de este valor del 25 % para las tratadas con sulfatos.

Envejecimiento acelerado en autoclave, luego de 28 días de curado en la cámara de humedad, se sometieron las probetas a autoclave a una presión de 0.2 MPa. En todos los casos se observó retracción, siendo la diferencia muy pequeña en el hormigón sin lodos o con solo 2.5 % de estos y aumentando en proporción al contenido de lodos.

La contracción de las probetas se produjo en la fase de transición de hormigón fresco a hormigón endurecido durante las primeras horas. Después de 28 días de curado en la cámara de humedad, la contracción fue mínima.

En cuanto a la carbonatación acelerada, en las probetas sometidas a las mismas condiciones de ensayo, la profundidad de carbonatación dependía de la porosidad del hormigón. La porosidad aumenta con una mayor concentración de lodo. La prueba de carbonatación lo confirma, ya que la carbonatación fue mayor en las muestras que contenían 10 % de lodo.

En la difracción de rayos X, observan que la presencia de lodos no tiene efecto sobre las sustancias cristalinas formadas en la hidratación del cemento, y que la única diferencia apreciable es la velocidad más lenta para las reacciones de hidratación, indicada por la presencia de C2S residual en las muestras con lodos.

Huang & Wang (2013) analizan la aplicación de lodos de tratamiento de agua bruta como materia prima en la producción de agregado ligero, incluyendo densidad y absorción de agua de los áridos resultantes, así como también las propiedades como la resistencia a la compresión del hormigón fabricado con el mismo. Esta investigación utiliza normas chinas.

Se trabaja con 10 muestras de LTAB distintas, provenientes de 10 plantas de tratamiento de agua en Taiwán (Taiwan Water Corporation). S1(Hsing-San plant), S2 (Ban-Hsing plant), S3 (Pin-Tzen plant), S4 (Hsing-Zu plant), S5 (Feng-Yuan plant), S6 (Lin-Nai plant), S7 (Nan-Huar plant), S8 (Pin-Din plant), S9 (Kau-Tang plant), S10 (Tzien-Chin plant). Los lodos son muy similares en su composición química: SiO₂ (62 % a 67 %) es el ingrediente principal, seguido de Al₂O₃ (19 % a 23 %) y Fe₂O₃ (4,9 % a 11

%). La presencia de Fe_2O_3 libera O_2 y CO_2 a la temperatura de transición vítrea. La presencia de elementos como (Na_2O , K_2O , CaO , MgO y Fe_2O_3) asegura el desarrollo de fases vítreas de alta temperatura con suficiente viscosidad.

Para la producción de áridos ligeros utilizando LTAB, existieron dos fases: la primera fase evaluó la viabilidad de la fabricación de los mismos con LTAB, y determinaron empíricamente un ciclo térmico óptimo (temperatura máxima, tiempo de remojo y ablandamiento y temperatura correspondiente a la hinchazón óptima). En la segunda fase investigaron la densidad de partículas de los agregados y sus propiedades de ingeniería.

Los LTAB recolectados de las plantas se deshidrataron mecánicamente, y luego al aire hasta alcanzar la humedad deseada, con un contenido de aproximadamente el 25 %. El lodo secado al aire fue triturado, molido y tamizado en fracciones con tamaños bastante similares. La materia prima homogeneizada se mezcló luego con una adecuada cantidad de agua y granulada por una máquina de extrusión. Se fabricaron cilíndricos de diámetro de aproximadamente 8 mm a 12 mm. Antes del proceso de sinterización, los pellets se secaron en una estufa (105 ± 10 ° C) durante 24 h para fortalecerlos y evitar que se agrieten o exploten durante la sinterización de alta temperatura.

El proceso comenzó con un precalentamiento a 500 ° C durante 10 min, seguido de sinterización a temperaturas de 1150-1250 ° C durante 10 min, y luego enfriar en aire. Después de este proceso de secado, el árido resultante se examinó midiendo su índice de hinchazón y densidad de partículas. La investigación de la primera fase confirmó la viabilidad de fabricar los áridos con LTAB.

La segunda fase del experimento, consistió en someter los gránulos secos a un proceso secuencial que comienza con el precalentamiento a 500 °C durante 0 min, 7,5 min y 15 min, seguido de sinterización a una temperatura de ablandamiento durante 10 min, y finalmente enfriarlos a temperatura ambiente. La segunda fase también aseguró la densidad de partículas, el índice de hinchazón y la absorción de agua de los LWA resultantes.

Para la preparación de hormigón, las muestras incluyeron tres cilindros de medición de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura para el ensayo de resistencia a la compresión,

tres cilindros de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura para el ensayo de resistencia a la tracción por rotura, y dos Probetas prismáticas de 25 mm x 25 mm x 285 mm para la contracción por secado. Las probetas preparadas se utilizaron para probar el hormigón fresco y las propiedades del hormigón endurecido.

Como resultado de estos ensayos, observaron que las muestras LTAB recolectadas de 10 plantas de tratamiento de agua en Taiwán se puede utilizar para producir áridos ligeros, incluso sin emisiones de gases. Los agregados fabricados en laboratorio dieron densidades de las partículas que van desde 0,65 g/cm³ a 2,05 g/cm³ y absorción de agua que oscila entre el 0,5 % y el 15 %. Estos valores son comparables a los requisitos de áridos de alta calidad.

Entre los 10 lodos, cinco muestras (S4, S6, S8, S9 y S10) son adecuadas para la fabricación árido para su uso tanto estructural como no estructural con precalentamiento a temperatura de 500 ° C durante 0-15 min. Las otras cinco muestras (S1, S2, S3, S5 y S7) solo son adecuados para fabricar áridos con una temperatura de precalentamiento de 500 ° C para 0-15 min y una temperatura de sinterización de 1150-1275 ° C para 10 minutos.

La resistencia a la compresión y la resistencia a la rotura de las mezclas de hormigón, excedieron el requisito mínimo de ASTM C330. Ambas fortalezas aumentaron con la densidad, pero disminuyeron con la relación agua/cemento. Estos resultados confirman la viabilidad de utilizar lodos para producir hormigón y crear nuevas oportunidades para uso comercial de los LTAB.

Wang et al. (2018) demostraron la utilización de LTAB (rico en alúmina) como sustituto en distintas proporciones del agregado fino reciclado utilizado para la producción de hormigón de baja resistencia (material de baja resistencia controlada), que se usa con fines no estructurales, por ejemplo para rellenos. Se realizaron mezclas con 12,5 %, 25 %, 50 % y 100 % de sustitución de agregado por lodo. Esta investigación trabaja con normas americanas, británicas y europeas.

El lodo se obtuvo de la planta de tratamiento de Tai Po, Departamento de Abastecimiento de Agua de Hong Kong. Crudo, contiene un 55,8 % de agua; y su composición química es principalmente Al₂O₃ (41,31 %), SiO₂ (40,60 %), Y Fe₂O₃ (8,56 %), y cuya pérdida por calcinación corresponde a 26,9 %. El lodo presentó un tamaño

de partícula <0,05 mm. Por lo tanto, podría ser reutilizado directamente para reemplazar una porción de agregado fino reciclado (tamaño <2,36 mm).

La incorporación de un 12,5 % de lodo alargó el tiempo de endurecimiento final de 19,3 h a 29,8 h, lo que superó el requisito mínimo de 24 h. Este fenómeno podría resultar principalmente de la alta absorción de agua de los lodos. Para mantener la propiedad de auto-nivelación (fluidez > 200 mm), la adición de lodo de alumbre aumentó significativamente la demanda de agua debido al alto contenido de arcilla. Como resultado, el tiempo de endurecimiento de este hormigón se retrasó significativamente.

El alto contenido de materia orgánica en el lodo (21,6 % de LOI) también interfirió en la hidratación del cemento, porque dificultaría la formación de CH y el aumento del pH. En consecuencia, la resistencia a la compresión disminuyó significativamente junto con el aumento de la tasa de reemplazo de lodos. Solo el 12,5 % de reemplazo de lodo condujo a una reducción del 75 % en la resistencia a la compresión a los 28 días, aunque todas las muestras cumplieron con el requisito de resistencia de 0,3 a 2,1 MPa.

La adición excesiva de lodo dio como resultado una alta absorción de agua del hormigón e incluso la disolución después de 1 día de inmersión en agua.

Aunque la adición de lodo mejoró la liberación de calor en el período de reacción inicial a través del lodo disolución, retrasó significativamente el período de inducción. Y cambió el tiempo de curado largo cuando hubo un reemplazo de lodo del 12,5 %. Esto reveló que la adición de lodo de alumbre obstaculizó significativamente la hidratación del cemento, lo que explica la observación de un tiempo de endurecimiento prolongado y una resistencia inicial baja. Las curvas TGA mostraron que el peso del lodo crudo disminuyó continuamente con la elevación de la temperatura hasta 500 °C, lo que se asoció con la descomposición de la materia orgánica y la pérdida de agua de los productos de alumbre. Por el contrario, la muestra de control (0 % lodo) presentó un pico distintivo a 410 °C correspondiente a la descomposición de Ca(OH)_2 , que es un indicador importante de la hidratación del cemento.

Sin embargo, el reemplazo del lodo condujo a la casi desaparición del pico de CH incluso a una tasa de reemplazo baja (12,5 %). Esto verificó que la materia orgánica del lodo de interfirió en la formación de CH e impidió una mayor hidratación del cemento.

Como conclusiones de los ensayos de las mezclas, observaron que la incorporación de 12,5 % de lodo, obstaculizó significativamente la hidratación del cemento, la contabilidad para observar un tiempo de endurecimiento prolongado y una resistencia inicial baja.

El alto contenido de materia orgánica en los lodos (21,6 % de LOI) también interfirió hidratación del cemento, ya que obstaculizaría la formación de CH y aumento de pH. En consecuencia, la resistencia a la compresión disminuyó significativamente junto con el aumento de la sustitución de lodos.

Liu et al. (2020) investigan el potencial uso de lodos de tratamiento de agua potable como sustituto de la arena en la fabricación de adoquines de hormigón. Se diseñaron cinco mezclas con proporciones de reemplazo de arena por lodo en 0 %, 5 %, 10 %, 15 % y 20 %, en peso. Esta investigación trabaja con normas australianas y americanas.

El LTAB fue colectado en la planta de tratamiento de Happy Valley en Australia del Sur. Su composición química es principalmente Al_2O_3 (28,27 %), SiO_2 (26,43 %) y Fe_2O_3 (6,66 %). Su pérdida por calcinación corresponde a una 29,5 %.

Se prepararon un total de cinco mezclas a escala de laboratorio, se utilizó la relación agregado-cemento de 6,6. Además, la relación en peso de piedra triturada a arena se mantuvo en 1:1,3. La relación agua/cemento se fijó en 0,3 para la mezcla de referencia (LTAB 0 %). Debido a la mayor absorción de agua de los LTAB, tales proporciones variaron ligeramente con las otras mezclas dependiendo de los diferentes contenidos de lodos (5 %, 10 %, 15 % y 20 %). Se fabricaron mediante el método de mezcla seca, en un tamaño de 115 mm x 115 mm x 50 mm. Los agregados (piedra partida, la arena y los LTAB), se secaron en horno a 105 °C por 24 horas. La carga se aplicó lentamente mediante una máquina de compresión hidráulica y la presión se fijó en 18 MPa durante 30 s según la práctica general de la industria.

Después de desmoldar, las muestras se cubrieron con una envoltura adhesiva y se almacenaron en una cámara a una temperatura constante de 23 °C, y una humedad relativa del 65 % durante un período de curado de 28 días antes de llevar a cabo la prueba experimental. Cabe señalar que se produjeron al menos tres réplicas por mezcla para las siguientes pruebas, excepto para la prueba de lixiviación donde se midieron dos muestras.

Se hicieron análisis microestructurales-químicos, de absorción de agua, de ataque de sulfato de sodio, de lixiviación, de resistencia a la abrasión y por último el ensayo resistencia a la compresión.

Como resultado de los mismos, el estudio presenta que el análisis microestructural revela una alta porosidad en los adoquines de hormigón con la incorporación de los lodos, especialmente en la zona interfacial entre la matriz del cemento y el lodo. Observan la formación de etringita en los compuestos al incorporar alto contenido de lodos, debido a la disponibilidad de azufre y alúmina en los mismos. Los adoquines mostraron una reducción en la resistencia a la compresión de 28 días con el aumento del contenido de lodos, excepto los con 5 % de adición. La resistencia a la compresión disminuye significativamente cuando mayores contenidos de lodos se utilizan (15 % y 20 %), debido a la formación de una estructura más porosa y con mayor cantidad de materia orgánica. A mayor porcentaje de sustitución de lodo, menor fue la resistencia a la abrasión, y mayor la absorción de agua. Adoquines con adición de lodo por encima del 10 % no cumplen con el requisito de absorción de agua exigido ni con los valores de resistencia a la abrasión.

Para obtener mayor durabilidad de los adoquines en entornos agresivos, plantean incorporar hasta un 10 % de lodos, para mantener la resistencia de los compuestos al ataque de sulfato de sodio. A mayor contenido de lodo, presentan desprendimientos debido al ataque químico y físico del sulfato de sodio. A pesar de la alta lixiviación de Cu en el lodo utilizado, este elemento y todos los demás metales en el mismo, son neutralizados en los adoquines, por lo que el producto obtenido no es contaminante.

A continuación, se realiza una breve síntesis del conjunto de los trabajos y sus resultados, mediante cuadros comparativos de los análisis y ensayos relevantes. En la Tabla 7 se presenta una síntesis de los tipos de análisis físico-químicos y ensayos realizados a los lodos en la bibliografía de referencia. Se observa que todos los estudios, caracterizan químicamente el lodo por fluorescencia de rayos X (FRX). Asimismo, la difracción de rayos X (DRX), la pérdida por calcinación (PPC) y la distribución del tamaño de partícula se realizan en la mayoría de los estudios.

Tabla 7: Ensayos de caracterización del LTAB (Agregados)

	pH	Humedad	Densidad	DTP	DRX	FRX	PPC	TGA/DTGA	MEB	LIXIVIADO
Hoppen (2005)										
Yagüe (2005)										
Huang & Wang (2013)										
Wang (2018)										
Liu (2020)										

En la Tabla 8 se presenta un cuadro comparativo indicando los resultados de FRX y PPC reportados para lodos en la bibliografía de referencia, y en la sección 2.3.2 más adelante, se realiza un análisis detallado.

Tabla 8: Composición química (FRX) y PPC (Agregados)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	MnO	P, P, C (%)
Hoppen (2005)	16,55	13,07	4,15	0,1	0,43	0,15	0,04	0,06	0,26	-	0,22	49,79
Yagüe (2005)	29,70	12,90	10,10	-	22,70	2,73	1,11	1,83	1,40	3,22	-	-
Huang & Wang (2013)	64,30	21,20	10,40	-	2,05	1,06	0,17	0,79	-	0,09	-	8,04
	63,60	22,20	10,70	-	0,72	1,73	0,12	0,83	-	0,17	-	11,90
	63,80	20,60	8,32	-	1,64	3,15	0,31	2,08	-	0,17	-	6,96
	64,00	23,00	8,15	-	1,35	1,78	0,10	1,55	-	0,05	-	7,75
	62,30	22,00	11,00	-	2,62	1,10	0,08	0,79	-	0,11	-	10,80
	66,90	20,60	7,00	-	1,82	2,53	0,14	0,86	-	0,16	-	4,26
	62,30	21,40	11,00	-	1,22	2,47	0,14	1,42	-	0,14	-	10,40
	54,80	23,00	11,30	-	4,26	3,40	1,99	1,14	-	0,08	-	3,77
	65,60	22,40	4,91	-	1,72	4,15	0,15	1,03	-	0,10	-	13,00
	63,70	19,60	9,60	-	2,91	2,51	0,27	1,10	-	0,39	-	11,00
Wang (2018)	40,60	41,31	8,56	-	1,55	0,86	0,18	2,15	2,76	-	-	26,90
Liu (2020)	26,43	28,27	6,66	-	5,36	1,11	-	1,23	-	0,48	-	29,50

Como resultado de estos análisis se puede observar que todos los lodos investigados son diferentes en su composición química. Como se mencionó en la sección 2.1.3., las características de los lodos dependen las características fisicoquímicas del agua bruta y de los productos químicos usados para el tratamiento.

Como resumen de los trabajados anteriormente presentados, esta alternativa de valorización propone la sustitución del árido fino por de LTAB en la fabricación de hormigón y productos en base a este material, ya que la distribución granulométrica del LTAB es similar a la arena utilizada en dichas aplicaciones. El máximo porcentaje de sustitución recomendado por los autores es del 5 %; para porcentajes de sustitución más altos se observa un mayor calor de hidratación para hormigones fabricados con LTAB (reacción exotérmica), perjudicando su calidad por el aumento de retracción y fisuración. Por otro lado, observan un aumento considerable de la absorción de agua, que limita a durabilidad del hormigón ante ambientes agresivos. Para valores de LTAB entre el 7 % y 10 % se observaron dificultades en la elaboración del hormigón, por su baja trabajabilidad. En tal sentido, se indica que es posible fabricar hormigones de baja resistencia, con fines no estructurales (por ejemplo, para rellenos) con LTAB rico en alúmina como sustituto de agregado fino.

2.2.4. Adición mineral

Husillos Rodríguez et al. (2010), Godoy et al., (2019), Alexandre & Luz (2020), De Carvalho et al., (2020) y Shamaki et al., (2021) evaluaron el uso de lodos de planta de tratamiento de agua como adición mineral, activa en los casos que es una puzolana, en los otros casos simplemente como adición mineral sustituyendo parte de cemento en pastas y morteros de cemento.

Husillos Rodríguez et al. (2010) utilizaron lodos de planta de tratamiento de agua, como adición de cemento portland. Esta investigación trabajó con normas europeas.

En particular, este lodo es atomizado, como parte del proceso de gestión del residuo en la planta potabilizadora de agua de Sant Joan Despí, en Barcelona, España. Posterior a la recogida y almacenamiento de lodos, del bombeo a zona de espesado, espesamiento, almacenamiento de estos, bombeo a zona de deshidratación y su deshidratación, generan el proceso de atomización y posterior almacenamiento final.

La atomización, que tiene como objetivo la obtención de un producto semi-fino, altamente fluido y con una humedad residual inferior al 5 %, consiste en un sistema de co-corriente rotativo con una capacidad máxima de evaporación de 3000 kg / h.

Este LTAB está compuesto por de SiO₂ (29,63 %), Al₂O₃ (17,57 %) y Fe₂O₃ (5,18 %), y con una pérdida por calcinación a 1000 °C de 22,70 %.

Se prepararon cuatro mezclas de cemento, con relaciones en peso de 90/10, 80/20, 75/25 y 70/30. La demanda de agua y el fraguado de las mezclas cemento / lodos se determinaron según norma europea de referencia; Los mismos materiales se utilizaron para realizar probetas de mortero prismático estandarizado de 40 mm x 40 mm x 160 mm para determinar la resistencia a la compresión y flexión a 2 y 28 días. También se determinó el asentamiento (según norma europea de referencia) en el mortero fresco. Se realizó el ensayo de actividad puzolánica para determinar la puzolanicidad de los lodos. El lodo se secó por aspersion.

Como resultado de los ensayos, obtuvieron que el material generado por el secado por aspersion de lodos de LTAB, es un polvo fácilmente manipulable que tenía una forma redondeada y un tamaño de partícula similar al observado en el cemento Portland, y una superficie específica BET un orden de magnitud mayor.

El lodo atomizado contenía de 12% a 14 % de materia orgánica, 2 % a 4 % de humedad, moscovita (25,9 %), cuarzo (11,6 %), calcita (16,7 %), dolomita (3,1 %) y serafinita (4,6 %), anortoclasa (2,3 %) y 35 % de material amorfo. El contenido de metales pesados en este LTAB atomizado fue mucho menor que en la ceniza de LTAB.

En el lodo atomizado estudiado, la proporción de SiO₂ + Al₂O₃, es decir, los componentes más activos en la reacción puzolánica, fue similar al valor medio reportado en la literatura para ceniza de LTAB.

La sustitución parcial del cemento por lodos provocó un retraso sustancial de las tasas de hidratación, incluso en las muestras 90/10. El reemplazo de proporciones mayores de cemento alteró significativamente la hidratación inicial, alargando el período de inducción en más de 12 h, y la hidratación del silicato se retrasó perceptiblemente. Una reacción entre los ácidos grasos y los iones Ca²⁺ + y OH⁻ en el medio inhibiría la nucleación de portlandita.

Los morteros hechos con cemento Portland mezclado con 10 % a 30 % de lodo atomizado exhibieron una disminución sustancial en el asentamiento y menor resistencia mecánica que el cemento de control, con valores de índice de resistencia a los 28 días de 30 % a 50 %. El fraguado también se alteró en los cementos mezclados con respecto al control

De Carvalho Gomes et al. (2019) evaluaron el efecto de la incorporación de lodos LTAB crudos en las pastas de cemento, en la microestructura, el calor de hidratación y la resistencia a la compresión, de las pastas de cemento portland. Esta investigación trabajó con normas americanas, brasileñas, chinas, taiwanesas, hindúes, británicas, y marroquíes.

El lodo es obtenido de la planta de tratamiento de agua de Katoomba, NSW, Australia. No se aportan datos de la composición química de estos LTAB; el dato con el que se cuenta, es que la planta utiliza un tratamiento de agua convencional con cloruro férrico (FeCl_3) como coagulante.

El lodo seco se trituró, se tamizó (300 μm) y se almacenó en una bolsa de plástico hermética, antes de su posterior caracterización. Se realizó pasta de cemento con una relación agua / cemento de 0,4, de acuerdo con la norma de referencia. Las pastas de cemento se prepararon mezclando cemento con diferentes cantidades de LTAB al 1 %, 2 %, 5 % y 10 % en base al peso del cemento. Además, se preparó pasta de cemento de referencia sin adición de lodos.

Se moldearon 12 muestras de moldes cúbicos de 50 mm x 50 mm x 50 mm para cada mezcla. Luego, las pastas mezcladas se curaron durante un día a 20 °C con una humedad relativa del 95 %. Después del desmolde, las muestras se curaron en húmedo durante 7, 14 y 28 días respectivamente.

Todas las mezclas se prepararon a mano durante 30 s, y se utilizaron aproximadamente 25 g de la pasta para cada prueba de mezcla. Los vasos de plástico con pastas se cubrieron con tapas de plástico y se colocaron rápidamente en el calorímetro. Todas las mediciones se realizaron durante las primeras 48 h de hidratación a una temperatura controlada de 20 ° C. El lodo y los fragmentos de pasta de cemento mezclados de las muestras de cubos (28 días) se molieron utilizando un molino de bolas. El polvo fino resultante se sometió al aparato DRX. Los cubos de pasta de cemento fracturados (28

días) de la prueba de resistencia a la compresión se utilizaron para analizar la morfología del composite hidratado. Las muestras se secaron a 40 °C durante 24 h.

Observaron que el proceso de hidratación del cemento aumentó de 3 horas (muestra de referencia) a 8 horas con una incorporación del 5 % de lodo y 22 horas con una incorporación del 10 % de lodo. Adiciones de hasta un 2 % de lodo mostraron una resistencia a la compresión similar a la de referencia, mayores proporciones presentaron una reducción de hasta el 55 %. Los lodos podrán ser incorporados en hormigones de resistencia a la compresión media, ya que presentan limitaciones en la hidratación de compuestos y en el desarrollo de enlaces de la matriz.

Godoy et al. (2019) reportan el potencial del uso de lodo de tratamiento de agua calcinado (LTAB) como adición mineral activa, como material cementicio, mediante procesos químicos, mineralógicos, morfológicos, y caracterización física de las muestras recolectadas en los lechos de secado de una planta de tratamiento de agua al Sur de Brasil, en el estado de Santa Catarina, sobre el Río Itajaí-Açú. Esta investigación trabajó con normas brasileñas.

Los lodos presentan un contenido de sólidos totales de 19,36 % y 0,39 % de contenido de materia orgánica. La composición química del lodo de tratamiento de agua calcinado es en su mayor parte SiO₂ (52,2 %), Al₂O₃ (26,7 %) y Fe₂O₃ (12,4 %).

Para el análisis de la viabilidad del uso de los lodos, comparan con los requisitos de las normas brasileñas de referencia que se aplica a materiales puzolánicos altamente activos, y la que se aplica a materiales puzolánicos normales. Usan dos métodos de calcinado un calcinador flash y un horno de mufla eléctrico a temperaturas que varían de 600 °C a 800 °C para una y dos horas. Luego de calcinados, se molieron en un molino de bolas de cerámica, con una bola para relación de lodos de 5: 1, durante 4 h, para obtener más del 90 % de partículas menor de 45 mm.

Los resultados muestran que todos los LTAB calcinados, cumplen con las propiedades equivalentes a las de un material puzolánico muy activo. La muestra de LTAB calcinada a 750 °C y 850 °C durante 1 h presenta las actuaciones más prometedoras, aunque el contenido de CaO + MgO del 1,7 % no cumple con el máximo del 1,5 %, ni el contenido de Al₂O₃ del 25,2 % con el mínimo del 32 %.

Respecto al uso de LTAB calcinado como material cementicios, con características de puzolana normal, los resultados presentados muestran que todas las muestras de LTAB calcinadas cumplen con los requisitos mínimos relacionados con el contenido de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 , contenido máximo de SO_3 , pérdida máxima al encendido y porcentaje retenido en 45 mm. Las muestras de LTAB calcinadas a 600 °C durante 1 h muestran las más prometedoras.

Alexandre & Luz (2020) analizaron la posible sustitución de cemento portland de alta resistencia inicial, por lodos no calcinados, evaluando los efectos producidos en la resistencia mecánica y el proceso de hidratación en la pasta de cemento. El cemento Portland, fue reemplazado parcialmente por lodos LTAB en las proporciones de 0 %, 10 % y 20 %. La presencia de lodos en la mezcla cambió la consistencia de la mezcla y, por lo tanto, también se optó por producir pastas con aditivo súper-plastificante, con el fin de mantener la consistencia y relación agua-cemento de la referencia (sin lodos LTAB), fabricando un total de 5 mezclas. En esta investigación, no se describe donde está ubicada la planta de tratamiento de agua desde donde fue extraído el lodo en estudio. Esta investigación utilizó normas brasileñas.

Este LTAB se compone principalmente por Al_2O_3 (25,8 %), SiO_2 (24,2 %) y Fe_2O_3 (19,3 %). Se observa que los principales compuestos químicos del cemento Portland también se encuentran en los LTAB. El contenido de SiO_2 es similar en ambos materiales, ya que Al_2O_3 y Fe_2O_3 aparecen en mayor concentración en los lodos. El CaO es el compuesto químico con mayor concentración en el cemento, con más del 50 %, mientras que en los lodos el mismo compuesto tiene el 0,60 % de la composición.

Los LTAB pasaron por el proceso de secado en estufa durante 48 horas a una temperatura controlada de 105 °C. Luego, se utilizó el molino de bolas durante aproximadamente 12 horas y finalmente el mortero y pistilo para terminar de triturar el material. Después de la preparación de las pastas, las muestras se colocaron en una cámara húmeda (23 °C y 95 % RH), siendo desmoldadas después de las 24 horas de edad. Luego, las muestras se colocaron en recipientes mantenidos en curado húmedo hasta la edad de 28 días. Las muestras se sometieron a la prueba de resistencia a la compresión a las edades de 7 y 28 días.

Como resultado, concluyeron que hubo una buena incorporación de lodos LTAB por parte del cemento Portland debido a que los principales compuestos hidratados del cemento se identificaron en la hidratación de las mezclas que contenían LTAB.

Shamaki et al. (2021) analizaron la posible incorporación de lodos LTAB, crudo y calcinado a distintas temperaturas, en morteros de cemento, evaluando posteriormente las propiedades físicas-mecánicas de la mezcla. El lodo fue recogido de la planta de tratamiento de Elvington en la ciudad de York, Reino Unido. Realizaron 6 mezclas, una de ellas con lodo crudo y las demás con el lodo calcinado a 475 °C, 625 °C, 1000 °C y 1100 °C. Todas las pastas se realizaron con una sustitución del 20 % del lodo en peso. Esta investigación trabajó con normas americanas y británicas.

Los principales componentes químicos del lodo crudo son SiO₂ (10,28 %), Al₂O₃ (44,24 %), Fe₂O₃ (2,51 %) y CaO (2,5 %), y una pérdida por calcinación a 950 °C de 36,4 %. Los lodos calcinados se componen mayoritariamente de SiO₂ (17,67 % a 19,09 %), Al₂O₃ (67,38 % a 68,29 %), Fe₂O₃ (4,75 % a 4,79 %) y CaO (4,55 % a 4,79 %), cuanto mayor es la temperatura de calcinación mayor es el porcentaje de los mismos. El cemento utilizado para las mezclas, tiene una composición similar, pero los valores difieren SiO₂ (20,50 %), Al₂O₃ (4,60 %), Fe₂O₃ (2,40 %) y CaO (63,40 %), y una pérdida por calcinación de SiO₂ (1,50 %).

Los LTAB se secaron en horno a 105 °C hasta masa constante. A continuación, se trituró usando un molino de disco vibratorio RS200 de Retsch a 1300 rpm durante 5 min. Luego se colocaron muestras secas en un horno eléctrico de laboratorio y fueron elevando la temperatura a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min seguido de un tiempo de mantenimiento de 2 h a la temperatura objetivo. El lodo calcinado se enfrió gradualmente a temperatura ambiente de laboratorio y luego se trituró usando un molino de disco vibratorio RS200 de Retsch a 1300 rpm durante 5 min.

Para evaluar la actividad puzolánica de los LTAB calcinados, se utilizaron cubos de mortero de 50 mm preparados con diferentes formulaciones, una relación ligante / arena de 1: 3 y una relación agua / ligante de 0,55.

Las mezclas de cemento y lodo se prepararon con un reemplazo del 20 % en peso. Los aglutinantes se homogeneizaron en un molino de bolas de laboratorio durante al menos 2 h utilizando bolas de polímero para evitar una mayor molienda. Los morteros se

mezclaron durante 4 minutos utilizando un mezclador automático. Las probetas de mortero se desmoldaron después de 24 h y se almacenaron en una sala de curado al 95 % de humedad relativa y 20 °C hasta la edad de prueba.

Las muestras de pasta de cemento correspondientes se mezclaron a mano, se vertieron en vasos de plástico de 8 ml, se sellaron al vacío y luego se almacenaron en un baño de agua a 20 °C hasta la edad de prueba.

Se realizó un análisis MEB de pastas de cemento hidratadas para comprender el desarrollo microestructural. Las rodajas se cortaron a la edad de prueba, se detuvo la hidratación, se impregnaron con resina, se pulieron y se recubrieron con carbón antes del análisis.

En las pastas de cemento, los contenidos de portlandita (CH) se determinaron mediante la pérdida de peso entre 380 °C y 500 °C, utilizando el método de la tangente. Se realizó una corrección en el contenido de portlandita para tener en cuenta la cantidad de CH carbonatado que se puede detectar en el proceso de descarbonatación entre 600 °C y 900 °C.

Observaron que el LTAB crudo es principalmente un precipitado de hidróxido de aluminio amorfo con cantidades menores de cuarzo cristalino y montmorillonita. Dentro del rango de temperatura entre 200 °C y 625 °C, no se observaron cambios en la composición cristalina, pero sí una pérdida de masa significativa.

La trabajabilidad de los morteros frescos varió constantemente con los cambios en la morfología y el área de superficie específica BET. Una superficie más alta generó que las partículas de lodo adsorbieran más agua, lo que resultó en una trabajabilidad reducida.

El LTAB calcinado puede considerarse una puzolana. La temperatura de calcinación tiene un efecto significativo sobre la actividad puzolánica de los LTAB. El lodo de alumbre calcinado a 825 °C mostró la mejor reactividad, la cual disminuyó para temperaturas de calcinación mayores. Los productos calcinados a 1000 °C y 1100 °C, mostraron un mayor desarrollo de resistencia mecánica.

En mezclas que contienen lodos calcinados a 825 °C, se observó una formación temprana de monosulfoaluminato, que cubre las partículas de cemento y reduce el espacio libre en la matriz. Esto disminuye la tasa y el grado de hidratación de la alita, lo que resulta en una menor resistencia a la compresión en edades posteriores. La hidratación y la resistencia mecánica están fuertemente influenciadas por la relación Al_2O_3 / SO_3 en los cementos mezclados con lodo calcinado. Se recomienda aumentar la dosis de yeso y/o polvo de piedra caliza para ayudar a controlar el efecto acelerador sobre la hidratación del C3A, para el lodo calcinado a 825 °C.

A continuación, se realiza una breve síntesis del conjunto de los trabajos y sus resultados, mediante cuadros comparativos de los análisis y ensayos relevantes. En la Tabla 9 se presenta una síntesis de los tipos de análisis físico-químicos y ensayos realizados a los lodos en la bibliografía de referencia. Se observa que todos los estudios, caracterizan químicamente el lodo por fluorescencia de rayos X (FRX). Asimismo, la difracción de rayos X (DRX), la pérdida por calcinación (PPC) y la distribución del tamaño de partícula se realizan en la mayoría de los estudios.

Tabla 9: Ensayos de caracterización del LTAB Adiciones minerales)

	pH	Humedad	Densidad	DTP	DRX	FRX	PPC	TGA/DTGA	MEB	LIXIVIADO
Husillos (2010)										
Godoy (2019)										
Alexandre(2020)										
Shamaki (2021)										

En la tabla 10 se presenta un cuadro comparativo indicando los resultados de composición química por FRX y pérdida por calcinación reportados para lodos en la bibliografía de referencia. En la sección 2.3.2 más adelante, se realiza un análisis detallado de la composición química de los lodos en base a los datos presentados en esta tabla.

Tabla 10: Composición química (FRX) y PPC (Adiciones minerales)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	MnO	P, P, C (%)
Husillos (2010)	29,6	17,6	5,2	0,6	11,8	2,1	6,1	2,8	0,9	0,3	0,1	22,7
Godoy (2019)	52,2	26,7	12,4	2,2	0,5	1,5	-	4,2	-	-	0,3	16,1
Alexandre (2020)	24,2	25,8	19,3	2,9	0,6	0,4	-	0,2	0,4	0,3	0,3	-
Shamaki (2021)	10,3	44,2	2,5	0,2	2,5	0,3	0,1	0,4	0,4	1,2	0,1	36,4

Como resultado de estos estudios se puede observar que todos los lodos investigados presentan diferente composición química. Como se mencionó en la sección 2.1.3., las características de los lodos dependen las características fisicoquímicas del agua bruta y de los productos químicos usados para el tratamiento.

Como resumen de los trabajos presentados para esta aplicación, algunos estudiaron la adición de LTAB al cemento, sea como puzolana (calcinado, como adición mineral activa) o como sustitución parcial de cemento, en consideración que los principales componentes químicos del cemento se encuentran en los LTAB.

En algunos trabajos el proceso incorpora un paso previo de atomización del LTAB, además del secado como en las demás alternativas. Mediante la atomización se obtiene un producto semi-fino, con forma redondeada y un tamaño de partícula similar al cemento portland. A pesar de esto, y para valores muy bajos de sustitución de cemento por LTAB del 10 %, los autores indican que se observan retrasos sustanciales en las tasas de hidratación inicial y en el desarrollo de enlaces de la matriz. En cuanto a la resistencia a la compresión de los morteros con esta sustitución, los valores disminuyeron al 50% con respecto a las normas de referencia. Adiciones de hasta un 2% mostraron resistencias similares a la referencia.

2.2.5. Suelo-cemento

Rodrigues et al., (2015) evaluaron el uso de lodos de planta de tratamiento de agua en la fabricación de suelo-cemento. A continuación, se presentan los ensayos realizados para la caracterización del LTAB.

Rodrigues et al (2015) plantean el reciclaje de los lodos de planta de tratamiento para la producción de ladrillos de suelo-cemento, realizando muestras con sustitución de la tierra con 1,25 %, 2,50 %, y 5 % de LTAB, además de la referencia sin adición de lodo. Los efectos de la misma fueron evaluados mediante sus propiedades físicas, como la resistencia a la compresión, la densidad aparente y la absorción de agua. Esta investigación trabajó con normas brasileñas.

La muestra representativa de lodos residuales se recogió en la planta de tratamiento de aguas de la comarca de Campos dos Goytacazes-RJ, Brasil. Y los resultados indicaron que obtuvieron es que el lodo es un material plástico (IP=25 %), rico en Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 y materia orgánica; y por DRX que está compuesto predominantemente de caolinita.

Los lodos residuales se sedimentaron para eliminar el exceso de agua, se homogeneizaron y se sometieron a secar en un horno durante 48 horas a $110^\circ C$. El residuo seco se tamizó hasta que una fracción pasara por una malla 35 (425um ASTM) tamiz. Se utilizó como referencia una composición tradicional de suelo-cemento (suelo: cemento - 10: 1). Se utilizó cemento Portland y suelo comercial. Las mezclas de suelo/residuos/cemento se humedecieron con un 16 % en peso de agua.

Se prepararon piezas cilíndricas mediante prensado uniaxial (18 MPa), y luego se curaron durante 28 días en cámara húmeda (~95 % de humedad a $24^\circ C$). Las probetas se ensayaron bajo los procedimientos de absorción de agua, resistencia a la compresión y densidad aparente. En el caso de este tipo de ladrillo de suelo-cemento no es necesario que se realice la etapa de cocción, a diferencia del ladrillo de arcilla convencional.

De los resultados obtenidos, extraen como conclusiones, que el residuo de la planta de tratamiento de agua es un material plástico (IP = 25,4 %) rico en Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 y materia orgánica, con una fracción arcillosa (35 %), lo que influye en las reacciones de hidratación del cemento y en el aumento de absorción de agua. Los resultados de la DRX mostraron que la muestra de desecho está compuesta predominantemente de caolinita.

A pesar de que los valores de resistencia a la compresión de los ladrillos disminuyeron, todos cumplen con el valor mínimo de 2,0 MPa según la norma brasileña de referencia.

Los valores de densidad aparente de los ladrillos, también disminuye con la adición de LTAB.

En este trabajo se demostró que el suelo puede ser reemplazado con hasta un 1,25 % de residuos de plantas de tratamiento de agua en la producción de ladrillos de suelo-cemento. La principal limitación para el reciclaje de residuos de plantas de tratamiento de agua en los ladrillos de suelo-cemento, está asociado con el aumento de la absorción de agua. Pese a ello, la incorporación de los LTAB en la producción de ladrillos suelo-cemento son una excelente alternativa para la reutilización de materiales sólidos y prácticas de reciclaje de residuos.

A continuación, se realiza una breve síntesis del trabajo y sus resultados, mediante cuadros comparativos de los análisis y ensayos relevantes. En Tabla 11 se presenta una síntesis de los tipos de análisis físico-químicos y ensayos realizados a él LTAB en la bibliografía de referencia. Se observa que al igual que otros autores, se caracteriza químicamente el lodo por fluorescencia de rayos X (FRX), así como también se realiza la difracción de rayos X (DRX) y la pérdida por calcinación (PPC).

Tabla 11: Ensayos de caracterización del LTAB (Suelo-cemento)

	pH	Humedad	Densidad	DTP	DRX	FRX	PPC	TGA/DTGA	MEB	LIXIVIADO
Rodrigues (2015)										

En la Tabla 12 se presenta un cuadro indicando los resultados de composición química por FRX y pérdida por calcinación reportados para el LTAB de la bibliografía de referencia. En la sección 2.3.2 más adelante, se realiza un análisis detallado de la composición química de los lodos en base a los datos presentados en esta tabla.

Tabla 12: Composición química (FRX) y PPC (Suelo-cemento)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	MnO	P, P, C (%)
Rodrigues (2015)	29,59	31,18	10,21	1,04	0,34	-	-	1,27	-	1,61	0,14	0,02

Debido a que se tiene un solo estudio para esta aplicación, se comparó con los resultados reportados para otras aplicaciones, encontrándose que los lodos presentan una composición química diferente. Tal como se mencionó en la sección 2.1.3., la composición química del lodo depende de las características fisicoquímicas del agua bruta y de los productos químicos usados para el tratamiento.

En esta alternativa de valorización, los autores de fabricaron ladrillos de suelo- cemento, pero encontraron una limitación muy grande con el porcentaje máximo de LTAB a incorporar: se observó que el suelo puede ser reemplazado hasta un máximo de 1,25 %. Esta fracción menor de incorporación se debe al aumento de la absorción de agua de los productos fabricados con LTAB, limitado por las normas de referencia. Los autores sostienen que el considerable aumento de la absorción de agua por agregado de LTAB se debe a que presenta altos porcentajes de fracción arcillosa y alta plasticidad, que influyen en las reacciones de hidratación del cemento. Se indica que, para valores mayores de sustitución, el alto contenido de fracción arcillosa de los LTAB, dificultó la etapa de homogenización de la mezcla suelo-cemento.

A pesar de que los valores de resistencia a la compresión de los ladrillos de suelo-cemento disminuye, todos cumplen con el valor mínimo según la norma de referencia. La densidad aparente de los ladrillos también disminuye con la adición de LTAB.

2.2.6. Geopolímeros

Suksiripattanapong et al. (2015), Nimwinya et al. (2016), y Geraldo et al. (2017), estudian la fabricación de geopolímeros mediante la adición de los LTAB, y sobre ellos se detalla a continuación.

Suksiripattanapong et al. (2015) estudian el desarrollo de la resistencia a la compresión en geopolímeros, fabricados a partir de lodos de tratamiento de agua y cenizas volantes (FA) de plantas de generación de electricidad; con la intención de generar un material de construcción ecológico sin uso de cemento portland como agente cementante. Se utilizó un activador alcalino líquido (L), una solución de silicato de sodio e hidróxido de sodio. Estudian la influencia en el material de la relación L/FA, la relación $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$, la condición de calor (temperatura y duración) y el tiempo de curado en el desarrollo de la fuerza. Esta investigación trabajó con normas tailandesas.

El lodo se recogió de la planta de tratamiento de agua Bang Khen, Tailandia. Los principales componentes químicos del lodo son SiO_2 (67,33 %), Al_2O_3 (22,47 %), Fe_2O_3 (6,15 %), y una pérdida por calcinación de 0,78 %. Las cenizas volantes utilizadas tienen SiO_2 (49,32 %), Al_2O_3 (12,96 %), Fe_2O_3 (15,64 %), y una pérdida por calcinación de 7,29 %. Los lodos se utilizan como agregados sin arena adicional, FA es utilizado como un precursor y una mezcla de NaOH y Na_2SiO_3 se utiliza como activación alcalina líquida.

Se hicieron muestra de geopolímero de LTAB-FA combinando LTAB, FA y líquido activador alcalino (Na_2SiO_3 y NaOH), de forma que la relación LTAB/FA se fijó en 70:30 y las relaciones de Na_2SiO_3 /NaOH fueron 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 y 50:50.

Los lodos fueron secados al aire y el AF se mezclaron durante 5 min en un mezclador para asegurar la homogeneidad de la mezcla. El mezclador se detuvo y la mezcla fue activada por el líquido activador alcalino y se mezcla durante 5 min más. Luego se compacta la mezcla bajo la energía Proctor modificada. Luego se comprimió estáticamente en un molde cilíndrico de 50 mm de diámetro x 100 mm de altura, mediante el cual la compresión fue realizada por un gato hidráulico manual.

Las muestras fueron desmanteladas, envueltas dentro de la hoja de vinilo y luego se calienta a 65, 75 y 85 °C respectivamente durante duraciones de 24, 48, 72, 96 y 120 h. Después de calentar, las muestras se curaron posteriormente a temperatura ambiente (27 °C a 30 °C) hasta que transcurran los diferentes tiempos de curado previstos.

Las resistencias a la compresión de las muestras de geopolímero de lodo-FA se midieron después de 7,14, 28, 60 y 90 días de curado de acuerdo con ASTM D1633.

Los resultados de los ensayos muestran que: la proporción óptima, que desarrolla el peso y la fuerza unitarios máximos, es una proporción de Na_2SiO_3 /NaOH de 80:20 y una proporción de LTAB/FA de 1.3, independientemente de las condiciones de calor y el tiempo de curado. La temperatura óptima de calor y la duración son 75 °C y 72 h, respectivamente. La temperatura de calor más alta de 85 °C provoca la pérdida de humedad, lo que resulta en microfisuras y reducción de la resistencia a la compresión.

Lodos de tratamiento de aguas tradicionalmente destinados a vertedero se puede utilizar de manera sostenible como agregado alternativo para desarrollar unidades de mampostería de geopolímero. Las resistencias a la compresión de geopolímeros de

LTAB-FA preparados con el porcentaje óptimo y calentado a 75 °C están entre 12 y 20 MPa, dependiendo de la duración del calor.

Nimwinya et al. (2016) investigaron la viabilidad del uso de lodo de tratamiento de agua (LTAB) mezclado con ceniza de cáscara de arroz (CCA), como precursor sostenible para desarrollar un aglutinante de geopolímero liviano, agente cementante como alternativa del cemento portland. El activador alcalino es una mezcla de hidróxido de sodio (NaOH) y silicato de sodio (Na₂SiO₃). Se investigan los efectos de la relación SiO₂/ Al₂O₃, que refleja las características de las composiciones químicas de LTAB y CCA, y la temperatura de curado térmico (a temperatura ambiente y a 60 °C) sobre la densidad, el tiempo de fraguado y la Resistencia a la compresión no confinada. Esta investigación trabajó con normas americanas.

El lodo se obtuvo de la planta de tratamiento de agua Bangkhen, en Bangkok, Tailandia. Los componentes principales del LTAB son SiO₂ (58,99 % en peso), Al₂O₃ (24,64 % en peso), Fe₂O₃ (6,63 %) y Na₂O (4,08 %). El CCA consiste principalmente en SiO₂ (89,17 % en peso), sin Al₂O₃, FeO₃ (0,41 %) y Na₂O (7,29 %).

Para eliminar las impurezas en el LTAB, se mezcló con agua en una relación LTAB/ agua de aproximadamente 0,8 e 1,2 en masa y luego la suspensión de LTAB se pasó a través de un tamiz (número 325) y se secó en horno a 100 °C durante 24 h. El LTAB seco se molió con un mortero eléctrico y se pasó por un tamiz (número 325) antes de ser calcinado a 600 ° C durante 2 h para obtener el polvo de LTAB calcinado.

La CCA se molió en húmedo en un molino de bolas durante 6 horas y luego se secó a 100 °C durante 24 horas antes de pasarlo por un tamiz (número 325). Se mezclaron gránulos de hidróxido de sodio (NaOH) y agua destilada para obtener una concentración de 10 M, luego se dejaron enfriar a temperatura ambiente (entre 27 °C y 30 °C).

La pasta de geopolímero se vertió en un molde de acero de 50 mm x 50 mm x 50 mm y se compactó, como se describe en ASTM C109-2002. Las muestras de geopolímero junto con los moldes luego se sellaron con una lámina de vinilo para evitar la evaporación de la humedad durante el curado, ya sea a temperatura ambiente (27 °C a 30 °C) o 60 °C. Tanto las muestras curadas a temperatura ambiente como las curadas a 60 °C se desmontaron e inmediatamente se envolvieron dentro lámina de vinilo después de 24 h. Las muestras curadas a temperatura ambiente se curaron a

continuación durante 6 días adicionales (7 días de curado), mientras que las muestras curadas a 60 °C se curaron en el horno a 60 °C durante 6 días adicionales.

Como conclusión de la investigación, sostienen que debido a la formación de microporos después del proceso de geopolimerización y la naturaleza liviana del CCA, la densidad de los geopolímeros es 3 veces menor que la del Cemento Portland Ordinario, que es útil como aglutinante para desarrollar estructuras de construcción livianas.

Los tiempos de fraguado inicial y final y la resistencia a la compresión, están fuertemente controlados por la relación $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$. Una relación $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ más alta da como resultado tiempos de fraguado inicial y final elevados, ya que la velocidad de condensación entre las especies de silicato y aluminato es más rápida que entre las especies de silicato y silicato.

El curado con calor a 60 °C puede mejorar la resistencia a la compresión de este geopolímero LTAB-CCA cuando las proporciones $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ son mayores de 4,9 pero tiene un impacto insignificante en las proporciones $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ menores de 4,9.

Por lo que a medida que se aumenta la temperatura de curado se obtienen mayores cantidades de productos de geo polimerización y por lo tanto el geopolímero resultante presenta una estructura más densa y mayor resistencia.

La proporción óptima de $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ que proporciona la mayor resistencia se encuentra en aproximadamente 4,9 y 5,9 para condiciones de curado a temperatura ambiente y 60 °C. Con estas proporciones óptimas de $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$, las resistencias a la compresión de los geopolímeros cumplen con el requisito mínimo del cemento portland de 19 MPa.

Esta investigación impulsa a que los LTAB y CCA, tradicionalmente destinados a los vertederos, se utilicen de manera sostenible como precursores en los aglutinantes de geopolímeros.

Geraldo et al. (2017) mostraron que es factible reemplazar parcialmente metacaolín por LTAB crudo (no calcinado) en la elaboración de geopolímeros. Esta investigación trabajó con normas brasileñas.

Las mezclas se hicieron reemplazado parcialmente metacaolín por LTAB en las proporciones de 0 %, 15 %, 30 % y 60 % en masa.

El LTAB fue recogido de la planta de tratamiento de Campinas, San Pablo, Brasil. Y sus principales componentes químicos son SiO₂ (34,92 %), Al₂O₃ (34,11 %), Fe₂O₃ (47,19 %) y la pérdida por calcinación resulto de 17,98 %. El metacaolín utilizado (Hp ultra): SiO₂ (55,77 %), Al₂O₃ (32,48 %), Fe₂O₃ (1,88 %) y la pérdida por calcinación resulto de 4,76 %; y la CCA: SiO₂ (89,51 %), Al₂O₃ (0,13 %), Fe₂O₃ (1,68 %) y la pérdida por calcinación resulto de 6,95 %.

El LTAB se deshidrató (deshidratación centrífuga), se secó al sol para alcanzar una humedad del 6 %, se trituroó, se tamizó (abertura del tamiz de 0,590 mm), se homogeneizó y se almacenó en un recipiente sellado. El polvo no se calcinó con el propósito de ahorrar energía.

Los morteros se vertieron en moldes prismáticos de 40 mm x 40 mm x 160 mm, y luego se compactaron en una mesa vibratoria durante 1 min para eliminar el aire atrapado. Los moldes se cubrieron con una película plástica para evitar la pérdida de agua. Después de 24 h, las probetas se retiraron de los moldes y se curaron a temperatura ambiente hasta las edades de prueba (temperatura promedio de 25 °C ± 2 °C y humedad relativa del 60 %).

Para las mezclas, como fuente de álcali se realizó una solución alternativa de silicato de sodio hecha de una mezcla de NaOH y ceniza de cáscara de arroz (CCA). Se usó CCA adicional en las mezclas de geopolímeros para mantener constante la relación molar SiO₂/ Al₂O₃.

Se investigaron las propiedades mecánicas y las características de durabilidad; y los resultados mostraron que las propiedades de los aglutinantes de geopolímeros dependen en gran medida del contenido de LTAB en la mezcla. El aglutinante con LTAB aumentó los tiempos de fraguado y la cinética de la prueba de temperatura mostró bajas tasas de reacciones de geo-polimerización.

La trabajabilidad y las propiedades mecánicas de los morteros de geopolímero disminuyeron a medida que aumentaba el contenido de LTAB en el aglutinante. Las resistencias a la compresión en todas las edades de curado fueron más altas que el mínimo requerido para varios tipos de componentes de construcción. Todos los

morteros aumentaron las propiedades mecánicas con el tiempo, indicativo de reacciones continuas. Los morteros con ligantes de geopolímeros con LTAB mostraron mayores vacíos y menor succión capilar en comparación con los morteros de referencia.

En conclusión, el reemplazo de LTAB disminuyó el flujo, las resistencias a la flexión y a la compresión, y aumentó la porosidad y la permeabilidad del mortero de geopolímero. El reemplazo del 15 % de Metacaolín por LTAB tuvo 25 MPa de resistencia a la compresión a los 28 días, lo cual es un buen resultado para hacer concreto o componentes de construcción.

Los resultados muestran que el uso de LTAB no calcinado y solución de silicato de sodio de CCA en geopolímero es técnicamente factible, lo que resulta en una alternativa sostenible y ambientalmente amigable para la eliminación de LTAB y CCA.

A continuación, se realiza una breve síntesis del conjunto de los trabajos y sus resultados, mediante cuadros comparativos de los análisis y ensayos relevantes. En Tabla 13 se presenta una síntesis de los tipos de análisis físico-químicos y ensayos realizados a él LTAB en la bibliografía de referencia. Se observa que al igual que otros autores, se caracteriza químicamente el lodo por fluorescencia de rayos X (FRX), así como también se realiza la difracción de rayos X (DRX) y la pérdida por calcinación (PPC).

Tabla 13: Ensayos de caracterización del LTAB (Geopolímeros)

	pH	Humedad	Densidad	DTP	DRX	FRX	PPC	TGA/DTGA	MEB	LIXIVIADO
Suksiripattanapong (2015)										
Nimwinya (2016)										
Geraldo (2017)										

En la Tabla 14 se presenta un cuadro comparativo indicando los resultados de composición química por FRX y pérdida por calcinación reportados para lodos en la bibliografía de referencia. En la sección 2.3.2 más adelante, se realiza un análisis

detallado de la composición química de los lodos en base a los datos presentados en esta tabla.

Tabla 14: Composición química (FRX) y PPC (Geopolímeros)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	MnO	P, P, C (%)
Suksiripattanapong (2015)	67,3	22,5	6,1	-	0,7	-	-	1,3	-	1,0	-	7,3
Nimwinya (2016)	58,9	24,6	6,6	0,9	0,7	1,1	4,1	1,5	-	-	-	1,4
Geraldo (2017)	34,9	34,1	7,2	0,8	-	0,6	-	1,8	-	-	-	17,9

Como resultado de estos estudios se puede observar que todos los lodos investigados presentan diferente composición química. Como se mencionó en la sección 2.1.3., la composición química de los lodos depende de las características fisicoquímicas del agua bruta y de los productos químicos usados para el tratamiento.

Como conclusión de los trabajos presentados, se puede observar que los autores que trabajan mediante la adición de LTAB en la fabricación de geopolímeros, buscan un agente cementante como alternativa al cemento portland. Para ello algunos trabajan con cenizas volantes (CA), otros con cáscara de arroz (CAA), desarrollando un aglutinante de geopolímero liviano. Para esta fabricación suman un activador alcalino. Los autores concluyen que controlando la relación de SiO₂ y Al₂O₃ presentes en los LTAB y CCA, y con altas temperaturas de curado, el geopolímero resultante presenta una estructura densa y cumple con los requisitos de resistencia del cemento portland.

Los autores obtuvieron morteros con ligantes de geopolímeros con LTAB, que disminuían su trabajabilidad, y su resistencia a la compresión y a la flexión, al aumentar las cantidades de LTAB, así como aumentaban la porosidad y la permeabilidad del mortero. Se observó que la sustitución del 15 % de metacaolín por LTAB y CCA es una alternativa viable.

2.3. Selección de la aplicación

La literatura técnica presenta una variedad de posibles aplicaciones para los lodos de planta de tratamiento de agua bruta en la producción de materiales de construcción. En general los lodos sustituyen parcialmente algunas de las materias primas.

La mayoría de las referencias consultadas concluyen que es técnicamente factible el uso de los LTAB en la fabricación de diversos materiales de construcción. Asimismo, para cumplir con normas o criterios de calidad de los materiales de construcción, se recomiendan en general porcentajes máximos de lodo, y/o condiciones de fabricación de los materiales o de acondicionamiento del lodo. No obstante, debe considerarse que estos estudios fueron realizados a escala laboratorio y no se conocen experiencias a escala industrial. A la vez, se observa una variedad de composiciones químicas de los LTAB que se utilizaron en los estudios, y por lo tanto no puede afirmarse que las aplicaciones sean técnicamente factibles para todos los LTAB.

A partir de estos datos se observa que no existe una correlación entre la composición química de los LTAB y la alternativa de valorización seleccionada (cerámicos, cementos, agregados para hormigón y productos en base a dicho material, adiciones minerales, suelo-cemento y geopolímeros).

En este estudio se selecciona la aplicación en la fabricación de materiales cerámicos por ser la alternativa que tiene un mayor desarrollo de investigación dado por el número de referencias bibliográficas identificadas (16 trabajos sobre cerámicos, 3 de cementos, 5 de agregados, 5 de adición mineral, 1 de suelo-cemento y 3 de geopolímeros). A la vez, es la aplicación que mayor porcentaje de LTAB puede incorporar al material manteniendo la calidad del producto, y, por lo tanto, la alternativa de valorización más atractiva.

Teniendo en cuenta los estudios de aplicación a materiales cerámicos publicados por Monteiro et al. (2008), Ramadan et al. (2008), Teixeira et al. (2011), Kizinievič et al. (2013), Benlalla et al. (2015), Da Silva et al. (2015), Wolff et al. (2015), Ling et al. (2017), Cremades et al. (2018), Petterle et al. (2018), Pokhara et al. (2019) y Sarabia Guarín et al. (2020), los LTAB se usaron en sustitución de la arcilla, que es la materia prima principal de los cerámicos. En estos trabajos se reporta que la composición granulométrica de los LTAB es mayoritariamente tamaño arcilla. Asimismo, los LTAB se

acondicionaron mediante molienda y deshidratación que es la forma más común encontrada en la bibliografía, además que permite controlar de mejor forma las condiciones iniciales de fabricación (humedad y granulometría del lodo). También considerando los resultados obtenidos por dichos autores, se realizaron sustituciones hasta el 20 % de LTAB por arcilla.

Finalmente, cabe mencionar que, en la presente tesis, se utilizaron LTAB del mismo origen que los estudiados en el proyecto CTAguA, UPM-Facultad de Ingeniería “Alternativas de Valorización de Lodos, UPM” (IEM, 2021). Como se desarrolla en la sección 2.2, este proyecto estudió diversas alternativas de valorización, y concluyó que la aplicación para materiales cerámicos es la más promisoría. A la vez, se observó que “el acondicionamiento previo de los lodos, también es clave obteniéndose resultados bien diferentes cuando los lodos fueron deshidratados y molidos previamente, que con lodos crudos”. En tal sentido la presente tesis complementa, y está justificada, por los estudios realizados en el proyecto mencionado.

2.4. Mezclas cerámicas

Habiendo seleccionado la aplicación de LTAB en productos cerámicos, en esta sección se presentan dos aspectos que son comúnmente identificados por los autores de referencia como fundamentales para evaluar la aptitud de los materiales para elaborar productos cerámicos: la composición granulométrica y química de las materias primas que componen la mezcla cerámica. Se adopta la definición de mezcla cerámica utilizada por la mayoría de los autores, que consiste en la combinación de las materias primas para la fabricación de productos cerámicos (en general: arcilla, arena y agua).

2.4.1. Composición granulométrica

La principal materia prima para la fabricación de productos de cerámica roja es la arcilla “común”, que se explota generalmente próximo al sitio de fabricación. Desde el punto de vista textural o granulométrico, las arcillas se definen como la fracción de partículas minerales con un tamaño menor a 2 μm , y mineralógicamente, se definen como agregados de silicatos de aluminio hidratados. En la práctica, las arcillas utilizadas para la fabricación de cerámica roja tienen una composición granulométrica variable (fracción arcilla, limo y arena) y una composición química y mineralógica también variable. En este trabajo se adopta la definición de arcilla utilizada en la industria de cerámica roja, que refiere al recurso mineral explotado y usado para la fabricación de sus productos.

En la industria de cerámica roja es común mezclar dos tipos de arcillas, o arcillas con arenas u otros materiales de granulometría gruesa, para obtener una “mezcla cerámica” que optimice los procesos de fabricación manteniendo los estándares de calidad de los productos finales. La composición mineralógica y granulométrica de esta mezcla cerámica es determinante en las condiciones requeridas para la fabricación (extrusión de las piezas, secado y cocción), y en las características del producto final.

Según Pracidelli & Melchades (1997), las arcillas plásticas, denominadas industrialmente "arcillas gordas", presentan granulometrías muy finas (menor a 2 μm), y entonces su procesamiento se vuelve muy complicado. Presentan buena plasticidad, aunque necesitan de considerables cantidades de agua para desarrollar completamente esa plasticidad. Tienen alta resistencia mecánica en seco y luego de la quema. Debido a su alto grado de compactación, se reducen los canales internos entre partículas, lo que dificulta la eliminación de agua durante el secado. Se produce un alto gradiente de humedad interno que provoca fuertes retracciones diferenciales y deformaciones, y, por lo tanto, pérdida de piezas en la fabricación. Requieren entonces un ciclo de secado más largo, con un calentamiento largo al principio.

La preparación de la mezcla cerámica busca lograr una composición granulométrica adecuada, dosificando materiales que aportan granos finos, medios y gruesos. Los granos finos y medios son generalmente aportados por las arcillas plásticas. Los granos gruesos son aportados por los denominados agentes “desplastificantes” (o “desengrasantes”) que reducen el grado de compactación de la mezcla, disminuyendo las contracciones durante el proceso de secado y quemado, y disminuyendo el tiempo de secado. La presencia de granos gruesos facilita la eliminación de agua en este proceso. Los agentes desplastificantes pueden ser otras arcillas “flacas”, que presentan un mayor tenor de impurezas (minerales no arcillosos, como arenas, micas, óxido de hierro y otros) y reducen la plasticidad de la masa. También es usual utilizar arena como agente desplastificante.

En la industria cerámica es particularmente popular el concepto de clasificación tecnológica de yacimientos de arcilla para la fabricación de productos cerámicos, propuesta por Winkler (1954), y sus variaciones posteriores. Este concepto se utiliza tanto para: 1) evaluar la aptitud de arcillas para fabricación de cerámica roja, como para

2) orientar la preparación de mezclas de arcillas y desplastificantes para lograr una composición granulométrica óptima.

En la Figura 3 se presenta el diagrama original propuesto por Winkler según la publicación de Dondi et al. (1996), traducido al español. Se indican cuatro regiones de aptitud para la fabricación de diferentes tipos de cerámicos, de acuerdo a los porcentajes en peso de fracción arena ($> 20 \mu\text{m}$) y de fracción arcilla ($< 2 \mu\text{m}$) de la mezcla cerámica: (1) ladrillos sólidos (*solid bricks*), (2) ladrillos perforados (*vertically perforated bricks*), (3) tejas y cumbreras livianas y bloques alivianados (*roofing tiles, lightweight blocks*), y (4) ladrillos perforados de pared fina (*thin walled hollow bricks*). Entre paréntesis se agrega la definición en inglés que se encuentra en el original.

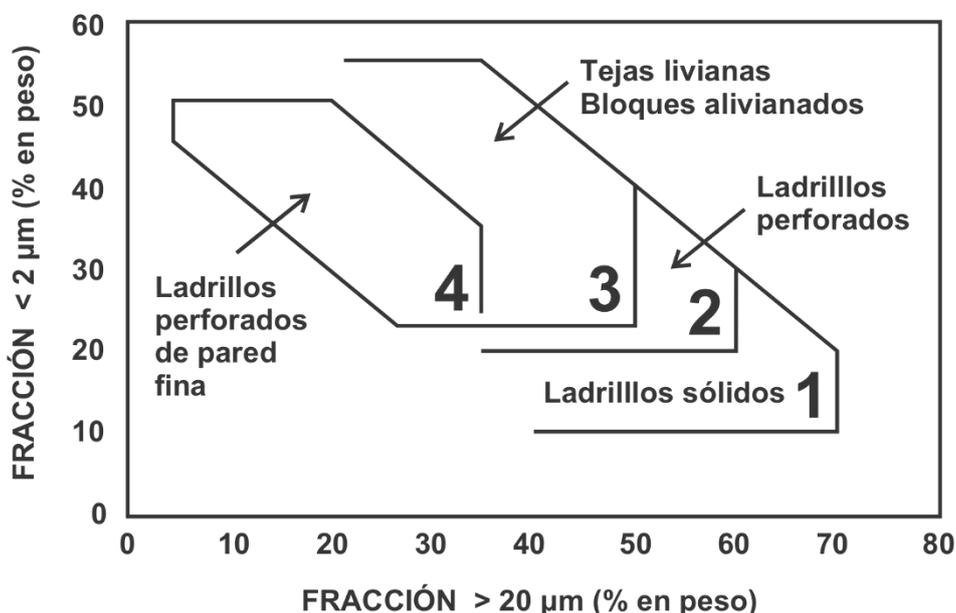


Figura 3: Diagrama original propuesto por Winkler. Fuente: Dondi et al. (1996)

En la Figura 4 se presenta una versión del diagrama de Winkler en la forma de diagrama triangular o ternario propuesto por Pracidelli & Melchiades (1997) para arcillas de la industria cerámica brasileña. En este diagrama se grafican los porcentajes en peso de partículas de tamaño “arcilla plástica” ($< 2 \mu\text{m}$), “arcilla arenosa” (2 a $20 \mu\text{m}$) y desplastificante ($> 20 \mu\text{m}$). A la vez, se definen campos o regiones de aptitud según la composición granulométrica. Pracidelli & Melchiades, (1997) definen los siguientes campos en el diagrama, que indican la aptitud para determinados productos de cerámica roja (entre paréntesis se agrega la definición en inglés que se encuentra de estos productos en la bibliografía):

Campo I: alta plasticidad

Campo II: tejas y cunbreras (*roof tiles*)

Campo III: ladrillos perforados (*vertically perforated bricks*)

Campo IV: ladrillos macizos (*solid bricks*)

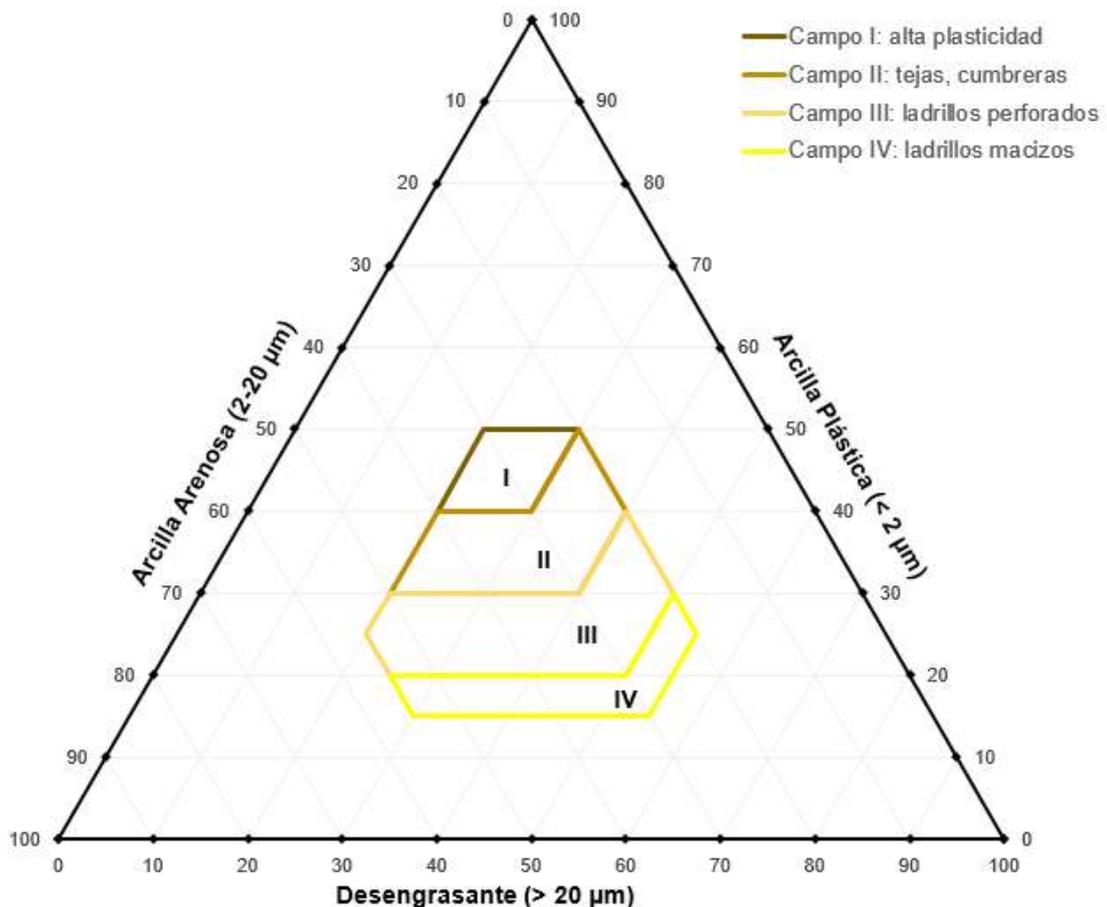


Figura 4: Diagrama triangular de Winkler (Pracidelli & Melchiades, 1997)

Los campos de aptitud propuestos originalmente por Winkler (1954) han sido contrapuestos por estudios más recientes, proponiendo valores más adecuados a las arcillas y productos cerámicos de cada país o región. También se proponen algunas modificaciones respecto a la clasificación original de productos cerámicos de Winkler, que definía un campo 4 para ticholos o ladrillos huecos (*thin walled hollow bricks*), y un campo 3 que además de tejas incluía bloques alivianados (*lightweight blocks*).

Por ejemplo, Dondi et al. (1996) analizaron la composición granulométrica de más de 200 arcillas utilizadas en la industria cerámica de Italia, encontraron que estas arcillas tienen un tamaño de partícula más homogéneo y más fino que las arcillas de Alemania

(generalmente más del 50 % menor a 2 μm), y que por tanto los campos de aptitud propuestos por Winkler (1954) no son adecuados para su país. En tal sentido, proponen un diagrama triangular similar a Winkler, pero con la fracción de arcilla arenosa entre 2 y 10 μm , y de desplastificante mayor a 10 μm .

Pracidelli & Melchiades (1997) concluyen que la composición granulométrica de las mezclas cerámicas tiene un rol fundamental en el procesamiento y las propiedades de los productos cerámicos, y que para cada tipo de producto, existe una distribución granulométrica que parece ser la más adecuada. En tal sentido, indican que Winkler es una herramienta poderosa para determinar estas composiciones, y proponen el diagrama modificado que se muestra anteriormente, en la que analizan teóricamente la composición granulométrica de la mezcla cerámica y proponen el diagrama que se presenta en la Figura 4. Además, realizan un análisis teórico del efecto de los materiales no-plásticos (arena, chamota, polvo de carbón, etc.) en las propiedades de la mezcla, y en su comportamiento durante el procesamiento. El agregado de arenas provoca una reducción de la resistencia a la flexión del producto luego de la cocción, y esta reducción es más marcada para arenas gruesas (> 60 μm) que para arenas finas (< 60 μm). También provoca una reducción de la retracción durante el secado, igualmente, más marcado para arenas gruesas. Por otro lado, la mezcla pierde plasticidad y ejerce una mayor resistencia al flujo durante la extrusión de las piezas cerámicas, por lo que se hace necesario el agregado de mayor cantidad de agua a la mezcla. Esto no representa un problema mayor, ya que la presencia de arena en la mezcla (granos gruesos) facilita la eliminación de agua durante el secado.

Para Uruguay no se identificaron trabajos publicados al respecto, salvo Techera et al. (2004), que en su descripción de los recursos minerales del departamento de San José, adoptan la clasificación propuesta por Pracidelli & Melchiades (1997) para evaluar la aptitud de arcillas uruguayas de la Formación Libertad y la Formación Dolores en la industria cerámica nacional.

Por lo anterior, el diagrama triangular de Pracidelli & Melchiades (1997), basado en los conceptos desarrollados por Winkler, se considera un marco teórico adecuado para evaluar la aptitud de los LTAB para su uso en productos cerámicos en sustitución de arcilla, desde el punto de vista de la granulometría.

Varios autores citados en la sección 2.2.1 analizan la composición granulométrica del LTAB, de la arcilla y de otros materiales utilizados para la fabricación de prototipos

cerámicos. Teixeira et al. (2011) relacionan el contenido de arcilla plástica de los LTAB (30 % a 60 % de partículas con tamaño $< 2 \mu\text{m}$) con su aptitud para la fabricación de tejas y cubiertas, de acuerdo a la clasificación de Pracidelli & Melchiades (1997). Encuentran una composición granulométrica del LTAB muy variable según la estación del año, y para la fabricación de cerámicos seleccionan el LTAB con mayor contenido de fracción arena basado en la composición granulométrica de la arcilla que se va a sustituir parcialmente en la mezcla cerámica. Petterle et al. (2018) clasifican al LTAB utilizado en el estudio como un lodo arenoso según el diagrama de Winkler (71,12 % partículas con tamaño $> 20 \mu\text{m}$).

2.4.2. Composición química

Los trabajos de referencia que se detallan en la sección 2.2.1, en general reportan la composición química de los lodos determinada por fluorescencia de rayos X (FRX). En la Tabla 3, Tabla 6, Tabla 8, Tabla 10, Tabla 12 y Tabla 14 de la sección 2.2.1, se presenta un detalle de las composiciones químicas reportadas para 41 lodos analizados por FRX que fueron utilizados para la fabricación de cerámicos, cemento, agregados para hormigón y productos derivados del mismo, adiciones minerales, suelo-cemento y geopolímeros. Algunos autores presentan resultados de FRX para lodos obtenidos en diferentes momentos, para la misma planta de tratamiento; Huang & Wang (2013) es un caso particular porque reporta el análisis por FRX de 10 lodos.

En la Figura 5 se presenta un diagrama triangular de composición química de estos lodos. Se observa un amplio rango de composiciones químicas de los lodos, pero con una clara predominancia de alúmina (Al_2O_3) y sílice (SiO_2). Salvo para el lodo reportado por Kizinievič et al. (2013), que proviene del tratamiento de agua con óxidos de hierro como coagulante, y por lo tanto presenta una predominancia de este elemento. Como era de esperar, los lodos obtenidos para una misma planta de tratamiento tienen un rango de variación menor, como es el caso de Huang & Wang (2013) y Sarabia Guarín et al. (2020).

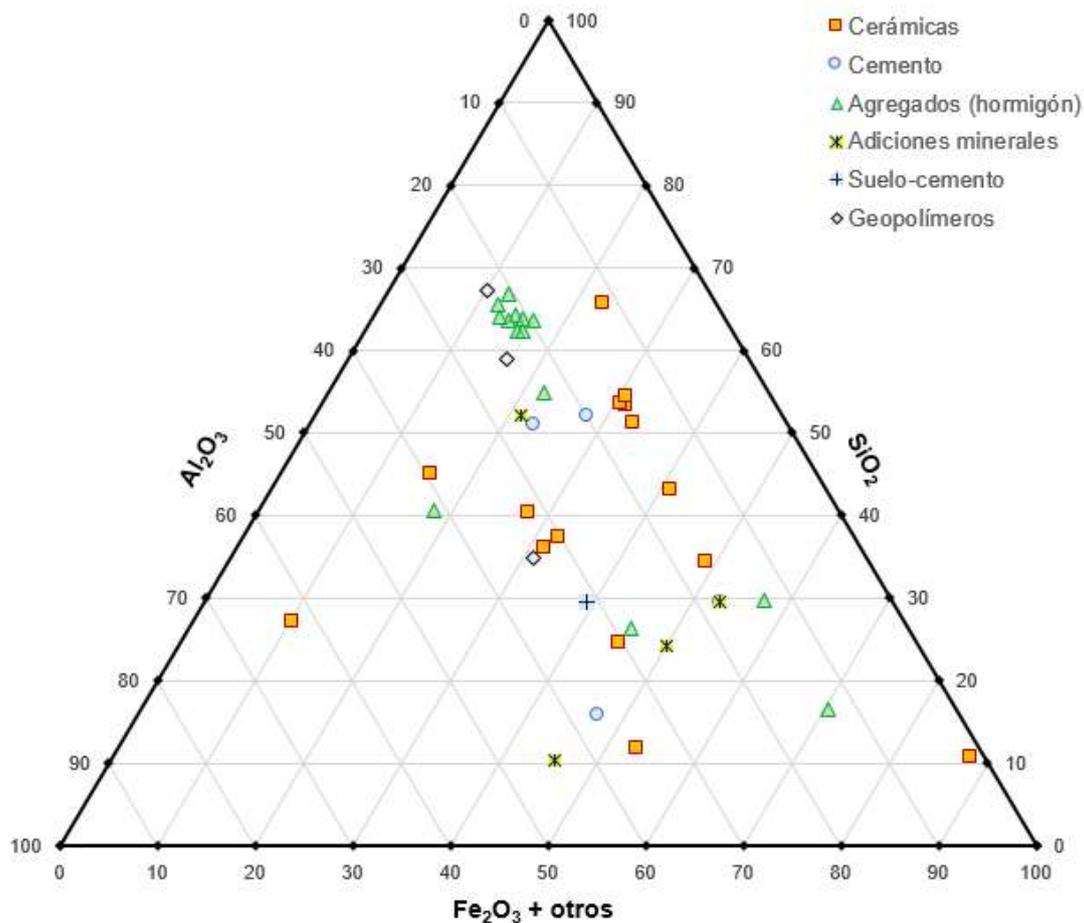


Figura 5: Diagrama triangular de composiciones químicas de los lodos Fuente: Elaboración propia

No se encontró en la bibliografía una clara correlación entre la composición química del lodo con su aptitud para la fabricación de cerámicos. Sin embargo, en varios artículos se menciona que el lodo y arcilla utilizados son de composición química similar, y que dicha similitud es favorable para la sustitución de la arcilla por lodo en la fabricación de cerámicos. Teixeira et al. (2011), por ejemplo, indican que la concentración de lodos que se puede incorporar a las arcillas para la fabricación de ladrillos dependerá de las propiedades de los lodos, su granulometría, composición química y mineral. Por otro lado, Wolff et al. (2015) destacan la baja proporción de óxidos alcalinos (Na_2O , K_2O) y alcalino-térreos (CaO , MgO) en la composición de los lodos, los cuales confieren buenas propiedades mecánicas a los materiales de cerámica estructural.

La pérdida por calcinación también presenta un amplio rango de valores para los lodos reportados en la bibliografía. Aunque ninguno de los autores explora las causas de ello, puede estar relacionada a una diferencia en la concentración de materia orgánica y carbonatos presentes en los lodos, que depende tanto de la naturaleza del agua bruta

como del proceso de tratamiento. Tampoco se observa una correlación entre este parámetro y la alternativa estudiada por los autores.

2.5. Propiedades de los cerámicos

En esta sección, se resumen los resultados obtenidos en los estudios de referencia para cerámicos, para las principales propiedades de los prototipos ensayados: densidad, pérdida de peso, resistencia a la compresión, contracción volumétrica, absorción de agua, porosidad, y sulfato en lixiviado. En general, los autores analizan la variación de estas propiedades en función del porcentaje de lodo agregado a la mezcla cerámica, y a la temperatura de cocción.

2.5.1. Densidad

Todos los autores revisados en la bibliografía coinciden en que el aumento del porcentaje de LTAB, provoca una disminución en la densidad de los prototipos cerámicos, en una relación inversamente proporcional. Con respecto al efecto de la temperatura, se encuentran divergencias, ya que dependen de la composición del LTAB.

Para algunos de ellos, como es el caso de Pokhara (2019), el lodo con que trabaja, tiene gran porcentaje de calcita, y la misma se descompone durante la cocción de los cerámicos, provocando una reducción de la densidad aparente y consecuentemente un aumento de la porosidad. Así como este autor, Benlalla (2018), asigna esta disminución de densidad con la liberación de CO₂, dejando mayor cantidad de poros en los ladrillos.

Por su parte, Cremades (2018) adjudica la disminución de la densidad con el aumento del porcentaje de lodos, debido al incremento del contenido de humedad de las mezclas, que se pierden durante el secado. En cuanto al efecto de la temperatura, además de la liberación del agua, corresponde a la liberación de CO₂ (carbonatos) durante la cocción. Por eso cuanto mayor sea el porcentaje de lodo añadido (rico en carbonatos), mayor pérdida de peso. Aunque el cambio en volumen, no suele ser significativa, la pérdida de peso puede ser considerable.

Kizinievic (2013) obtiene la misma tendencia en sus resultados, cuando el porcentaje de adición de LTAB aumenta en la mezcla, la densidad bruta disminuye. Sin embargo, aumenta cuando se incrementa la temperatura de cocción. Esto lo traduce a que se acelera el proceso de cristalización, es decir, la aglomeración de los cuerpos cerámicos

se vuelve más intensa, los poros abiertos se cierran, la porosidad abierta total de las muestras disminuye.

El comportamiento de la densidad en el estudio de Teixeira (2011), varía con respecto a las temperaturas, por debajo de los 1000 °C los cerámicos con adición del LTAB mostraron poca variación con respecto a los de referencia sin adición. Pero a partir de los 1000 °C hasta los 1100 °C, la variación fue abrupta. Este efecto, de mejoras de las propiedades cerámicas con el aumento de temperatura, se debe a que por encima de los 1000 °C se produce una fase líquida, con mayor densificación del cerámico.

Sin embargo, no se esperaba la ralentización de la reacción entre 1100 °C y 1150 °C, lo que indica que con las adiciones de LTAB las reacciones de densificación ocurrieron a temperaturas más bajas que las de la arcilla pura, y pudo haber ocurrido la cristalización de nuevas fases con la producción de microfisuras.

2.5.2. Pérdida de peso

Los autores consultados coinciden que la adición de LTAB aumenta la pérdida de peso, y con respecto a la temperatura de cocción, no hay una tendencia clara, pero se puede observar que mantiene o aumenta levemente el valor de la pérdida de peso por cocción.

Autores como Benlalla (2015) obtuvieron resultados donde el aumento de proporción de LTAB y la temperatura, generaron un aumento en la pérdida de peso de los ladrillos por cocción. El criterio de pérdida de peso por cocción para un ladrillo normal es del 15 % según la norma de referencia utilizada por los autores. Tomando dicha norma como referencia, los ladrillos producidos no cumplen con el criterio, ya que todos los valores de pérdida de peso para cerámicos fabricados con LTAB, incluso la referencia sin lodo, exhiben valores mayores o iguales a dicha norma.

Por otro lado, Cremades (2018), afirma que la primera pérdida de peso se da durante el secado y está directamente relacionado con el contenido de humedad de las pastas cerámicas. La pérdida de peso de las pastas secas aumenta a medida que aumenta el porcentaje de LTAB debido al mayor contenido de humedad de las mezclas. La segunda pérdida de peso, se da durante la cocción y es causada por la liberación de agua constituyente, pero sobre todo por la descomposición de los carbonatos. Por esta razón,

cuanto mayor sea el porcentaje de lodo añadido (rico en carbonatos), mayor es la pérdida de peso.

2.5.3. Resistencia a la compresión

Los autores consultados coinciden que la adición de LTAB disminuye resistencia a la compresión y con respecto a la temperatura de cocción, se puede observar que aumenta el valor de la resistencia a la compresión.

En el trabajo de Gilboa et al. (1994) se caracterizan unidades de albañilería (bloques, ticholos, ladrillos macizos y perforados industriales y “de campo”), producidas en Uruguay, desde el punto de vista de la resistencia característica a la compresión. Para ladrillos macizos “de campo”, de cuatro procedencias diferentes, encuentran una alta variabilidad en los resultados, con promedios de 2,8; 4,3; 5,8 y 7,1 MPa. En los ladrillos macizos industriales (de prensa), se obtienen valores mayores y con menor variabilidad entre especímenes, con promedios de 10,5; 12,8 y 13,3 MPa. Todos los anteriores valores son expresados como resistencia característica a la compresión (f_{ck}) que se calcula con el valor medio de las resistencias y corrigiendo con la desviación estándar.

Rodríguez & Taroco (1995) evaluaron la resistencia a la compresión de ladrillos cerámicos macizos nacionales, de acuerdo a tres tipos de ensayo, según la norma uruguaya, argentina y brasileña de referencia. En particular, analizan la influencia de tres condiciones en los ensayos: 1) las dimensiones de los ejemplares (ladrillo entero, medio ladrillo y tipo sándwich), 2) el tipo de encabezado (pasta de yeso, mortero de cemento y arena, mezcla de azufre, arena y grafito, y chapa de madera compensada), y 3) las condiciones de curado (seca y húmeda). Encontraron que la geometría del ejemplar es el parámetro con mayor influencia en los resultados de resistencia a la compresión, siendo el más adecuado para el ensayo el ladrillo entero; los esfuerzos de compresión son aplicados en un área mayor que las otras geometrías, y la tensión de rotura es representativa de todo el ejemplar. En el ladrillo entero se presentaron los valores más altos de resistencia a la compresión (entre 1,78 y 2,86 MPa), probablemente debido a la geometría del ejemplar, que aumenta el efecto de la restricción de las deformaciones impuestas por los platos de la prensa durante el ensayo. Por otro lado, el curado es un parámetro que tiene poca influencia en la resistencia a la compresión en los ejemplares ensayados. Finalmente, recomienda el

uso de encabezado de madera compensada para los ensayos a la compresión, para obtener resultados más representativos.

Morquio et al. (2015) realizaron ensayos en ladrillos macizos nacionales, de fabricación artesanal, moldeados a mano, y cocidos en hornos de campo, de dos tipos: colorados y plateados de origen comercial, además de los ladrillos antiguos extraídos de edificios de patrimonio histórico. Para estos dos tipos de ladrillos macizos artesanales comerciales, seleccionan 6 ejemplares de ladrillo colorado y 6 de ladrillo plateado. Se reportan resistencias a la compresión de 4,15; 4,41; 4,84; 5,88; 8,14 y 9,48 MPa para el ladrillo colorado, y valores de 8,59; 9,60; 10,08; 10,56; 11,19 y 11,24 MPa para ladrillo plateado. Los ladrillos antiguos reportaron valores superiores de 8,75; 9,32; 9,81; 12,53; 13,11 y 13,43 MPa.

Otro ejemplo es el estudio de Fontana Cabezas (2011) para ticholos nacionales, que obtuvo valores de resistencia característica (medida con los huecos en dirección vertical) en el rango de 1,2 a 7,6 MPa, aunque no es totalmente comparable con los prototipos macizos fabricados para el presente estudio.

A continuación, se resumen las observaciones de algunos autores respecto a esta propiedad en los cerámicos fabricados con lodos y los valores obtenidos.

En el trabajo de Da Silva et al. (2015) se reporta que la adición de lodo a las mezclas cerámicas redujeron la resistencia de los cerámicos con respecto al control, aunque los valores individuales (en el entorno de 2 MPa) estuvieron dentro de los límites estipulados por la norma de referencia. Cabe indicar que trabajaron con ticholos cerámicos de 8 bocas, para los cuales la norma citada, exige mínimo de resistencia de 1,5 MPa, para una clase de ticholo tipo “VED15” (*ticholo para vedação*). Los autores adjudican la reducción de la resistencia mecánica a la quema de la materia orgánica que ocurre a 500 °C, y la descomposición de carbonatos y sulfatos a temperatura superior a 800 °C, que contribuyen a aumentar la porosidad de los cerámicos durante la cocción, y como consecuencia tienen una estructura menos consolidada.

Para Benlalla et al. (2015) el ensayo de compresión es la prueba más importante para asegurar la calidad de ingeniería de un material de construcción. En este trabajo también se encontraron variaciones importantes en la resistencia a la compresión de ladrillos por efecto de la cantidad de lodo que se adiciona y por la temperatura de cocción. El comportamiento frente al porcentaje de lodo y la temperatura de cocción es similar a los

autores anteriores, pero con valores absolutos de resistencia a la compresión sensiblemente mayores (entre 7 y 17 MPa).

Ramadan et al., (2008) también enfatizan la importancia de la resistencia a la compresión para evaluar el potencial de aplicación de los ladrillos fabricados con LTAB. Indican que usualmente esta propiedad es afectada por la porosidad, el tamaño de poro y el tipo de cristalización. Reportan un rango de resistencias a la compresión para sus cerámicos entre 2 y 12 MPa, como en la mayoría de los trabajos consultados, obteniendo los mayores valores para altas temperaturas de cocción y bajos contenidos de lodo (y viceversa). Atribuyen el efecto de la temperatura de cocción a la finalización de los procesos de cristalización y sinterizado que ocurren a altas temperaturas. Y el efecto del porcentaje de lodo al menor contenido de sílice en la mezcla cerámica (usaron lodos con menor contenido de sílice que la arcilla) y consecuentemente el deterioro de sus propiedades mecánicas. Afirman que al usar prototipos cerámicos prismáticos de 50 mm de lado en sus ensayos, obtienen valores de resistencia a la compresión significativamente menores que si hubieran utilizado prototipos de dimensiones comerciales (por ejemplo 250 mm x 125 mm x 65 mm).

Pokhara et al. (2019) informan que un aumento en el porcentaje de lodos afectó negativamente la resistencia a la compresión del cerámico, indicando que podría deberse al cambio en la microestructura del ladrillo tras la adición de lodo, como se refleja en el aumento de porosidad y disminución de la densidad aparente.

En contrario, Ling et al. (2017) afirman que el alto contenido de sílice en los lodos incrementó las propiedades mecánicas del producto cerámico cocido. No obstante, en este estudio se ensayaron piezas de porcelana cocidas a más de 1000 °C.

2.5.4. Contracción volumétrica

Algunos de los autores coinciden que la adición de LTAB aumenta la contracción volumétrica de los prototipos, sin embargo, otros logran menos contracción del cerámico con el aumento de adición de LTAB.

En la bibliografía consultada algunos autores estudian esta propiedad física de los cerámicos, como es el caso de Benlalla (2015), que afirma que la calidad del ladrillo, se

puede asegurar aún más según el grado de contracción durante la cocción. Normalmente un ladrillo de buena calidad, presenta una contracción inferior al 8 %.

Benlalla (2015) demuestra a partir de sus resultados, que la contracción de sus prototipos aumenta cuando aumenta la adición de LTAB.

En cambio, Cremades (2018), obtiene resultados opuestos (menor contracción del cerámico con aumento de la adición de lodo). Atribuye este comportamiento a la granulometría de la mezcla cerámica sin agregado de lodo, conteniendo un tamaño de grano grueso, con un alto contenido de cuarzo. Durante el proceso de secado las partículas gruesas no se aglomeran tanto como las partículas de textura fina. Comparte que la contracción total en los casos de adición de LTAB, es menor que con 0 % de adición, (a pesar de tener mayor contenido de humedad, ya que a mayor cantidad de LTAB, más agua se necesita agregar a la mezcla, para extruir las piezas. En este estudio se fabrican los ladrillos mediante extrusión, a lo que le ejerce una presión determinada. Cuanto mayor es el contenido de humedad, menor es la presión de extrusión a la que deben someterse los ejemplares.

Por otra parte, Kizinievic (2013) realiza un análisis de los procesos de secado de los cerámicos, y sostiene que el agua mezclada mecánicamente con la mezcla seca formada, forma una red de capilares ramificados con los extremos abiertos que alcanzan la superficie. Durante el secado, la humedad comienza a evaporarse de la superficie, y aumenta la concentración de humedad en las capas internas. Por lo tanto, la humedad se mueve constantemente desde las capas internas hacia la superficie. La disminución del volumen de las muestras analizadas después del secado varía y esta disminución está relacionada con las partículas coloidales secas de la arcilla y especialmente las del LTAB poroso, que absorben agua de la atmósfera y durante la formación su volumen aumenta debido a esto, y después del secado, disminuye cuando el agua se evapora. La disminución del volumen del secado y la cocción a una temperatura varía dependiendo de la composición de la masa de formación. El cambio de volumen después de la quema está relacionado con el hecho de que durante la fragmentación de los componentes de arcilla y LTAB se eliminan materiales cocidos.

Kizinievic (2013) resume en dos procesos lo que ocurre durante la quema de los cuerpos cerámicos, es decir, la fragmentación de las fases iniciales y la creación de otras nuevas. Durante el aumento de la temperatura, en las masas de formación tienen lugar

reacciones físicas y químicas complejas: deshidratación de hidróxidos y minerales de arcilla, transformación de fases, entre otras. Todos estos procesos mencionados, tienen una influencia directa en la microestructura del cuerpo cerámico.

2.5.5. Absorción de agua

En esta sección se presentan los resultados de los ensayos de absorción de agua: succión capilar y absorción de agua por inmersión en agua fría.

2.5.5.1. Succión capilar

En la bibliografía consultada, pocos autores indican un valor máximo o recomendado para la tasa inicial de absorción de agua; Cremades et al. (2018) adoptan un valor máximo de $4,5 \text{ kg/m}^2/\text{min}$ en base a la norma UNE 67031:1985 (que fue anulada por la norma UNE-EN 772-11:2001 (AENOR, 2011a)), mientras que Ramadan et al. (2008) establecen un valor recomendado de $2 \text{ kg/m}^2/\text{min}$ en base a la norma británica mencionada anteriormente.

En cuanto a los valores absolutos reportados por ambos autores, las tasas iniciales de absorción de agua son del mismo orden de magnitud, entre 0 y $8 \text{ kg/m}^2/\text{min}$, aunque menores para similar temperatura y concentración de lodos.

En el caso de Cremades et al. (2018), se observa una tendencia general de aumento de la tasa inicial de absorción de agua con el aumento de porcentaje de lodo en los cerámicos estudiados, aunque sólo se reporta este parámetro a una temperatura de cocción ($980 \text{ }^\circ\text{C}$). Ramadan et al. (2008) midió esta propiedad en prototipos cerámicos fabricados con diferentes concentraciones de lodo y cocidos a diferentes temperaturas, y encuentra un comportamiento similar: a medida que aumenta el porcentaje de lodos en el cerámico, aumenta la tasa inicial de absorción de agua. Este autor atribuye este comportamiento a la disminución de la proporción de sílice en la mezcla cerámica al aumentar el porcentaje de lodo, requiriendo mayores temperaturas para completar la cristalización, y por lo tanto la presencia de un mayor número de poros finos abiertos en el ladrillo. En síntesis, las tendencias reportadas por ambos autores son concordantes.

Ramadan et al. (2008) encuentra una tendencia general de disminución de la tasa inicial de absorción con un aumento de la temperatura de cocción. Cabe indicar que el autor

trabajó con temperaturas de cocción de 950 a 1100 °C). El autor atribuye este comportamiento al cambio de la estructura al finalizar el proceso de cristalización y el cierre de los poros finos en el sinterizado, al aumentar la temperatura de cocción.

Cabe indicar que no existe una norma nacional para este parámetro. La norma británica BS 5628-2:2005 (BSi, 2005b) no establece valores máximos de tasa inicial de absorción de agua por succión capilar, pero recomienda humedecer el ladrillo previo a su colocación cuando este parámetro supera 1,5 kg/m²/min. Esta recomendación busca prevenir la succión del agua del mortero por el cerámico, en particular en climas secos y cálidos, y lograr una correcta adherencia entre ambos. Por este último motivo, se recomienda evitar agua superficial libre en el ladrillo, así como para prevenir la eflorescencia y aparición de manchas en el ladrillo. La eflorescencia es un fenómeno químico que se manifiesta como manchas blancas en la superficie del ladrillo, por sales que se depositan por evaporación. Estas sales pueden tener un origen externo como el agua del suelo en contacto con la mampostería, o provenir del mortero o el propio ladrillo. Las sales pueden contener alta concentración de sulfatos y provocar el ataque en las juntas de mortero.

2.5.5.2. Inmersión en agua fría

En la bibliografía estudiada, los autores coinciden en que el aumento del porcentaje de lodo provoca un aumento de la absorción de agua. En cuanto al efecto de la temperatura de cocción, se reporta una disminución de la absorción con la temperatura cuando se comienzan a observar los efectos de la sinterización en la estructura del cerámico (aproximadamente a 1000 °C). Varios autores comparten que la absorción de agua es un factor clave que afecta la durabilidad del ladrillo; cuanto menor la absorción, mayor la resistencia del ladrillo a los factores climáticos y su durabilidad esperada. A continuación, se presentan las principales observaciones de los autores respecto a este parámetro.

Monteiro et al. (2008) reporta que para todas las composiciones de lodos, la absorción de agua no varía prácticamente de 700 °C a 900 °C (que son las temperaturas de cocción usuales para la fabricación de ladrillos y tejas), pero disminuye marcadamente a 1100 °C. De acuerdo a los autores, este comportamiento está relacionado a los mecanismos de consolidación de partículas, como la sinterización en estado sólido y en fase líquida, que hasta 900 °C todavía no son muy efectivos. También indican que el

lodo, en este caso dominado por arcillas a base de caolinita, presenta un comportamiento refractario. Por otro lado, afirman que la adición de lodo provoca un ligero aumento en la absorción de agua del cuerpo de arcilla a todas las temperaturas investigadas.

Ramadan et al. (2008) también vincula la reducción de la absorción de agua con el proceso de sinterización a mayores temperaturas de cocción (cristalización y cierre de los poros en este proceso). Y el aumento en la absorción de agua cuando el porcentaje de lodos es mayor, porque aumenta la proporción de sílice en la mezcla cerámica, y se reduce el efecto de sinterizado (más lodo en la mezcla provoca mayor cantidad de poros abiertos en el ladrillo cocido).

Benlalla et al. (2015), al igual que Algamal et al. (2018) encuentran un comportamiento similar a los anteriores autores: la absorción de agua es directamente proporcional a la cantidad de lodo en la mezcla cerámica, y a mayores temperaturas de cocción del cerámico, disminuye la absorción por efecto de la sinterización.

En el caso de Kizinievič et al. (2013) reportan menores absorciones de agua para los ladrillos con hasta 10 % de lodo comparados con la referencia (arcilla sin sustitución de lodo), pero a mayores porcentajes de lodo, encuentran el mismo comportamiento que los demás autores. Indican que la cantidad de agua absorbida por el ladrillo cocido generalmente está determinada por el volumen de los poros del cerámico, las dimensiones y la disposición de estos poros (en conjunto: porosidad efectiva), y el agregado de lodo por encima del 10 % en sus mezclas cerámicas tiene un efecto significativo en la porosidad. Atribuyen este cambio a la materia orgánica presente en los lodos (que en este estudio alcanza el 22,5 %), que, al quemarse durante la cocción, deja poros y grietas en el ladrillo.

Por otro lado, Da Silva et al. (2015) explica que el aumento de la absorción de agua a mayor porcentaje de lodo en la mezcla cerámica se debe a la quema de la materia orgánica a 500 °C, y a la descomposición de carbonatos y sulfatos a temperatura superior a 800 °C, que contribuyen a aumentar la porosidad de los ladrillos. Esto conduce a una estructura menos consolidada del ladrillo, y además del efecto en la absorción, provoca una menor resistencia mecánica.

Cremades et al. (2018) afirman que la absorción de agua ocurre principalmente debido a la presencia de huecos, espacios o poros en el interior de las piezas cocidas, y reportan un aumento de este parámetro con el porcentaje de lodos en la pieza cerámica.

En el caso de Pokhara et al. (2019), observan un aumento de la absorción con el aumento del porcentaje de lodo, que explican por un aumento de la porosidad del cerámico. Si bien en este caso la distribución del tamaño de partícula de la arcilla y el lodo son similares, la presencia en el lodo de ciertos minerales o componentes lábiles, como la calcita, crean espacio (agujeros) en el cerámico durante su cocción

2.5.6. Porosidad

En la bibliografía consultada, Benlalla (2018), constata que la densidad disminuye con la temperatura y la porosidad aumenta. Cremades (2018), observa que la porosidad total generalmente aumenta con el aumento del porcentaje de adición de lodo, y lo explica debido al contenido de carbonatos.

Kizinievic (2013) trabajaron con un LTAB con un alto porcentaje de cuarzo, por lo que a mayor concentración de cuarzo podría contribuir al aumento de la porosidad y microgrietas generadas durante el enfriamiento de los cuerpos cerámicos. Estas microfisuras tienden a afectar otras propiedades de los cerámicos, como aumentar la absorción de agua y disminuir la masa específica aparente y la resistencia mecánica.

La porosidad en sí, es una característica que juega un papel muy importante en varias de las propiedades del material cerámico, como las térmicas y el aislamiento acústico, la resistencia mecánica, y la absorción de agua. Por lo tanto, los fenómenos descritos por los autores, respecto a la variación de la porosidad con el contenido de lodo y la temperatura de cocción de los cerámicos, también son de aplicación a las propiedades mencionadas.

2.5.7. Ensayos de lixiviación

En la bibliografía de referencia se reportan diferencias significativas en la composición del lixiviado entre los lodos y el cerámico fabricado con lodo. En el caso de Monteiro et al. (2008) indican que la etapa de cocción a alta temperatura típica de la fabricación de ladrillos no solo es fundamental para la consolidación de lodos y partículas de arcilla,

sino también para la desintegración completa de los compuestos orgánicos. Las etapas de cocción también permiten inmovilizar contaminantes inorgánicos, especialmente productos químicos, dentro de las fases de silicato.

Monteiro & Vieira (2014) discuten que en algunos casos los compuestos tóxicos presentes en un residuo que se agrega al cerámico pueden descomponerse durante la cocción y emitir a la atmósfera contaminantes peligrosos. Citan un ejemplo de uso de cenizas de una planta termoeléctrica en República Checa en la fabricación de cerámicos. Estas cenizas presentan un alto contenido de CaSO_4 , y se encontró un aumento de SO_2 en las emisiones gaseosas, por encima de 2.000 ppm, durante la cocción del cerámico a 860 °C.

Cremades et al. (2018) reporta que todas las concentraciones de metales y iones en lixiviado de los cerámicos fabricados con lodo cumplen con los valores límite de la norma de referencia, y por lo tanto se pueden usar sin restricciones ambientales.

Pokhara et al. (2019) realizaron ensayos de lixiviación en similares condiciones al EPA 1311 para evaluar el posible impacto ambiental de ladrillos fabricados después de su uso, a largo plazo. Determinaron las concentraciones de Al, Fe, Cr, K, Mg, Na, Ca, y U en el lixiviado, encontraron que están dentro de los límites que se tomaron como referencia, y a partir de ello afirman que los ladrillos fabricados con lodo no son materiales peligrosos. Reportan además que la concentración de aniones en el lixiviado de los cerámicos (F^{2-} , Cl^- , NO_3^{2-} y SO_4^{2-}) disminuyó entre 10 y 50 veces respecto a la concentración en lixiviado de lodos, lo que podría ser algo positivo desde el punto de vista ambiental (encapsulación exitosa de contaminantes solubles en una matriz inmóvil de cerámico). Asocian esta disminución al proceso de cocción de los ladrillos, que promueve la fusión de los constituyentes peligrosos del lodo con los minerales base que están presentes en la arcilla (cuarzo y $\text{Al}(\text{OH})_3$).

3. Investigación experimental

En el presente capítulo se describe la investigación experimental desarrollada en el marco de la tesis, incluyendo los materiales empleados (su origen, caracterización fisicoquímica y acondicionamiento), los procedimientos para la fabricación de los prototipos y los ensayos a los que fueron sometidos.

3.1. Introducción

La investigación experimental estuvo centrada en la fabricación y ensayo de prototipos cerámicos a partir de una mezcla cerámica de tres materiales: lodos de planta de tratamiento de agua bruta (LTAB), arcilla y arena. Para evaluar el efecto del LTAB en esta mezcla y los productos cerámicos obtenidos, se adicionó lodo en sustitución de la arcilla, en distintos porcentajes (0 %, 5 %, 10 %, 15 % y 20 %). A la vez, cada una de estas series se sometió a diferentes temperaturas de cocción (700 °C, 800 °C, 900 °C y 1000 °C) con el objetivo de evaluar el efecto de dicho parámetro de producción.

El LTAB objeto de esta investigación es el lodo residual generado en la planta de tratamiento de agua bruta de la planta industrial de UPM, ubicada en la ciudad de Fray Bentos, Uruguay. Se utilizó fundamentalmente un lote de LTAB generado el 8 de marzo de 2021.

En la primera etapa de la investigación, se compilaron datos de caracterización de los materiales que conforman la mezcla cerámica de los prototipos (LTAB, arcilla y arena) mediante análisis fisicoquímicos. En particular para el LTAB, se realizaron ensayos sobre el lodo crudo (Humedad, Densidad y pH) y sobre el lodo deshidratado (Densidad, Distribución y tamaño medio de partículas, Difracción de Rayos X, Fluorescencia de Rayos X, Pérdida por Calcinación, Termogravimetría, Microscopía Electrónica de Barrido, y Lixiviación de Sulfatos). Además, se realizaron análisis de caracterización de la arcilla (Fluorescencia de Rayos X, Lixiviación de Sulfatos y Distribución de Tamaño de Partícula) y de la arena (Granulometría, Densidad Aparente). El objetivo de esta etapa es identificar las principales características físicas y químicas de los materiales que intervienen en la parte experimental de esta tesis. En la sección 3.2 se presenta un detalle de la metodología de análisis y los resultados.

En una segunda etapa, se fabricaron los prototipos cerámicos a partir de distintas proporciones de LTAB deshidratado y molido, en sustitución de arcilla. Se obtuvieron series de 24 prototipos cada una con 0 % (control), 5 %, 10 %, 15 % y 20 % de sustitución de arcilla. Estas series fueron sometidas a cuatro diferentes temperaturas de cocción. En total se fabricaron 120 prototipos cerámicos contemplando las variaciones de ambos parámetros (porcentaje de LTAB y temperatura de cocción). En la sección 3.3 se presenta una descripción del proceso de fabricación de los prototipos.

En una tercera etapa se realizaron ensayos estándar sobre los prototipos cerámicos (definidos por normas o recomendados en la bibliografía) con el objetivo de evaluar la calidad de los productos obtenidos, y de identificar tendencias, en particular las vinculadas al porcentaje de LTAB y a la temperatura de cocción. Los prototipos se sometieron a ensayos de densidad, pérdida de peso, resistencia a la compresión, contracción volumétrica, absorción de agua por succión capilar, permeabilidad e inmersión en agua fría, porosidad, colorimetría y sulfato en lixiviado. En la sección 3.4 se presenta un detalle de las metodologías de ensayo utilizadas.

3.2. Materiales

En esta sección se realiza una descripción de los principales materiales utilizados para la investigación experimental, los componentes sólidos de la mezcla cerámica para la fabricación de los prototipos: LTAB, arcilla y arena. En el caso específico del LTAB, se realiza un detalle de su origen y características. Para los tres materiales se describen los métodos de análisis fisicoquímicos empleados para su caracterización.

En el caso del agua, único componente líquido de la mezcla cerámica, cabe indicar que en ninguno de los estudios de referencia (sección 2.2.1) se indica el tipo y fuente de agua para la fabricación de los cerámicos. Las características del agua tampoco se identifican como determinantes de la aptitud de la mezcla cerámica, según el diagrama de Winkler y sus posteriores modificaciones (sección 2.4). En tal sentido, se decidió utilizar agua de red para la fabricación de los prototipos cerámicos, y no se consideró necesario realizar una caracterización de esta agua.

3.2.1. Lodo de tratamiento de agua bruta (LTAB)

Para la investigación experimental, se obtuvieron lodos generados en la planta de tratamiento de agua bruta de la planta industrial de UPM, ubicada en la ciudad de Fray Bentos, Uruguay. Esta planta está especializada en el desarrollo y la producción de celulosa de fibra corta elaborada a partir de distintas especies de Eucaliptus (UPM, 2022), y tiene una capacidad de producción de 1.3 millones de ton/año de celulosa blanqueada (UPM Forestal Oriental, 2021).

3.2.1.1. Origen del LTAB

El tratamiento de agua bruta es una etapa del proceso productivo de UPM Fray Bentos, cuyo objetivo es producir agua tratada para diversos procesos de la planta industrial y para consumo humano (agua potable). Por tal motivo, son de aplicación los conceptos descriptos en la sección 2.1, referidos a tecnologías y procesos de tratamiento de agua, características de los LTAB y sus potenciales impactos ambientales.

La planta de tratamiento de agua bruta ocupa un sector dedicado en la planta industrial, indicado como “punto 2” en el esquema de la Figura 6. En dicho esquema también se indica la toma de agua bruta, que se realiza directamente del Río Uruguay, como “punto 1”. Además de esta fuente de agua principal, se recirculan aguas de lavado de filtros de arena (aguas de retro lavado), aunque no supera el 10 % del agua bruta que ingresa a la planta.

En verano la planta trata en promedio 1050 L/s (rango entre 970 L/s y 1100 L/s) de agua bruta, y en invierno, en promedio 950 L/s de agua bruta (rango entre 890 L/s y 1000 L/s). Genera un volumen promedio de 5000 Ton/año de LTAB en base húmeda (rango entre 300 ton/mes a 500 ton/mes) (IEM, 2021)

Para conocer en detalle los procesos y equipos que comprende la planta de tratamiento de agua bruta de UPM Fray Bentos, en particular los vinculados a la generación del LTAB, se estudiaron documentos proporcionados por UPM y se realizó una visita a la planta industrial en agosto de 2021. En la Figura 7 se presenta un esquema sintético de la planta de tratamiento, modificado de los documentos digitales proporcionados por UPM. El esquema comprende desde la toma de agua bruta del Río Uruguay hasta el punto de distribución de agua tratada para la planta industrial. Incluye el sistema de

tratamiento de lodos, desde su generación en la etapa de clarificación del agua bruta, hasta la salida de los LTAB en la centrífuga.

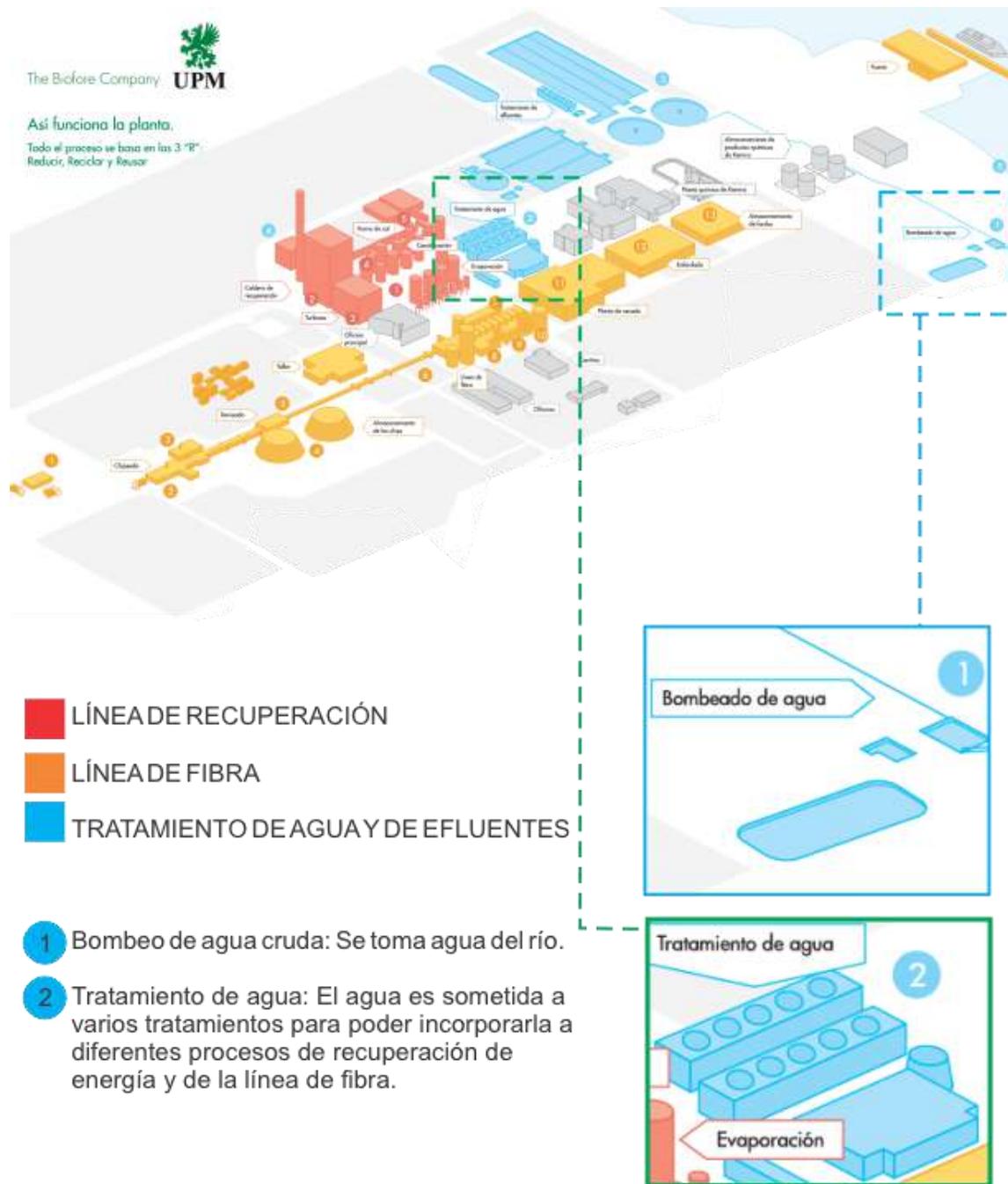


Figura 6: Mapa de planta, proceso productivo UPM Fray Bentos. Fuente: UPM (2022)

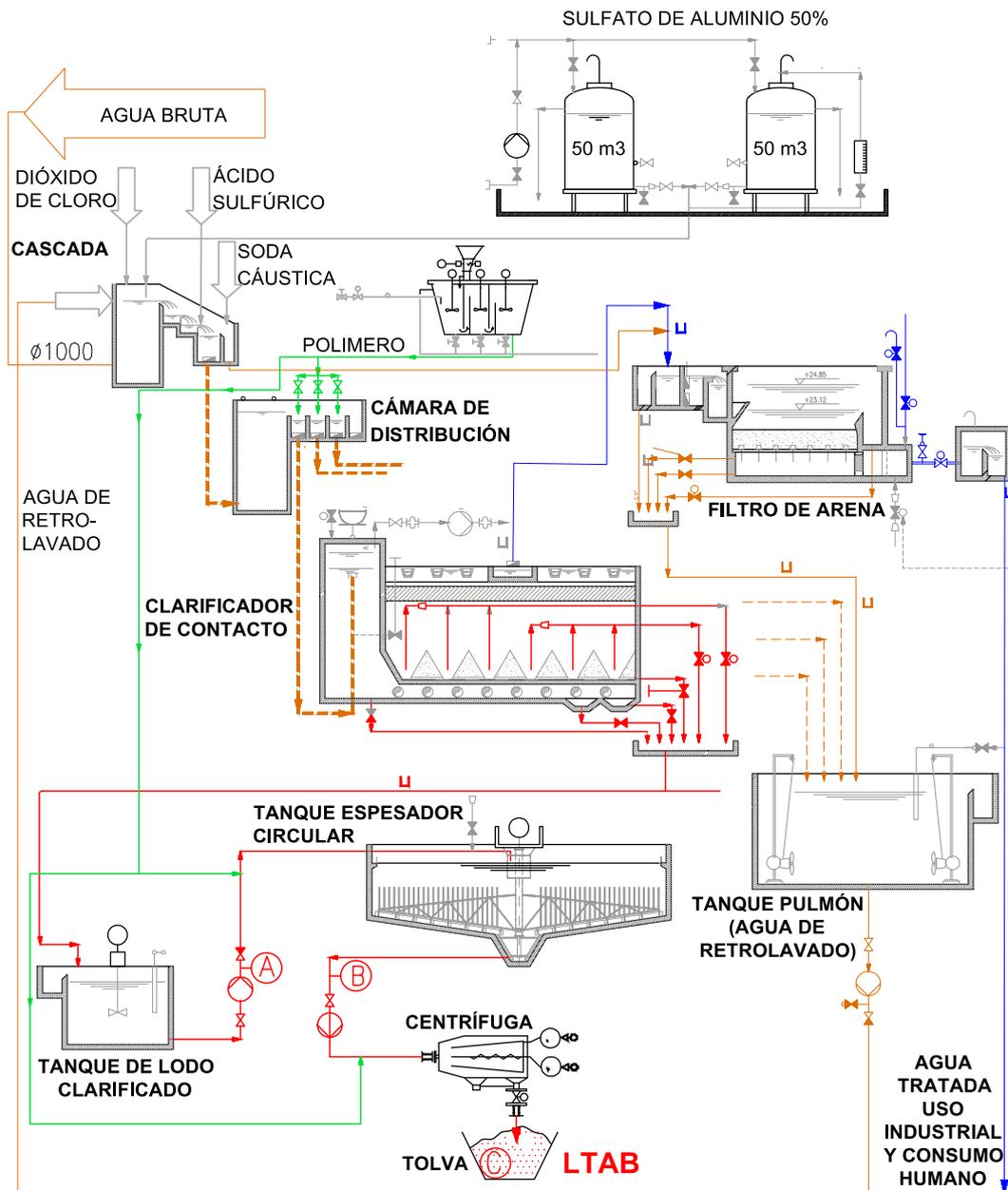


Figura 7: Esquema del tratamiento de agua bruta, UPM Fray Modificado de UPM (2022) Bentos.

El proceso comienza con el ingreso de agua bruta por la toma ubicada en el Río Uruguay, a través de vasos comunicantes por una tubería de 1000 mm de diámetro, hacia el Tanque de Ingreso de agua bruta. Se determina el índice de turbidez instantánea al agua bruta, previo a su ingreso al sistema, y se monitorea diariamente la alcalinidad. Desde el Tanque de Ingreso, el agua bruta es bombeada a un aireador tipo “Cascada” (ver fotografía del sistema de bombeo en la Figura 9). En este punto también

ingresan las aguas de retro lavado de los filtros de arena (recirculación de agua del proceso de tratamiento).



Figura 9: Sistema de bombeo



Figura 8: Cascada (aireador)

En la fotografía de la Figura 8 se observa la Cascada en operación. En este punto se dosifica el coagulante sulfato de aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ (diluido al 50 %), y el dióxido de cloro. De acuerdo a datos proporcionados por UPM, la dosis de coagulante se encuentra generalmente entre 4 – 135 mg/L, y del dióxido de cloro entre 1- 265 mL/s (IEM, 2021).

El objetivo de esta etapa es la oxidación inicial de materia orgánica presente en el agua, o de sustancias inorgánicas tales como metales disueltos (Mg y Fe). La Cascada es una estructura de hormigón con tres escalones, que permite la agitación y aireación del agua, y la rápida y efectiva mezcla del coagulante y desinfectante. Dependiendo del pH del agua bruta, que presenta variaciones, a veces se requiere también la dosificación de un ácido (ácido sulfúrico) o de una base (hidróxido de sodio) a la salida de la Cascada.

A continuación de la Cascada, el agua pasa a la Cámara de Distribución (ver fotografía de la Figura 11), en donde se dosifica el floculante, un polímero aniónico cuya concentración original está entre 0,3 % a 0,5 %, y que se diluye en una relación 1/20.

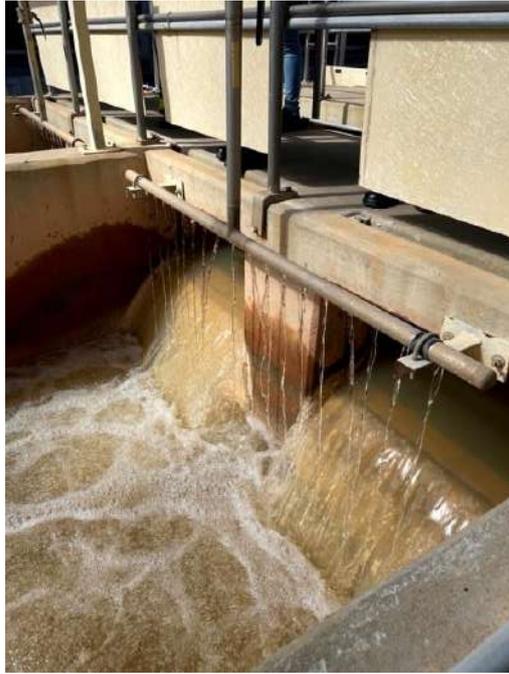


Figura 11: Cámara de Distribución



Figura 10: Clarificadores de Contacto

Desde la Cámara de Distribución se envía a la etapa de clarificación, que consiste en tres unidades en paralelo. Cada unidad consiste en un Clarificador de Contacto (también denominado “clarificador de manto de lodos”).

El agua ingresa por la parte inferior del Clarificador de Contacto, y asciende verticalmente a través de una solución concentrada en lodos (el “manto de lodos”). Se produce la floculación y sedimentación de los coágulos formados en la etapa anterior, promovida por el contacto con los flóculos ya presentes en el manto de lodos. Los Clarificadores de Contacto de UPM también cuentan con deflectores (placas planas inclinadas) en la parte superior, para optimizar las condiciones de flujo del agua y mejorar la eficiencia de la sedimentación. En la fotografía de la Figura 10 se observa la parte superior de uno de los clarificadores, que se tapan con lonas para prevenir el consumo de dióxido de cloro por acción del sol.

El agua clarificada sale de los clarificadores y es enviada por canaletas a la etapa de filtración final donde son removidos los flóculos en suspensión que no sedimentaron (la fotografía de la Figura 12 ilustra los Filtros de Arena de esta última etapa). En la etapa de filtración se genera un agua de retro lavado que es almacenada en un Tanque Pulmón (*Dirty Filtered Water Tank*), y bombeada a la Cascada. El agua filtrada se almacena en el Tanque de Agua Filtrada, y desde allí es bombeada al resto de la planta.

Los lodos que sedimentan en los Clarificadores de Contacto se acumulan en la parte inferior del equipo, que tiene una forma cónica invertida y se denominan “lamelas”. Los lodos que se purgan de la sección inferior de los Clarificadores de Contacto se

denominan en adelante lodo "A", y se transfieren al Tanque de Lodo Clarificado (*Clarified Sludge Tank*), equipo que se observa en la fotografía de la Figura 13.



Figura 12: Filtros de Arena, luego de la etapa de clarificación del agua bruta



Figura 13: Tanque de Lodo Clarificado, recepción del lodo "A"

El lodo "A" proveniente del Tanque de Lodo Clarificado es bombeado al sistema de tratamiento de lodos (ver fotografía de la Figura 14), que consiste en etapas sucesivas de espesamiento o concentración de sólidos. La primera etapa se realiza en el Tanque Espesador Circular (*Sludge Thickner*) que se observa en la fotografía de la Figura 15, con el agregado de floculante, que es el mismo polímero aniónico que se utiliza en la clarificación del agua bruta. De este Tanque Espesador Circular se obtiene el lodo "B" con una mayor concentración de sólidos que el lodo "A". El agua sobrenadante de este Tanque Espesador Circular es enviado a la planta de tratamiento de efluentes (ETP).

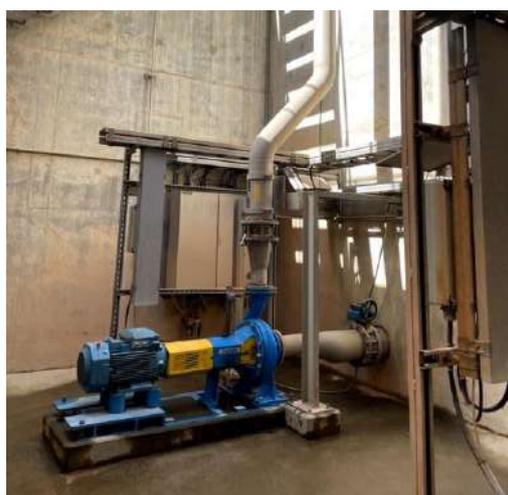


Figura 14: Bombeo lodo "A" (Tanque Lodo Clarificado a Espesador Circular)



Figura 15: Tanque Espesador Circular (producción del lodo "B")

El lodo "B" se envía a un equipo de decantación centrífuga (Centrífuga, que se observa en la fotografía de la Figura 16), donde se genera el lodo "C". Este lodo es el LTAB final, que sale del equipo directamente a una tolva para su traslado al sitio de disposición final de residuos de UPM Fray Bentos, según se observa en la fotografía de la Figura 17.



Figura 16: Centrífuga, espesamiento del lodo "B" para producir el lodo "C" (LTAB)



Figura 17: Tolva a la salida de la Centrífuga, recibe el lodo "C" (LTAB)

3.2.1.2. Muestras de LTAB

Se trabajó con muestras proporcionadas por la empresa UPM, correspondientes al lote de LTAB generado el 8 de marzo de 2021.



Figura 18: Lote LTAB

Las muestras fueron tomadas por personal de UPM en la tolva de descarga de la Centrífuga (ver ubicación en esquema del proceso en la Figura 7 y tolva indicada en la Figura 17) y proporcionados para el estudio en cinco recipientes de 20 litros (ver Figura 18).

Los recipientes se denominaron correlativamente: C1, C2, C3, C4 y C5. Estas muestras se utilizaron para la caracterización fisicoquímica del lodo crudo y del lodo deshidratado, y posteriormente para la fabricación de los prototipos cerámicos.

En la Figura 19 se muestra la sistemática de muestreo y análisis de cada recipiente para la caracterización de lodo crudo. Por ejemplo, para el recipiente C1 se tomaron 3 muestras aleatorias de lodo crudo, y se realizó la determinación de densidad y porcentaje de humedad a cada muestra. Mientras que, para la determinación de pH del lodo crudo, se tomaron muestras aleatorias de los 5 recipientes, se realizaron 3 muestras compuestas y homogeneizadas, y se determinó pH en estas 3 muestras.

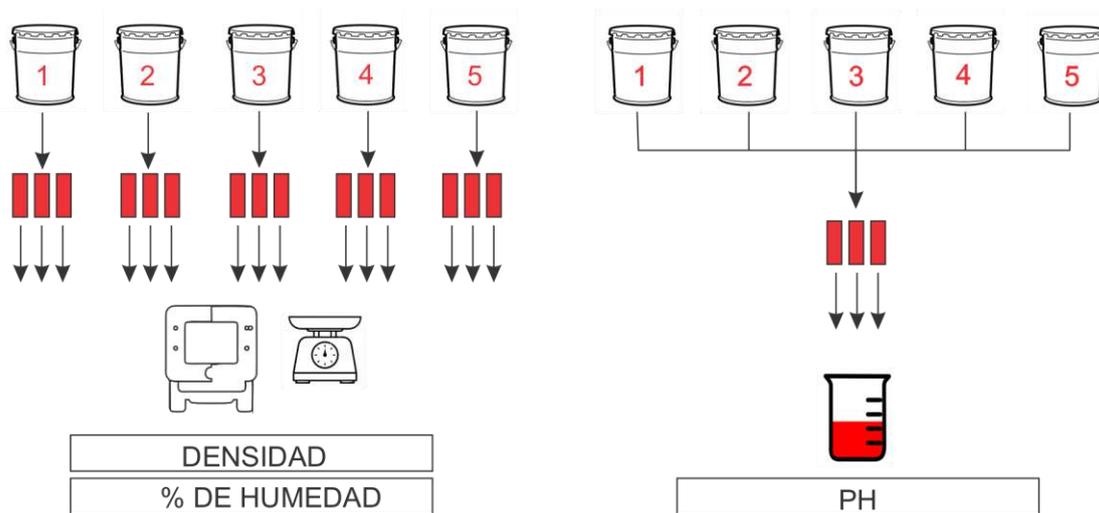


Figura 19: Muestras y análisis del LTAB crudo

En la Figura 20, se presenta la sistemática de muestreo y análisis para la caracterización de lodo seco y molido.

En lo posible, se procuró realizar un muestreo aleatorio de los recipientes seguida de una composición (mezcla homogénea) de las muestras aleatorias para obtener una muestra representativa del lote. En el caso del lodo crudo, por sus propiedades reológicas, no es posible realizar una mezcla homogénea, por lo tanto, se utilizaron muestras aleatorias de los recipientes.

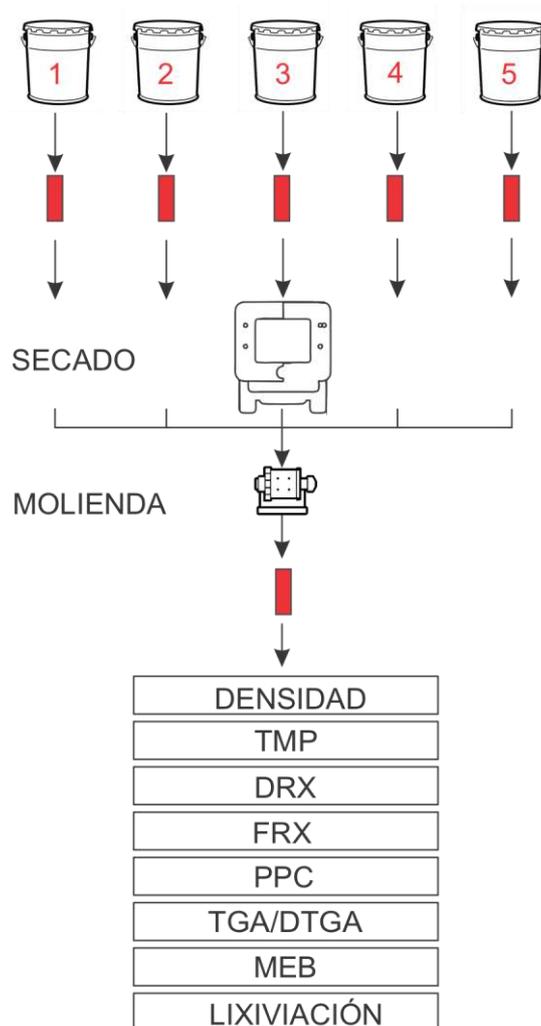


Figura 20: Muestras y análisis del LTAB deshidratado y molido

3.2.1.3. Caracterización del LTAB crudo

Para la caracterización del LTAB crudo, se realizaron ensayos fisicoquímicos más comunes identificados en la bibliografía (sección 2.2): determinación del pH en agua, densidad y humedad.

3.2.1.3a. Determinación de pH

Para la determinación del pH se siguió el procedimiento indicado por la norma ISO 10390:2021 (ISO, 2021), con agua como solución para la suspensión. Se utilizó un agitador marca Fisatom Modelo 753A y un pH-metro Tester HI98103 Checker de la marca HANNA.

En un vaso de bohemia se introdujo la muestra homogeneizada del LTAB crudo y agua destilada en una relación de 1:5 en volumen, se mezcló en el agitador, a velocidad 4, durante 60 minutos, evitando la entrada de aire (ver los equipos utilizados en la fotografía de la Figura 21). Luego se dejó reposar 1 hora, y se introdujo el pH-metro (esta etapa se ilustra en la fotografía de la Figura 22), al transcurrir un minuto y medio se tomó la medida del pH leyendo hasta alcanzar la estabilización del valor (cuando el pH medido durante un período de 5 s varía en no más de 0,02 unidades de pH). En Tabla 15 se presenta un resumen de los resultados de esta determinación (los valores para cada una de las cinco muestras realizadas para el lote, se presentan en la Tabla 98 del Anexo A).

Tabla 15: pH muestras de LTAB

	PH	σ	CV (%)
LTAB	6,10	0,10	1,64



Figura 21: Agitador marca Fisatom Modelo 753A



Figura 22: pH-metro Tester HI98103 Checker de la marca HANNA.

3.2.1.3b. Densidad y porcentaje de humedad

Para la determinación de la densidad (kg/m^3) y el porcentaje de humedad del LTAB crudo (%), se fabricaron prototipos prismáticos de 40 mm x 40 mm x 160 mm. Se elaboraron tres probetas por cada muestra (C1-C2-C3-C4-C5) del lote LTAB suministrado por la empresa, obteniendo un total de 15 prototipos.

Para ambos ensayos, el equipamiento utilizado fue la balanza modelo KL32001D Marca CONTROLS, la mesa compactadora y el horno modelo CMC 100 marca COMACO.

El procedimiento consistió en llenar el molde prismático en dos capas como se ve en las Figura 23, Figura 24 y Figura 25, compactando las mismas en mesa compactadora de 60 golpes, se desmoldaron y pesaron en forma individual. Permanecieron 48 horas a temperatura controlada en el Laboratorio, se pesaron nuevamente y se ingresaron al horno a 105 °C. Se pesaron cada 24 horas hasta peso constante, logrando él mismo 4 días después de la fabricación, de los cuales 3 días estuvieron en el horno a 105 °C.

Como resultado, obtuvimos que el LTAB es depositado en el sitio de disposición final con un porcentaje de Humedad del 80,54 % como es expresado en el resumen de Tabla 16. Los datos sin procesar se presentan en la Tabla 99 del Anexo A. Esta cantidad de agua, es la que vamos a eliminar para controlar el proceso de fabricación de los prototipos cerámicos.

Tabla 16: Porcentaje de humedad de LTAB (H%)

	% HUMEDAD	σ (%)	CV(%)
LTAB	80,54	0,17	0,21



Figura 23: Molde para fabricación de probetas



Figura 24: Primera capa de llenado + compactadora



Figura 25: Segunda capa de llenado + compactadora



Figura 26: Mesa compactadora



Figura 27: Enrasado



Figura 28: Desmolde de probetas



Figura 29: Pesada de cada una de las probetas



Figura 30: Probetas a 105 °C hasta llegar a peso constante



Figura 31: Probetas recién fabricadas y posteriores al secado.

Como se menciona anteriormente, mediante estas probetas extraídas de los lotes, se determina también la densidad de los lodos. Tal como se detalla en la Tabla 17, la densidad se calcula como el cociente entre el peso y el volumen correspondientes a las tres probetas prismáticas del molde de dimensiones 40 mm x 40 mm x 160 mm. Los valores obtenidos de cada una de las probetas se detallan en las Tabla 100 y Tabla 101 del Anexo A.

Tabla 17: Densidad: LTAB (crudo)

	ρ (kg/m ³)	σ (%)	CV (%)
LTAB	1066,12	23,16	2,17

3.2.1.4. Acondicionamiento del LTAB

Se realizó el secado del LTAB utilizando dos hornos del laboratorio del Instituto de Ensayo de Materiales (horno modelo CMC 100 marca COMACO y una estufa modelo ES 64 ST marca Pablo Ferrando) a una temperatura de 105 °C. El lodo fue colocado en recipientes de vidrio, hasta que las muestras alcanzaran su peso constante. Se separaron en bolsas de 50 gramos, para su posterior molienda, respetando esta misma cantidad de material en cada una.

Posteriormente se molió utilizando un Molino de bolas SERVITECH CT-242, que contiene dos recipientes de cerámica de alta resistencia a la abrasión, revestidos con una capa de aluminio. En su interior se colocan 67 esferas de cerámica de dos tamaños diferentes junto con el material a moler. La molienda se realizó durante 10 min y 50 gramos en cada uno de los recipientes. Se molió un total de 5,00 kg de lodo seco y se tamizó en tamiz de 150 micras. Además del lodo necesario para la fabricación de los cerámicos, en esta instancia se preparan las muestras de lodo deshidratado para los análisis de laboratorios (tamaño medio de partícula, FRX, DRX, TGA).



Figura 32: Lodo seco previo a ser pesado y embolsado



Figura 33: Interior de molino



Figura 34: Exterior del molino



Figura 35: Lodo seco previo a la molienda



Figura 36: Lodo post molienda en el recipiente del molino



Figura 37: Lodo post molienda



Figura 38: Limpieza de bolas del molino para recuperar todo el material molido



Figura 39: Embolsado de lodo molido para la fabricación



Figura 40: 1600 gr de lodo para la fabricación con sustitución de 20 %

3.2.1.5. Caracterización del LTAB deshidratado

Para la caracterización del lodo deshidratado se realizaron diversos ensayos y análisis, incluyendo Densidad, determinación del Tamaño de Partícula, composición mineral por Difracción de Rayos X (DRX), composición química por Fluorescencia de Rayos X (FRX) y Pérdida por Calcinación (PPC), Termogravimetría (TGA y DTGA), Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), y Ensayo de Lixiviación de Sulfatos.

Estos ensayos y análisis se seleccionaron por ser los más comúnmente utilizados para la caracterización fisicoquímica de los LTAB en la literatura técnica (sección 2.2.1). A continuación, se describen los métodos aplicados y resultados obtenidos.

3.2.1.5a. Densidad

Se determinó la densidad absoluta del lodo deshidratado (masa por unidad de volumen) mediante el procedimiento descrito en la norma UNIT-NM 23:2004 (UNIT, 2004), empleando el frasco volumétrico de Le Chatelier.

El mismo consiste en llenar el frasco de Le Chatelier (frasco de vidrio de borosilicato con una capacidad aproximada de 250 cm³ hasta la marca cero de la escala), con un líquido reactivo que no reaccione químicamente con el material y tenga una densidad no menor de 0,731 g/cm³ a 15 °C, e inferiores a los materiales a ensayar. En este caso se utilizó Queroseno de empresa ANCAP, cuya densidad específica (relativa al agua = 1) va de 0,775 a 0,840 g/cm³ (ANCAP, 2017).

El queroseno se adiciona hasta que alcance el nivel entre las marcas 0 y 1 de la escala graduada, a temperatura de laboratorio 20 °C ± 2 °C (ver Figura 41). Posteriormente, se sumerge el frasco volumétrico en un recipiente con agua, Figura 43, controlando su temperatura en 20 °C ± 2 °C para la igualación de las temperaturas de los líquidos del matraz y del agua, durante 30 minutos como mínimo, ver Figura 42.

Una vez retirado del recipiente de agua, la primera lectura de volumen (V1) en la escala graduada del frasco. Se toma una masa conocida del material y se lo introduce en el frasco volumétrico, y una vez completada la tarea se registra la segunda lectura de volumen (V2). La densidad absoluta del material se calcula con la ecuación (1):

$$\rho = m/V \quad (1)$$

Siendo:

ρ : la densidad absoluta del material ensayado (g/cm³);

m : la masa del material ensayado (g);

V , el volumen desplazado por la masa del material ensayado ($V_2 - V_1$) en (cm³).

Los valores obtenidos se detallan en la Tabla 101 del anexo A.

Tabla 18: Densidad: lotes LTAB (deshidratados)

	ρ (g/cm ³)	σ (%)	CV (%)
LTAB	2,09	0,00	0,22



Figura 41: Frasco de Le Chatelier con queroseno



Figura 42: Control de la temperatura del agua



Figura 43: Frasco sumergido con queroseno por 30 min mínimo

3.2.1.5b. Distribución y tamaño medio de partícula

Se realiza mediante método Coulter, realizado por el Laboratorio de Biofarmacia y Tecnología Farmacéutica (BIOTEFA) de la Facultad de Química, Universidad de la República. Se utilizó la técnica de difracción de luz láser mediante el equipo COULTER LS230).

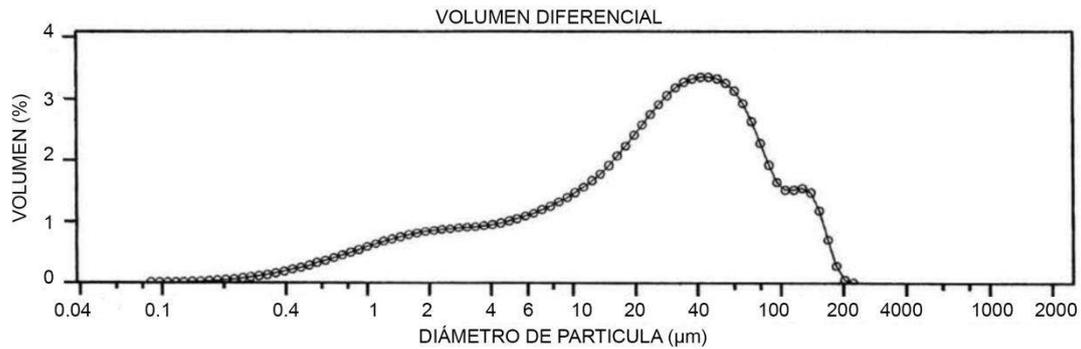


Figura 44: LTAB: Curva de Distribución de Tamaño de Partículas

Tabla 19: % de partículas de LTAB según su diámetro

DIÁMETRO	VOLUMEN
µm	%
<2	6,09
2 a 20	38,28
>20	55,63

El informe de las muestras de LTAB presenta la distribución de tamaño aproximadamente entre 0,1 y 200 µm, Figura 44. Los resultados obtenidos (media, mediana y moda) de tamaño medio de partículas se pueden ver en la Tabla 20.

Tabla 20: Tamaño Medio de Partículas: LTAB1.

MUESTRA	LTAB
MEDIA (µm)	18,86
MEDIANA (µm)	26,53
MODA (µm)	41,67

En la Figura 45 se puede observar la ubicación del LTAB, así como de otros lodos reportados en las referencias bibliográficas, en el diagrama de Winkler modificado por Pracidelli & Melchíades (1997) que se presentó en la sección 2.4.1. Como observación general, el LTAB de UPM presenta una composición granulométrica limo-arenosa, con relativamente bajo contenido de arcillas plásticas (6,09 % de partículas < 2 µm, extrapolado del gráfico de la Figura 44). Tomando en cuenta esto, y las recomendaciones de Winkler y modificaciones posteriores del concepto de aptitud cerámica, el LTAB podría reducir las propiedades plásticas al sustituir la arcilla en la mezcla cerámica. En tal sentido, el LTAB actuaría más como un desplastificante para la mezcla cerámica que como un sustituto de la arcilla. Otros lodos reportados por

bibliografía presentan composiciones granulométricas similares en cuanto al bajo contenido de arcillas plásticas, como los lodos estudiados por Pokhara et al. (2019) y Cremades et al. (2018), más limosos que el LTAB, y por Petterle et al. (2018), más arenoso que el LTAB.

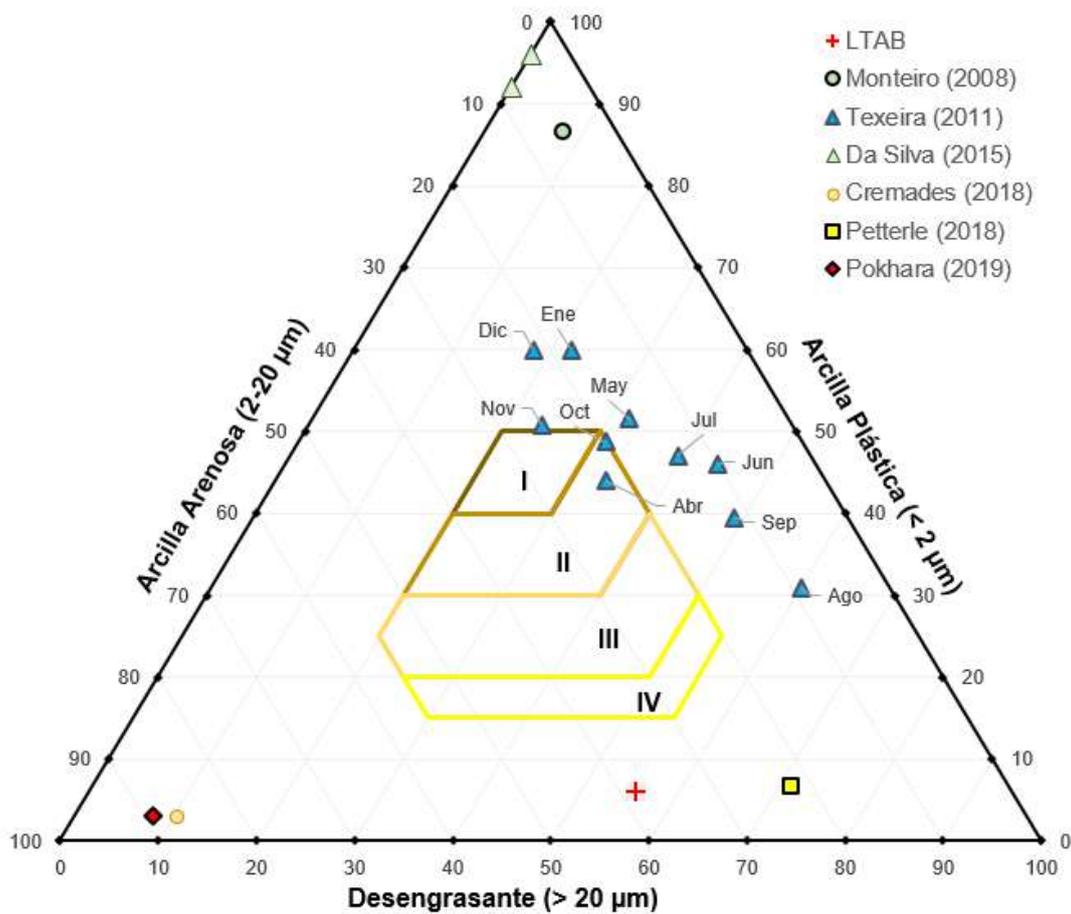


Figura 45: Diagrama de Winkler: LTAB y lodos de referencias bibliográficas Elaboración propia.

Los datos reportados por Teixeira et al. (2011), incluidos en el diagrama de la Figura 45, son bien ilustrativos de la variación estacional de la composición granulométrica de los lodos. En este caso los lodos generados en diciembre y enero presentan una relativamente alta concentración de arcillas plásticas (alrededor de 60 % de partículas < 2 µm), frente a una concentración más moderada en los meses de agosto y septiembre (entre 30 % y 40 % de partículas < 2 µm). Posiblemente esta variación responde a cambios significativos en el material suspendido en agua, relacionadas a épocas de estiaje y lluviosas en el nordeste de Brasil donde se desarrolló el estudio. Aunque no se

tienen datos de composición granulométrica del LTAB de UPM más que para el lote LTAB (8 de marzo de 2021), es posible anticipar una variación estacional en dicha composición, aunque no la magnitud de la misma.

En el caso de los lodos reportados por Monteiro et al. (2008) y por Da Silva et al. (2015) se observa una concentración excepcionalmente alta de arcillas plásticas (entre 85 % y 95 % de partículas < 2 μm), y representan un extremo en el diagrama de Winkler.

Wolff et al. (2017) indican que el diagrama de Winkler es una herramienta comprobada para los materiales arcillosos convencionales, pero puede ser menos confiable cuando se utilizan materias primas alternativas como los residuos industriales, pues su distribución de tamaño de partícula y contenido de óxidos puede no siempre ser apropiada para una mezcla cerámica exitosa.

Por lo anterior, se manifiesta lo indicado anteriormente en cuanto a la composición granulométrica de los LTAB: esta composición se puede presentar en un amplio rango que depende de la naturaleza del agua bruta y su tratamiento, y que además varía estacionalmente (cambios en el agua bruta) y por cambios en el proceso de tratamiento.

3.2.1.5c. Composición mineral (DRX)

El análisis de la composición mineral del lote de LTAB deshidratado, se realizó mediante análisis de Difracción de Rayos X (DRX), en el Laboratorio de Cristalografía de la Facultad de Química, Universidad de la República.

Se utilizó un Difractómetro de polvo RIGAKU-Ultima IV, y el difractograma final se puede observar en la Figura 46. En el informe de análisis correspondiente a la muestra del lote LTAB (Facultad de Química, 2021), se indica que el difractograma “se corresponde con estructura de tipo arcillosa”, “a partir de los patrones de difracción se estima que el porcentaje en peso es de ~ 95 % de aluminosilicato y ~ 5 % de sílice sobre el total de fases cristalinas”.

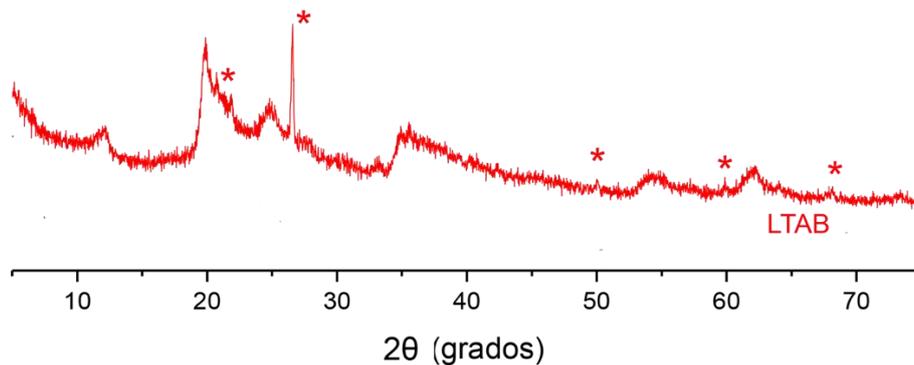


Figura 46: DRX: Difractograma del LTAB

De acuerdo a los resultados, se concluyó que mineralógicamente el LTAB está compuesto principalmente por arcillas, Metahalloysita, un aluminosilicato del grupo caolín. Sin embargo, teniendo en cuenta el análisis de tamaño de partícula, desde el punto de vista granulométrico, la fracción arcilla (< 2 μm) solamente representa el 6 % del LTAB. Una posible explicación es que en el proceso de coagulación y floculación se produzcan aglomerados (o flóculos) muy estables de minerales de arcilla que alcanzan un tamaño de arena (> 20 μm).

Los resultados del DRX del LTAB son bastante coherentes con los mismos análisis realizados por los estudios de referencia bibliográficas en lodos, aunque la identificación mineral en dichos estudios es más precisa. En tal sentido, todos los estudios de referencias bibliográficas concluyen a partir del DRX la presencia y abundancia de caolinita en el lodo, seguido de cuarzo. En algunos trabajos se identifican minerales de arcilla específicos, y otros minerales vinculados al hierro, tal como se detalla en la sección 2.2.1.

3.2.1.5d. Composición química (FRX)

El análisis de la composición química del LTAB deshidratado, se realizó mediante Fluorescencia de Rayos X de Energía Dispersiva (ED-FRX) en el Departamento de Ingeniería de Materiales y Minas del Instituto de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.

El análisis por FRX determinó la concentración de los siguientes elementos, expresada como porcentaje en peso, en base seca: Si (como sílice o SiO_2), Al (como alúmina o Al_2O_3), Fe (como óxido férrico o Fe_2O_3), Mn (como óxido de manganeso o MnO), Ca

(como óxido de calcio o CaO), K (como óxido de potasio o K₂O), S (como óxido sulfúrico o SO₃), P (como anhídrido fosfórico o P₂O₅), Cl y metales como el Ti, Cu, Zn, Pb, As, Cd, Hg y Ni. En la Tabla 21 se presenta un extracto de los resultados de FRX reportados por la Facultad de Química (IIQ, 2021a, 2021b). Se utilizó un equipo de FRX portátil que cuantifica los elementos con número atómico mayor o igual a 12, por lo que no determina Na, O y C, entre otros.

Tabla 21: LTAB: Composición Química (FRX)

Analito	%
SiO₂	17,90
Al₂O₃	24,10
Fe₂O₃	8,20
MnO	0,06
CaO	0,16
K ₂ O	0,18
SO ₃	4,90
P ₂ O ₅	0,35
Cl	0,04
Ti	0,70
Cu	0,02
Zn	0,02
Pb	< 0,002
As	< 0,002
Cd	< 0,002
Hg	< 0,001
Ni	< 0,01

El LTAB presenta una composición con tres elementos mayoritarios: SiO₂ (17,9 %), Al₂O₃ (24,1 %), y Fe₂O₃ (8,2 %). El siguiente elemento en composición es el azufre como SO₃ (4,9 %). Los demás elementos determinados por FRX se presentan en concentraciones menores al 1 %. A partir de la pérdida por calcinación pueden estimarse los porcentajes de los demás componentes, que se aborda en la próxima sección 0, como la materia orgánica y carbonatos.

Es de esperar una concentración variable de todos los elementos analizados en los distintos lotes de LTAB que se pueden extraer, debido a las condiciones variables del agua bruta y las dosificaciones también variables de coagulante y floculante durante el

tratamiento del agua bruta y del lodo, según se indica en la sección 2.1. También es de esperar la composición mayoritaria de SiO_2 y de Al_2O_3 debido a la naturaleza del lodo: parte de los materiales en suspensión en agua bruta corresponden a minerales de arcilla (aluminio-silicatos), y por la dosificación de sulfato de aluminio en el tratamiento de agua bruta.

En el diagrama triangular de la Figura 47 se comparan los resultados de FRX del lote de LTAB con los valores informados por las referencias bibliográficas que utilizaron lodos para productos cerámicos.

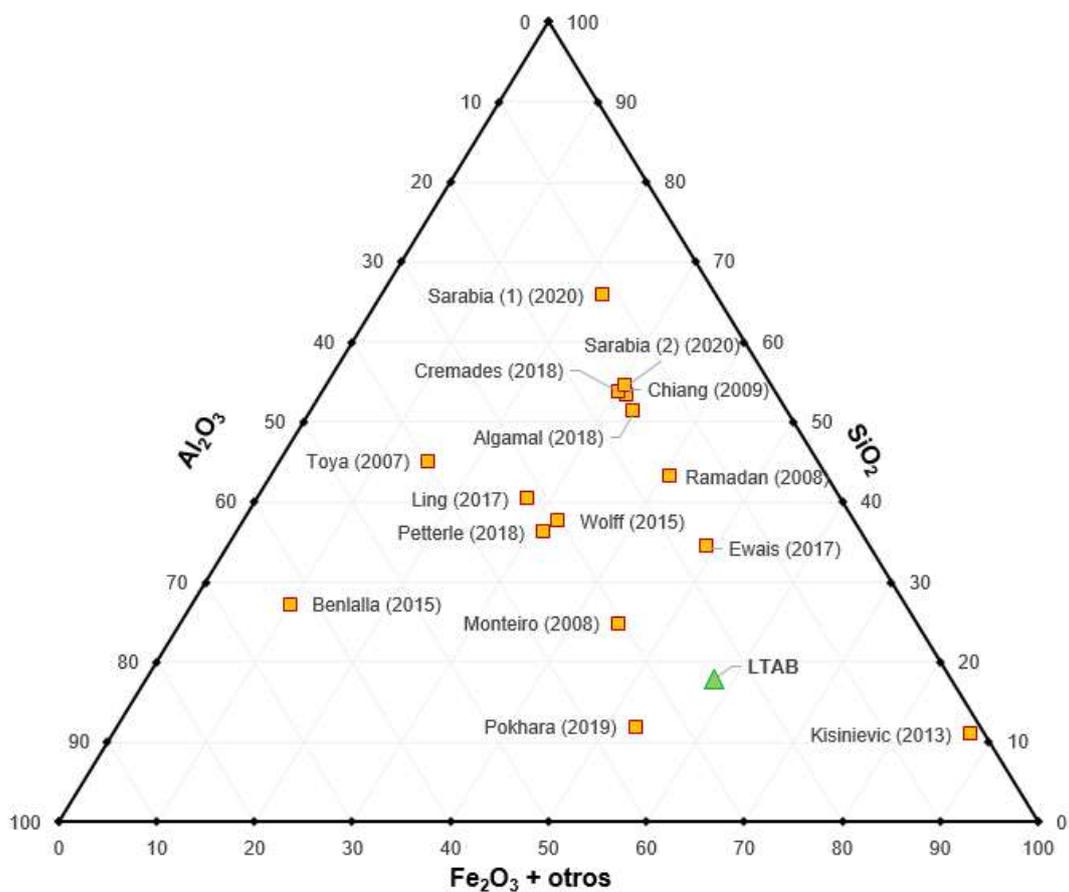


Figura 47: Diagrama triangular composición (LTAB y referencias). Elaboración propia.

Puede observarse que respecto al contenido de SiO_2 , el LTAB de UPM presenta concentraciones de 17,9 %, encontrándose dentro del rango de valores reportados en la bibliografía (5,5 % a 65,7 %), pero en el extremo inferior de dicho rango. Por ejemplo, Kizinievič et al. (2013) reporta un valor de 10,90 % pero que es un caso de lodo porque se utilizan óxidos de hierro como coagulante, en lugar de alúmina, y es por tanto esperable un menor valor de sílice. Por otro lado Pokhara et al. (2019), que reporta un valor de 5,50 %, también presenta concentraciones particularmente anómalas de Na_2O

y podría tratarse de un caso particular. Esta concentración relativamente baja de SiO_2 para los LTAB de UPM se ilustra en la Figura 48, más adelante.

Con respecto al contenido de Al_2O_3 , está dentro de los valores de referencia de la bibliografía encontrada, los valores van desde Sarabia Guarín et al. (2020) con 11,5 % y 14,9 %, hasta valores superiores como el lodo trabajado por Benlalla et al. (2015) con 62,7 %.

El LTAB de UPM presenta concentraciones de Fe_2O_3 de 8,20 %, Este valor se encuentra dentro del amplio rango de Fe_2O_3 reportado en la bibliografía: 1,16 % (Benlalla et al., 2015) a 68,70 % (Kizinievič et al., 2013). Aunque este último valor es una anomalía de este parámetro, posiblemente asociada al uso de coagulante férrico en el tratamiento de agua bruta objeto de dicho estudio.

Otro componente químico del LTAB, aunque no mayoritario como los anteriores, es el azufre como SO_3 . Al respecto, además del origen natural del azufre en los lodos (sulfatos y sulfuros presentes en el agua bruta), existe un aporte antrópico durante el tratamiento por el uso de sulfato de alúmina como coagulante, y también por el agregado de ácido sulfúrico para ajustar el pH del agua antes de la coagulación. El contenido de azufre en el lodo y la lixiviación de sulfatos tiene importancia por su manipulación y disposición final como residuo (peligrosidad), por sus efectos en el proceso de fabricación del cerámico (corrosividad de la mezcla cerámica y emisión de azufre durante la cocción), y por sus efectos en el uso final del producto cerámico (corrosividad en estructuras con aceros). Estos efectos se discuten con mayor detalle en la sección 4.8.

Tal como se indicó anteriormente, el análisis de FRX es un método típico para la caracterización de los lodos en la bibliografía de referencia, como se puede ver en la sección 2.2.1.

De acuerdo a las referencias de los autores (Dayaratnam, 1987) (Chowdhuri, 1965) (Duggal, 2009), la sílice proporciona forma uniforme y resistencia a los ladrillos crudos contra el agrietamiento, la deformación y la contracción, mejorando así su durabilidad, y la alúmina imparte plasticidad que ayuda en su moldeado.

Otros autores encontraron una composición química generalmente similar a la de la arcilla utilizada para la mezcla cerámica, en sus elementos principales, con las mayores

diferencias en cuanto al contenido de Aluminio y/o Hierro asociado al coagulante utilizado para el tratamiento de agua. La presencia y contenido de elementos menores (Ca, Mg, Na, S, metales) es muy variable para los distintos lodos reportados.

Algunos autores realizaron análisis complementarios para determinar la composición química de los lodos en estudio, tal como Espectrofotometría de Absorción Atómica (AAS) o Espectrometría de Masa con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS), para cuantificar metales pesados y verificar el cumplimiento de estándares locales o internacionales para residuos.

3.2.1.5e. Pérdida por Calcinación

Para la determinación de la pérdida por calcinación de las muestras de lodos deshidratados se aplica la norma UNIT-NM 18:2012 (UNIT, 2012). Se realizaron tres determinaciones.

El ensayo consiste en pesar 1,000 g \pm 0,001 g de muestra en un crisol de porcelana de masa conocida. Se calcina dentro de una mufla a la temperatura de 950 °C \pm 50 °C, durante un período mínimo de 50 min. Se deja enfriar en un desecador y se pesa.

Se calcula la pérdida por calcinación, expresado como porcentaje de la masa inicial, con la ecuación (2):

$$\%PPC = \frac{m1 - m2}{m} \times 100 \quad (2)$$

Siendo;

PPC: Pérdida por Calcinación (%)

m1, es la masa del crisol con la muestra, antes de la calcinación, en gramos;

m2, es la masa del crisol con la muestra, después de la calcinación, en gramos;

m, es la masa de la muestra utilizada en el ensayo, en gramos.

En la Tabla 22 se presentan los promedios aritméticos de la pérdida por calcinación obtenida para el LTAB, su desviación estándar y el coeficiente de variación. La PPC para el LTAB es de 36,63 %, tal como se ilustra en la Figura 48, este valor de PPC es excepcionalmente alto comparado con los 9 lodos que reportados en la bibliografía de

referencia (estudios de uso de LTAB en cerámicos). Los valores obtenidos para cada una de las muestras se detallan en la Tabla 103 del Anexo A.

Tabla 22: Pérdida por Calcinación: LTAB

	PPC (%)	σ (%)	CV (%)
LTAB	36,83	0,12	0,34

La PPC es un indicador de los componentes volátiles del lodo (agua de cristalización, materia orgánica, carbonatos, sulfatos y sulfuros, entre otros), y por lo tanto permite estimar las pérdidas de masa de la mezcla cerámica durante la cocción. En particular varios autores relacionan la relativamente alta PPC, comparado con las arcillas para cerámicos, con la presencia de abundante materia orgánica en los lodos (Algama et al., 2018; Ewais et al., 2017; Monteiro et al., 2008; Petterle et al., 2018). En uno de los casos, se relaciona PPC con la formación de poros durante la cocción de la pieza cerámica debido a la pérdida de masa de minerales de arcillas, hidróxidos y materia orgánica (Petterle et al., 2018).

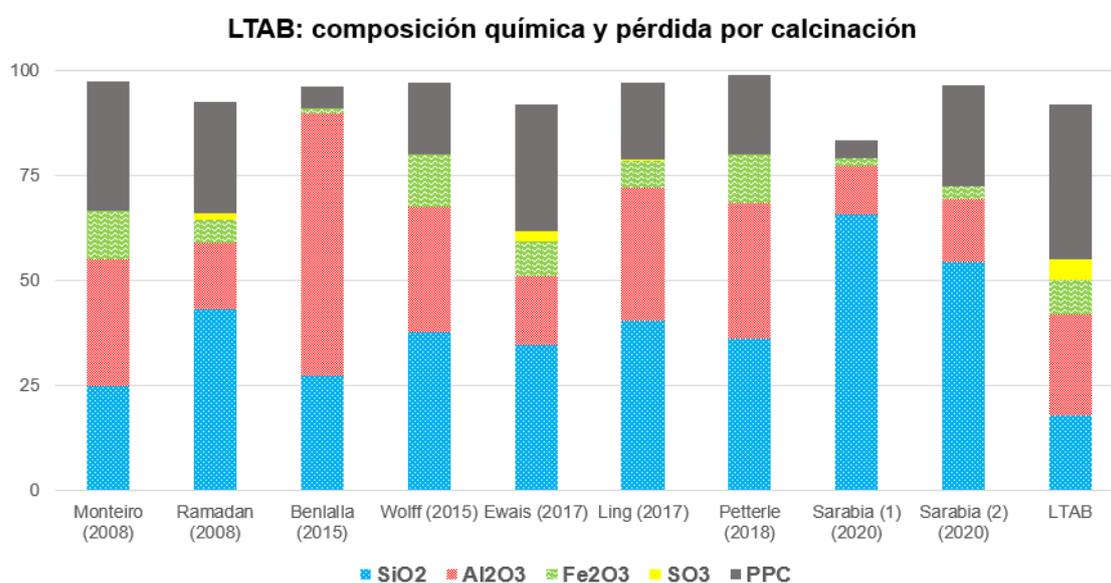


Figura 48: Composición química y PPC: LTAB y referencias

3.2.1.5f. Termogravimetría (TGA/DTGA)

Un análisis térmico comprende el estudio de la evolución de las propiedades de una muestra o compuesto cuando es sometida a un calentamiento a altas temperaturas. La técnica utilizada en este caso es la Termogravimetría, que registra la variación de la

masa en función de la temperatura y el tiempo de calentamiento de la muestra. Se obtiene las curvas termogravimétricas: TGA (*Thermogravimetric Analysis*), que es la relación entre masa y temperatura, y DTGA (*Differential Thermogravimetric Analysis*) que es la derivada de la curva TGA. La curva TGA permite identificar los cambios físicos y las reacciones químicas que ocurren en la muestra al aumentar la temperatura, y la magnitud de dichos cambios en relación a la pérdida de masa. La curva DTGA indica la entalpía asociada a cada cambio, si se trata de cambios endotérmicos o exotérmicos.

Se realizó Termogravimetría TGA/DTGA de una muestra del lote LTAB deshidratado en el Laboratorio de Análisis Térmico de la Facultad de Química de la Universidad de la República. En la Figura 49 se pueden observar los resultados del análisis en las curvas gravimétricas: TGA (roja) y DTGA (rosada).

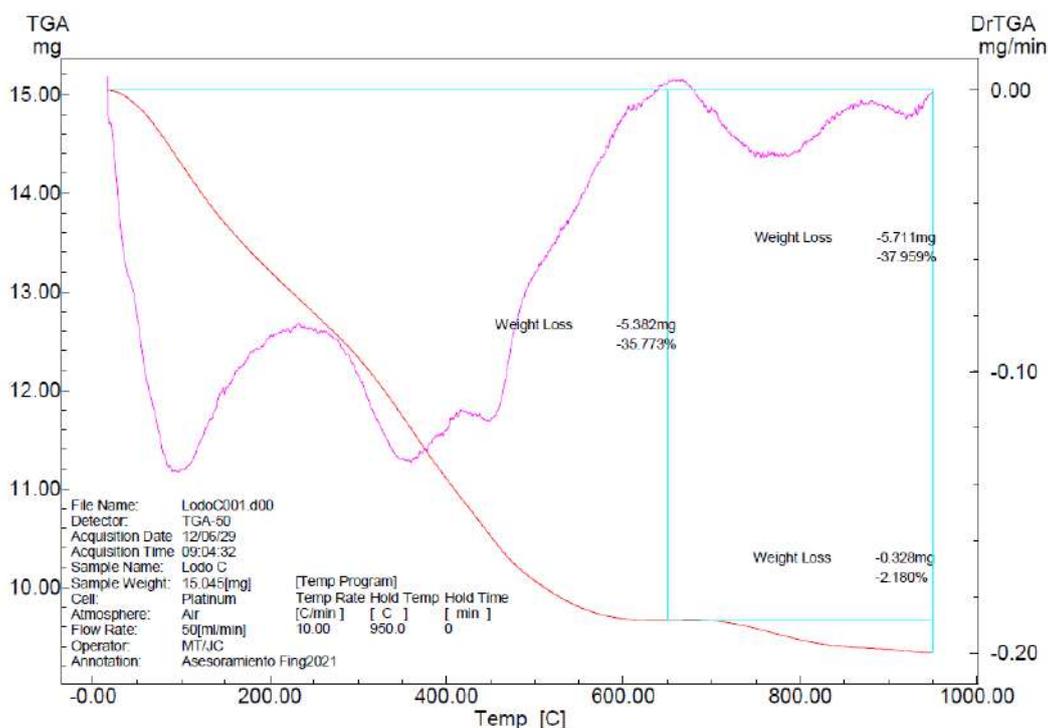


Figura 49: Curvas TGA/DTGA del análisis térmico de LTAB

A partir de estas curvas se observa que los cambios físicos y químicos con pérdida de masa más significativa del LTAB se producen hasta los 650 °C (35,773 % de pérdida de masa). De acuerdo a la curva DTGA, a alrededor de 100 °C se produce un cambio endotérmico importante que puede estar asociado a pérdida de humedad higroscópica de la muestra. A alrededor de 225 °C se produce un máximo local en la curva DTGA (reacción exotérmica), a 350 °C un mínimo (endotérmica), a 425 °C un máximo (exotérmica) seguida de un mínimo (endotérmica) a 450 °C, y un máximo local muy

pronunciado (exotérmica) a los 650 °C mencionado anteriormente. Entre 650 °C y 950 °C (límite superior del análisis), la pérdida de masa es menos significativa (2,18 %), y en la curva DTGA se observa un mínimo local (reacción endotérmica) a 775 °C, un máximo (exotérmica) a 875 °C, y un mínimo (endotérmica) a 925 °C.

La muestra de LTAB muestra coincidencias en su comportamiento térmico similar con lo reportado para lodos de la bibliografía. Monteiro et al. (2008) realizaron análisis TGA/DTGA del lodo estudiado y reportan un pico endotérmico a 95,9 °C, que es característico de la pérdida de peso por liberación del agua higroscópica. A 313,6 °C reportan un pico exotérmico asociado a la oxidación de materia orgánica, un pico endotérmico a 516,7 °C asociado a la deshidroxilación de la caolinita, y un pico exotérmico a 931,2 °C característico de la disociación de la metacaolinita. Estos autores informan que la caolinita, el cuarzo, la gibbsita y la goethita son las principales fases cristalinas del lodo utilizado. La gibbsita y la goethita también podrían estar asociados con productos químicos utilizados por la planta de tratamiento de agua, como el sulfato de aluminio y el cloruro de hierro.

Por su lado, Teixeira et al. (2011) reportan un 9 % de pérdida de masa (humedad de la muestra) a 65 °C, un pico endotérmico a 265 °C asociado a la pérdida de agua por descomposición de hidróxidos de aluminio y hierro, y un pico a 315 °C asociado a la combustión de materia orgánica. Ling et al. (2017) observaron picos endotérmicos a 40 y 460 °C que asocian a la descomposición parcial del óxido hidratado atrapado en la zeolita, como $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}$, y una reacción exotérmica entre 300 °C a 400 °C y pérdida de peso del 5 % asociado a la combustión de materia orgánica. Indican que la transición de fase de la caolinita estuvo representada por un pico endotérmico significativo a 500 °C, acompañado de una pérdida de peso drástica del 5 % de 470 °C a 530 °C, cuando ocurrió la eliminación incidental del grupo hidroxilo y la producción de metacaolín ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$). Finalmente identifican un pico exotérmico próximo a 940 °C asociado a la recristalización de metacaolín en espinela de silicio.

Teniendo en cuenta que la mayor pérdida de masa del LTAB se produce hasta los 650 °C, y considerando entonces que los cambios más importantes en su estructura suceden antes de dicha temperatura, se sugiere utilizar una temperatura de cocción de los productos cerámicos elaborados con LTAB entre 700 °C y 1000 °C (IEM, 2021).

3.2.1.5g. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Se llevaron muestras de LTAB deshidratado al laboratorio de la Unidad de Microscopía Electrónica de Facultad de Ciencias (Universidad de la República), para la realización de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). Debido a que la interpretación de las imágenes resultado de la MEB requiere una experticia y experiencia particular, solamente se incluyen observaciones generales sobre las mismas.

En la Figura 50 se agregan estas imágenes de las muestras de LTAB, para magnificaciones entre 100 y 10000, que permiten observar la morfología de la superficie del LTAB a escalas entre 100 y 1 μm respectivamente. A las escalas más pequeñas se observan partículas de tamaño 10-20 μm con cierta estructura cristalina, y partículas más pequeñas, agrupadas, de tamaño 1-5 μm y aparentemente amorfas. Esta variedad granulométrica del lodo es indicativa de una baja porosidad efectiva. Por otro lado, las observaciones anteriores son coherentes con los resultados de distribución de tamaño de partículas del LTAB que se presenta en la sección 0.

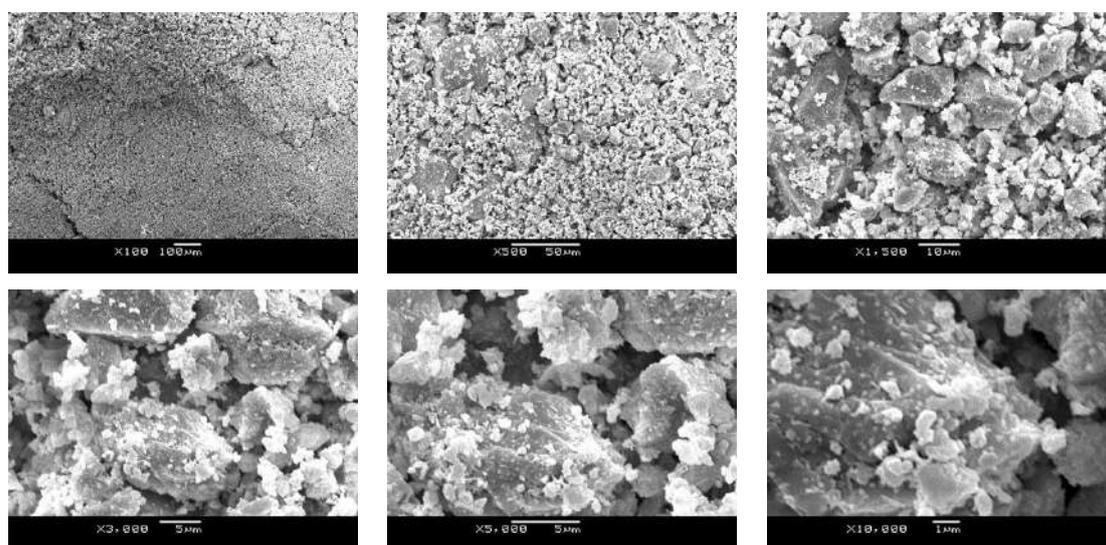


Figura 50: Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), del lote de LTAB

En la bibliografía de referencia se presentan algunos resultados e interpretaciones de la MEB para lodos en estudio. En el caso de Kizinievič et al. (2013), observan en las fotografías de MEB que el lodo contiene partículas de varios tamaños, esféricas y agrupadas en conglomerados. En magnificaciones bajas (X 15,000) observan que la densidad de estos conglomerados de partículas es baja, y que presentan una gran cantidad de espacios vacíos (poros) entre ellos. Infieren que los conglomerados

continuos fueron triturados durante la molienda del lodo, resultando en partículas con tamaño igual o menor a 138 μm . Además, observan que estos conglomerados presentan estructuras granulares, con una gran cantidad de poros externos, abiertos, finos e interconectados. Por su parte Da Silva et al. (2015) indican que las muestras de lodo observadas con MEB presentan dimensiones micrométricas ($<2 \mu\text{m}$), y que en general, se trata de aglomerados con texturas muy similares a las observadas en minerales arcillosos. Identifican la presencia de diatomeas (algas), de la especie *Aulacoseira granulata*. Ling et al. (2017) observan que las partículas de lodo no tienen formas o tamaños definidos, y exhiben una textura rugosa y compacta.

3.2.1.5h. Sulfato en Lixiviado

Para este ensayo se aplica el procedimiento de lixiviación definido por la norma EPA 1311 (U.S. EPA, 1992) y se determina la concentración de sulfatos en el lixiviado mediante la norma UNE-EN ISO 10304-1 (AENOR, 2009). El ensayo y la determinación fueron realizados en muestras compuestas por el Laboratorio Ecotech. Los resultados informados por el laboratorio, arrojan un valor de 170 mg $\text{SO}_4^{2-}/\text{L}$ (Laboratorio Ecotech, 2021a).

El ensayo de lixiviación de sulfatos también se realiza para la arcilla y para los prototipos cerámicos, cuyos detalles y resultados se presentan en la sección 3.2.2 y 3.4.8 respectivamente.

En la sección 3.4.8 se observan los resultados de sulfato en lixiviado lo cual se discute en un contexto más general en la sección 4.8.

3.2.2. Arcilla

Para todas las mezclas cerámicas se utiliza una arcilla comercial proveniente de empresa ARCAL (<https://www.arcal.com.uy/>). Su caracterización química fue realizada por el laboratorio del Departamento de Ingeniería de Materiales y Minas del Instituto de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería (Universidad de la República), mediante Fluorescencia de Rayos X de Energía Dispersiva (ED-FRX), utilizando un equipo de FRX portátil. En la Tabla 23 se resumen los resultados informados por el laboratorio (IIQ, 2021c).

El elemento principal presente en la arcilla es la sílice con 43,50 %, seguido por el aluminio con 18,60 % (tal como era de esperar por la composición química de los minerales de arcilla, definidos típicamente como aluminosilicatos).

Tabla 23: Arcilla: Composición Química (FRX)

ANALITO	%
	ARCILLA
SiO ₂	43,50
Al ₂ O ₃	18,60
Fe ₂ O ₃	3,10
MnO	< 0,01
CaO	2,00
K ₂ O	2,90
SO ₃	< 0,1
P ₂ O ₅	0,20
Cl	< 0,01
Ti	1,10
Cu	< 0,005
Zn	0,02
Pb	< 0,002
As	< 0,002
Cd	< 0,002
Hg	< 0,001
Ni	< 0,01

Para esta arcilla también se determina sulfato en lixiviado, mediante el procedimiento de lixiviación definido por la norma EPA 1311 y la determinación de concentración de sulfatos en el lixiviado mediante la norma UNE-EN ISO 10304-1. El resultado informado por el laboratorio (Laboratorio Ecotech, 2021a) fue de 11 mgSO₄²⁻/L.

Al finalizar los ensayos en los prototipos cerámicos (que se describen en la sección 3.4), y teniendo en cuenta sus resultados, se decidió realizar un análisis de granulometría de la arcilla. El objetivo de este análisis complementario es evaluar la composición granulométrica de las mezclas cerámicas utilizadas para la fabricación de prototipos, en el marco de las recomendaciones propuestas por Winkler (1954) y modificaciones posteriores que se detallan en la sección 2.4.1. Se realizó un análisis de distribución de tamaño de partícula de una muestra de arcilla, realizado por el Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), mediante método UOP Method 856-07. En la Tabla 24 se presentan los resultados reportados por el laboratorio (LATU, 2022).

Tabla 24: Arcilla: distribución de tamaño de partícula

GRANULOMETRÍA	%
Arcilla Plástica (< 2 µm)	5.6
Arcilla Arenosa (2 - 20 µm)	91.2
Desplastificante (> 20 µm)	3.2

3.2.3. Arena

Como desplastificante para la mezcla cerámica se utilizó arena natural tamizada a 4.75 mm, a la que se determinó su humedad, granulometría, y densidad aparente (compactada y sin compactar). Para la determinación de la humedad, la arena se secó en estufa a 105 °C, a peso constante, obteniendo un valor de 3,3 %.

La determinación de la granulometría de la arena se realizó bajo la norma UNIT-NM 248:2002 (UNIT, 2002), por tamices normalizados, y los resultados del ensayo se resumen en la Tabla 25, obteniéndose un módulo de finura de 3,06. En la Figura 51 se puede observar la curva granulométrica obtenida del ensayo, y en tal sentido, se trata de una arena clase I (granulometría regular) según la norma UNIT 82:1951 (UNIT, 1951).

Tabla 25: Arena: Granulometría

NORMA UNIT 82: 1951							
% DE MATERIAL RETENIDO							
ABERTURA DE TAMIZ ASTM (mm)	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	CLASE I máx.	CLASE I mín.	CLASE II máx.	CLASE II mín.
4,75	0	0	0,0 %	5 %	0 %	9 %	0 %
2,36	46,3	8,8	8,8 %	30 %	10 %	44 %	5 %
1,18	154,4	29,3	38,1 %	55 %	30 %	67 %	15 %
0,600	192,7	36,6	74,7 %	80 %	50 %	85 %	27 %
0,300	92,2	17,5	92,2 %	95 %	70 %	95 %	40 %
0,150	0,9	0,2	92,4 %	100 %	90 %	100 %	85 %
Fondo	39,7	7,5	99,2 %				
TOTAL	526,2	99,9					

MÓDULO DE FINURA	3,06
------------------	-------------

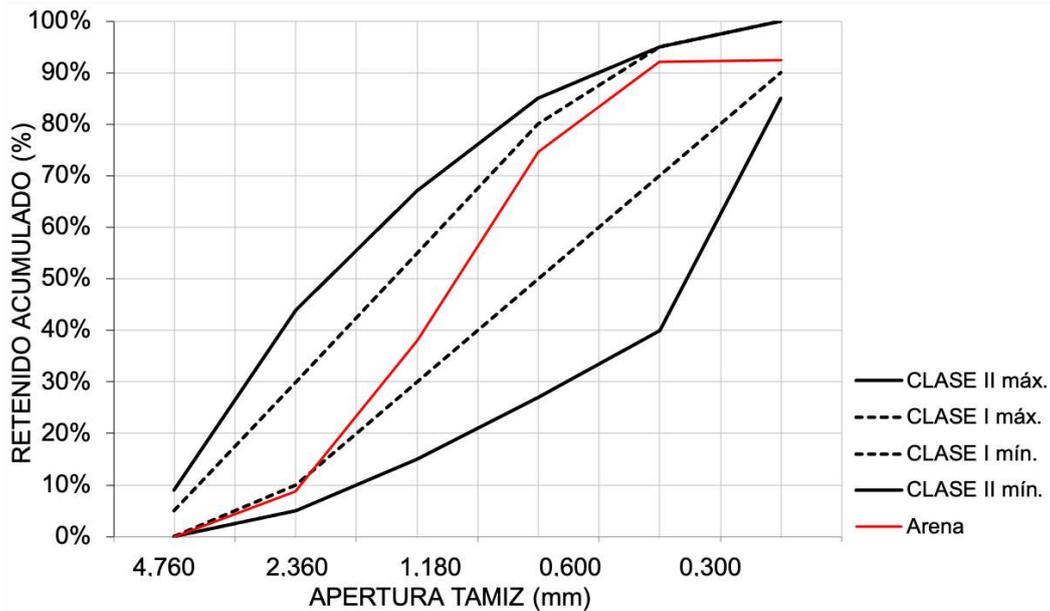


Figura 51: Arena: Curva granulométrica

La densidad aparente de la arena se determinó bajo la norma UNIT-ISO 20290-1:2021 (UNIT, 2021). Se obtuvieron los siguientes resultados: 1533,3 kg/m³ para la densidad sin compactar, y 1608,5 kg/m³ para la densidad compactada.

Para ambos ensayos, la arena se secó a 105 °C hasta temperatura constante lograda a las 24 horas, luego de dos pesadas consecutivas con intervalo de una hora. Se prepararon tres muestras de arena, para buscar la densidad aparente del agregado, como la media de los tres resultados obtenidos. El resultado individual de cada una de las muestras no superó un desvío mayor que el 1 % con relación a la media.

Se utilizó un recipiente cilíndrico con asa, con capacidad nominal de 1 L, recomendado para agregados cuyo tamaño máximo este próximo a los 4 mm, como es el caso de la arena utilizada como desplastificante. El recipiente tiene una superficie interior lisa de 11,2 cm de diámetro interior y 9,5 cm de altura (interior).

La primera parte del ensayo consiste en la calibración del volumen del recipiente con agua, como se ilustra en las Figura 52, Figura 53 y Figura 54. En la Tabla 104 del Anexo B se presentan los resultados de esta calibración y las ecuaciones utilizadas para el cálculo.

Para el cálculo de la densidad aparente sin compactar, se llena el recipiente calibrado con arena, se enrasa y se pesa, según se muestra en las Figura 55, Figura 56 y Figura 57. En la Tabla 26 se informa el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación del grupo obtenido en el ensayo. Los resultados individuales del ensayo se presentan en la Tabla 105 del Anexo B.

Tabla 26: Arena: Densidad aparente, arena sin compactar

ρ (kg/m ³)	σ (%)	CV(%)
1533,32	11,88	0,77

Para el cálculo de la densidad aparente compactada, se llena el recipiente calibrado en tres capas iguales de arena, se compacta con varilla lisa de 16 mm, y con 10 golpes distribuidos uniformemente sobre la superficie de cada capa, según se muestra en las Figura 58, Figura 59, Figura 60 y Figura 61. En la Tabla 27 se informa el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación del grupo obtenido en el ensayo. Los resultados individuales del ensayo se presentan en la Tabla 106 del Anexo B.

Tabla 27: Arena: Densidad aparente, arena compactada

ρ (kg/m ³)	σ (%)	CV(%)
1608,48	9,46	0,59



Figura 52: Recipiente cilíndrico, con agua ocupando el 100 % de su volumen



Figura 53: Control de T del agua para cálculo de densidad



Figura 54: Placa transparente para eliminar el aire y el exceso de agua



Figura 55: Llenado del recipiente con arena (densidad sin compactar)



Figura 56: Enrasado con varilla compactadora para eliminar exceso de material



Figura 57: Masa de arena total para el cálculo de densidad sin compactar



Figura 58: Primera capa + 10 golpes con varilla 16 mm para compactación



Figura 59: Segunda capa y compactación sólo de esta



Figura 60: Tercera capa de arena, para compactar y enrasar



Figura 61: Masa de arena total para el cálculo de densidad compactada

3.3. Fabricación de cerámicos

De acuerdo a la bibliografía estudiada, presentada en la sección 2.2.1, se elaboraron prototipos de materiales cerámicos con arcilla, arena y LTAB. A los efectos de comparación, se elaboraron también prototipos sin LTAB. Por ello también fue necesario caracterizar la arena y la arcilla empleadas en su fabricación. A continuación se presenta la Tabla 28 de nomenclatura de los prototipos cerámicos según el porcentaje LTAB adicionada a la mezcla y la temperatura de cocción.

Se realizan probetas cúbicas de 50 mm de arista, empleando 5 %, 10 %, 15 % y 20 % de lodo de planta de tratamiento de agua bruta en sustitución de la arcilla, y la referencia sin adición de lodo. Se fabrican 24 prototipos de cada dosificación, en un total de 120

probetas con el lodo LTAB deshidratado y molido conforme lo indicado en la mayoría de las referencias bibliográficas de empleo de lodos de agua bruta en materiales cerámicos.

Tabla 28: Nomenclatura de los prototipos cerámicos

NOMENCLATURA DE PROTOTIPOS						
C= 14 cm		% DE ADICIÓN DE LTAB				
		0 %	5 %	10 %	15 %	20 %
TEMPERATURA DE COCCIÓN	700	S 0-1	S 5-1	S 10-1	S 15 -1	S 20 - 1
		S 0-2	S 5-2	S 10-2	S 15 -2	S 20 - 2
		S 0-3	S 5-3	S 10-3	S 15 -3	S 20 - 3
		S 0-4	S 5-4	S 10-4	S 15 -4	S 20 - 4
		S 0-5	S 5-5	S 10-5	S 15 -5	S 20 - 5
		S 0-6	S 5-6	S 10-6	S 15 -6	S 20 - 6
	800	S 0-7	S 5-7	S 10-7	S 15 -7	S 20 - 7
		S 0-8	S 5-8	S 10-8	S 15 -8	S 20 - 8
		S 0-9	S 5-9	S 10-9	S 15 -9	S 20 - 9
		S 0-10	S 5-10	S 10-10	S 15 -10	S 20 - 10
		S 0-11	S 5-11	S 10-11	S 15 -11	S 20 - 11
		S 0-12	S 5-12	S 10-12	S 15 -12	S 20 - 12
	900	S 0-13	S 5-13	S 10-13	S 15 -13	S 20 - 13
		S 0-14	S 5-14	S 10-14	S 15 -14	S 20 - 14
		S 0-15	S 5-15	S 10-15	S 15 -15	S 20 - 15
		S 0-16	S 5-16	S 10-16	S 15 -16	S 20 - 16
		S 0-17	S 5-17	S 10-17	S 15 -17	S 20 - 17
		S 0-18	S 5-18	S 10-18	S 15 -18	S 20 - 18
	1000	S 0-19	S 5-19	S 10-19	S 15 -19	S 20 - 19
		S 0-20	S 5-20	S 10-20	S 15 -20	S 20 - 20
		S 0-21	S 5-21	S 10-21	S 15 -21	S 20 - 21
		S 0-22	S 5-22	S 10-22	S 15 -22	S 20 - 22
		S 0-23	S 5-23	S 10-23	S 15 -23	S 20 - 23
		S 0-24	S 5-24	S 10-24	S 15 -24	S 20 - 24

También se hicieron pruebas de fabricación de otros prototipos con diferente consistencia, y los ensayos correspondientes, pero sus resultados se descartan para el presente estudio.

En la Figura 62, se muestra un esquema de la fabricación de los prototipos cerámicos.

MEZCLA SECA

ARENA + ARCILLA + LTAB = PROTOTIPOS CERÁMICOS

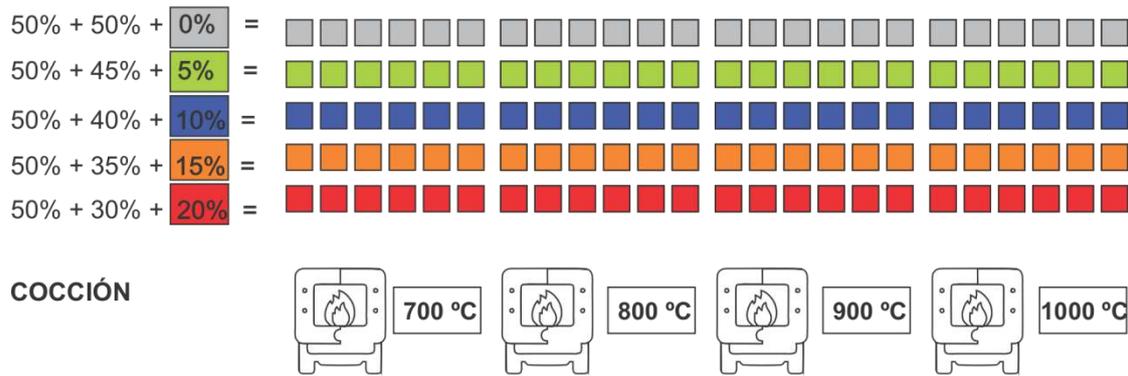


Figura 62: Esquema de fabricación de los prototipos cerámicos

3.3.1. Preparación de la mezcla

Las mezclas se fabricaron bajo el procedimiento indicado en la norma UNIT-ISO 679:2009 (UNIT, 2009). Para ello, se utiliza una mezcladora conformada por un recipiente de acero inoxidable de 5 dm³ de capacidad y una paleta de acero inoxidable. La mezcladora trabaja a dos velocidades de rotación (lenta: 140 ± 5 min⁻¹; rápida: 285 ± 10 min⁻¹), según norma UNIT 1243:2018 (UNIT, 2020), la misma se puede ver en Figura 68.

Para tomar el peso de los materiales y lograr las dosificaciones buscadas, se usó una balanza modelo KL32001D marca CONTROLS (capacidad de 4.500 g / 32.000 g) con una apreciación de 0,1 g / 1 g, ver la misma y la pesada del lodo a adicionar a la mezcla en la Figura 64. También recipientes metálicos, cucharas, y vasos de bohemia. También un reloj para medir el tiempo de trabajo de la mezcladora.

Para la dosificación del agua, las mezclas se realizaron bajo la norma UNE-EN-1015-3:2000 (AENOR, 2000) y la norma UNE 1015-6 (AENOR, 1999). Se utilizaron estas normas definidas para morteros, por falta de una correspondiente a mezclas cerámicas. Se añadió suficiente agua a la mezcla para asegurar la trabajabilidad de la pasta húmeda de la manera convencional, determinando una consistencia plástica como indica la Tabla 29, utilizando el método del extendido en la mesa de sacudidas.

Tabla 29: Clasificación de Consistencia (UNE 1015-6).

CONSISTENCIA	VALOR DE ESCURRIMIENTO (mm)
--------------	-----------------------------

Mortero Seco	< 140
Mortero Plástico	140 a 200
Mortero Fluido	> 200

De esta manera, el contenido de agua necesario en las dosificaciones de las mezclas elaboradas, se determinó cuando las mismas alcanzan una consistencia con valor de escurrimiento de ± 14 cm por el procedimiento de la mesa de sacudidas.

La misma consiste en colocar un molde troncocónico (base inferior y superior interior miden 100 mm y 70 mm respectivamente) centrado sobre la plataforma (de bronce de 254 mm \pm 2,5 mm), llenar el molde en dos capas, compactando cada una de ellas con 20 golpes mediante un pisón, repartidos uniformemente, con la presión necesario y suficiente para asegurar un llenado uniforme. Se enrasa con la regla, evitando compactar el mortero, se retiran los derrames de material, secando la plataforma alrededor del molde, y finalmente se levanta cuidadosamente el mismo, y de inmediato se acciona el sistema para dejar caer la plataforma por 25 veces en 15 s, en forma regular.

Una vez que finaliza, se mide y se registra, cuatro diámetros equidistantes, con una exactitud de 1 mm, con el arco medición. El resultado del explayamiento de la mezcla, es el promedio de los diámetros medidos, expresados en mm.

El valor de explayamiento buscado, corresponde al de una mezcla de mortero plástica, de 14 cm, por lo que manteniendo esta consistencia dosificamos la cantidad de agua a adicionar a la mezcla de arena, arcilla y lodo. En la Tabla 30 se indican las dosificaciones (en porcentaje) de los elementos que componen la mezcla cerámica, y la consistencia lograda para cada dosificación. Puede observarse que a medida que aumenta el contenido de LTAB, se necesita mayor cantidad de agua para obtener el mismo explayamiento. Esto puede explicarse por un cambio en las propiedades reológicas de la mezcla cerámica al agregar LTAB. Además, el LTAB puede contener residuos de coagulante del tratamiento de agua bruta, y la hidratación de este coagulante podría estar demandando mayor cantidad de agua al momento de la preparación de la mezcla.

Tabla 30: Dosificaciones de las mezclas cerámicas (en %)

	LTAB	ARCILLA	ARENA	AGUA	EXPLAYAMIENTO
	%	%	%	%	cm
REFERENCIA	0	50	50	20,3 %	14,0

LTAB 5 %	5	45	50	23,6 %	14,1
LTAB 10 %	10	40	50	24,6 %	14,0
LTAB 15 %	15	35	50	25,6 %	14,2
LTAB 20 %	20	30	50	26,6 %	14,0

Las mezclas se realizaron uniendo primeramente los materiales secos, arena, lodo y arcilla, por último, se le adiciona agua. Se mezclaron durante 30 segundos a velocidad de rotación lenta y 30 segundos a velocidad de rotación rápida (lenta: $140 \pm 5 \text{ min}^{-1}$; rápida: $285 \pm 10 \text{ min}^{-1}$).

Cada una de las mezclas fabricadas, se vertió en moldes prismáticos, permitiendo la conformación de 3 de los prototipos cerámicos, de 50 mm x 50 mm x 50 mm. En la Tabla 31 se indica la masa de cada ingrediente de la mezcla cerámica utilizada para la fabricación de los prototipos cerámicos, para la referencia (0 %) y las 4 dosificaciones seleccionadas (5 %, 10 %, 15 % y 20 %).

Se desmoldaron en el momento de fabricados, se pesaron, y se mantuvieron en ambiente de laboratorio a temperatura de 20 °C y 50 % de HR durante una semana.

Tabla 31: Dosificaciones de las mezclas cerámicas (en peso)

	LTAB	ARCILLA	ARENA	AGUA	EXPLAYAMIENTO
	g	g	g	g	cm
REFERENCIA	0	500	500	203	14,0
LTAB 5 %	50	450	500	236	14,1
LTAB 10 %	100	400	500	246	14,0
LTAB 15 %	150	350	500	256	14,2
LTAB 20 %	200	300	500	266	14,0

A los siete días de fabricados, se sometieron al horno a 60 °C, al octavo día a 105 °C hasta lograr su peso constante, se retiraron del horno, se pesaron y se almacenaron en recipientes cerrados para su posterior cocción. Posteriormente se cocinaron a 4 temperaturas, 700 °C, 800 °C, 900 °C y 1000 °C. Para cada temperatura definida, se realizaron 6 prototipos de cada una de las dosificaciones.

El ciclo de cocción se definió de manera tal que una vez ingresado a la mufla y llegando a la temperatura de cocción prevista, se mantuvieron en exposición durante 60 min. Luego se apagó y se dejó enfriar gradualmente dentro de la misma durante 24 horas. Se pesaron y se controlaron las dimensiones y la contracción.

De la Figura 63 a la Figura 83, se ilustra todo el proceso de fabricación de los prototipos cerámicos.



Figura 63: Tamizado de la arena



Figura 64: Pesada del LTAB



Figura 65: Pesada de la arcilla



Figura 66: Materiales secos



Figura 67: Previo a mezcla



Figura 68: Mezcladora



Figura 69: Mezcla con 5 % de lodo



Figura 70: Mesa de sacudidas



Figura 71: 2do llenado



Figura 72: Enrasado



Figura 73: Desmolde



Figura 74: Medición de diámetros



Figura 75: Traslado del diámetro



Figura 76: Molde prismático previo al llenado



Figura 77: Enrasado previo



Figura 78: Desmolde



Figura 79: Fabricación de los 24 prototipos con 5 % LTAB



Figura 80: Secado a 60 °C y a 105 °C previo a cocción



Figura 81: Cerámicos con 5 % LTAB previo a la cocción



Figura 82: Mufla para cocción



Figura 83: Cerámicos posterior a la cocción a 900°C

3.4. Ensayos sobre los prototipos cerámicos

Esta sección describe los ensayos realizados sobre los prototipos cerámicos fabricados con 0 % (referencia: sin agregado de LTAB), 5 %, 10 %, 15 % y 20 % de adición de LTAB, y cocidos a 700 °C, 800 °C, 900 °C y 1000 °C.

3.4.1. Densidad

El objetivo de este ensayo es determinar las propiedades físicas básicas vinculadas a la masa y la densidad, de los prototipos cerámicos fabricados con diferentes porcentajes de LTAB, y cocidos a diferentes temperaturas. Se realizaron 75 ensayos.

Se adopta el procedimiento de la norma IRAM 12593:2004 (IRAM, 2005), que consiste en sumergir los prototipos totalmente en agua, a una temperatura de 20 °C, separados del fondo, de manera que el agua también este en contacto con las caras inferiores. El período de inmersión dependerá del criterio de masa constante, es decir, que puede variar entre 24 y 96 horas. Para este ensayo, se verifica masa constante registrando el peso de los prototipos, hasta que, entre pesadas sucesivas con un intervalo de 2 horas, la diferencia sea menor al 0,25 %. Posterior a esto, se las retira del agua, se las deja escurrir y se pesan determinando la masa saturada (m_s).



Figura 84: Dispositivo para el ensayo de densidad



Figura 85: Inmersión del prototipo (masa saturada) en el agua.



Figura 86: Prototipo suspendido en agua.

Por último, se secan las probetas en estufa a 105 °C a peso constante, se las deja enfriar y se registra el valor de la masa seca (m). La densidad se calcula con la ecuación (3):

$$\rho = \frac{m \times \rho_a}{m_s - m_a} \quad (3)$$

Luego se pesan suspendidas en agua; para esto se colocan los prototipos en un cesto de alambre y el mismo colgado de la balanza se sumerge en un balde de agua (ver fotografías en las Figura 84, Figura 85 y Figura 86. Se registra la masa del prototipo suspendido en agua a 20 °C (m_a).

Siendo;

m : la masa del prototipo seco (g)

ρ_a : la densidad del agua ($\rho_a = 1 \text{ g/cm}^3$);

m_s : la masa del prototipo saturado (g)

m_a : la masa del prototipo suspendido en agua (g)

ρ : la densidad (g/cm^3);

3.4.2. Pérdida de peso

Este procedimiento permite evaluar la variación en el peso de los prototipos cerámicos, desde la fabricación de la pieza fresca hasta la pieza seca (pérdida de humedad por secado al aire y en horno), y desde la pieza seca hasta la pieza cocida (pérdida por cocción).

Se registra el peso de cada prototipo, en sus diferentes etapas de fabricación (antes y después del secado, posterior a su cocción) en una balanza modelo KL32001D marca CONTROLS (capacidad de 4500 g / 32000 g) con una apreciación de 0,1 g / 1 g. Se calcula la pérdida de peso en la etapa de secado y en la etapa de cocción, según las ecuaciones (4) y (5):

$$\% \Delta P_S = \frac{P_i - P_s}{P_i} \times 100 \quad (4)$$

$$\% \Delta P_C = \frac{P_s - P_c}{P_s} \times 100 \quad (5)$$

Siendo;

$\% \Delta P_S$: Pérdida de Peso por Secado (porcentual)

$\% \Delta P_C$: Pérdida de Peso por Cocción (porcentual)

P_i : Peso del prototipo luego del moldeado (antes del secado), en gramos

P_s : Peso del prototipo luego del secado, en gramos

P_c : Peso del prototipo luego de la cocción, en gramos

3.4.3. Resistencia a la Compresión

Debido a que se trata de un ensayo destructivo, se realizó la evaluación de una de las propiedades mecánicas de los prototipos, la resistencia a la compresión, como uno de los últimos ensayos de laboratorio. Se realizaron 120 ensayos, logrando resultados que nos permiten evaluar la influencia del porcentaje de lodo y la temperatura de cocción en la resistencia a la compresión de los prototipos cerámicos.

Se utiliza la norma UNE-EN 772-1 (AENOR, 2011a). El modelo de prensa utilizada es la Prensa PILOT modelo 4 - C47C02, como se observa en la Figura 88.



Figura 87: Cálculo del área de la cara



Figura 88: Prensa PILOT modelo 4 - C47C02

Los prototipos se acondicionan por secado a 105 °C en estufa, hasta obtener masa constante. Luego del secado y antes de realizar el ensayo, los prototipos se conservaron a 20 °C. Luego se calculó el área de la cara del prototipo, a la que va a ser aplicada la fuerza de compresión, midiendo ambos lados y registrándolo (en milímetros).



Figura 89: Prototipo cerámico luego del ensayo (5 % LTAB, 700°C)



Figura 90: Interior del prototipo cerámico (5 % LTAB, 700°C)

Para comenzar el ensayo, se limpiaron las impurezas que existían en las caras de apoyo, y se alineó el prototipo al centro del plato, de manera que la carga se aplicara de forma uniforme. La velocidad de aplicación de carga fue de 0,05 MPa/s. La resistencia a la compresión (kg/cm^2) de cada uno de los prototipos, se calcula mediante la ecuación (6):

$$f_{cm} = \frac{F}{A} \quad (6)$$

Siendo;

f_{cm} : resistencia media a la compresión (kg/cm^2)

F: fuerza máxima aplicada durante en el ensayo (kg)

A: área de la cara seleccionada del prototipo cerámico, sometida a la carga (en cm^2)

Luego se calcula “ f_{ck} ”, la resistencia característica a la compresión, que se define como aquel valor que presenta un grado de confianza del 95 %, es decir, que existe una probabilidad de 0,95 de que se presenten valores individuales de resistencia de los cerámicos más altos que f_{ck} . De acuerdo con esta definición, la resistencia característica se calcula según la ecuación (7):

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,645 \times \sigma \quad (7)$$

Siendo;

f_{ck} : la resistencia característica a la compresión (kg/cm^2)

f_{cm} : resistencia media a la compresión (kg/cm^2)

σ : Desviación estándar (kg/cm^2)

3.4.4. Contracción volumétrica

Este procedimiento permite evaluar la variación en volumen entre la pieza fresca (luego del moldeado) y la pieza seca, en cuyo caso se denomina contracción al secado, o la pieza cocida, lo que se denomina contracción total.

Como se explica en la sección 3.3, para la fabricación de los prototipos, se utilizaron moldes prismáticos de 50 mm x 50 mm x 50 mm, por lo que el área inicial (antes del secado) de la cara seleccionada de los prototipos considerada es 25 cm².

Posterior a su cocción se registra el área de una de las caras con un calibre digital (ver fotografía en la Figura 87), obteniendo los datos para aplicar la ecuación (8), de contracción volumétrica total:

$$Cv = 100 \times \frac{A_i - A_c}{A_i} \quad (8)$$

Siendo;

Cv: la contracción volumétrica total (%)

Ai: el área de la cara seleccionada del prototipo cerámico, antes del secado (en cm²)

Ac: el área de la cara seleccionada del prototipo cerámico, posterior a cocción (en cm²)

3.4.5. Absorción de agua

3.4.5.1. Absorción de agua por succión capilar

El objetivo de este ensayo es cuantificar la tasa inicial de absorción de agua de los prototipos cerámicos fabricados con los diferentes porcentajes de LTAB, y cocidos a distintas temperaturas (75 ensayos en total).

Se usa el procedimiento de la norma UNE-EN 772-11:2011 (AENOR, 2011b) que consiste en secar los prototipos en estufa a 105 °C hasta obtener masa constante, que se verifica cuando en dos pesadas sucesivas realizadas en un intervalo de 24 horas, la pérdida de masa entre ambas pesadas no supera el 0,1 % de la masa total. Luego se dejan enfriar a temperatura ambiente, y se miden las dimensiones de la cara que estará en contacto con el agua, calculando el área bruta de esa cara (As).

En una bandeja de 30 mm de profundidad, se coloca una capa de algodón embebida en agua, y sobre ella los prototipos, de forma que estén sumergidos a una profundidad de 5 mm durante todo el ensayo. Se mide el tiempo con cronómetro desde el instante que se colocan los prototipos en agua.

Se determina el aumento de masa a distintos tiempos de inmersión (t_{so}): la primera medida a los 30 segundos, luego cada 1 minuto hasta alcanzar los 5 minutos, y a continuación cada 5 minutos hasta que se observe masa constante. Para la mayoría de los prototipos ensayados se alcanza masa constante a los 75 minutos del inicio del ensayo.

La masa se determina de la siguiente forma: se retiran las probetas del agua en cada intervalo indicado anteriormente, se seca el agua superficial, se pesa en balanza graduada al 0,1 gramo, y se vuelve a sumergir en agua. Se registra la masa en cada intervalo ($m_{so,s}$).

Con los resultados obtenidos se calcula la tasa inicial de absorción de agua por capilaridad, y la media de las tasas iniciales de absorción de agua, según la ecuación (9):

$$c_{w,i} = \frac{m_{so,s} - m_{seco,s}}{A_s \times t} \times 10^3 \quad (9)$$

Siendo;

$c_{w,i}$: tasa inicial de absorción de agua por capilaridad ($\left[\frac{kg}{m^2 \times min.} \right]$)

$m_{seco,s}$: masa de la probeta después del secado (g)

$m_{so,s}$: masa de la probeta después de la inmersión durante un tiempo t (g)

A_s : superficie bruta de la cara de la probeta sumergida en el agua (mm²)

t = 30 segundos, 1 minuto o 5 minutos (el intervalo que corresponda)



Figura 91: Bandeja con algodón embebido en agua, balanza y prototipos

Figura 92: Prototipos cerámicos durante el ensayo de absorción por capilaridad

Figura 93: Registro de masa durante el ensayo

3.4.5.2. Absorción de Agua por el Método de la Pipeta

A partir de este ensayo, que simula las condiciones de un ladrillo cerámico expuesto a la intemperie (lluvia y viento), se busca determinar la absorción de agua de los prototipos cerámicos fabricados con diferentes porcentajes de LTAB, y cocidos a distintas temperaturas. Se realizaron 75 ensayos para las series de 0 %, 5 %, 10 %, 15 % y 20 % de LTAB, y de temperatura de cocción 700 °C, 800 °C, 900 °C y 1000 °C en cada serie.

Para el ensayo se utiliza la norma UNE-EN 16302:2016 (AENOR, 2016a); se mantuvo constante la columna de agua y presión hidrostática.

Previo al ensayo, los prototipos se secan en horno a 105 °C hasta obtener masa constante, y luego se dejan enfriar a temperatura ambiente. Se registra el peso del prototipo seco y se limpia la superficie removiendo el polvillo. Luego se adhiere una pipeta Karsten (pipeta de vidrio graduada) mediante silicona neutra, en todo el contorno de la pipeta, teniendo la precaución de no cubrir el área circular interna de la base (ya que es la zona de ensayo). En la fotografía de la Figura 94 se ilustra este procedimiento. Luego se seca por 24 horas en horno a 60 °C para asegurar la hermeticidad del sellado, tal como se ilustra en la fotografía de la Figura 95. Si durante el ensayo se verifica la pérdida de agua por este encuentro entre el tubo y el cerámico, se debe descartar y repetir (lo que ocurrió en algunos casos). El prototipo así preparado se coloca sobre una balanza y se registra el peso inicial (peso seco del prototipo y pipeta Karsten).

El ensayo comienza agregando agua destilada a la pipeta Karsten (en este caso se utilizó una pipeta plástica), hasta la graduación máxima, verificando que no queden burbujas dentro de la columna. En la fotografía de la Figura 96 se ilustra este procedimiento para mantener el nivel de agua en la pipeta Karsten. Se toma el tiempo con cronómetro desde este instante, y se registra la cantidad de agua absorbida en intervalos de $t = 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 40$ y 60 minutos, manteniendo la columna de agua en la graduación máxima. El agua absorbida se determina como la diferencia entre el peso al tiempo t y el peso inicial, en gramos.

De acuerdo a la norma NCh2256/1:2013 (INN, 2013) la graduación máxima (altura de columna de 12 cm en la pipeta Karsten, que se mantiene durante todo el ensayo) corresponde a una presión de 1177 Pa, o a una presión de viento (lluvia con viento) de 158 km/h. Por lo tanto, este ensayo simula dichas condiciones del ladrillo a la intemperie.



Figura 94: Adhesión de la pipeta Karsten al prototipo



Figura 95: Prototipos luego del secado con pipeta Karsten adherida



Figura 96: llenado de la columna de agua de la pipeta Karsten.

3.4.5.3. Absorción por Inmersión en Agua Fría

El objetivo de este ensayo es determinar la absorción de agua, por inmersión en agua fría, de los prototipos cerámicos fabricados con diferentes porcentajes de LTAB, y cocidos a distintas temperaturas. Se realizaron 75 ensayos.

Se utiliza la norma UNE-EN 772-21:2011 (AENOR, 2011c). Se secan los prototipos en estufa a 105 °C hasta obtener masa constante, y se dejan enfriar a temperatura ambiente, registrando la masa del prototipo después del secado. El procedimiento consiste en sumergir los prototipos en su totalidad en una cubeta llena de agua a

constante, es decir, que puede variar entre 24 y 96 horas. Para este ensayo, se verifica masa constante registrando el peso de los prototipos, hasta que, entre pesadas sucesivas con un intervalo de 2 horas, la diferencia sea menor al 0,25 %. Posterior a esto, se las retira del agua, se las deja escurrir y se pesan determinando la masa saturada (m_s).

Luego se pesan suspendidas en agua; para esto se colocan los prototipos en un cesto de alambre y el mismo colgado de la balanza se sumerge en un balde de agua (ver fotografías en las figuras Figura 84, Figura 85 y Figura 86, de la sección 3.4.1. Se registra la masa del prototipo suspendido en agua a 20 °C (m_a).

Por último, se secan las probetas en estufa a 105 °C a peso constante, se las deja enfriar y se registra el valor de la masa seca (m).

La porosidad se calcula a partir de la ecuación (11), con los datos registrados en el ensayo descrito anteriormente:

$$\phi = \frac{m_s - m}{m_s - m_a} \times 100 \quad (11)$$

Siendo;

ϕ : la porosidad del prototipo (%)

m : la masa del prototipo seco (g)

m_s : la masa del prototipo saturado (g)

m_a : la masa del prototipo suspendido en agua (g)

3.4.7. Colorimetría

Mediante este ensayo se estudia la uniformidad del color de los prototipos cerámicos, y su variación de color con respecto a la referencia (prototipos fabricados sin LTAB en sustitución de arcilla).

Se usa la norma UNI-EN 15886:2010 (UNI, 2010), que establece un procedimiento e instrumental para la determinación del color de cualquier superficie de material inorgánico poroso. Permite cuantificar el color y expresarlo numéricamente con pautas definidas por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE). El instrumental utilizado

para la cuantificación es un Espectrofotómetro X-RTIE CAPSURE RM200 (fotografía de la Figura 103). Las características básicas del mismo se detallan en la Tabla 32.

Tabla 32: Espectrofotómetro: características básicas

X-RITE CAPSURE RM 200	
COLORES DE ILUMINACIÓN	25 LED (8 x VISIBLE WAVELENGTHS, 1 X UV)
TAMAÑO DEL ÁREA DE ILUMINACIÓN	9 mm
DURACIÓN DEL CICLO DE MEDICIÓN	1,8 segundos
ZONA DE MEDICIÓN	8 mm
APERTURA	9 mm

La CIE define tres espacios de color, donde incluye CIE XYZ, CIE Lab*, y CIE LCh*. Los colores se representan en un “espacio de color”, donde cualquier color del rango visible se define mediante tres coordenadas (Borgno Martín, 2018) (JENCK, 2015).

El espacio de color denominado CIE L' a*b* 1976 y CIE L' a*b* 2000: Transformación matemática del espacio CIE XYZ en un espacio métrico, posee coordenadas de color rectangulares que son:

L' - la coordenada de luminosidad. La escala de L' va de 0 (negro) a 100 (blanco);

a* - la coordenada rojo/verde, donde +a* indica rojo y -a* indica verde;

b* - la coordenada amarillo/azul con +b' indicando amarillez y -b' indicando azul.

Tal como se muestra en la Figura 99 el espacio CIELab está constituido por una esfera, que tiene 3 ejes, un eje central que corresponde por la coordenada L, y dos perpendiculares a este eje central, que refieren a la coordenada b y a la coordenada a. Los estímulos acromáticos se encuentran en la coordenada L, que tiene valores de 0 a 100, de manera que valores de L=0 son estímulos al negro, y valores de L=100 son estímulos próximos al blanco. Y los estímulos cromáticos, viene desde el eje central hacia el borde exterior de la esfera, descrito por las coordenadas b y a. Las coordenadas b y a presentan valores entre -80 y + 80, con un valor de 0 en el corte de la coordenada L. Como es complejo trabajar en el espacio tridimensional, se realizan dos cortes, trabajando en dos planos cromáticos, obteniendo el plano cromático L*a* que nos va a permitir describir la luminosidad del producto, y por otro lado el plano b*a*, la tonalidad o pureza del color.

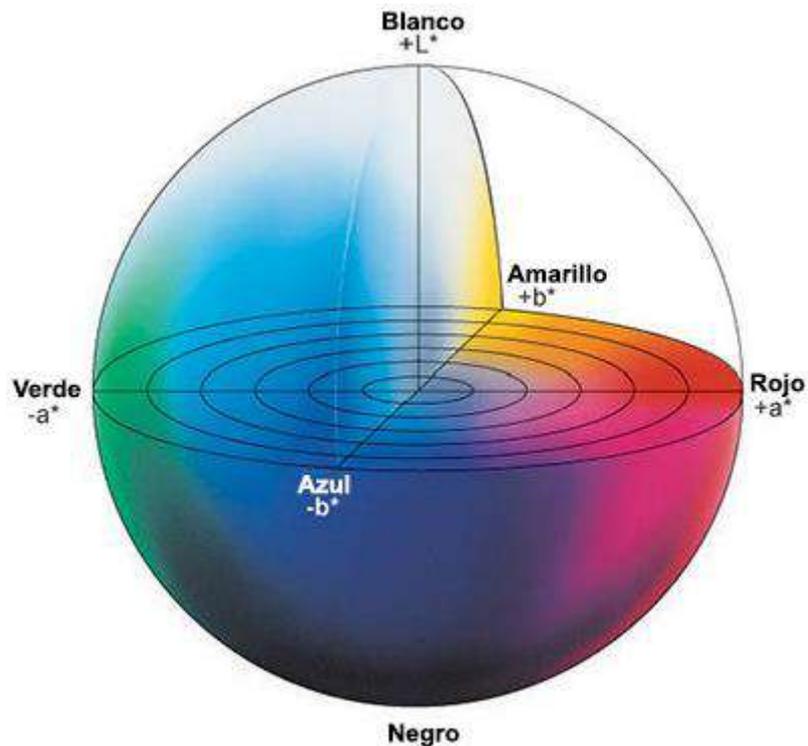


Figura 99: Representación del espacio de color CIE L*a*b* (Talens Oliag, 2019)

En el plano cromático b^*a^* , se obtiene la pureza (C^*) o saturación, que es el contenido de color de una superficie evaluado en proporción a su luminosidad, y se define por la distancia del punto al centro de los ejes (0) y al borde de la circunferencia (100).

El Tono (h) es el atributo de la sensación visual según la cual una superficie parece similar a uno, o a proporciones de dos, de los colores percibidos (rojo, naranja, amarillo, verde, azul y púrpura), la cual se ve representada por el ángulo a lo largo de la esfera, de 0° a 90° nos indican tonalidades rojo-amarillas, entre 90° y 180° amarillas – verdosas, entre 180° y 270° tonalidades entre verde y azules, y entre 270° y 360° tonalidades entre azul y colores púrpuras.

En el plano L^*a^* se expresa la luminosidad de los prototipos cerámicos, definiendo esta última como el atributo de la sensación visual según la cual una superficie emite más o menos luz.

El espectrofotómetro utilizado, arroja todos los valores de coordenadas L' , a^* , b^* , C^* , y h^* .

Para el cálculo de los valores $L^* a^* b^*$, la referencia blanca está constituida dentro del espectrofotómetro, por un difusor reflector iluminado por la misma fuente de luz que el prototipo ensayado.

Debido a que el espacio de color $L^* a^* b^*$ no tiene una equidistancia exacta entre los colores percibidos, se incorporan a estas mediciones, factores que corrigen la variación en la magnitud de la diferencia de color percibida por el ojo humano. Se le suman las coordenadas, del espacio de color LCh^* , que es similar al CIELAB, tiene el mismo diagrama que el espacio de color Lab^* pero usa coordenadas cilíndricas en vez de usar coordenadas rectangulares.

Se realizaron un total de 1200 tomas de color. Por cada prototipo fabricado, se eligieron dos caras del prototipo para su estudio, y para cada una de ellas, se toman 5 muestras de color (la ubicación de estas muestras en cada cara se representa en el esquema de la Figura 100).

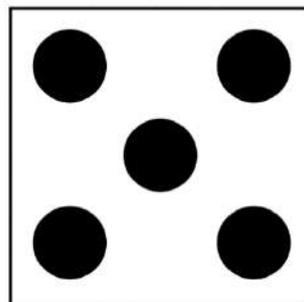


Figura 100: Posiciones para las tomas de color



Figura 101: Enfoque para toma de color

Figura 102: Primera toma de color con espectrofotómetro

Figura 103: Espectrofotómetro con los resultados de L^* , a^* , b^* , C^* , y h^*

A partir de estos valores obtenidos entre las dos caras tomadas por prototipo, se efectúa un promedio y en base a ello se calculan los parámetros colorimétricos: ΔL^* (diferencia de luminosidad), Δa^* (diferencia eje rojo-verde), Δb^* (diferencia eje amarillo-azul), C^* (saturación), ΔC^* (diferencia de saturación), E^* (color total) y ΔE^* (diferencia total de color). H^* es el ángulo de matiz o tono, y el ΔH^* (diferencia de tono). Por último, la ΔE_{c^*} (diferencia total de color percibida por el ojo humano). Debido a que el espacio de color $L^*a^*b^*$ no tiene una equidistancia exacta entre los colores percibidos (las diferencias en los colores saturados son más difíciles de percibir), la fórmula de diferencia de color corregida modifica la luminosidad, saturación y tonalidad ($L^* C^* H^*$) del espacio de color $L^* a^* b^*$ incorporando factores que corrigen la variación en la magnitud de la diferencia de color percibida. En esta aparecen los parámetros de SL, SC y SH que son factores de ponderación de la luminosidad, del croma y del tono o matiz respectivamente.

Estos cálculos de parámetros colorimétricos se realizan según la norma UNI EN 15886, y las fórmulas se presentan en la Tabla 33.

Tabla 33: Cálculo de parámetros colorimétricos según Norma UNI EN 15886

PARÁMETRO	SIGNIFICADO	FÓRMULA
ΔE^*	Diferencia total de color	$\Delta E^* = \sqrt{((\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2)}$
ΔL^*	Diferencia de luminosidad	$\Delta L^* = L2^* - L1^*$
Δa^*	Diferencia eje rojo - verde	$\Delta a^* = a2^* - a1^*$
Δb^*	Diferencia eje amarillo-azul	$\Delta b^* = b2^* - b1^*$
$C1^*$	Saturación cara 1	$C1^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$
$C2^*$	Saturación cara 2	$C2^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$
ΔC^*	Diferencia de saturación	$\Delta C^* = C2^* - C1^*$
ΔH^*	Diferencia de tonalidad	$\Delta H^* = \sqrt{(\Delta E^{*2} - \Delta L^{*2} - \Delta C^{*2})}$
SC*	Factor ponderación croma	$SC = \sqrt{1 + 0,045 \times (C1^* \times C2^*)}$
SH*	Factor ponderación de tono	$SH = \sqrt{1 + 0,015 \times (C1^* \times C2^*)}$
ΔE^* corregida	Diferencia de color percibida	$\Delta E_{c^*} = \sqrt{((\Delta L^*/1^*1)^2 + (\Delta C^*/(1^*SC))^2 + (\Delta H^*/1^*SH)^2)}$

Según los valores obtenidos de diferencia total de color percibida por el ojo humano (ΔE^*), se analiza, como la adición de LTAB modifica el color del cerámico, es decir la calidad del color de los nuevos prototipos cerámicos con distintas adiciones de LTAB y cocidos a distintas temperaturas, con respecto a la referencia sin adición del LTAB cocido a la misma temperatura.

Este análisis se realiza según la norma UNE-ISO 12647-2 (AENOR, 2016b), en el que define los umbrales de tolerancia para ΔE^* (diferencia total de color percibida por el ojo

humano) para la industria gráfica, y la cual se toma para este análisis. Según la norma esta diferencia de color se puede clasificar en “excelente” cuando el valor de $\Delta E=1$, “buena” cuando $\Delta E^*= 1-2$, “normal” $\Delta E^*= 2-4$, suficiente $\Delta E^*= 4-5$ y mala cuando el valor de $\Delta E^*>5$.

Por otro lado, como se menciona anteriormente se define el color de los cerámicos a través del espacio CIELab, donde se analiza la pureza del color, la luminosidad y la tonalidad de los cerámicos fabricados.

Para esto, se grafica el plano cromático a^*b^* y el plano cromático L^*a^* (Talens Oliag, 2019) y la ubicación en los mismos de los prototipos cerámicos cocidos a 1000 °C, con los distintos porcentajes de LTAB. Cada punto de color en los gráficos representa una serie de fabricación. En este plano, se evidencia la pureza del color y la tonalidad de los cerámicos.

Por último, se realiza el análisis de uniformidad y variación del color de cada uno de los prototipos cerámicos con respecto a todas las tomas de color de sus caras.

3.4.8. Sulfato en lixiviado

El objetivo de este ensayo es determinar la concentración de sulfatos en el lixiviado de los prototipos cerámicos, con el objetivo de cuantificar la liberación de sulfato de estos materiales cuando están expuestos a ciertas condiciones ambientales, de uso o manipulación (fabricación del ladrillo, uso del ladrillo a la intemperie, disposición final como residuo de construcción, etc.).

La lixiviación refiere al proceso de contacto y percolación de un fluido “eluyente” (generalmente agua o solución acuosa) a través de un material poroso y/o fracturado (un residuo, o un material fabricado a partir de un residuo), generando la disolución o arrastre de sustancias presentes en el material. Este proceso modifica la composición química del “eluyente”, generando un nuevo fluido denominado “lixiviado”. La peligrosidad del lixiviado depende de la composición química del material poroso, de las características fisicoquímicas del fluido y de las condiciones en que se produce la lixiviación (tiempo, temperatura, etc.).

El ensayo de lixiviación establecido por la norma EPA 1311, aplicado a los lodos (sección 3.2.13) y a los prototipos cerámicos (sección 3.4.8), simula el proceso de lixiviación al que estará sometido un determinado material en las condiciones de un vertedero de residuos domésticos (U.S. EPA, 1992). Es un método de rutina en Uruguay para la aplicación del Decreto N° 182/013, y la clasificación de un residuo como categoría I o II.

La motivación de este ensayo es la presencia de concentraciones significativas y variables de azufre en el lodo, que fueron detectadas por el ensayo de composición química elemental que se detalla en la sección 3.2.1.5., y la potencialidad de que parte de este azufre se libere como sulfato en el proceso de fabricación y durante el uso de los cerámicos. En el lote de LTAB de UPM, se encontraron concentraciones de azufre como SO₃ superiores a los valores reportados en la bibliografía de referencia.

Para este ensayo se aplica el procedimiento de lixiviación definido por la norma EPA 1311 (U.S. EPA, 1992) y se determina la concentración de sulfatos en el lixiviado mediante la norma UNE-EN ISO 10304-1 (AENOR, 2009).

El ensayo y la determinación fueron realizados por el Laboratorio Ecotech en muestras compuestas correspondientes a los prototipos cerámicos con 0 %, 5 %, 10 % y 15 % de LTAB, con temperaturas de cocción a 700 °C, 800 °C, 900 °C y 1000 °C. Las muestras compuestas fueron elaboradas según el esquema que se muestra en la Figura 62 de la sección 3.3.

En total se realizaron 16 determinaciones en muestras compuestas de prototipos cerámicos.

A través del ensayo de sulfato en lixiviado se pretendió analizar el potencial de que parte del azufre presente en los lodos se libere como sulfato en el proceso de fabricación de los cerámicos, durante su uso en la industria de la construcción, y al final de su vida útil.

3.4.9. Análisis estadístico

El análisis estadístico de los resultados se presenta al final de cada una de las secciones, que comprende un análisis estadístico básico (valores mínimos, máximos, media, desviación estándar y coeficiente de variación) y un análisis estadístico mediante ANOVA.

Con referencia a los coeficientes de variación obtenidos, se adopta el siguiente criterio; en Gallegos & Casabonne Rasselet (2005) se indica que los materiales usados en albañilería tienen en general coeficientes de variación elevados, en especial cuando estos materiales son fabricados en forma artesanal. Los procesos artesanales de dosificación, mezclado y compactación tienden a producir características variables en los materiales. Estos autores reportan coeficientes de variación de la resistencia a la compresión entre 7 % y 29 % para ladrillos de arcilla moldeados artesanales en Perú, México y Chile. En base a estos datos, se entiende que un coeficiente de variación menor al 30 % es típico o aceptable para cerámicos artesanales, mientras que uno mayor, se considera alto o anormal. Debido a que no se encontraron referencias de coeficientes de variación para otras propiedades de cerámicos artesanales, se adoptará el mismo criterio para analizar los coeficientes de variación obtenidos para otras propiedades (densidad, absorción de agua, etc.).

El análisis mediante ANOVA es de dos factores, con 5 y 4 niveles, con repeticiones. Esta herramienta estadística de análisis de la varianza, permite contrastar la hipótesis nula de que los grupos son iguales, frente a la hipótesis alternativa de que sean diferentes. Se consideraron diferencias significativas con un alfa menor o igual a 0,05.

Para establecer la correlación entre las propiedades, se estudia el coeficiente de determinación, también llamado R^2 , que representa la dispersión alrededor de la curva de regresión. Ese coeficiente refleja la bondad del ajuste de un modelo a la variable que se pretende explicar, y oscila entre 0 y 1. Cuanto más cerca de 1 se encuentre el valor de R^2 , mayor es la incidencia de la variable independiente sobre la dependiente. Este valor indica el porcentaje de la variación de una variable debido a la variación de la otra variable y viceversa.

Para analizar la correlación entre dos propiedades, se utiliza el coeficiente de determinación (R^2), que es el cuadrado del coeficiente de Pearson (R), una prueba estadística para analizar la relación entre dos variables medidas en un nivel por intervalos o de razón. De acuerdo a Hernández Sampieri et al. (2006) R^2 indica el porcentaje de la variación de una variable debido a la variación de la otra variable y viceversa (o cuánto explica o determina una variable la variación de la otra). En la Tabla 34 se indican los criterios de correlación propuestos por Hernández Sampieri et al. (2006), de acuerdo al resultado del coeficiente de Pearson para regresiones lineales, y por lo tanto, de acuerdo al R^2 obtenido.

Tabla 34: Correlación entre propiedades de acuerdo al R^2 . (Hernández Sampieri et al., 2006)

R	R²	Correlación
0.00	0.00	No existe
± 0.10	0.01	Débil
± 0.50	0.25	Media
± 0.75	0.56	Considerable
± 0.90	0.81	Muy fuerte
± 1.00	1.00	Perfecta

4. Resultados y discusión

En este capítulo se presenta un resumen de los resultados de los ensayos realizados a los prototipos cerámicos, según los métodos descritos en la sección 3.4, posterior al tratamiento de los valores espurios. Los datos originales de los ensayos se exhiben en el Anexo. Se presenta además el análisis estadístico de los resultados (estadística básica, ANOVA y correlación entre propiedades). Para cada propiedad se realiza una discusión de los resultados de acuerdo a referencias bibliográficas desarrollados en la sección 2.5.

4.1. Densidad

La densidad de los prototipos cerámicos se determinó según el procedimiento descrito en la sección 3.4.1. Los resultados para cada uno de los prototipos fabricados con LTAB se detallan en la Tabla 107 a la Tabla 111 del Anexo C.

En el gráfico de la Figura 104 se presentan los promedios de la densidad obtenidos del ensayo de los prototipos cerámicos fabricados con 0 %, 5 %, 10 %, 15 % y 20 % de LTAB (una curva para cada porcentaje), y cocidos a 700 °C, 800 °C, 900 °C y 1000 °C. Con respecto a la adición de LTAB, la densidad de los prototipos cerámicos disminuyó con el aumento del porcentaje de lodo, todas las series fabricadas quedaron por debajo de la referencia sin adición de LTAB, proporcionalmente a la cantidad sustituida.

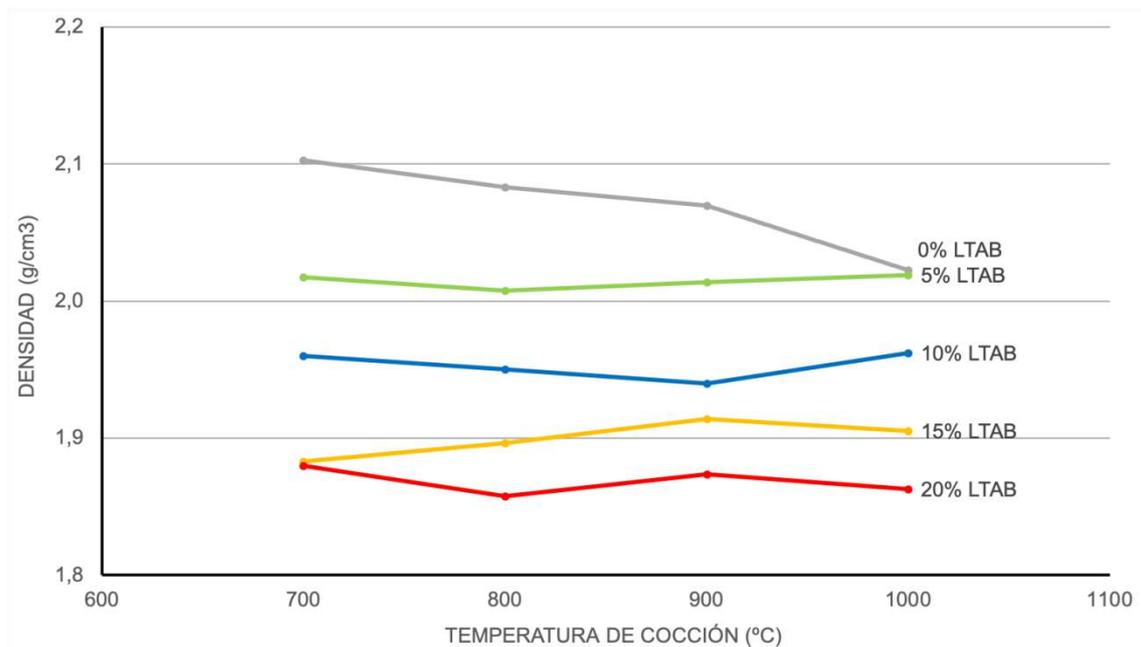


Figura 104: Densidad de los prototipos cerámicos

Para la referencia, el aumento de la temperatura de cocción llevo a la disminución de la densidad de los prototipos. Sin embargo, para los fabricados con LTAB, con 5 %,10 %, 15 % y 20 % la densidad aumento o se mantuvo.

A continuación, se presenta el análisis estadístico básico para cada una de las series fabricadas. En las Tabla 35, Tabla 36, Tabla 37,

Tabla 38 y Tabla 39 se detallan los resultados obtenidos con la variación del porcentaje de LTAB adicionado a la mezcla cerámica y las diferentes temperaturas de cocción.

Tabla 35: Análisis estadístico básico: Densidad (0 % LTAB)

T (°C)	Densidad mínima (g/cm ³)	Densidad máxima (g/cm ³)	Densidad Media (g/cm ³)	Desviación Estándar σ (g/cm ³)	Coefficiente de variación (%)
700	2,10	2,11	2,10	0,01	0,50
800	2,08	2,08	2,08	0,00	0,08
900	2,06	2,08	2,07	0,01	0,60
1000	2,01	2,03	2,02	0,01	0,74

Tabla 36: Análisis estadístico básico: Densidad (5 % LTAB)

T (°C)	Densidad mínima (g/cm ³)	Densidad máxima (g/cm ³)	Densidad Media (g/cm ³)	Desviación Estándar σ (g/cm ³)	Coefficiente de variación (%)
700	2,00	2,03	2,02	0,01	0,58
800	1,99	2,02	2,01	0,01	0,64
900	2,00	2,02	2,01	0,02	0,75
1000	1,98	2,04	2,02	0,03	1,47

Tabla 37: Análisis estadístico básico: Densidad (10 % LTAB)

T (°C)	Densidad mínima (g/cm ³)	Densidad máxima (g/cm ³)	Densidad Media (g/cm ³)	Desviación Estándar σ (g/cm ³)	Coefficiente de variación (%)
700	1,96	1,96	1,96	0,00	0,03
800	1,94	1,95	1,95	0,01	0,27
900	1,94	1,94	1,94	0,00	0,21
1000	1,96	1,97	1,96	0,00	0,17

Tabla 38: Análisis estadístico básico: Densidad (15 % LTAB)

T (°C)	Densidad mínima (g/cm ³)	Densidad máxima (g/cm ³)	Densidad Media (g/cm ³)	Desviación Estándar σ (g/cm ³)	Coefficiente de variación (%)
700	1,82	1,93	1,88	0,05	2,88
800	1,88	1,91	1,90	0,02	0,84
900	1,90	1,92	1,91	0,01	0,70
1000	1,90	1,91	1,91	0,01	0,40

Tabla 39: Análisis estadístico básico: Densidad (20 % LTAB)

T (°C)	Densidad mínima (g/cm ³)	Densidad máxima (g/cm ³)	Densidad Media (g/cm ³)	Desviación Estándar σ (g/cm ³)	Coefficiente de variación (%)
700	1,86	1,90	1,88	0,02	1,04
800	1,83	1,87	1,86	0,02	1,11
900	1,85	1,90	1,87	0,02	1,27
1000	1,84	1,88	1,86	0,02	1,22

Los resultados de este ensayo se consideran aceptables, ya que sus coeficientes de variación son menores al 29 %, valor típico para la fabricación de ladrillos artesanales tal como se menciona en la sección 2.5.1. Para este ensayo, los cv son similares para los distintos porcentajes de adición de LTAB y las diferentes temperaturas de cocción (cv entre 0,03 % y 2,88 %). Se observa una tendencia de aumento del cv, cuando la adición de LTAB es del 20 %.

Considerando estas variables estudiadas se realizó el análisis mediante ANOVA de dos factores, con 5 y 4 niveles, con repeticiones. A continuación, en la Tabla 40 se presenta el análisis estadístico de los resultados de Densidad, según lo descrito en la sección 3.4.9.

Tabla 40: Análisis de varianza: Densidad de los prototipos cerámicos.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
% LTAB	0,322	4	0,0805	226,24	6,878E-27	2,61
T Cocción	0,002	3	0,0006	1,78	0,1672	2,84
Interacción	0,014	12	0,0012	3,26	0,0024	2,00
Dentro del grupo	0,014	40	0,0004			
Total	0,352	59				

Para el factor porcentaje de adición de LTAB el valor calculado de F es mayor al F crítico, por lo cual se rechaza la hipótesis nula (se encuentra una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos) y entonces se observa una influencia del porcentaje LTAB en la densidad.

Para el factor temperatura de cocción el valor calculado de F es menor al F crítico, por lo cual se acepta la hipótesis nula (no existe una diferencia significativa entre los grupos) y entonces no se encuentra una influencia de la T cocción en la densidad.

Finalmente, el valor calculado de F para la interacción de los factores anteriores, es mayor al F crítico, por lo cual se observa que la densidad es influida por la interacción del porcentaje LTAB y la temperatura de cocción.

Todos los autores citados en la sección 2.5.1 coinciden en que el aumento del porcentaje de LTAB provoca una disminución en la densidad de los prototipos cerámicos, en una relación inversamente proporcional. Con respecto al efecto de la temperatura, se encuentran divergencias, ya que dependiendo de la composición del LTAB, la temperatura de cocción mantiene o disminuye el valor de la densidad.

4.2. Pérdida de peso

La pérdida de peso de los prototipos cerámicos se determinó según el procedimiento descrito en la sección 3.4.2. Los resultados para los prototipos fabricados con LTAB se detallan en la Tabla 112 a la Tabla 116 del Anexo D. A continuación, se presenta un

resumen de los resultados luego del tratamiento de datos espurios y se realiza una discusión de los mismos de acuerdo a referencias bibliográficas.

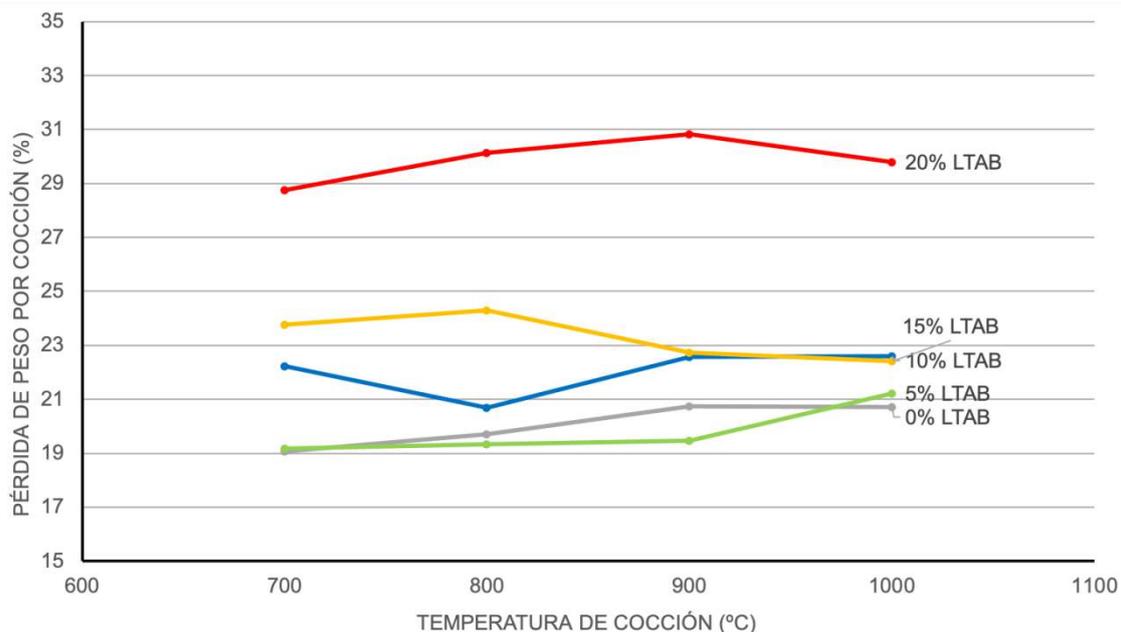


Figura 105: Pérdida de peso de los prototipos cerámicos posterior a la coacción

En el gráfico de la Figura 105 se muestran los resultados obtenidos del procedimiento. La pérdida de peso de los prototipos cerámicos fabricados, aumenta con el porcentaje de adición de LTAB. Con respecto a la temperatura, no hay una tendencia clara y significativa, excepto para la serie de adición del 10 %, que baja considerablemente para temperatura de coacción 800 °C.

A continuación, se presenta el análisis estadístico básico para cada una de las series fabricadas. En las Tabla 41, Tabla 42, Tabla 43, Tabla 44 y Tabla 45 se detallan los resultados obtenidos con la variación del porcentaje de LTAB adicionado a la mezcla cerámica y las diferentes temperaturas de coacción.

Tabla 41: Análisis estadístico básico: Pérdida de peso (0 % LTAB)

T (°C)	Pérdida de peso mínima (%)	Pérdida de peso máxima (%)	Pérdida de peso media (%)	Desviación Estándar σ (%)	Coficiente de variación (%)
700	18,92	19,26	19,07	0,14	0,75
800	19,38	19,98	19,71	0,24	1,21
900	20,59	21,01	20,75	0,15	0,72
1000	20,55	21,18	20,72	0,23	1,11

Tabla 42: Análisis estadístico básico: Pérdida de peso (5 % LTAB)

T (°C)	Pérdida de peso mínima (%)	Pérdida de peso máxima (%)	Pérdida de peso media (%)	Desviación Estándar σ (%)	Coefficiente de variación (%)
700	18,68	19,48	19,18	0,44	2,29
800	18,10	19,48	19,34	0,43	2,23
900	18,10	19,48	19,46	1,86	9,55
1000	19,66	19,48	21,21	1,63	7,71

Tabla 43: Análisis estadístico básico: Pérdida de peso (10 % LTAB)

T (°C)	Pérdida de peso mínima (%)	Pérdida de peso máxima (%)	Pérdida de peso media (%)	Desviación Estándar σ (%)	Coefficiente de variación (%)
700	21,47	22,97	22,22	0,75	3,38
800	22,47	22,97	22,41	1,66	7,41
900	22,47	22,97	22,57	0,19	0,83
1000	22,38	22,97	22,61	0,31	1,38

Tabla 44: Análisis estadístico básico: Pérdida de peso (15 % LTAB)

T (°C)	Pérdida de peso mínima (%)	Pérdida de peso máxima (%)	Pérdida de peso media (%)	Desviación Estándar σ (%)	Coefficiente de variación (%)
700	22,95	24,30	23,78	0,72	3,03
800	22,25	24,30	24,29	0,17	0,72
900	22,25	24,30	22,73	1,00	4,41
1000	22,15	24,30	22,42	0,34	1,50

Tabla 45: Análisis estadístico básico: Pérdida de peso (20 % LTAB)

T (°C)	Pérdida de peso mínima (%)	Pérdida de peso máxima (%)	Pérdida de peso media (%)	Desviación Estándar σ (%)	Coefficiente de variación (%)
700	26,47	29,97	28,76	1,98	6,90
800	28,53	29,97	30,12	2,40	7,96
900	29,43	29,97	30,82	2,07	6,71
1000	29,20	29,97	29,79	0,62	2,07

Los coeficientes de variación de los datos de pérdida de peso son variables entre prototipos fabricados con el mismo porcentaje de LTAB. Cabe indicar que se observó

pérdida de material de los prototipos cerámicos durante el traslado de la bandeja de fabricación al horno, y esto podría ser una causa de errores aleatorios en el método de determinación de la pérdida de peso por cocción. Sin embargo, los resultados obtenidos para la pérdida de peso, poseen coeficientes de variación menores al 29 %, valor típico para la fabricación de ladrillos artesanales tal como se menciona en la sección 2.5.2.

Considerando estas variables estudiadas se realizó el análisis mediante ANOVA de dos factores, con 5 y 4 niveles, con repeticiones. A continuación, en la Tabla 46 se presenta el análisis estadístico de los resultados de Pérdida de peso, según lo descrito en la sección 3.4.9.

Tabla 46: Análisis de la varianza: Pérdida de peso.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
% LTAB	767,70	4	191,92	148,52	2,0E-23	2,61
T Cocción	7,00	3	2,33	1,80	0,1618	2,84
Interacción	21,51	12	1,79	1,39	0,2123	2,00
Dentro del grupo	51,69	40	1,29			
<hr/>						
Total	847,89	59				

Para el factor porcentaje de adición de LTAB el valor calculado de F es mayor al F crítico, por lo cual se rechaza la hipótesis nula (se encuentra una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos) y entonces se observa una influencia del porcentaje de LTAB en la pérdida de peso por cocción.

Para el factor temperatura de cocción el valor calculado de F es menor al F crítico, por lo cual se acepta la hipótesis nula (no existe una diferencia significativa entre los grupos) y entonces no se encuentra una influencia de la T cocción en la en la pérdida de peso por cocción.

Finalmente, el valor calculado de F para la interacción de los factores anteriores, es menor al F crítico, por lo cual no se observa que la pérdida de peso por cocción sea influida por la interacción del porcentaje de LTAB y la temperatura de cocción.

Así como los datos presentados en esta investigación, los autores que se citan en la sección 2.5.2 coinciden que la adición de LTAB aumenta la pérdida de peso, y con respecto a la temperatura de cocción, no hay una tendencia clara, pero se puede observar que mantiene o aumenta levemente el valor de la pérdida de peso por cocción.

Al respecto, cabe indicar que en los prototipos cerámicos de este estudio se observan superficies irregulares, atribuibles a la quema de los componentes orgánicos durante la cocción. Este alto contenido en materia orgánica del lodo se puede inferir por los altos valores de pérdida por calcinación que se detallan en la sección 3.2.1.5.

4.3. Resistencia a la Compresión

La resistencia a la compresión de los prototipos cerámicos se determinó según el procedimiento descrito en la sección 3.4.3. Los resultados para los prototipos fabricados con LTAB se detallan en la Tabla 117, Tabla 118, Tabla 119, Tabla 120, y Tabla 121 del Anexo E. A continuación, se presenta un resumen de los resultados y se realiza una discusión de los mismos de acuerdo a normas y referencias bibliográficas.

En el gráfico de la Figura 106 se presentan los resultados de resistencia característica a la compresión obtenidos del ensayo de los prototipos cerámicos fabricados con 0 %, 5 %, 10 %, 15 % y 20 % de LTAB (una curva para cada porcentaje), y cocidos a 700 °C, 800 °C, 900 °C y 1000 °C.

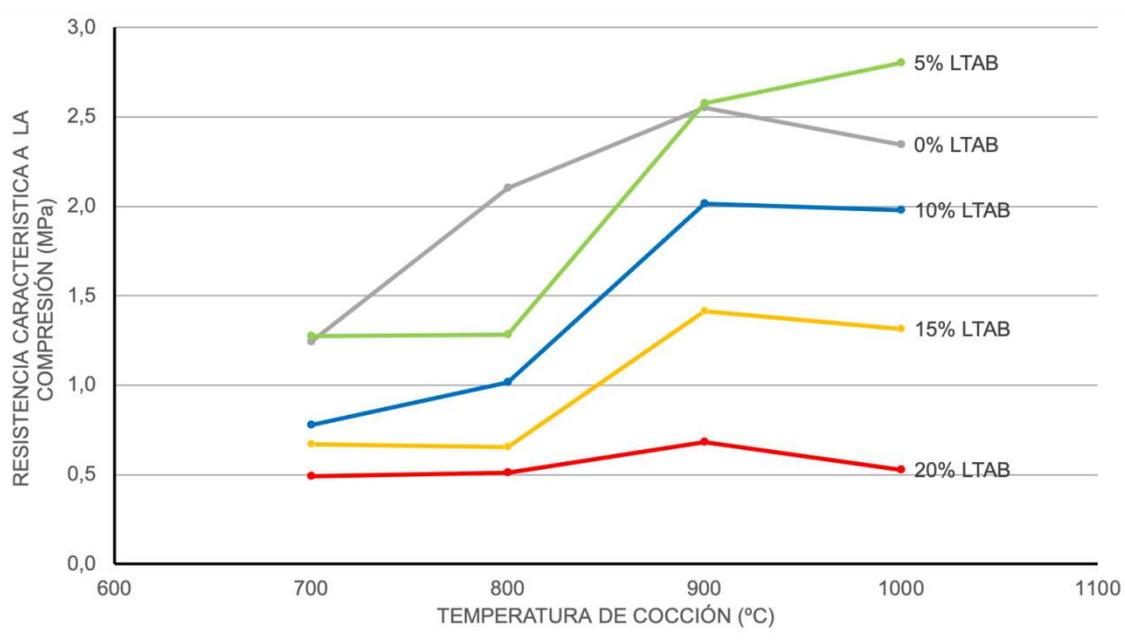


Figura 106: Resistencia característica a la Compresión

En la Figura 106 se observa que, como resultado de la adición de lodo en sustitución de la arcilla (aumentar el porcentaje de LTAB), disminuye la resistencia característica a la compresión de los prototipos cerámicos. Con respecto al efecto de la temperatura de cocción, para iguales porcentajes de LTAB, a mayor temperatura, mayor resistencia a la compresión, aunque se observan algunos apartamientos a esta tendencia.

A continuación, se presenta el análisis estadístico básico para cada una de las series fabricadas. En Tabla 47, Tabla 48, Tabla 49, Tabla 50 y Tabla 51 se detallan los resultados obtenidos con la variación del porcentaje de LTAB adicionado a la mezcla cerámica y las diferentes temperaturas de cocción.

Tabla 47: Análisis estadístico básico: Resistencia a la compresión (0 % LTAB)

T (°C)	Resistencia mínima (MPa)	Resistencia máxima (MPa)	Resistencia media Fcm (MPa)	Desviación Estándar σ (MPa)	Coefficiente de variación cv (%)	Fck (MPa)
700	1,38	1,69	1,51	0,16	10,65	1,24
800	2,13	2,39	2,30	0,12	5,16	2,10
900	2,82	3,60	3,20	0,39	12,23	2,55
1000	2,49	2,83	2,63	0,17	6,63	2,34

Tabla 48: Análisis estadístico básico: Resistencia a la compresión (5 % LTAB)

T (°C)	Resistencia mínima (MPa)	Resistencia máxima (MPa)	Resistencia media Fcm (MPa)	Desviación Estándar σ (MPa)	Coefficiente de variación cv (%)	Fck (MPa)
700	1,30	1,51	1,39	0,07	5,35	1,27
800	1,28	1,52	1,41	0,08	5,71	1,28
900	2,66	2,97	2,79	0,13	4,66	2,57
1000	2,95	3,23	3,05	0,15	5,06	2,80

Tabla 49: Análisis estadístico básico: Resistencia a la compresión (10 % LTAB)

T (°C)	Resistencia mínima (MPa)	Resistencia máxima (MPa)	Resistencia media Fcm (MPa)	Desviación Estándar σ (MPa)	Coefficiente de variación cv (%)	Fck (MPa)
700	0,81	0,98	0,87	0,06	6,84	0,78
800	1,06	1,27	1,16	0,09	7,80	1,01
900	2,11	2,45	2,25	0,14	6,40	2,01
1000	2,19	2,82	2,50	0,31	12,58	1,98

Tabla 50: Análisis estadístico básico: Resistencia a la compresión (15 % LTAB)

T (°C)	Resistencia mínima (MPa)	Resistencia máxima (MPa)	Resistencia media Fcm (MPa)	Desviación Estándar σ (MPa)	Coefficiente de variación cv (%)	Fck (MPa)
700	0,72	0,92	0,81	0,08	10,29	0,67
800	0,68	0,79	0,73	0,05	6,71	0,65
900	1,42	1,61	1,54	0,08	5,12	1,41
1000	1,43	1,73	1,53	0,13	8,60	1,31

Tabla 51: Análisis estadístico básico: Resistencia a la compresión (20 % LTAB)

T (°C)	Resistencia mínima (MPa)	Resistencia máxima (MPa)	Resistencia media Fcm (MPa)	Desviación Estándar σ (MPa)	Coefficiente de variación cv (%)	Fck (MPa)
700	0,51	0,56	0,54	0,03	5,51	0,49
800	0,51	0,56	0,54	0,02	3,19	0,51
900	0,71	0,79	0,75	0,04	5,39	0,68
1000	0,55	0,65	0,61	0,05	8,75	0,53

Los resultados obtenidos para la resistencia a la compresión, poseen coeficientes de variación menores al 29 %, valor típico para la fabricación de ladrillos artesanales tal como menciona en la 3.4.9.

Considerando estas variables estudiadas se realizó el análisis mediante ANOVA de dos factores, con 5 y 4 niveles, con repeticiones. A continuación, en la Tabla 52 se presenta el análisis estadístico de los resultados de Resistencia a la compresión, según lo descrito en la sección 3.4.9.

Tabla 52: Análisis de varianza: Resistencia a la compresión

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
% LTAB	54,15	4	13,54	93,77	5,9E-33	2,46
T Cocción	38,60	3	12,87	89,14	3,8E-28	2,70
Interacción	9,70	12	0,81	5,60	2,9E-07	1,85
Dentro del grupo	14,44	100	0,14			
Total	116,89	119				

Para el factor porcentaje de adición de LTAB el valor calculado de F es mayor al F crítico, por lo cual se rechaza la hipótesis nula (se encuentra una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos) y entonces se observa una influencia del porcentaje LTAB en la resistencia a la compresión.

Para el factor temperatura de cocción el valor calculado de F es menor al F crítico, por lo cual se rechaza la hipótesis nula (se encuentra una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos) y entonces se observa una influencia de la temperatura de cocción en la resistencia a la compresión.

Finalmente, el valor calculado de F para la interacción de los factores anteriores, es mayor al F crítico, por lo cual se observa que la resistencia a la compresión es influida por la interacción del porcentaje LTAB y la temperatura de cocción.

Se analizaron los resultados obtenidos con respecto a valores mínimos o recomendados de resistencia a la compresión en normas de fabricación y calidad de cerámicos, y en la bibliografía de referencia detallada en la sección 2.5.3. Cabe indicar que no existe una norma nacional para este parámetro, por lo tanto, se consultaron normas internacionales. En la Tabla 53 se presenta una síntesis de los valores mínimos o recomendados de resistencia a la compresión para ladrillos macizos en normas consultadas. Además de ya indicadas anteriormente, se incluyen otras normas y criterios citados en la bibliografía de referencia, como la norma ecuatoriana NTE INEN 3049-1 (INEN, 2018), la americana ASTM C216-10 (ASTM, 2010), y los recomendados por la Facultad de Ingeniería (IET, 1998).

Tabla 53: Resistencia a la Compresión en normas internacionales consultadas

NORMA	TIPO	fck MIN (MPa)
IRAM 12566-1: 2005	LADRILLO CARA VISTA O REVESTIDO	4
ABNT NBR 15270-1: 2017	LADRILLO NO ESTRUCTURAL	4
	LADRILLO ESTRUCTURAL	6
NCH 167 + NCH 2123:2003	LADRILLO NO ESTRUCTURAL	4
FING (1998)	LADRILLO MACIZO CLASE A	8
	LADRILLO MACIZO CLASE B	4,5
NCH 169:2001	LADRILLO ESTRUCTURAL CAT I	15
	LADRILLO ESTRUCTURAL CAT II	11
	LADRILLO ESTRUCTURAL CAT III	5
	PIEZA ARCILLA COCINA HD CAT I	10

NORMA	TIPO	fck MIN (MPa)
UNE- EN 772-11: 2011 + AENOR RP 34.01	PIEZA ARCILLA COCINA HD CAT II	22,5
INEN NTE 3049-1: 2018	LADRILLO ESTRUCTURAL	20
	LADRILLO NO ESTRUCTURAL	14
ASTM 216 - 10	LADRILLO CARA VISTA	17,2
NTC 4205-1 : 2009	LADRILLO ESTRUCTURAL	20
NTC 4205-2: 2009	LADRILLO NO ESTRUCTURAL	14
BS 5628-3: 2005 + BS 5628:1	LADRILLO A1 - A2	16,5
	LADRILLO A3	22

Si se considera el valor recomendado por la norma IRAM 12566-1:2005 por ser de aplicación en un país de la región y el más cercano al rango de valores de resistencia a la compresión del conjunto de prototipos, el valor de la resistencia característica mínima debería ser 4 MPa. Ninguno de los prototipos, incluido el de referencia (0 % de LTAB) cumple con esta norma, y están significativamente por debajo. Estos resultados son indicativos de una inadecuada mezcla cerámica, lo que será discutido más adelante.

Cabe indicar que el propósito de este ensayo es determinar cómo y en qué grado los lodos afectan la resistencia a la compresión de los prototipos. En tal sentido, el ensayo no fue diseñado específicamente para comparar los prototipos con productos cerámicos del mercado. Para ello se deberían considerar aspectos tales como las dimensiones del prototipo y su proceso de fabricación. No obstante, es útil tomar como referencia los trabajos académicos y valores reportados de resistencia a la compresión para cerámicos nacionales, que se desarrollaron en la sección 2.2.1, donde obtienen valores variables, algunos de ellos similares a los resultados obtenidos en el presente estudio.

Si bien algunos trabajos reportados en la bibliografía de referencia obtienen resultados significativamente mejores de resistencia a la compresión, el comportamiento de esta propiedad es consistente con lo observado en el presente estudio: disminuye con el porcentaje de lodos, y aumenta con la temperatura de cocción.

En función de los resultados obtenidos y de la bibliografía técnica consultada, la principal causa de lo que ocurre con la resistencia a la compresión de los prototipos cerámicos fabricados en esta investigación, puede asociarse a una mala composición granulométrica de las mezclas cerámicas utilizadas para los prototipos, por lo que se observa una oportunidad de optimización en el proceso de fabricación, considerando los

critérios de Winkler (1954) y posteriores modificaciones. Según se observa en el diagrama de la Figura 107, cualquier mezcla cerámica de la arcilla, LTAB y arena utilizadas en este estudio queda fuera de las zonas recomendadas para productos cerámicos (I a IV). Gráficamente, la composición granulométrica de la mezcla cerámica de todos los prototipos fabricados, incluyendo el de referencia con 0 % de LTAB, queda dentro del triángulo amarillo indicado en esta figura.

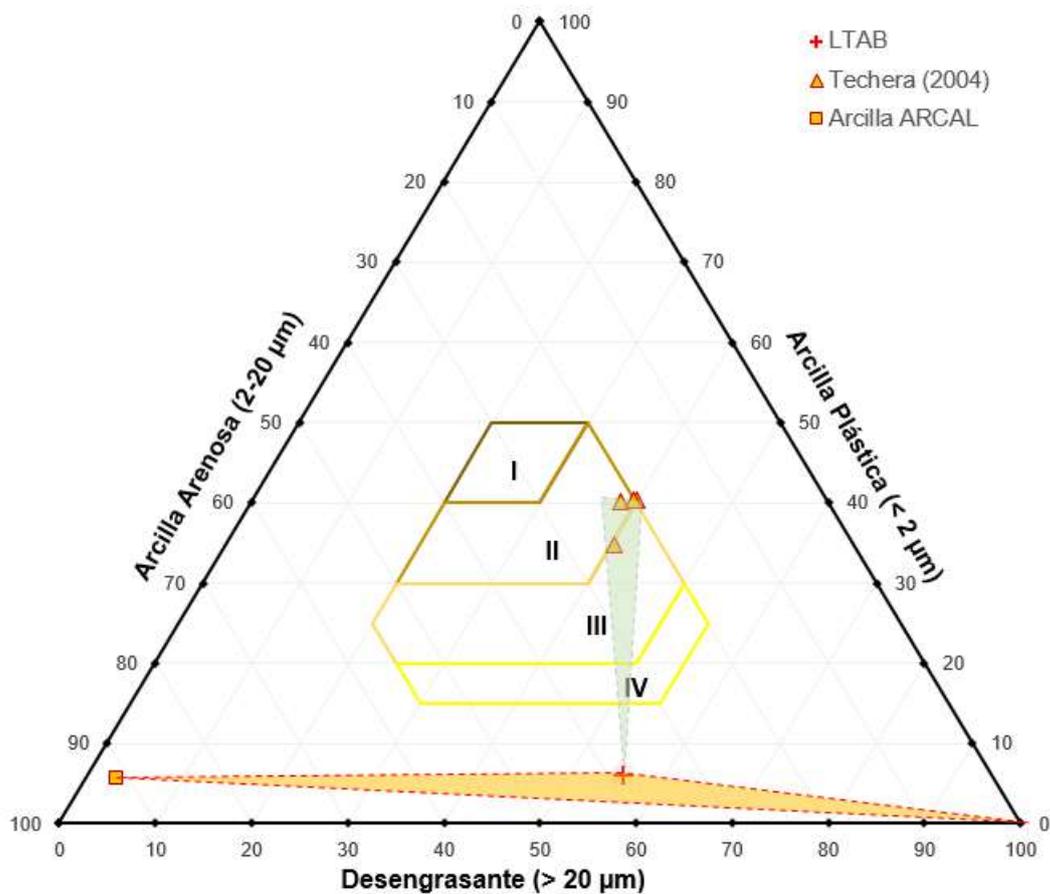


Figura 107: Diagrama de Winkler: prototipos cerámicos y arcillas nacionales

Se realizó el ejercicio de mapear en el diagrama de Winkler las composiciones granulométricas de arcillas nacionales utilizadas en la industria cerámica nacional, según los datos reportados por Techera et al. (2004). Estos datos se identifican en el diagrama de la Figura 107, y corresponden a perfiles de suelo arcilloso, frentes de cantera o acopios de arcilla para la industria cerámica en el departamento de San José. Puede observarse que la composición granulométrica de la arcilla comercial utilizada para este estudio es muy diferente al de las arcillas industriales nacionales, en particular el contenido de granulometría más fina (fracción de arcilla plástica). Además, puede

observarse que una mezcla de los LTAB con estas arcillas nacionales daría una composición granulométrica esperada dentro de los campos II a IV del diagrama de Winkler, o sea, teóricamente apto para estos tipos de productos cerámicos desde el punto de vista granulométrico (ilustrado por el triángulo verde).

En definitiva, a través de este breve análisis se identifica una oportunidad de mejora de las mezclas cerámicas de los prototipos, para futuros estudios, mediante el uso de arcillas industriales nacionales, y la formulación de una mezcla cerámica adecuada de acuerdo a las recomendaciones de Winkler y posteriores modificaciones.

4.4. Contracción volumétrica

La contracción volumétrica total de los prototipos cerámicos se determinó según el procedimiento descrito en la sección 3.4.4. Los resultados para los prototipos fabricados con LTAB se detallan en la Tabla 122, Tabla 123, Tabla 124, Tabla 125 y Tabla 126 del Anexo F. A continuación, se presenta un resumen de los resultados y se realiza una discusión de los mismos de acuerdo a referencias bibliográficas.

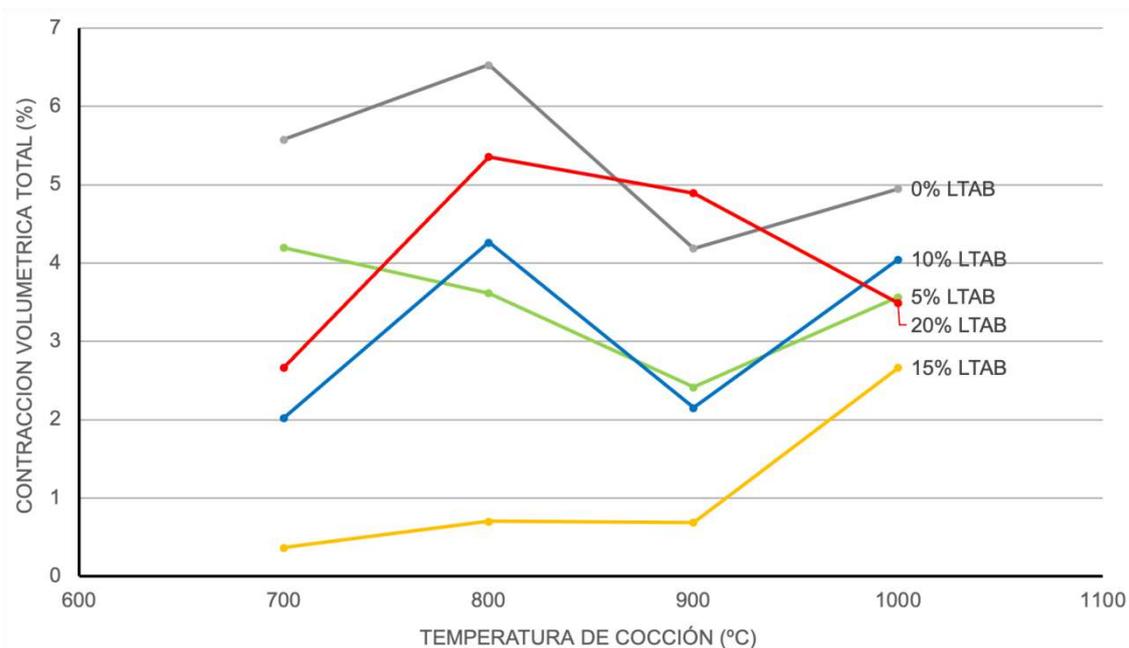


Figura 108: Contracción Volumétrica posterior a la cocción

En la Figura 108 se expresan los resultados del ensayo. En términos generales, se concluye que la contracción volumétrica disminuyó con el porcentaje de adición de

LTAB, en forma gradual, es decir para los prototipos de referencia cocidos a 700 °C, los valores de contracción volumétrica total fueron de 5,58 %, para las adiciones de LTAB los valores alcanzados fueron de 4,20 %, 2,03 %, 0,37 % y 2,67 % para 5 %, 10 %, 15 % y 20 % de LTAB. Para las demás temperaturas, el comportamiento de las series fue similar, excepto la serie con 20 % de adición de LTAB que tuvo un comportamiento anómalo, que pueda explicarse citando a uno de los autores Cremades (2018), que para adiciones de hasta el 15 % la contracción puede deberse a las reacciones del óxido de calcio en el LTAB, pero para adiciones mayores como es en este caso la del 20 %, la contracción es mayor, porque en esta situación el mayor contenido de humedad, no es compensando por la re expansión que tiene lugar durante el proceso de cocción.

La temperatura de cocción es otro parámetro importante que afecta la contracción volumétrica. Así, la proporción de LTAB en la mezcla y la temperatura de cocción son los dos factores claves a controlar para minimizar la contracción en el proceso de cocción.

Durante el secado las partículas de arcilla y LTAB, inicialmente rodeadas por películas de agua, se van cerrando causando la concentración de la masa. La contracción de la mezcla está determinada por la disminución de volumen sufrida en el secado y cochura de las piezas moldeadas; en estos procesos se reducen los espacios porosos intermedios.

Las arcillas grasas contraen más que las magras, a causa de su mayor contenido en partículas esponjables con el agua (FADU, 2020). La contracción prosigue acompañada a la evaporación del agua hasta que llega un momento en que las partículas de arcilla no pueden acercarse más entre sí. El agua evaporada recibe el nombre de agua de contracción para distinguirla del agua que se desprende después en la cocción; una vez perdida esta agua la arcilla no vuelve nunca a adquirir su condición plástica.

El comportamiento de la arcilla al calor depende de su contenido en fundentes (ácido silícico, cal, óxido de hierro, magnesia y álcalis). De la mayor o menor cantidad de estos componentes depende un mayor o menor reblandecimiento de la arcilla, reblandecimiento que, pasando por el estado vitrificado, puede llegar, a la fusión. Las arcillas pobres en fundentes requieren más calor para su cocción que las ricas.

A continuación, se presenta el análisis estadístico básico para cada una de las series fabricadas. En las Tabla 54, Tabla 55, Tabla 56, Tabla 57 y Tabla 58 se detallan los resultados obtenidos con la variación del porcentaje de LTAB adicionado a la mezcla cerámica y las diferentes temperaturas de cocción.

Tabla 54: Análisis estadístico básico: Contracción volumétrica (0 % LTAB)

T (°C)	Contracción volumétrica mínima (%)	Contracción volumétrica máxima (%)	Contracción volumétrica media (%)	Desviación Estándar (%)	Coefficiente de variación (%)
700	5,31	6,39	5,58	0,72	12,95
800	5,66	7,44	6,53	0,89	13,62
900	3,45	5,02	4,19	0,79	18,83
1000	4,26	5,41	4,95	0,61	12,33

Tabla 55: Análisis estadístico básico: Contracción volumétrica (5 % LTAB)

T (°C)	Contracción volumétrica mínima (%)	Contracción volumétrica máxima (%)	Contracción volumétrica media (%)	Desviación Estándar (%)	Coefficiente de variación (%)
700	3,43	3,43	4,20	0,66	15,83
800	3,27	3,91	3,62	0,26	7,30
900	2,33	2,51	2,42	0,13	5,23 (*)
1000	3,35	3,92	3,57	0,25	6,88

(*) A partir del tratamiento de valores espurios únicamente se conservaron dos medidas.

Tabla 56: Análisis estadístico básico: Contracción volumétrica (10 % LTAB)

T (°C)	Contracción volumétrica mínima (%)	Contracción volumétrica máxima (%)	Contracción volumétrica media (%)	Desviación Estándar (%)	Coefficiente de variación (%)
700	1,86	2,25	2,03	0,20	10,02
800	4,16	4,37	4,26	0,15	3,57 (*)
900	1,99	2,32	2,15	0,23	10,74 (*)
1000	3,44	4,37	4,05	0,53	13,09 (*)

(*) A partir del tratamiento de valores espurios únicamente se conservaron dos medidas.

Tabla 57: Análisis estadístico básico: Contracción volumétrica (15 % LTAB)

T (°C)	Contracción volumétrica mínima (%)	Contracción volumétrica máxima (%)	Contracción volumétrica media (%)	Desviación Estándar (%)	Coefficiente de variación (%)
700	0,30	0,42	0,37	0,06	16,66
800	0,65	0,76	0,70	0,06	8,08
900	0,64	0,64	0,69	0,07	10,12 (*)
1000	2,22	3,12	2,67	0,45	16,86

(*) A partir del tratamiento de valores espurios únicamente se conservaron dos medidas.

Tabla 58: Análisis estadístico básico: Contracción volumétrica (20 % LTAB)

T (°C)	Contracción volumétrica mínima (%)	Contracción volumétrica máxima (%)	Contracción volumétrica media (%)	Desviación Estándar (%)	Coefficiente de variación (%)
700	2,35	2,98	2,67	0,31	11,69
800	4,62	5,99	5,36	0,69	12,92
900	4,51	5,23	4,89	0,36	7,40
1000	3,10	3,87	3,49	0,39	11,07

Al respecto de los coeficientes de variación obtenidos, se observa que los prototipos experimentan pérdida de material durante la cocción, resultando en cubos de aristas rugosas y vértices truncados. Esto podría ocasionar un error aleatorio significativo en la medición del volumen final del prototipo, que se realiza a partir de la medición con calibre manual de los ejes del cubo en una de sus caras elegida al azar. A pesar de ello, los resultados obtenidos para la contracción volumétrica poseen coeficientes de variación menores al 29 %, valor típico para la fabricación de ladrillos artesanales tal como se menciona en la 3.4.9.

Considerando estas variables estudiadas se realizó el análisis mediante ANOVA de dos factores, con 5 y 4 niveles, con repeticiones. A continuación, en la Tabla 59 se presenta el análisis estadístico de los resultados de Contracción volumétrica, según lo descrito en la sección 3.4.9.

Tabla 59: Análisis de varianza: Contracción volumétrica.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
% LTAB	295,98	4	74,00	24,20	5,1E-14	2,46
T Cocción	37,05	3	12,35	4,04	0,0093	2,70
Interacción	120,35	12	10,03	3,28	0,0005	1,85
Dentro del grupo	305,71	100	3,06			
Total	759,09	119				

Para el factor porcentaje de adición de LTAB el valor calculado de F es mayor al F crítico, por lo cual se rechaza la hipótesis nula (se encuentra una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos) y entonces se observa una influencia del porcentaje LTAB en la contracción volumétrica.

Para el factor temperatura de cocción el valor calculado de F es mayor al F crítico, por lo cual se rechaza la hipótesis nula (se encuentra una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos) y entonces se observa una influencia de la temperatura de cocción en la contracción volumétrica.

Finalmente, el valor calculado de F para la interacción de los factores anteriores, es mayor al F crítico, por lo cual se observa que la contracción volumétrica es influida por la interacción del porcentaje LTAB y la temperatura de cocción.

Como se puede observar en los resultados de esta investigación, no hay una tendencia clara con respecto a la contracción volumétrica. Algunos de los autores citados en la sección 2.5.4, coinciden que la adición de LTAB aumenta la contracción volumétrica de los prototipos, sin embargo, otros logran menos contracción del cerámico con el aumento de adición de LTAB. Podemos atribuir esto al tipo de lodo con el que se está trabajando, la composición del mismo y su comportamiento durante la cocción del cerámico.

Benlalla (2015), fija el valor límite para un ladrillo de buena calidad, en un valor de contracción inferior al 8 %. Todas las series fabricadas en esta investigación dieron por debajo de este valor.

4.5. Absorción de agua

La absorción de agua de los prototipos cerámicos se determinó mediante tres tipos de ensayos, la succión capilar (tasa inicial y medidas durante 75 min), por el método de la pipeta y por inmersión en agua fría durante 48 horas, todos ellos según los procedimientos descritos en la sección 2.5.5. Los resultados de los ensayos se detallan a continuación y se realiza una discusión de los mismos de acuerdo a normas y referencias bibliográficas.

4.5.1. Succión Capilar

En el gráfico de la Figura 109 se presentan los promedios de la tasa inicial (durante 1 minuto) de absorción de agua por succión capilar para los prototipos cerámicos fabricados con 0 % (referencia), 5 %, 10 %, 15 % y 20 % de adición de LTAB en sustitución de arcilla, en función de las temperaturas de cocción utilizadas para cada serie. Cada serie corresponde a una curva del gráfico. Los resultados obtenidos para cada prototipo, y los promedios utilizados en este gráfico, se presentan en la Tabla 127 a la Tabla 136 del Anexo.

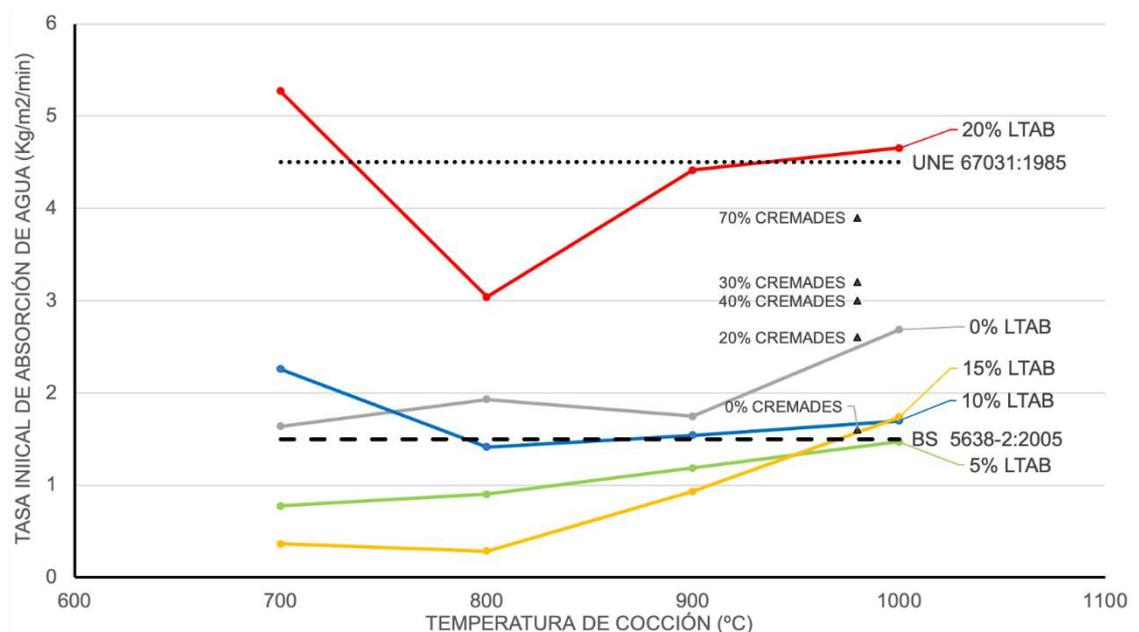


Figura 109: Tasa inicial de Absorción de Agua por Succión Capilar

Los prototipos cerámicos con adición de 5 %, 10 % y 15 % presentan en general promedios de tasa inicial de absorción de agua menores a los de la referencia a la misma temperatura. La serie con adición del 20 % de LTAB presenta promedios visiblemente superiores a todas las demás series. No se observa una correlación clara entre el porcentaje de LTAB y la tasa inicial de absorción de agua.

No obstante, se observa que la medida de este parámetro está sujeta a una significativa dispersión; se obtuvieron resultados muy diferentes para prototipos fabricados con el mismo porcentaje de LTAB y cocidos a la misma temperatura. Para ilustrar esta dispersión, se presentan los valores máximos y mínimos, y la desviación estándar.

Con respecto a la influencia de la temperatura de cocción, se observa una tendencia general de aumento de la tasa inicial de absorción de agua a mayores temperaturas.

A continuación, se presenta el análisis estadístico básico para cada una de las series fabricadas. En las Tabla 60, Tabla 61, Tabla 62, Tabla 63 y Tabla 64 se detallan los resultados obtenidos con la variación del porcentaje LTAB adicionado a la mezcla cerámica y las diferentes temperaturas de cocción.

Tabla 60: Análisis estadístico básico: Tasa inicial - succión capilar (0 % LTAB)

T (°C)	Tasa inicial mínima (kg/m ² /min)	Tasa inicial máxima (kg/m ² /min)	Tasa inicial Media (kg/m ² /min)	Desviación Estándar σ (kg/m ² /min)	Coefficiente de variación cv (%)
700	1,51	1,74	1,64	0,20	11,96
800	1,80	2,21	1,93	0,20	10,14
900	1,62	1,96	1,75	0,13	7,38
1000	2,61	2,79	2,68	0,08	2,96

Tabla 61: Análisis estadístico básico: Tasa inicial - succión capilar (5 % LTAB)

T (°C)	Tasa inicial mínima (kg/m ² /min)	Tasa inicial máxima (kg/m ² /min)	Tasa inicial Media (kg/m ² /min)	Desviación Estándar σ (kg/m ² /min)	Coefficiente de variación cv (%)
700	0,75	0,79	0,77	0,03	3,37 (*)
800	0,83	0,98	0,90	0,08	8,46
900	1,12	1,25	1,19	0,09	7,74 (*)
1000	1,40	1,54	1,47	0,09	6,35 (*)

(*) A partir del tratamiento de valores espurios únicamente se conservaron dos medidas.

Tabla 62: Análisis estadístico básico: Tasa inicial - succión capilar (10 % LTAB)

T (°C)	Tasa inicial mínima (kg/m ² /min)	Tasa inicial máxima (kg/m ² /min)	Tasa inicial Media (kg/m ² /min)	Desviación Estándar σ (kg/m ² /min)	Coefficiente de variación cv (%)
700	1,74	2,77	2,26	0,73	32,26 (*)
800	1,24	1,58	1,41	0,24	17,12 (*)
900	1,45	1,63	1,54	0,13	8,34 (*)
1000	1,63	1,76	1,70	0,09	5,51 (*)

(*) A partir del tratamiento de valores espurios únicamente se conservaron dos medidas.

Tabla 63: Análisis estadístico básico: Tasa inicial - succión capilar (15 % LTAB)

T (°C)	Tasa inicial mínima (kg/m ² /min)	Tasa inicial máxima (kg/m ² /min)	Tasa inicial Media (kg/m ² /min)	Desviación Estándar σ (kg/m ² /min)	Coefficiente de variación cv (%)
700	0,23	0,50	0,36	0,19	51,04 (*)
800	0,24	0,33	0,28	0,06	20,69 (*)
900	0,91	0,95	0,93	0,03	2,94 (*)
1000	1,63	1,84	1,73	0,15	8,85 (*)

(*) A partir del tratamiento de valores espurios únicamente se conservaron dos medidas.

Tabla 64: Análisis estadístico básico: Tasa inicial - succión capilar (20 % LTAB)

T (°C)	Tasa inicial mínima (kg/m ² /min)	Tasa inicial máxima (kg/m ² /min)	Tasa inicial Media (kg/m ² /min)	Desviación Estándar σ (kg/m ² /min)	Coefficiente de variación cv (%)
700	5,08	5,46	5,27	0,27	5,14(*)
800	2,82	3,26	3,04	0,31	10,20(*)
900	3,88	4,95	4,42	0,76	17,23(*)
1000	4,20	5,11	4,65	0,65	13,87(*)

(*) A partir del tratamiento de valores espurios únicamente se conservaron dos medidas.

La confiabilidad de los datos de tasa inicial de absorción de agua es variable entre prototipos fabricados con el mismo porcentaje LTAB. En su mayoría se encuentran dentro del rango típico de fabricación de ladrillo artesanal, tal como menciona en la 3.4.9, con un cv < 29 %. Excepto dos valores, correspondientes a los fabricados con 10 % LTAB y 15 % LTAB cocidos a 700 °C, que presentan coeficientes de variación superiores a dicho criterio. Sin embargo, se observa una tendencia de valores más confiables, con

coeficientes de variación más bajos a mayor temperatura (con diferente porcentaje de LTAB).

Cabe indicar que, durante la medición de esta propiedad según el método que se detalla en la sección 3.4.5, se observó que el prototipo cerámico pierde un poco de material durante el ensayo (sobre el algodón se observan partículas de material), y esto puede influir en el peso del prototipo, y en la variabilidad de los resultados de absorción a partir de esas medidas de peso.

Considerando estas variables estudiadas se realizó el análisis mediante ANOVA de dos factores, con 5 y 4 niveles, con repeticiones. A continuación, en la Tabla 65 se presenta el análisis estadístico de los resultados de Succión Capilar, según lo descrito en la sección 3.4.9.

Tabla 65: Análisis de la varianza: Absorción de agua por succión capilar.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
% LTAB	7079,04	4	1769,76	379,09	3,24009E-31	2,61
T Cocción	165,89	3	55,30	11,84	1,08862E-05	2,84
Interacción	387,83	12	32,32	6,92	1,44861E-06	2,00
Dentro del grupo	186,74	40	4,67			
Total	7819,50	59				

Para el factor porcentaje de adición de LTAB el valor calculado de F es mayor al F crítico, por lo cual se rechaza la hipótesis nula (se encuentra una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos) y entonces se observa una influencia del porcentaje de LTAB en la absorción de agua por succión capilar.

Para el factor temperatura de cocción el valor calculado de F es mayor al F crítico, por lo cual se rechaza la hipótesis nula (se encuentra una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos) y entonces se observa una influencia de la temperatura de cocción en la absorción de agua por succión capilar.

Finalmente, el valor calculado de F para la interacción de los factores anteriores, es mayor al F crítico, por lo cual se observa que la absorción de agua por succión capilar es influida por la interacción del porcentaje de LTAB y la temperatura de cocción.

Para analizar los resultados obtenidos, se compararon respecto a valores recomendados en normas de calidad de cerámicos, y en la bibliografía de referencia desarrollada en la sección 2.5.5.

Tal como se menciona anteriormente, no existe una norma nacional para este parámetro. La norma británica BS 5628-2:2005 (BSi, 2005b) no establece valores máximos de tasa inicial de absorción de agua por succión capilar, pero recomienda humedecer el ladrillo previo a su colocación cuando este parámetro supera 1,5 kg/m²/min. Algunos autores, establecen un valor recomendado de 2 kg/m²/min en base a esta norma.

La mayor parte de los valores reportados por esta investigación excepto para una adición del 20 % de LTAB, están por debajo de 4,5 kg/m²/min, valor límite por la norma UNE 67031: 1985, luego sustituida por la UNE-EN 772-11:2001 (AENOR, 2011a)).

En cuanto a los valores absolutos reportados por los autores, las tasas iniciales de absorción de agua son del mismo orden de magnitud, entre 0 y 8 kg/m²/min, aunque menores para similar temperatura y concentración de lodos.

En síntesis, las tendencias reportadas por los autores, son concordantes con las encontradas en el presente estudio, a medida que aumenta el porcentaje de lodos en el cerámico, aumenta la tasa inicial de absorción de agua. Sin embargo, con respecto a la temperatura de cocción, algunos autores presentan una disminución de la tasa inicial de absorción de agua con el incremento de la temperatura, comportamiento opuesto al observado en el presente estudio. Cabe destacar que se utilizan temperaturas de cocción mayores.

El ensayo de succión capilar se continuó hasta los 75 minutos para analizar el comportamiento en el tiempo. En el Anexo se presentan los gráficos de este parámetro con respecto al tiempo para las 5 series de concentración de LTAB y las 4 temperaturas de cocción Figura 124, Figura 125, Figura 126 y Figura 127 . Tanto en estos gráficos como en las tablas de datos del Anexo, se observa que en general, a 75 minutos o

menos tiempo de ensayo, la masa del prototipo permanece constante, lo que indica que se llegó a la saturación de agua del prototipo.

Para ilustrar los valores de succión de agua de los prototipos en condiciones de saturación de agua, en el gráfico de la Figura 110 se presentan las medidas de absorción de agua por succión capilar a los 75 minutos de ensayo, para los prototipos cerámicos fabricados con 0 % (referencia), 5 %, 10 %, 15 % y 20 % de adición de LTAB, en función de las temperaturas de cocción utilizadas para cada serie. En este caso se observa un comportamiento similar al de la tasa inicial de la Figura 109: a mayor temperatura de cocción, y en general a mayor porcentaje de lodo, se tienen valores de absorción de agua más altos.

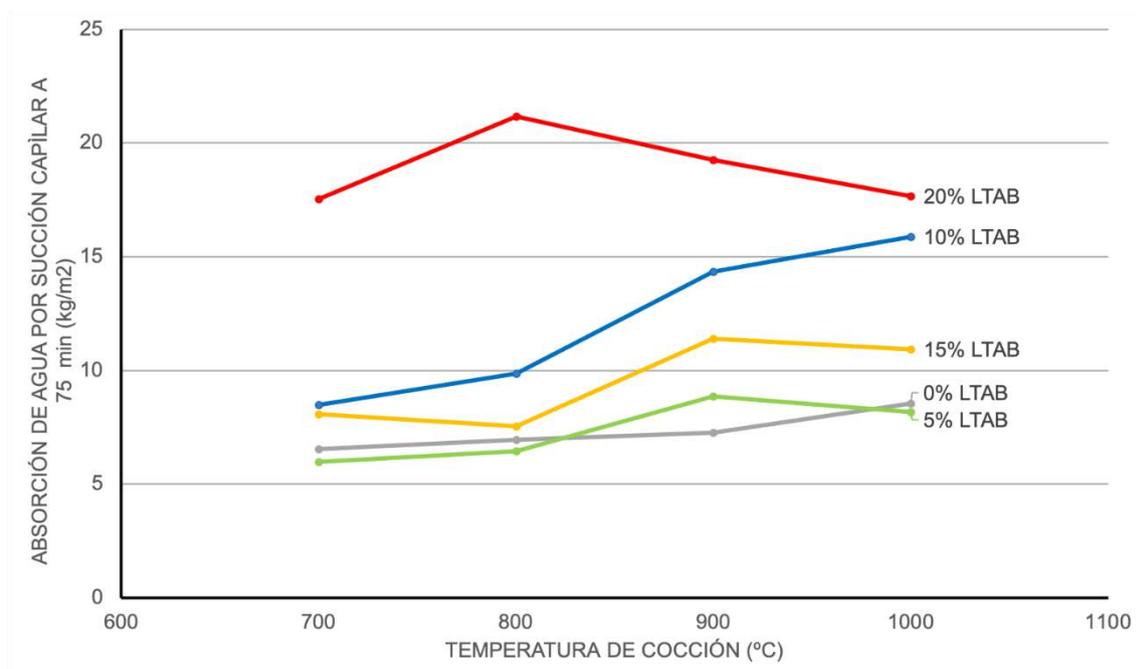


Figura 110: Succión capilar a $t = 75$ min. (en condiciones de saturación de agua)

4.5.2. Método de la Pipeta

En el gráfico de la Figura 111 se presentan los resultados del ensayo de absorción de agua por el método de la pipeta, según procedimiento descrito en la sección 3.4.5, para los prototipos cerámicos fabricados con 5 %, 10 %, 15 % y 20 % de LTAB, y cocidos a 700 °C. Los resultados obtenidos para todos los prototipos cocidos a distintas temperaturas se presentan en la Tabla 137 a la Tabla 140 del Anexo G.

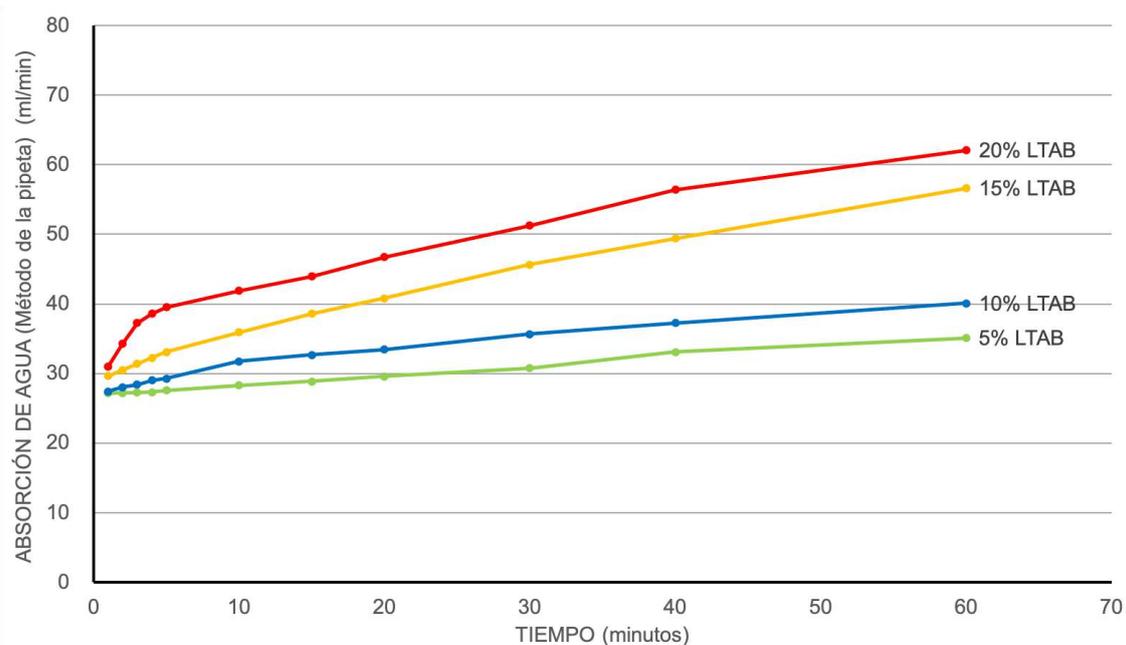


Figura 111: Absorción de Agua por Método de la Pipeta (700 °C)

En términos generales los resultados muestran una rápida absorción de agua en los primeros 5 minutos del ensayo, seguido por una velocidad de absorción más o menos constante, llegando en algunos casos a saturación del prototipo antes de la finalización del ensayo a los 60 minutos (se detecta por presencia de agua en la balanza, que escurre del prototipo ensayado). A la vez, se observa una tendencia de mayor absorción de agua (al mismo tiempo de ensayo) a mayor concentración de LTAB. Ambas observaciones son coherentes con los resultados obtenidos por los otros métodos de absorción de agua (secciones 4.5.1 y 4.5.3).

A continuación, se presenta el análisis estadístico básico para cada una de las series fabricadas. En la Tabla 66, Tabla 67, Tabla 68 y Tabla 69 se detallan los resultados obtenidos con la variación del porcentaje de LTAB adicionado a la mezcla cerámica y las diferentes temperaturas de cocción.

Tabla 66: Análisis estadístico básico: Absorción (método de la pipeta) (5 % LTAB)

T (°C)	Absorción mínima (l/min)	Absorción máxima (l/min)	Absorción media (l/min)	Desviación Estándar σ (l/min)	Coefficiente de variación %
700	34,28	35,90	35,09	1,15	3,26(*)
800	55,27	58,22	56,75	2,09	3,68(*)
900	54,25	58,90	56,58	3,29	5,81(*)
1000	55,40	60,37	57,89	3,51	6,07(*)

(*) A partir del tratamiento de valores espurios únicamente se conservaron dos medidas.

Tabla 67: Análisis estadístico básico: Absorción (método de la pipeta) (10 % LTAB)

T (°C)	Absorción mínima (l/min)	Absorción máxima (l/min)	Absorción media (l/min)	Desviación Estándar σ (l/min)	Coefficiente de variación %
700	37,40	42,80	40,10	3,82	9,52(*)
800	42,20	43,00	42,60	0,57	1,33(*)
900	56,20	62,80	59,53	3,30	5,54
1000	79,90	84,10	82,00	2,97	3,62(*)

(*) A partir del tratamiento de valores espurios únicamente se conservaron dos medidas.

Tabla 68: Análisis estadístico básico: Absorción (método de la pipeta) (15 % LTAB)

T (°C)	Absorción mínima (l/min)	Absorción máxima (l/min)	Absorción media (l/min)	Desviación Estándar σ (l/min)	Coefficiente de variación %
700	56,20	57,00	56,60	0,40	0,71
800	51,30	55,10	53,20	2,69	5,05(*)
900	65,30	67,80	66,27	1,34	2,03
1000	61,30	63,80	62,90	1,39	2,21

(*) A partir del tratamiento de valores espurios únicamente se conservaron dos medidas.

Tabla 69: Análisis estadístico básico: Absorción (método de la pipeta) (20 % LTAB)

T (°C)	Absorción mínima (l/min)	Absorción máxima (l/min)	Absorción media (l/min)	Desviación Estándar σ (l/min)	Coefficiente de variación %
700	59,80	64,33	62,07	3,20	5,16(*)
800	65,40	72,75	69,28	3,69	5,33
900	73,50	76,40	74,67	1,53	2,05
1000	70,00	78,20	74,83	4,29	5,74

(*) A partir del tratamiento de valores espurios únicamente se conservaron dos medidas.

El coeficiente de variación es diferente entre prototipos fabricados con el mismo % LTAB, sin embargo los resultados obtenidos para absorción de agua por el método de la pipeta, poseen coeficientes de variación menores al 29 %, valor típico para la fabricación de ladrillos artesanales tal como se menciona en la sección 2.5.5.

Cabe indicar que, la variabilidad de este ensayo, puede explicarse por la composición del cuerpo cerámico, la no uniformidad de sus caras. La superficie donde se fija la pipeta para el ensayo, varía según el prototipo cerámico.

Considerando estas variables estudiadas se realizó el análisis mediante ANOVA de dos factores, con 5 y 4 niveles, con repeticiones. A continuación, en la Tabla 70 se presenta el análisis estadístico de los resultados de absorción de agua por método de la pipeta, según lo descrito en la sección 3.4.9.

Tabla 70: Análisis de la varianza: Absorción (método de la pipeta)

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
% LTAB	313,87	3,00	104,62	1,90	0,1493	2,90
T Cocción	1358,93	3,00	452,98	8,23	0,0003	2,90
Interacción	808,99	9,00	89,89	1,63	0,1476	2,19
Dentro del grupo	1760,90	32,00	55,03			
Total	4242,68	47,00				

Para el factor porcentaje de adición de LTAB el valor calculado de F es menor al F crítico, por lo cual se acepta la hipótesis nula (no se encuentra una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos) y entonces se observa que no hay una influencia del porcentaje de LTAB en la absorción de agua por succión capilar.

Para el factor temperatura de cocción el valor calculado de F es mayor al F crítico, por lo cual se rechaza la hipótesis nula (se encuentra una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos) y entonces se observa una influencia de la temperatura de cocción en la absorción de agua por succión capilar.

Finalmente, el valor calculado de F para la interacción de los factores anteriores, es menor al F crítico, por lo cual se observa que la absorción de agua por succión capilar no es influida por la interacción del porcentaje de LTAB y la temperatura de cocción.

No se reportan datos sobre esta propiedad en la bibliografía de referencia para la fabricación de cerámicos a partir de LTAB.

4.5.3. Inmersión en agua fría

En el gráfico de la Figura 112 se presentan resultados de la absorción de agua por inmersión en agua fría durante 48 horas para los prototipos cerámicos fabricados con 0 % (referencia), 5 %, 10 %, 15 % y 20 % de adición de LTAB, en función de las temperaturas de cocción utilizadas para cada serie. Cada serie de porcentaje de LTAB corresponde a una curva del gráfico, y el valor puntual representa el promedio aritmético de la absorción para cada porcentaje de LTAB, cocido a una determinada temperatura. Los resultados obtenidos para todos los prototipos se presentan en la Tabla 141 a la Tabla 145 del Anexo G.

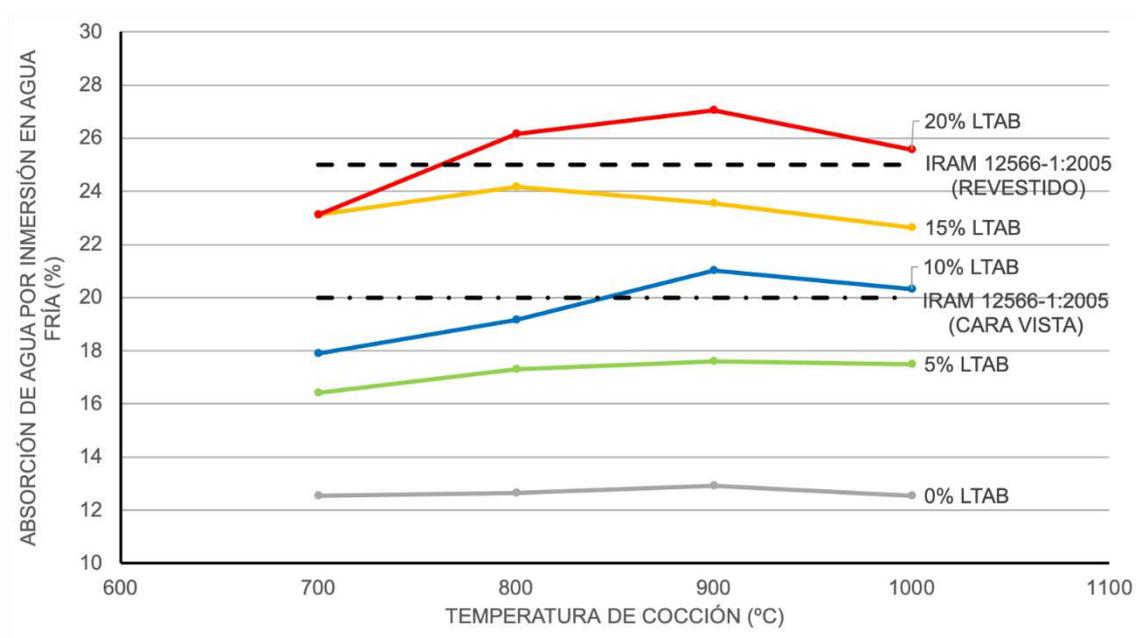


Figura 112: Absorción de Agua por Inmersión durante 48 horas

En el gráfico se observa que, como resultado de la adición de lodo en sustitución de la arcilla, al aumentar el porcentaje de LTAB, aumenta la absorción de agua por este método. Con respecto al efecto de la temperatura de cocción, la tendencia parece ser similar hasta los 900 °C, o sea que en general aumenta la absorción de agua hasta dicha temperatura. Asimismo, se observa una disminución de la absorción de agua entre 900 y 1000 °C para los prototipos con 10 %, 15 % y 20 % de LTAB.

Para analizar los resultados obtenidos, se compararon respecto a valores recomendados en normas de fabricación y calidad de cerámicos, y con los datos reportados en la bibliografía de referencia desarrollada en la sección 2.5.3. Cabe indicar que no existe una norma nacional para este parámetro, así que se indican normas internacionales. En la Tabla 71, se presenta una síntesis de los valores máximos de absorción de agua presentados en las distintas normas. Se agregan otras normas de aplicación no indicadas anteriormente, pero citadas por la bibliografía de referencia: el conjunto de normas para materiales de construcción en Reino Unido BS 5628-1:2005 (BSi, 2005a), BS 5628-2:2005 (BSi, 2005b) y BS 5628-3:2005 (BSi, 2005c), la certificación de materiales de arcilla para la construcción RP 34.01 (AENOR, 2015), y las norma brasileras para ladrillos cerámicos ABNT NBR 15270-1 (ABNT, 2005a) y ABNT NBR 15270-2 (ABNT, 2005b), las normas colombianas para materiales de arcilla cocida NTC 4205-1 (ICONTEC, 2009a) y NTC 4205-2 (ICONTEC, 2009b), la norma técnica ecuatoriana para ladrillos cerámicos INEN NTE 3049-1:2019 (INEN, 2019), y las normas técnicas chilenas para ladrillos cerámicos NCh 167:2001 (INN, 2001a), NCh 169:2001 (INN, 2001b) y NCh 2123:2003 (INN, 2003).

Tabla 71: Valores máximos de absorción en normas internacionales revisadas

NORMA	DENOMINACIÓN	ABSORCIÓN MÁXIMA (%)
BS 5628-1:2005 + BS 5628-2:2005 + BS 5628-3:2005	Ladrillo Interior	4.5
	Ladrillo Exterior	7
UNE-EN 772-11:2011 + AENOR RP 34.01	Pieza Arcilla HD Cat I	6
	Pieza Arcilla HD Cat II	17
ABNT NBR 15270-1:2005	Ladrillo No Estructural	8 a 25
NTC 4205-1:2009	Ladrillo Estructural	13
NTC 4205-2:2009	Ladrillo No Estructural	17
INEN NTE 3049-1:2019	Ladrillo Estructural	13
	Ladrillo No Estructural	17
NCh 169:2001	Ladrillo Estructural Cat I	14
	Ladrillo Estructural Cat II	16
	Ladrillo Estructural Cat III	18
IRAM 12566-1: 2005	Ladrillo Cara Vista	20
	Ladrillo Para Revestir	25
NCh 167:2001 + NCh 2123:2003	Ladrillo No Estructural	22

Para la discusión de los resultados se adoptan los valores recomendado por la norma IRAM 12566-1:2005 (IRAM, 2005), por ser de aplicación en un país de la región, y se agregan estos valores en la Figura 112 (Ladrillo Cara Vista: 20 %, Ladrillo Para Revestir: 25 %).

La serie fabricada con un 5 % de LTAB, así como la referencia, cumple con el valor máximo más restrictivo definido por la norma IRAM 12566-1:2005, correspondiente a ladrillos cerámicos cara vista, expuestos a la intemperie. Presentaron valores de absorción de agua menor al 20 % para las 4 temperaturas de cocción. En cuanto a las series con 10 % y 15 % de LTAB, cumplen con el valor máximo de la norma para ladrillos revestidos, con valores entre 20 % y 25 % de absorción. En cambio, la serie con 20 % de LTAB cumple con dicho máximo únicamente para los prototipos cocidos a 700 °C, mientras que, a temperaturas mayores, supera los valores máximos.

A continuación, se presenta el análisis estadístico básico para cada una de las series fabricadas. En las Tabla 72, Tabla 73, Tabla 74, Tabla 75 y Tabla 76 se detallan los resultados obtenidos con la variación del porcentaje de LTAB adicionado a la mezcla cerámica y las diferentes temperaturas de cocción.

Tabla 72: Análisis estadístico básico: Absorción (inmersión) (0 % LTAB)

T (°C)	Absorción mínima (%)	Absorción máxima (%)	Absorción media (%)	Desviación Estándar σ (%)	Coefficiente de variación (%)
700	12,49	12,60	12,55	0,08	0,62
800	12,54	12,75	12,64	0,15	1,16
900	12,91	12,95	12,93	0,03	0,24
1000	12,51	12,60	12,55	0,06	0,50

Tabla 73: Análisis estadístico básico: Absorción (inmersión) (5 % LTAB)

T (°C)	Absorción mínima (%)	Absorción máxima (%)	Absorción media (%)	Desviación Estándar σ (%)	Coefficiente de variación (%)
700	16,06	16,75	16,42	0,34	2,10
800	16,67	17,74	17,31	0,57	3,28
900	17,43	17,85	17,59	0,23	1,29
1000	17,19	17,67	17,50	0,27	1,54

Tabla 74: Análisis estadístico básico: Absorción (inmersión) (10 % LTAB)

T (°C)	Absorción mínima (%)	Absorción máxima (%)	Absorción media (%)	Desviación Estándar σ (%)	Coefficiente de variación (%)
700	17,78	18,02	17,90	0,12	0,65
800	18,63	19,82	19,17	0,61	3,17
900	20,67	21,44	21,01	0,39	1,85
1000	20,11	20,51	20,33	0,20	1,01

Tabla 75: Análisis estadístico básico: Absorción (inmersión) (15 % LTAB)

T (°C)	Absorción mínima (%)	Absorción máxima (%)	Absorción media (%)	Desviación Estándar σ (%)	Coefficiente de variación (%)
700	22,37	23,61	23,11	0,65	2,82
800	24,00	24,49	24,18	0,28	1,14
900	23,45	23,69	23,54	0,13	0,55
1000	22,48	22,75	22,63	0,14	0,60

Tabla 76: Análisis estadístico básico: Absorción (inmersión) (20 % LTAB)

T (°C)	Absorción mínima (%)	Absorción máxima (%)	Absorción media (%)	Desviación Estándar σ (%)	Coefficiente de variación (%)
700	24,58	27,35	25,54	1,56	6,11
800	23,91	28,49	26,16	2,29	8,76
900	24,24	28,75	27,05	2,45	9,06
1000	23,81	26,75	25,57	1,56	6,10

Los coeficientes de variación de esta propiedad son diferentes entre prototipos fabricados con distinto porcentaje de LTAB. Para los prototipos fabricados sin adición de LTAB (0 %), y con adición del 5 %, 10 % y 15 % de LTAB, los coeficientes de variación relativamente bajos ($cv < 5 \%$). Sin embargo, para los prototipos fabricados con adición del 20 % de LTAB, los coeficientes de variación resultan mayores ($cv < 10 \%$). Esta variabilidad puede explicarse por una menor compacidad y homogeneidad en la masa cerámica, con respecto a los cerámicos con menor porcentaje de LTAB. A pesar de esto, todos los resultados obtenidos para la absorción de agua por inmersión, poseen coeficientes de variación menores al 29 %, valor típico para la fabricación de ladrillos artesanales tal como se menciona en la sección 2.5.5.

Considerando estas variables estudiadas se realizó el análisis mediante ANOVA de dos factores, con 5 y 4 niveles, con repeticiones. A continuación, en la Tabla 77 se presenta el análisis estadístico de los resultados de absorción de agua por inmersión, según lo descrito en la sección 3.4.9 .

Tabla 77: Análisis de la varianza: Absorción por inmersión en agua fría.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
% LTAB	1319,54	4	329,88	370,19	5,14E-31	2,61
T Cocción	13,38	3	4,46	5,00	0,0049	2,84
Interacción	14,68	12	1,22	1,37	0,2188	2,00
Dentro del grupo	35,65	40	0,89			
Total	1383,25	59				

Para el factor porcentaje de adición de LTAB el valor calculado de F es mayor al F crítico, por lo cual se rechaza la hipótesis nula (se encuentra una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos) y entonces se observa que hay una influencia del porcentaje de LTAB en la absorción de agua por inmersión en agua fría.

Para el factor temperatura de cocción el valor calculado de F es mayor al F crítico, por lo cual se rechaza la hipótesis nula (se encuentra una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos) y entonces se observa una influencia de la temperatura de cocción en la absorción de agua por inmersión en agua fría.

Finalmente, el valor calculado de F para la interacción de los factores anteriores, es menor al F crítico, por lo cual se observa que la absorción de agua por inmersión en agua fría no es influida por la interacción del porcentaje de LTAB y la temperatura de cocción.

En la bibliografía consultada y citada en la sección 2.5.5, se presentan valores de absorción en el mismo orden que los obtenidos en el presente estudio, y los autores coinciden en que el aumento del porcentaje de lodo provoca un aumento de la absorción de agua. En cuanto al efecto de la temperatura de cocción, se reporta una disminución

de la absorción con la temperatura cuando se comienzan a observar los efectos de la sinterización en la estructura del cerámico (aproximadamente a 1000 °C). Varios autores comparten que la absorción de agua es un factor clave que afecta la durabilidad del ladrillo; cuanto menor la absorción, mayor la resistencia del ladrillo a los factores climáticos y su durabilidad esperada.

En general, la absorción de agua de los prototipos cerámicos por los 3 métodos (succión capilar, método de la pipeta e inmersión en agua fría), se observó un comportamiento similar: la absorción de agua aumenta con el porcentaje de lodos, y disminuye con la temperatura de cocción, lo cual es concordante con lo reportado en la bibliografía de referencia anteriormente detallada. Esta propiedad es afectada por la composición química y mineral del lodo, que a su vez afecta la composición de la mezcla cerámica. Componentes típicos del lodo, como la materia orgánica y la calcita, tienden a aumentar la porosidad efectiva del ladrillo porque se queman durante la cocción y dejan huecos y grietas en la estructura del material. El contenido de sílice también puede tener un efecto, porque influye en los procesos de sinterización (que, a su vez, reducen la porosidad efectiva). Los prototipos con 5 % y 10 % de LTAB cumplen con la norma IRAM 12566-1:2005 de absorción por inmersión en agua fría para ladrillo visto sin revestir (≤ 20 %), mientras que los prototipos con 15 % de LTAB cumplen con dicha norma para ladrillo revestido (≤ 25 %). A la vez, los prototipos con 5 %, 10 % y 15 % de LTAB cumplen con la norma UNE-EN 772-11:2011, de tasa inicial de absorción por succión capilar ($\leq 4,5$ kg/m²/min).

4.6. Porosidad

La porosidad de los prototipos cerámicos se determinó según el procedimiento descrito en la sección 3.4.6. Los resultados para los prototipos fabricados con LTAB se detallan en la Tabla 146 a la Tabla 150 del Anexo H. A continuación, se presenta un resumen de los resultados y se realiza una discusión de los mismos de acuerdo a referencias bibliográficas.

En la Figura 113 se grafica los resultados obtenidos del ensayo. La adición de LTAB en sustitución de arcilla en la fabricación de los prototipos cerámicos, llevó a un aumento de la porosidad en forma gradual al porcentaje de adición. Los valores promedios de la referencia, obtenidos a 1000 °C, fueron de 22,5 %, mientras que, para la adición de 5

%, 10 %, 15 % y 20 % los valores promedios alcanzados fueron de 30,07 %; 33,14 %, 35,26 % y 37,94 % respectivamente.

Los datos reportados son concordantes de lo descrito en el punto anterior, y se puede concluir que la porosidad aumenta al disminuir la densidad aparente.

En lo que refiere a la variación con respecto a la temperatura, no hay cambios significativos. Esto podía explicarse por la selección de las temperaturas de cocción, tal como citaba Teixeira (2011), que la variación abrupta se produce a temperaturas por encima de los 1000 °C.

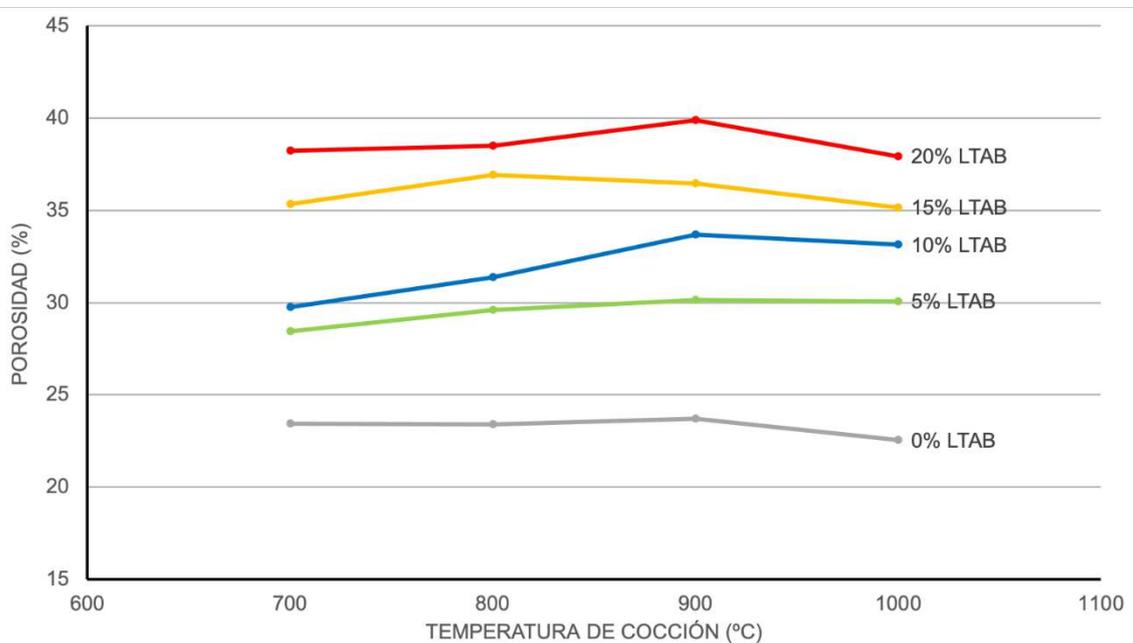


Figura 113: Porosidad de los prototipos cerámicos

A continuación, se presenta el análisis estadístico básico para cada una de las series fabricadas. En las Tabla 78, Tabla 79, Tabla 80, Tabla 81 y Tabla 82 se detallan los resultados obtenidos con la variación del porcentaje de LTAB adicionado a la mezcla cerámica y las diferentes temperaturas de cocción.

Tabla 78: Análisis estadístico básico: Porosidad (0 % LTAB)

T (°C)	Porosidad mínima (%)	Porosidad máxima (%)	Porosidad media (%)	Desviación Estándar σ (%)	Coefficiente de variación (%)
700	23,44	23,45	23,45	0,01	0,05
800	23,23	23,54	23,38	0,22	0,95
900	23,56	23,83	23,70	0,19	0,81
1000	22,50	22,60	22,55	0,07	0,29

Tabla 79: Análisis estadístico básico: Porosidad (5 % LTAB)

T (°C)	Porosidad mínima (%)	Porosidad máxima (%)	Porosidad media (%)	Desviación Estándar σ (%)	Coefficiente de variación (%)
700	28,03	28,76	28,46	0,38	1,32
800	28,87	30,23	29,62	0,69	2,34
900	30,03	30,25	30,13	0,11	0,37
1000	29,11	30,57	30,07	0,83	2,77

Tabla 80: Análisis estadístico básico: Porosidad (10 % LTAB)

T (°C)	Porosidad mínima (%)	Porosidad máxima (%)	Porosidad media (%)	Desviación Estándar σ (%)	Coefficiente de variación (%)
700	29,59	29,92	29,75	0,16	0,55
800	30,66	32,33	31,37	0,86	2,74
900	33,22	34,18	33,68	0,48	1,42
1000	32,90	33,33	33,14	0,22	0,67

Tabla 81: Análisis estadístico básico: Porosidad (15 % LTAB)

T (°C)	Porosidad mínima (%)	Porosidad máxima (%)	Porosidad media (%)	Desviación Estándar σ (%)	Coefficiente de variación (%)
700	34,49	36,27	35,33	0,89	2,52
800	36,70	37,03	36,92	0,19	0,51
900	36,37	36,55	36,47	0,09	0,25
1000	35,08	35,30	35,16	0,12	0,34

Tabla 82: Análisis estadístico básico: Porosidad (20 % LTAB)

T (°C)	Porosidad mínima (%)	Porosidad máxima (%)	Porosidad media (%)	Desviación Estándar σ (%)	Coefficiente de variación (%)
700	36,77	40,83	38,25	2,25	5,87
800	35,40	41,56	38,50	3,08	8,00
900	36,11	42,38	39,88	3,32	8,33
1000	35,35	39,73	37,94	2,30	6,06

El coeficiente de variación de los datos de porosidad es variable entre prototipos fabricados con distinto porcentaje LTAB. Para los valores de porcentaje de LTAB 0 %, 5 %, 10 % y 15 % los resultados son menores ($cv < 5 \%$), y para la adición del 20 % de LTAB, resultan mayores ($cv < 10 \%$). Esta mayor variabilidad puede explicarse por una menor compacidad y homogeneidad en la masa cerámica, con respecto a los cerámicos con menor porcentaje de LTAB, lo que lleva a una mayor porosidad. A pesar de esto, los resultados obtenidos para la porosidad, poseen coeficientes de variación menores al 29 %, valor típico para la fabricación de ladrillos artesanales tal como se menciona en la sección 2.5.6.

Considerando estas variables estudiadas se realizó el análisis mediante ANOVA de dos factores, con 5 y 4 niveles, con repeticiones. A continuación, en la Tabla 83 se presenta el análisis estadístico de los resultados de Porosidad según lo descrito en la sección 3.4.9.

Tabla 83: Análisis de varianza: Porosidad de los prototipos cerámicos.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
% LTAB	1709,51	4	427,38	250,25	1,0E-27	2,61
T Cocción	22,30	3	7,43	4,35	0,0096	2,84
Interacción	27,17	12	2,26	1,33	0,2427	2,00
Dentro del grupo	68,31	40	1,71			
Total	1827,30	59				

Para el factor porcentaje de adición de LTAB el valor calculado de F es mayor al F crítico, por lo cual se rechaza la hipótesis nula (se encuentra una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos) y entonces se observa que hay una influencia del porcentaje de LTAB en la porosidad del prototipo cerámico.

Para el factor temperatura de cocción el valor calculado de F es mayor al F crítico, por lo cual se rechaza la hipótesis nula (se encuentra una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos) y entonces se observa una influencia de la temperatura de cocción en la porosidad del prototipo cerámico.

Finalmente, el valor calculado de F para la interacción de los factores anteriores, es menor al F crítico, por lo cual se observa que la porosidad del prototipo cerámico no es influida por la interacción del porcentaje de LTAB y la temperatura de cocción.

Los datos de la bibliografía consultada, son concordantes con los obtenidos en esta investigación, la porosidad total generalmente aumenta con el aumento del porcentaje de adición de lodo, y se mantiene para temperaturas hasta 1000°C, por encima de la misma la porosidad tiende a disminuir.

4.7. Colorimetría

En la Tabla 84 se presentan los resultados de cálculo de diferencia total de color obtenidos para los prototipos cerámicos con adición de LTAB con respecto a la referencia con 0 % de adición, cocido a la misma temperatura, donde L' es la coordenada de luminosidad (la escala de L' va de 0 (negro) a 100 (blanco); a* es la coordenada rojo/verde (donde +a* indica rojo y -a* indica verde); y b* es la coordenada amarillo/azul con +b' indicando amarillez y -b' indicando azul.

Las fórmulas aplicadas se detallan en la Tabla 33 de la sección 3.4.7. En el anexo I de la Tabla 151 a la Tabla 170, se presentan los resultados obtenidos mediante el ensayo de colorimetría descrito en la sección 3.4.7, y los cálculos realizados de variación de color de cada ejemplar, con los valores de L*, a*, b*, C y h, para los prototipos cerámicos fabricados con 0 %, 5 %, 10 %, 15 % y 20 % de LTAB, y cocidos a 700 °C, 800 °C, 900 °C y 1000 °C.

Como se detalla en la sección 3.4.7, según la norma UNE-ISO 12647-2 (AENOR, 2016b), los umbrales de tolerancia para ΔE^* (diferencia total de color percibida por el ojo humano) en la industria gráfica, se pueden clasificar en excelente (1), buena (1-2), normal (2-4), suficiente (4-5) y mala (>5). En este caso, se presenta y se analiza, como la adición de LTAB modifica el color del cerámico, la calidad del color de los nuevos prototipos cerámicos con distintas adiciones de LTAB y cocidos a distintas temperaturas, con respecto a la referencia sin adición del LTAB cocido a la misma temperatura.

Tabla 84: Diferencia total de color de los prototipos cerámicos

PROTOTIPO	COLORIMETRÍA				ISO 12647-2
	L*	a*	b*	ΔE^*	CALIDAD
REFERENCIA 700 °C	77,19	8,07	14,45		
S05 % - 700 °C	79,45	5,795	12,64	3,68	NORMAL
S10 % - 700 °C	77,49	7,47	15,5	1,25	BUENA
S15 % - 700 °C	79,08	9,06	17,39	3,63	NORMAL
S20 % - 700 °C	78,41	7,02	15,7	2,04	BUENA
REFERENCIA 800 °C	78,47	9,42	16,65		
S05 % - 800 °C	81,31	8,095	15,26	3,43	NORMAL
S10 % - 800 °C	82,85	7,65	14,52	5,18	SUFICIENTE
S15 % - 800 °C	80,76	8,95	17	2,36	NORMAL
S20 % - 800 °C	81,77	7,15	16,48	4,01	SUFICIENTE
REFERENCIA 900 °C	80,03	8,54	14,86		
S05 % - 900 °C	82,31	9,895	15,09	2,66	NORMAL
S10 % - 900 °C	82,61	8,09	15,86	2,80	NORMAL
S15 % - 900 °C	82,45	8,297	17,57	3,64	NORMAL
S20 % - 900 °C	81,71	6,83	19,64	5,35	MALA
REFERENCIA 1000 °C	81,66	8,52	16,44		
S05 % - 1000 °C	83,38	7,628	15,28	2,26	NORMAL
S10 % - 1000 °C	83,78	6,99	16,04	2,64	NORMAL
S15 % - 1000 °C	82,81	6,713	21,87	5,84	MALA
S20 % - 1000 °C	79,55	8,56	24,98	8,80	MALA

Las mayores variaciones de color se dieron con un 20 % de LTAB adicionado, y cocido a 900° C (5,84) y 1000 °C (8,80). Los valores superiores a 5, se toman como inaceptables en la industria gráfica, ya que indican que la diferencia de color es especialmente evidente. La adición del 5 % y 10 % cocidos a 1000 °C, obtuvieron valores

de 2,26 y 2,64 respectivamente, valores menores a 3, que son muy pequeños, difícilmente perceptibles.

Para la industria de los materiales de la construcción, debe tomarse en cuenta la variación del color al adicionar el LTAB en la fabricación de los cerámicos, ya que el ladrillo cerámico es históricamente utilizado muchas veces como material de revestimiento visto, sin recubrimiento, donde el color cobra relevancia desde el diseño.

En determinadas situaciones, el ladrillo cerámico es elegido por la calidez de su color terracota característica del mismo, por lo que controlar su variación de color en la fabricación no es un tema de menor importancia.

Por otra parte, según lo detallado en la 3.4.7 se analizan los resultados de color obtenidos en los planos cromáticos del espacio CIELab.

En la Figura 114 se gráfica el plano cromático a^*b^* y la ubicación en el mismo de los prototipos cerámicos cocidos a 1000 °C, con los distintos porcentajes de LTAB. Cada punto de color representa una serie de fabricación. En la misma, podemos observar la pureza del color y la tonalidad de los cerámicos.

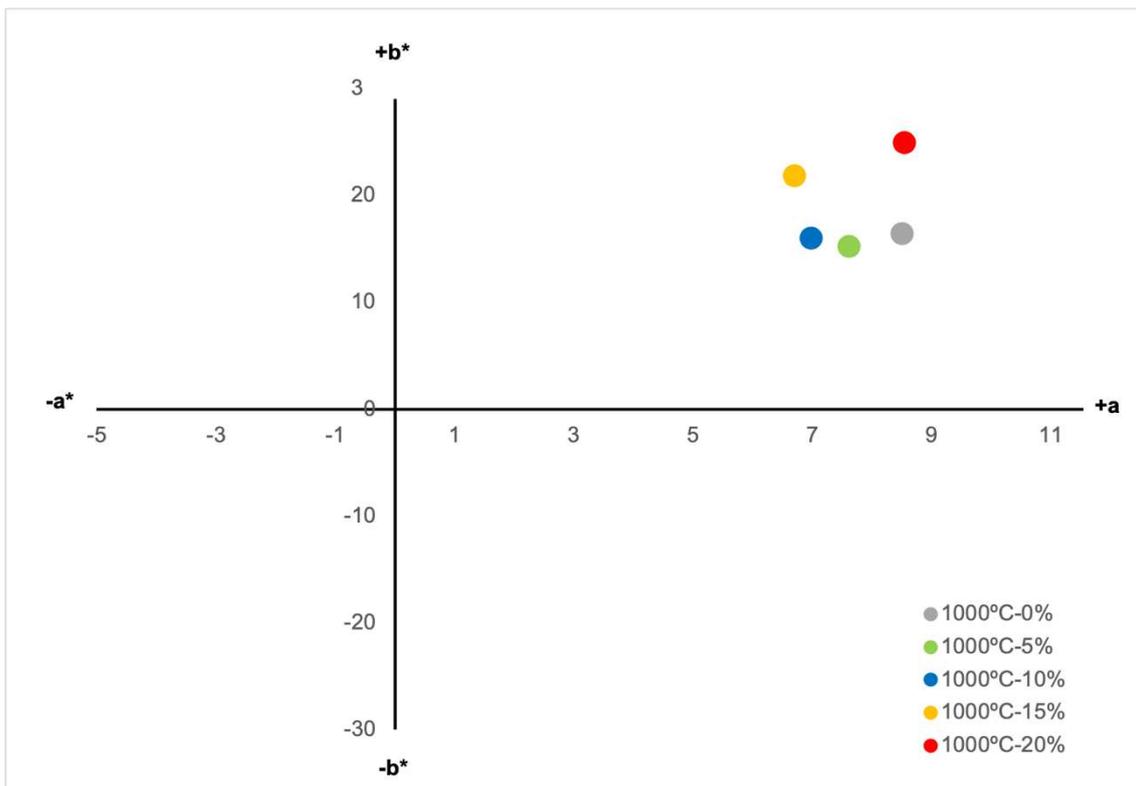


Figura 114: Plano cromático a^*b^* , del espacio CIE $L^*a^*b^*$ (1000°C)

En el plano a^*b^* los prototipos cerámicos caen dentro del cuadrante superior derecho, ubicados en los ángulos entre 0° y 90° , indicándonos que corresponden a las tonalidades rojo – amarillas. En la Figura 114 se puede observar la diferencia de tonalidad entre los prototipos. Los valores para la adición de 5 %, 10 % y 15 %, presentan una pureza de color superior a la referencia, sin embargo, la adición del 20 %, está a una distancia del centro de los ejes superior a la referencia, evidenciando una pureza de color menor a la misma.

En la Figura 115 se grafica el plano cromático L^*a^* , de los prototipos cerámicos cocidos a 1000°C , con 0 %, 5 %, 10 %, 15 % y 20 % de adición de LTAB.

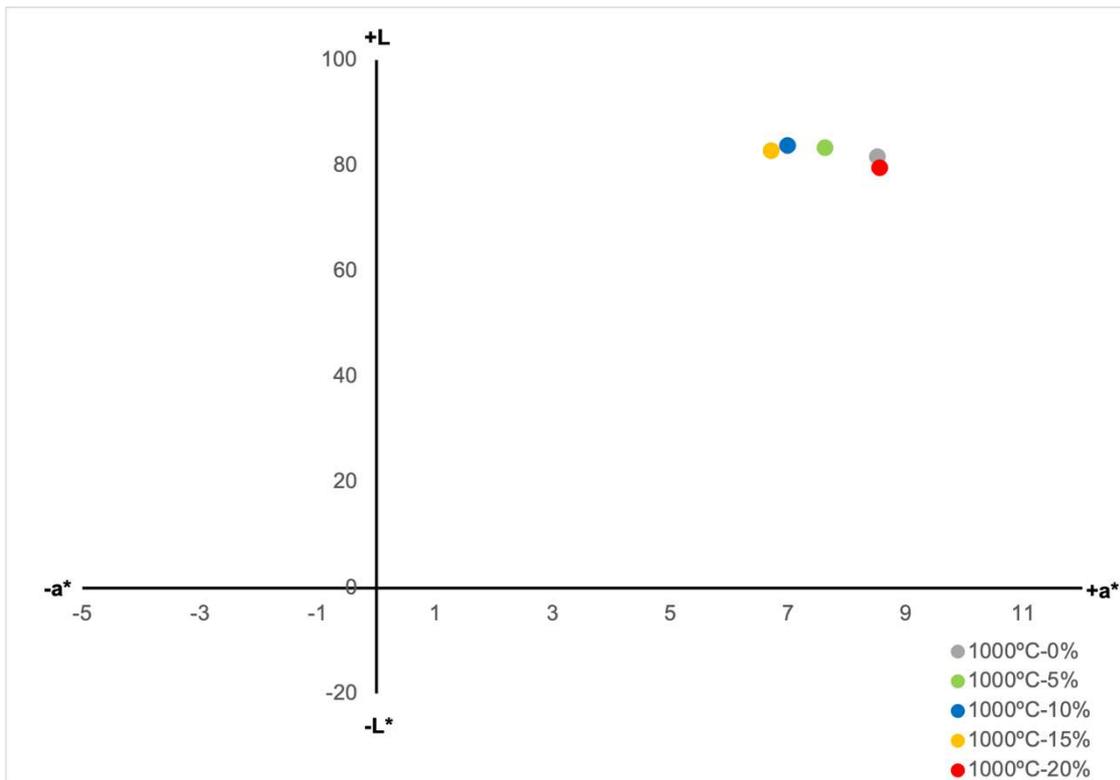


Figura 115: Plano cromático L^*a^* (1000°C)

En el plano L^*a^* los prototipos cerámicos presentan una luminosidad muy similar, pero se puede apreciar valores ligeramente superiores a la referencia, para las adiciones 5 %, 10 y 15 %, y uno menor a la referencia para la adición del 20 %.

Con las respectivas adiciones de LTAB, se puede concluir que con porcentajes de adiciones de 15 % y 20 % de LTAB, hay cambios visibles en el color, con respecto al valor de referencia. En la Figura 114 podemos ver que la serie fabricada con la adición del 20 % LTAB cocido a 1000°C , tiene una mayor pureza de color que las demás. Esto

podría asociarse a lo aportado por Da Silva (2015), donde cita que el principal responsable por el color rojizo en los cerámicos después de la cocción es el óxido de hierro (Fe_2O_3). Cuando se sustituye la arcilla por LTAB, se está sustituyendo un porcentaje de hierro de la arcilla correspondiente a 3,10, por uno mayor correspondiente al LTAB que es de 8,20. Por lo que la tendencia de los cerámicos con la mayor cantidad de LTAB sería hacia el rojo. La dosificación adoptada para estos prototipos cerámicos, tiene un 50 % del cuerpo de la mezcla arena, lo que modifica significativamente el color del cuerpo de arcilla.

Por otro lado, debe controlarse la uniformidad del color de cada prototipo fabricado, y para eso la $\Delta E^* c^*$ (diferencia total de color percibida por el ojo humano), como se describe en la sección 3.4.7, deben incorporar factores de corrección del color. Los valores obtenidos para cada uno de los prototipos se presentan en la Tabla 171 a la Tabla 180 del Anexo.

Para las adiciones del 5 %, 10 % y 15 % los ΔE^* fueron menor a 1, por lo que la calidad del color de cada prototipo cerámico se considera excelente, no es perceptible la variación del color en las distintas caras de los mismos. Sin embargo, para la adición del 20 %, los prototipos si presentan variaciones perceptibles de color, y los valores de $\Delta E^* > 5$ lo confirman (5,19-6,33-7,09-7,42-8,96).

Estas variaciones del color pueden explicarse por el proceso de fabricación artesanal de los mismos, de no haber logrado una mezcla lo suficientemente homogénea con la adición del 20 % de LTAB. También puede explicarse por el método de cocción, que la mufla no haya cocido de forma uniforme estos prototipos, generando manchas y diferencia de color en los mismos.

No se reportan datos sobre Colorimetría de los cerámicos en la bibliografía de referencia para la fabricación de cerámicos a partir de LTAB.

4.8. Sulfato en Lixiviado

El uso de residuos como sustitutos de materias primas tradicionales para la producción de materiales de construcción, si bien es beneficioso desde una perspectiva de economía circular, está condicionado al cumplimiento las especificaciones de calidad

del producto, y a que no conlleve problemas para la salud humana o el ambiente (U.S. EPA, 2016).

En la sección 2.1 se mencionó que los lodos de plantas de tratamiento de agua bruta son considerados residuos categoría II (no peligrosos o asimilables a residuos urbanos) de acuerdo al Decreto N° 182/013. Reglamentación Del Artículo 21 de La Ley 17.283 (Ley General de Protección Del Medio Ambiente) (2013). A partir de los resultados obtenidos en el presente estudio, no se espera que el LTAB cumpla ninguna de las condiciones para ser considerado residuo categoría I (peligroso). En particular, si se comparan los resultados obtenidos en la caracterización química del LTAB (sección 3.2.1.5), se encuentra que la mayoría de los metales pesados analizados por FRX presenta concentraciones por debajo del límite de detección del método (As, Cd, Hg, Ni y Pb), o bien presenta concentraciones muy bajas (Cu), según puede observarse en la Tabla 21 de la sección 3.2.1.5.

En el proyecto CTAguá-UPM (IEM, 2021), se estudiaron tres lotes de lodo de UPM, extraídos en diferentes fechas (el primero, correspondiente al mes de Marzo, fue el empleado en esta tesis); y se encontraron concentraciones de azufre (como SO_3) superiores a los valores reportados en la bibliografía de referencia (ver sección 2.2.1), y con alta variación entre los lotes. El azufre presente en el lodo proviene del agua bruta (generalmente sulfatos y sulfuros de origen natural o por contaminación del cuerpo de agua), y del uso de compuestos de azufre en el tratamiento del agua bruta (uso de sulfato de aluminio como coagulante y agregado de ácido sulfúrico para ajustar el pH del agua antes de la coagulación).

A pesar que la normativa nacional (Decreto N° 182/013) no define un valor máximo de sulfato o compuestos de azufre para determinar la peligrosidad de los residuos, es importante analizar las implicancias que estas concentraciones de azufre pueden tener en el uso del lodo para la fabricación de cerámicos, en todo su ciclo de vida.

En el gráfico de la Figura 116 se resumen los resultados de la determinación de sulfato en lixiviado para el lodo LTAB, y para los prototipos cerámicos fabricados con 0 %, 5 %, 10 % y 15 % de LTAB a temperaturas de cocción de 700 °C, 800 °C, 900 °C y 1000 °C. En la Tabla 181 del Anexo J, se presentan los resultados informados por el laboratorio (Laboratorio Ecotech, 2021b).

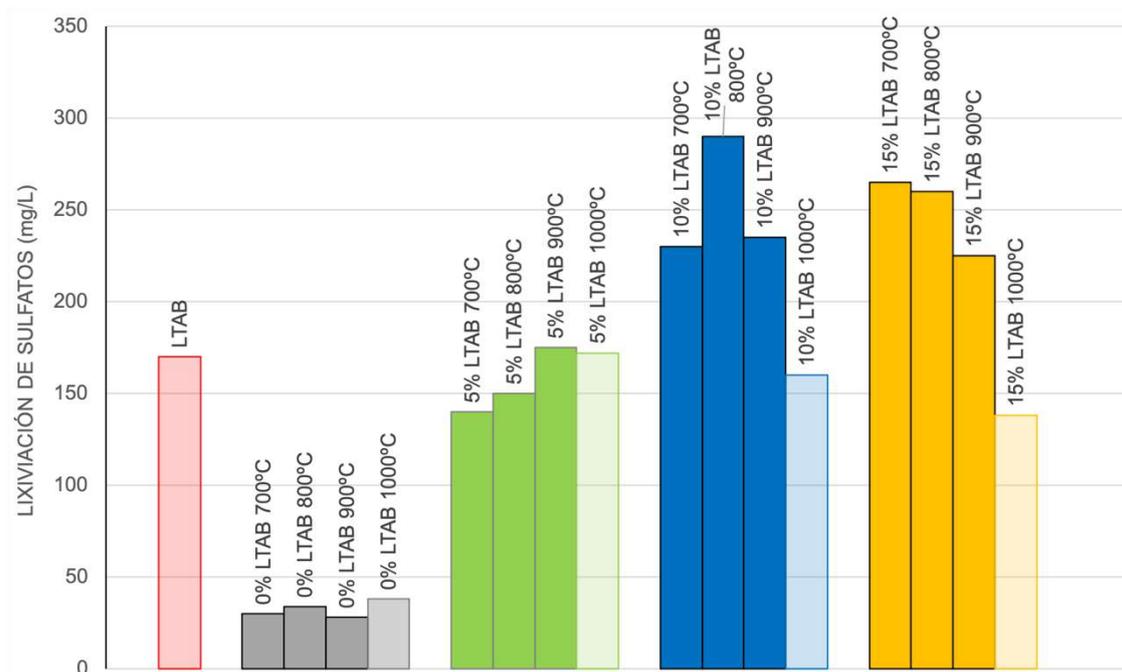


Figura 116: Sulfato en Lixiviado: LTAB y prototipos cerámicos.

Se observa que el sulfato en lixiviado aumenta cuando se adiciona lodo a los prototipos, aunque para el 15 % esta tendencia parece revertirse o estancarse. No se observa una tendencia clara con la temperatura de cocción.

En base a la bibliografía, con respecto a este parámetro podrían estar operando los siguientes fenómenos al sustituir lodo por arcilla, y al variar la temperatura de cocción de los prototipos cerámicos:

- Siendo que el aporte más sustantivo de sulfato al cerámico es por el lodo (SO_3 en el rango 2,5 % a 7,5 %, mientras que para la arcilla es de $< 0,1$ %, y para la arena se supone despreciable), un mayor porcentaje de lodo haría aumentar la concentración de sulfato en el cerámico, y por tanto el sulfato en lixiviado.
- Un aumento de la temperatura de cocción podría favorecer la formación en el cerámico de compuestos de azufre o sulfatos con un comportamiento más resistente a la lixiviación (encapsulamiento) o más lábil, lo cual no es posible determinar a priori.
- Un aumento de la temperatura de cocción podría favorecer la formación y emisión de óxidos de azufre, disminuyendo la concentración de sulfato en el cerámico y en el lixiviado.

Tabla 85: Datos de azufre/ sulfatos del LTAB

LOTE	LTAB
Azufre elemental (%SO ₃)	4,90
Sulfato en Lixiviado (mgSO ₄ ²⁻ /L)	170
Dosificación de Sulfato de Aluminio (mL/s)	105
Fecha (dosificación)	08/03/2021

En la

Tabla 85 se detallan los valores para el LTAB trabajado en esta investigación, pero no se encuentra una correlación clara entre la concentración de sulfato en lixiviado o el porcentaje de azufre como SO₃ en los lodos, con la dosis de sulfato de aluminio (coagulante) que se utilizó en el tratamiento de agua el día que fueron obtenidos los diferentes lotes extraídos por UPM. Este último dato operativo fue reportado por UPM para el día que se obtuvieron los lotes de lodo correspondientes.

El método aplicado a los lodos detallado en la sección 3.4.8, puede utilizarse como indicador, no es un ensayo adecuado para evaluar la lixiviación en las condiciones que va a estar expuesto el cerámico durante su vida útil, que se espera sean menos drásticas que las definidas en el ensayo EPA 1311. Existen otros ensayos más adecuados y diseñados para simular la lixiviación de contaminantes en materiales de construcción, como la norma americana EPA 1315 (U.S. EPA, 2017) o la holandesa NEN 7345 (NEN, 1995). En ambos métodos se sumerge la muestra (ladrillo entero) en un tanque con agua a pH neutro, durante largos períodos (días) y cambiando el agua.

Además de las consideraciones ambientales y de salud, la presencia de sulfatos en lixiviados puede tener implicancia en aumentar la corrosividad de los lodos y los cerámicos. En los procesos de fabricación del cerámico, el lodo puede estar en contacto con equipos y recipientes de hierro y acero, mientras que los ladrillos pueden estar en contacto con materiales de construcción de hierro y acero (por ejemplo: varillas y otros elementos estructurales). Por ambos materiales, sería importante evaluar la corrosividad del lixiviado, aunque los datos que se dispone no permiten hacerlo.

En la bibliografía de referencia se reportan diferencias significativas en la composición del lixiviado entre los lodos y el cerámico fabricado con LTAB. Algunos de los autores indican la importancia de la cocción a alta temperatura para la desintegración completa de los compuestos orgánicos, así como también inmovilizar contaminantes inorgánicos,

especialmente productos químicos, dentro de las fases de silicato. Al mismo tiempo se recomienda realizar ensayos de lixiviación en similares condiciones al EPA 1311 para evaluar el posible impacto ambiental de ladrillos fabricados después de su uso, a largo plazo.

4.9. Correlación entre propiedades

Con la finalidad de estudiar la correlación entre las propiedades estudiadas, se calcula el coeficiente de determinación, también llamado R^2 .

Mediante los gráficos que se presentan a continuación, se expresó la mejor línea de tendencia para los datos, o sea, la que más se ajusta a los resultados experimentales obtenidos. Como se detalla anteriormente, una línea de tendencia es más confiable cuando R^2 se sitúa más cerca de 1, representando con ello que mayor será el ajuste del modelo de la varianza que intentamos explicar. De forma inversa, cuando más cerca de 0 es el valor de R^2 , menos ajustado estará el modelo y, por lo tanto, menos fiable será.

4.9.1. Resistencia a la Compresión – Densidad

En la Tabla 86 se presentan los valores obtenidos de R^2 correspondiente a los distintos modelos de correlación. Como se detalla en la sección 3.4.9, se puede afirmar que el nivel de correspondencia para el modelo lineal entre las propiedades es una “correlación muy fuerte” ($R^2 > 0,81$) según la clasificación de Hernández Sampieri et al. (2006).

Tabla 86: Compresión-Densidad: R^2 para distintos modelos.

Función	Fórmula	R^2
Exponencial	$y = 1E-08e^{0,0098x}$	0,7912
Potencial	$y = 4E-63x^{19,036}$	0,7975
Lineal	$y = 0,0178x - 32,478$	0,8556
Logarítmica	$y = 34,661\ln(x) - 260,29$	0,8557
Polinómica 2º	$y = -4E-06x^2 + 0,0337x - 47,881$	0,8557

En la Figura 117 se presenta el modelo de correlación lineal. Funciones polinómicas de mayor grado arrojan valores de R^2 mayores, pero son funciones que presentan incoherencias, como raíces negativas, o interpolan valores extremadamente altos o

bajos entre dos puntos que no tienen datos, por lo que no se consideraron polinomios de mayor grado.

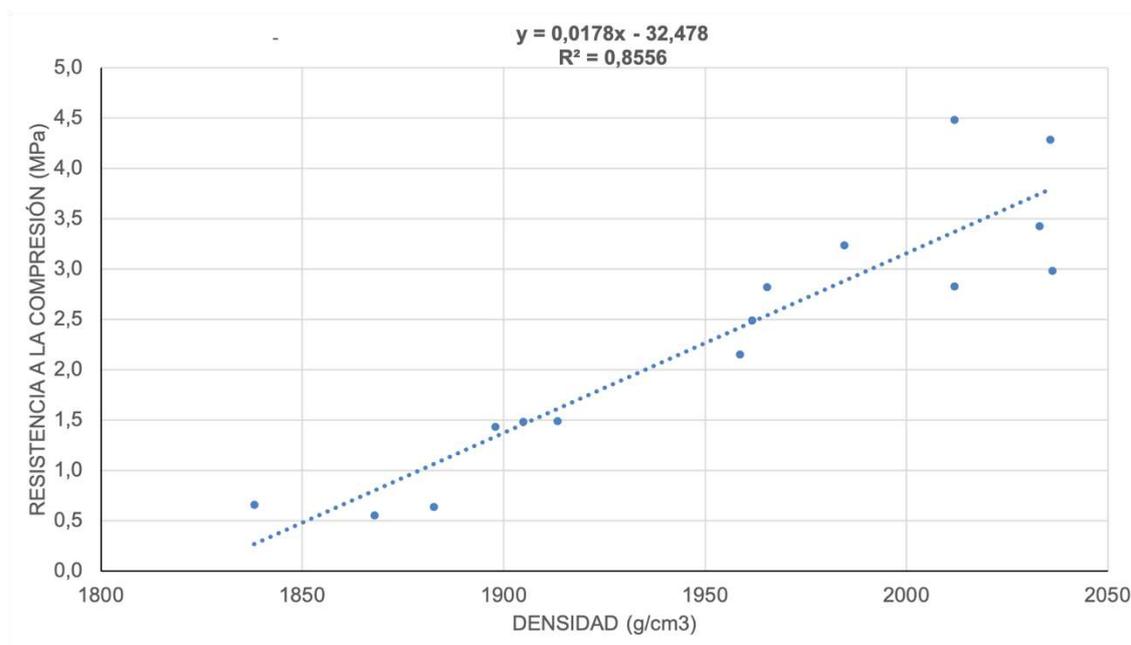


Figura 117: Correlación: Resistencia a la compresión – Densidad

4.9.2. Resistencia a la Compresión – Pérdida de peso

En la Tabla 87 se presentan los valores obtenidos de R^2 correspondiente a los distintos modelos de correlación. Como se detalla en la sección 3.4.9, se puede afirmar que el nivel de correspondencia para el modelo lineal entre las propiedades es una “correlación considerable” ($R^2 > 0,56$) según la clasificación de Hernández Sampieri et al. (2006)

Tabla 87: Compresión-Pérdida de peso: R^2 para distintos modelos.

Función	Fórmula	R^2
Potencial	$y = 2E+06x^{-4,413}$	0,5339
Exponencial	$y = 118,71e^{-0,176x}$	0,5514
Lineal	$y = -0,2726x + 8,6991$	0,5572
Logarítmica	$y = -6,87\ln(x) + 23,913$	0,5615
Polinómica 2º	$y = 0,0121x^2 - 0,8869x + 16,318$	0,5633

Según fue indicado en la sección anterior, se consideraron solamente funciones polinómicas hasta grado 2. Las diferentes funciones presentadas tienen R^2 muy similar (siendo la función potencial la de menor R^2), por lo que se asume correlación lineal por ser más sencilla que las anteriores.

4.9.3. Resistencia a la Compresión – Contracción volumétrica

En la Tabla 88 se presentan los valores obtenidos de R^2 correspondiente a los distintos modelos de correlación. Como se detalla en la sección 3.4.9, se puede afirmar que el nivel de correspondencia para el modelo lineal entre las propiedades es una “correlación débil” ($R^2 < 0,25$) según la clasificación de Hernández Sampieri et al. (2006).

Tabla 88: Compresión-Contracción volumétrica: R^2 para distintos modelos.

Función	Fórmula	R^2
Logarítmica	$y = 0,2527\ln(x) + 3,5047$	0,0095
Potencial	$y = 2,4453x^{0,234}$	0,0208
Exponencial	$y = 1,6408e^{0,2376x}$	0,1046
Lineal	$y = 0,3874x + 2,7693$	0,0749
Polinómica 2º	$y = 0,482x^2 - 1,9211x + 4,8086$	0,2400

Ninguno de los modelos de correlación analizados presenta un buen ajuste en relación a los resultados experimentales obtenidos.

4.9.4. Resistencia a la Compresión – Absorción de agua por capilaridad

En la Tabla 89 se presentan los valores obtenidos de R^2 correspondiente a los distintos modelos de correlación. Como se detalla en la sección 3.4.9, se puede afirmar que el nivel de correspondencia para el modelo lineal entre las propiedades es una “correlación media” ($R^2 > 0,25$) según la clasificación de Hernández Sampieri et al. (2006).

Tabla 89: Compresión-Capilaridad: R^2 para distintos modelos.

Función	Fórmula	R^2
Potencial	$y = -0,4669x + 3,4775$	0,1945
Exponencial	$y = 4,33e^{-0,328x}$	0,2704
Logarítmica	$y = -1,197\ln(x) + 3,2251$	0,2641
Lineal	$y = -0,4669x + 3,4775$	0,3297
Polinómica 2º	$y = -1,197\ln(x) + 3,2251$	0,3576

Ninguno de los modelos de correlación analizados presenta un buen ajuste en relación a los resultados experimentales obtenidos.

4.9.5. Resistencia a la Compresión – Absorción de agua por permeabilidad

En la Tabla 90 se presentan los valores obtenidos de R^2 correspondiente a los distintos modelos de correlación. Como se detalla en la sección 3.4.9, se puede afirmar que el nivel de correspondencia para el modelo lineal entre las propiedades es una “correlación débil” ($R^2 < 0,25$) según la clasificación de Hernández Sampieri et al. (2006).

Tabla 90: Compresión-Permeabilidad: R^2 para distintos modelos.

Función	Fórmula	R^2
Potencial	$y = 280,87x^{-1,236}$	0,2122
Logarítmica	$y = -2,193\ln(x) + 11,119$	0,2433
Exponencial	$y = 7,5705e^{-0,023x}$	0,2453
Lineal	$y = -0,0407x + 4,6747$	0,2445
Polinómica 2º	$y = 0,0005x^2 - 0,0937x + 6,1288$	0,2558

Ninguno de los modelos analizados presenta un buen ajuste en relación a los resultados experimentales obtenidos.

4.9.6. Resistencia a la Compresión – Absorción de agua por inmersión

En la Tabla 91 se presentan los valores obtenidos de R^2 correspondiente a los distintos modelos de correlación. Como se detalla en la sección 3.4.9, se puede afirmar que el nivel de correspondencia para el modelo lineal entre las propiedades es una “correlación considerable” ($R^2 > 0,56$), según la clasificación de Hernández Sampieri et al. (2006), tal como se muestra en la Figura 118.

Tabla 91: Compresión-Inmersión de agua fría: R^2 para distintos modelos.

Función	Fórmula	R^2
Potencial	$y = 1305,5x^{-2,206}$	0,5333
Exponencial	$y = 24,453e^{-0,129x}$	0,6011
Logarítmica	$y = -4,16\ln(x) + 14,613$	0,6995
Lineal	$y = -0,2377x + 7,0164$	0,7612
Polinómica 2º	$y = -0,0145x^2 + 0,3174x + 2,0126$	0,8179

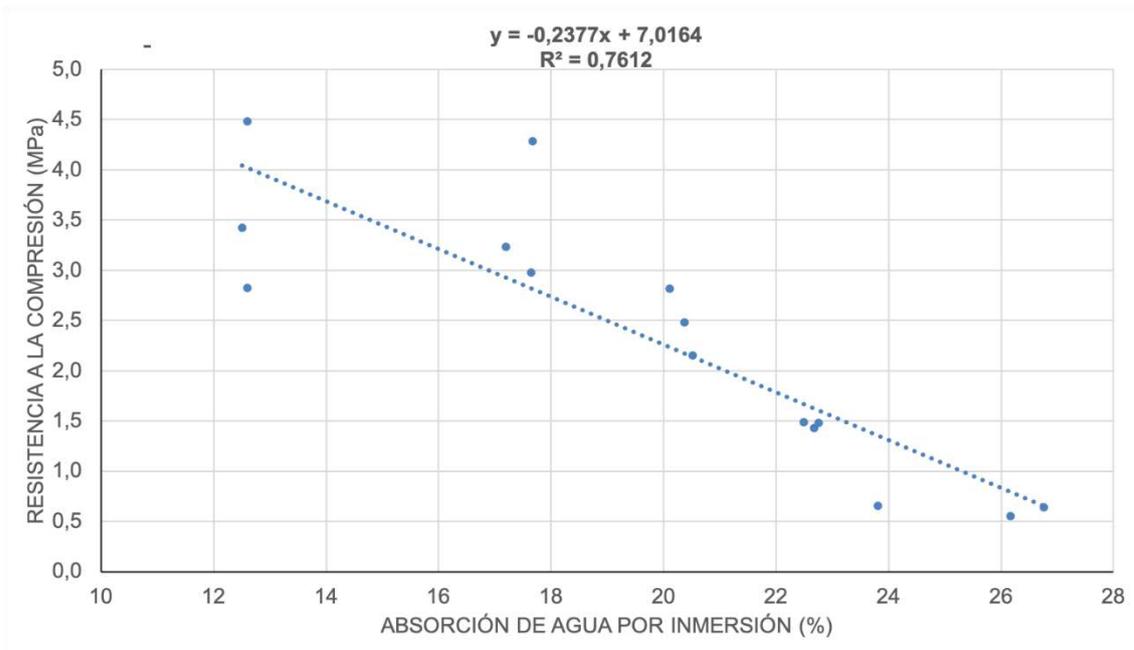


Figura 118: Correlación: Resistencia a la compresión – Inmersión

Se puede observar que el modelo que correlaciona de forma más ajustada la resistencia a la compresión con la absorción de agua por inmersión en agua fría de los prototipos fabricados es el polinomio de 2º grado, pero difiere poco de los resultados de la correlación lineal, la cual es más simple, por eso se selecciona y grafica dicho modelo.

4.9.7. Resistencia a la Compresión – Porosidad

En la

Tabla 92 se presentan los valores obtenidos de R^2 correspondiente a los distintos modelos de correlación. Como se detalla en la sección 3.4.9, se puede afirmar que el nivel de correspondencia para el modelo lineal entre las propiedades es una “correlación considerable” ($R^2 > 0,56$), según la clasificación de Hernández Sampieri et al. (2006), tal como se muestra en la *Figura 119*.

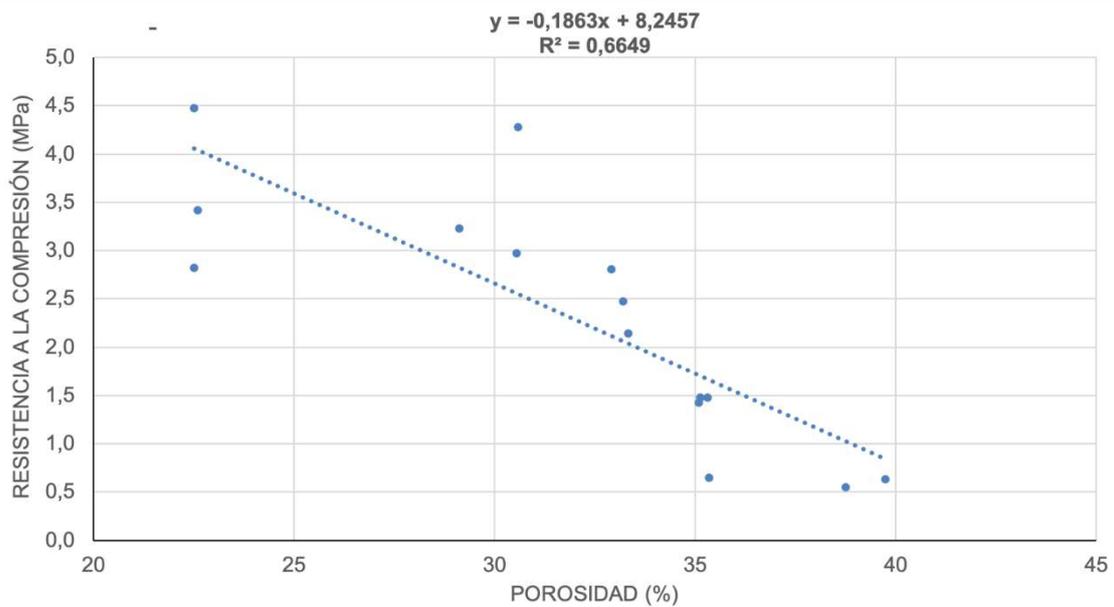


Figura 119: Correlación: Resistencia a la compresión – Porosidad

Tabla 92: Compresión-Porosidad: R² para distintos modelos.

Función	Fórmula	R ²
Potencial	$y = 26071x^{-2,762}$	0,4723
Exponencial	$y = 45,033e^{-0,099x}$	0,5125
Logarítmica	$y = 26071x^{-2,762}$	0,6147
Lineal	$y = -0,1863x + 8,2457$	0,6649
Polinómica 2º	$y = -0,014x^2 + 0,659x - 4,0718$	0,7704

Se puede observar que el modelo que correlaciona de forma más ajustada la resistencia a la compresión con la absorción de agua por inmersión en agua fría de los prototipos fabricados es el polinomio de 2º grado, pero difiere poco de los resultados de la correlación lineal, la cual es más simple, por eso se selecciona y grafica dicho modelo.

4.9.8. Resistencia a la Compresión – Lixiviación

En la Tabla 93 se presentan los valores obtenidos de R² correspondiente a los distintos modelos de correlación. Como se detalla en la sección 3.4.9, se puede afirmar que el nivel de correspondencia para el modelo lineal entre las propiedades es una “correlación débil” (R² < 0,25), según la clasificación de Hernández Sampieri et al. (2006).

Tabla 93: Compresión-Lixiviación: R^2 para distintos modelos.

Función	Fórmula	R^2
Potencial	$y = 7,4101x^{0,225}$	0,162
Exponencial	$y = 3,308e^{-0,002x}$	0,1052
Logarítmica	$y = -0,615\ln(x) + 5,6454$	0,1505
Lineal	$y = -0,0056x + 3,4721$	0,0927
Polinómica 2º	$y = -0,0056x + 3,4721$	0,7712

El polinomio grado 2 correlaciona de forma más ajustada la resistencia a la compresión con la lixiviación de los prototipos fabricados, sin embargo como puede verse en la Figura 120 los valores son dispersos, por lo que no existe una curva que se ajuste correctamente a los mismos.

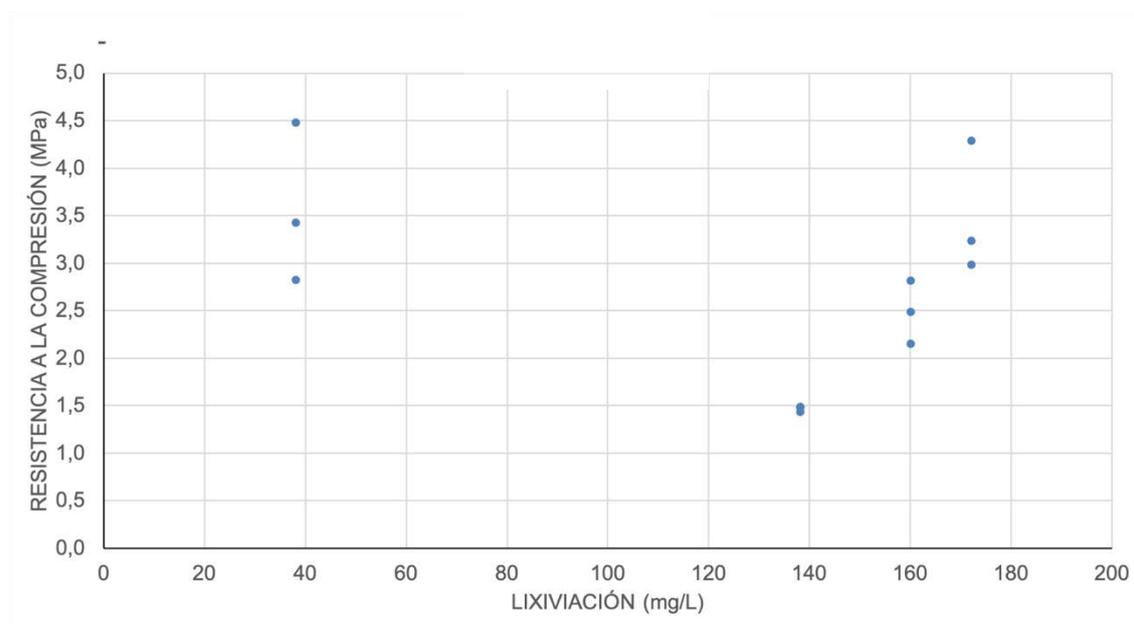


Figura 120: Correlación: Resistencia a la compresión – Lixiviación

4.9.9. Absorción de agua por inmersión – Densidad

En la Tabla 94 se presentan los valores obtenidos de R^2 correspondiente a los distintos modelos de correlación. Como se detalla en la sección 3.4.9, se puede afirmar que el nivel de correspondencia para el modelo lineal entre las propiedades es una “correlación considerable” ($R^2 > 0,56$), según la clasificación de Hernández Sampieri et al. (2006), como puede verse en la Figura 121.

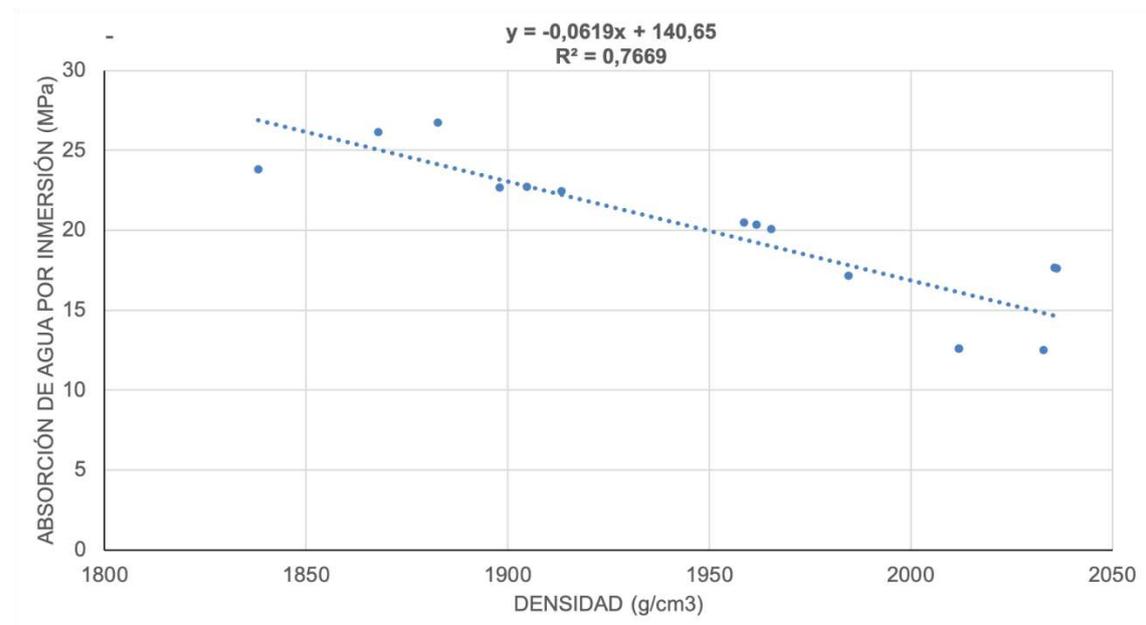


Figura 121: Correlación: Inmersión – Densidad

Tabla 94: Absorción por inmersión-Densidad: R^2 para distintos modelos.

Función	Fórmula	R^2
Potencial	$y = 1E+22x^{6,333}$	0,7415
Logarítmica	$y = 1E+22x^{6,333}$	0,7648
Exponencial	$y = -0,0619x + 140,65$	0,7468
Lineal	$y = -0,0619x + 140,65$	0,7669
Polinómica 2º	$y = -0,0001x^2 + 0,3325x - 242,81$	0,7728

4.9.10. Absorción de agua por inmersión – Pérdida de peso

En la Tabla 95 se presentan los valores obtenidos de R^2 correspondiente a los distintos modelos de correlación. Como se detalla en la sección 3.4.9, se puede afirmar que el nivel de correspondencia para el modelo lineal entre las propiedades es una “correlación considerable” ($R^2 > 0,56$) según la clasificación de Hernández Sampieri et al. (2006), como puede verse en la Figura 122.

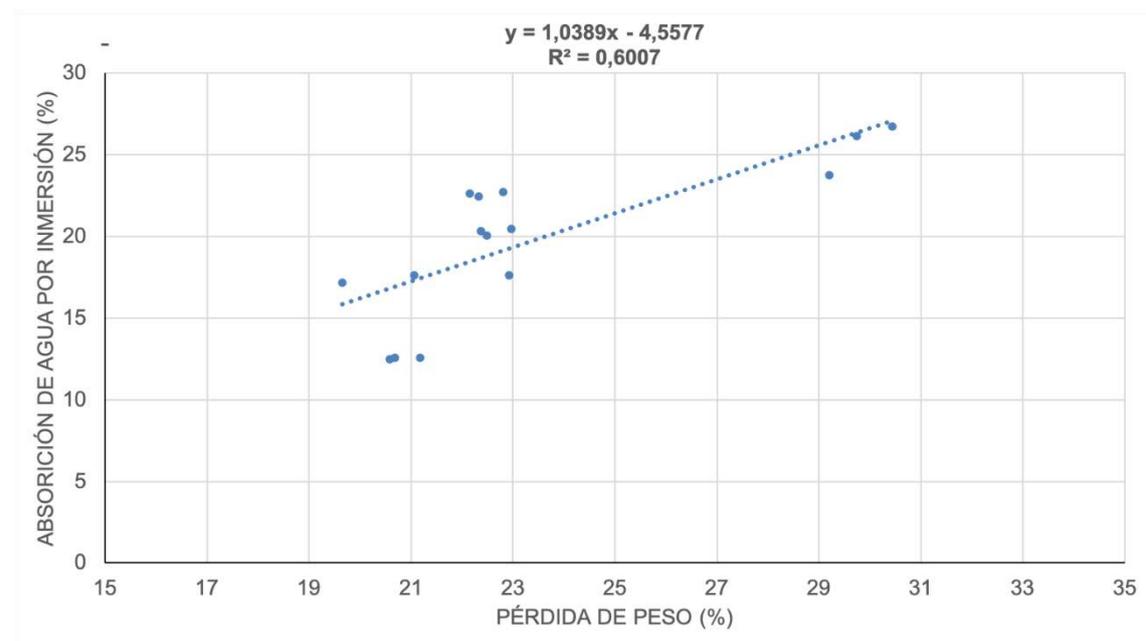


Figura 122: Correlación: Inmersión – Pérdida de peso

Tabla 95: Absorción por inmersión-Pérdida de peso: R^2 para distintos modelos.

Función	Fórmula	R^2
Exponencial	$y = 5,5962e^{0,0527x}$	0,5746
Potencial	$y = 0,2753x^{1,3503}$	0,5936
Lineal	$y = 1,0389x - 4,5577$	0,6007
Logarítmica	$y = 26,505\ln(x) - 63,559$	0,6206
Polinómica 2º	$y = -0,1524x^2 + 8,7843x - 100,63$	0,6730

4.9.11. Absorción de agua por inmersión – Contracción volumétrica

En la Tabla 96 se presentan los valores obtenidos de R^2 correspondientes a los distintos modelos de correlación. Como se detalla en la sección 3.4.9, se puede afirmar que el nivel de correspondencia para el modelo lineal entre las propiedades es una “correlación débil” ($R^2 < 0,25$) según la clasificación de Hernández Sampieri et al. (2006).

Tabla 96: Absorción por inmersión-Contracción: R^2 para distintos modelos.

Función	Fórmula	R^2
Lineal	$y = -0,6167x + 21,985$	0,0566
Exponencial	$y = 22,281e^{-0,041x}$	0,0628
Potencial	$y = 20,952x^{-0,085}$	0,0824
Logarítmica	$y = -1,415\ln(x) + 21,204$	0,0828
Polinómica 2º	$y = 0,5236x^2 - 3,9398x + 25,554$	0,1862

Ninguno de los modelos analizados presenta un buen ajuste en relación a los resultados experimentales obtenidos.

4.9.12. Absorción de agua por inmersión – Porosidad

En la Tabla 97 se presentan los valores obtenidos de R^2 correspondiente a los distintos modelos de correlación. Como se detalla en la sección 3.4.9, se puede afirmar que el nivel de correspondencia para el modelo lineal entre las propiedades es una “correlación muy fuerte” ($R^2 > 0,81$), casi “perfecta” según la clasificación de Hernández Sampieri et al. (2006).

Tabla 97: Absorción por inmersión-Porosidad: R^2 para distintos modelos.

Función	Fórmula	R^2
Logarítmica	$y = 24,115\ln(x) - 63,301$	0,9561
Lineal	$y = 0,8301x - 6,6522$	0,9806
Potencial	$y = 0,1884x^{1,3426}$	0,9859
Exponencial	$y = 4,4766e^{0,0458x}$	0,9901
Polinómica 2º	$y = 0,0164x^2 - 0,1628x + 7,8165$	0,9914

El modelo que correlaciona de forma más ajustada la absorción por inmersión y la Porosidad de los prototipos fabricados es el lineal, con su valor de R^2 de 0,9806, tal como se grafica en la Figura 123.

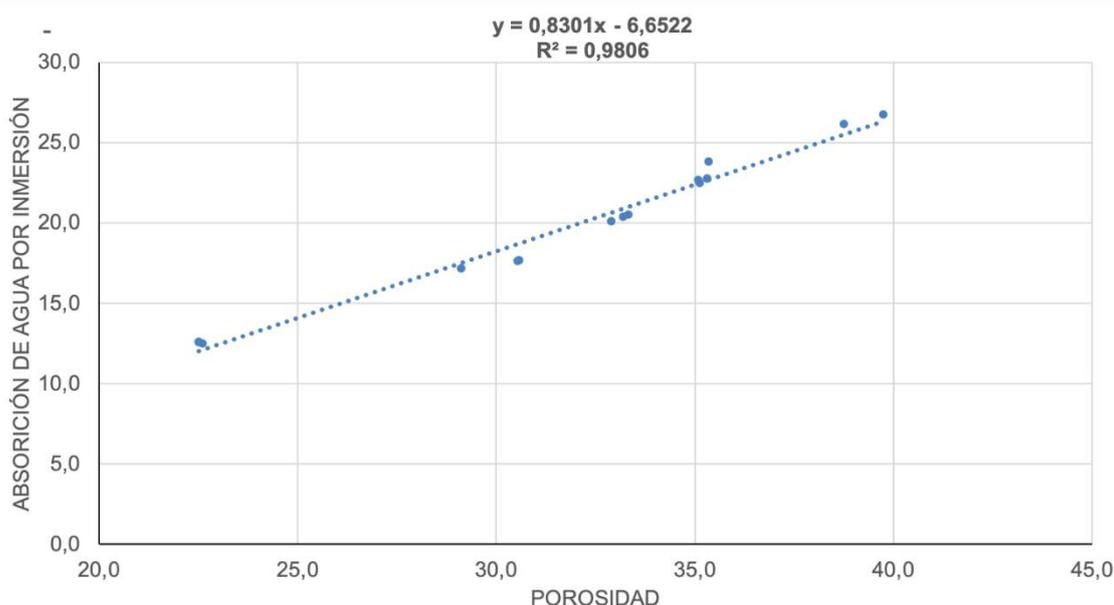


Figura 123: Correlación: Inmersión – Porosidad

5. Conclusiones

Existe abundante investigación sobre el uso de lodos de planta de tratamiento de agua para la fabricación de productos cerámicos, aunque la producción comercial es aún bastante limitada (Zhang, L., 2013). En la literatura técnica se observa que el agregado de lodos tiene generalmente una influencia negativa en algunas propiedades de los productos, y esta influencia aumenta con el porcentaje de lodo agregado. No obstante, esta aplicación sigue siendo promisoría, y se espera que más investigación aplicada pueda resolver estos problemas, para lodos y productos cerámicos específicos. Presenta ventajas ambientales ya mencionadas anteriormente, como la reducción de la disposición final de los lodos en favor de una alternativa de valorización, y la sustitución de recursos minerales (arcilla) en la fabricación de cerámicos, con la consiguiente reducción de los impactos de la actividad minera, consumo de energía y de recursos no renovables.

El uso de LTAB como insumo para otros procesos presenta un desafío ya que, por su naturaleza, las características fisicoquímicas y volúmenes de generación del residuo están menos controladas que cualquier materia prima, y sujetas a variaciones importantes. Durante el tratamiento de agua bruta (en particular en la etapa de clarificación), se agregan dosis variables de productos químicos, y el agua bruta también tiene variaciones estacionales de composición, lo que en conjunto tiene un efecto en la composición mineral, fisicoquímica, granulométrica y volumen de generación de lodos. Para un escalado industrial se requiere estudiar y conocer esta variación, y adaptar los procesos para que sea un insumo apto para la fabricación de cerámicos.

Por tal motivo, aún existen desafíos tecnológicos como el desarrollo y optimización de procesos de fabricación de cerámicos a partir de lodos, y el desarrollo de estándares y normas. Desde el punto de vista comercial, también es necesario promover la aceptación de estos productos en la industria cerámica y los consumidores. La normativa nacional en materia de residuos ya promueve una jerarquía en la gestión de residuos, poniendo como prioritario el reuso o reciclaje antes que la disposición final, pero es posible que se requieran regulaciones e instrumentos político-económicos específicos para fomentar y apoyar esta aplicación.

En este estudio se determinó cómo varían las distintas propiedades de los prototipos cerámicos con el agregado de distintos porcentajes de LTAB de UPM en sustitución de

arcilla en la mezcla cerámica, obteniéndose los resultados que se resumen a continuación.

Se determinaron las propiedades de colorimetría y la uniformidad del color de los prototipos cerámicos fabricados. Se obtuvieron uniformidades de color excelentes para prototipos con 5 %, 10 % y 15 % de LTAB, sin embargo, para 20 % de LTAB los prototipos presentaron variaciones perceptibles del color. El LTAB de UPM tiene una mayor concentración de óxidos de hierro que la arcilla utilizada en las mezclas cerámicas, por lo que sería de esperar variación del color percibido.

Asimismo, se determinó la absorción de agua de los prototipos cerámicos por 3 métodos (succión capilar, método de la pipeta e inmersión en agua fría), y en todos ellos se observó un comportamiento similar: la absorción de agua aumenta con el porcentaje de lodos, y disminuye con la temperatura de cocción, lo cual es concordante con lo reportado en la bibliografía de referencia. Esta propiedad es afectada por la composición química y mineral del lodo, que a su vez afecta la composición de la mezcla cerámica. Componentes típicos del lodo, como la materia orgánica y la calcita, tienden a aumentar la porosidad efectiva del ladrillo porque se queman durante la cocción y dejan huecos y grietas en la estructura del material. El contenido de sílice también puede tener un efecto, porque influye en los procesos de sinterización (que, a su vez, reducen la porosidad efectiva). Los prototipos con 5 % y 10 % de LTAB cumplen con la norma IRAM 12566-1:2005 de absorción por inmersión en agua fría para ladrillo visto sin revestir (≤ 20 %), mientras que los prototipos con 15 % de LTAB cumplen con dicha norma para ladrillo revestido (≤ 25 %). A la vez, los prototipos con 5 %, 10 % y 15 % de LTAB cumplen con la norma UNE-EN 772-11:2011, de tasa inicial de absorción por succión capilar ($\leq 4,5$ kg/m²/min).

Por otro lado, se determinaron algunas propiedades físicas como la densidad, porosidad y pérdida de peso de los prototipos cerámicos. En cuanto a la pérdida de peso, se obtienen altos valores porcentuales durante el secado debido al alto contenido de desplastificante (arena y fracciones de granulometría > 20 μ m en la arcilla y lodo). La pérdida de peso porcentual es bastante menor durante la cocción, lo cual era de esperar teniendo en cuenta los valores de pérdida por calcinación del lodo.

También se determinó la resistencia a la compresión de los prototipos cerámicos, observándose que en general disminuye con el porcentaje de agregado de lodos, y

aumenta con la temperatura de cocción, lo cual es coherente con lo observado por la mayoría de los autores de referencia. Se compararon los resultados con respecto a la norma IRAM 12566-1:2005 encontrando que ninguno de los prototipos, incluido el de referencia, cumple con la norma de 4 MPa como mínimo de la resistencia a la compresión. Los prototipos también presentan, en su mayoría, valores de resistencia a la compresión menores a los reportados por la literatura técnica nacional. Estos resultados muestran que los prototipos cerámicos fabricados para este estudio, incluyendo el prototipo de referencia sin lodo, no cumplen uno de los criterios de calidad más importantes para ladrillos macizos.

Desde la perspectiva de la composición granulométrica de la mezcla cerámica, y teniendo en cuenta las recomendaciones de Winkler y modificaciones posteriores, existe un potencial importante de optimizar la fabricación de cerámicos con agregado de LTAB. En el presente estudio se utilizó una muy baja proporción de arcillas plásticas ($< 2 \mu\text{m}$) y una muy alta proporción de fracción arena ($>20 \mu\text{m}$), lo cual puede tener un efecto negativo en las propiedades mecánicas y físicas de los prototipos.

Lo cual indica, que, para realizar una comparación adecuada en el futuro, deberá optimizarse el diseño de la mezcla cerámica de referencia y de los procesos de fabricación, así como también ajustar los ensayos de resistencia a la compresión considerando todos los aspectos que influyen en sus resultados, tales como dimensiones del prototipo, uso de encabezados y condiciones de curado.

Finalmente, se determinó la concentración de sulfatos en lixiviado de los prototipos cerámicos, ya que se observó una concentración relativamente alta de azufre en lodo (expresado como SO_3 en análisis elemental por FRX) respecto a lo reportado en referencias bibliográficas, y con alta variación entre lotes. De estos ensayos, no se observa correlación entre el contenido de azufre del lodo, la concentración de sulfatos en lixiviado de dichos lodos (por método EPA 1311), y la dosis de sulfato de aluminio en el tratamiento agua para el día correspondiente. Existe una tendencia a aumentar el sulfato en lixiviado de prototipos cerámicos cuando aumenta el porcentaje de lodos, pero no se observa una tendencia clara con la temperatura de cocción.

En general se observa que algunas de las propiedades que determinan la calidad o aptitud de los prototipos cerámicos se deterioran con el agregado de LTAB a la mezcla

cerámica. Sin embargo, estas propiedades también mejoran con la temperatura de cocción. Este comportamiento coincide con lo reportado por la bibliografía de referencia.

Por lo que el uso de lodos de planta de tratamiento de agua bruta para la fabricación de productos cerámicos es una tecnología promisoría para la valorización de estos residuos, basado en los resultados de esta investigación y los trabajos técnicos de referencia consultados.

En tal sentido, para estudios y desarrollo futuro de esta alternativa de valorización, se recomienda que se aborden los siguientes aspectos específicos:

- Conocer con mayor detalle la variación estacional (mensual) del LTAB de UPM de enero a diciembre, principalmente su composición granulométrica y química y cómo se comportan dichas variables con la composición del agua bruta y las condiciones de tratamiento.
- Incorporar al análisis otros LTAB generados en Uruguay, en particular los que se producen en plantas de tratamiento de OSE y en plantas industriales, incluyendo su caracterización y aptitud cerámica, como forma de incorporar volúmenes y analizar sinergias entre los generadores del residuo.
- Realizar un diseño de la mezcla cerámica a medida teniendo en cuenta las propiedades y proporciones de sus componentes (lodo, arcilla, arena), utilizando guías de la industria cerámica como el diagrama de Winkler.
- Estudiar el efecto de la sustitución de LTAB por arcilla en las propiedades reológicas de la mezcla cerámica, y su influencia en la preparación y manejo de la mezcla.
- Estudiar el efecto del agua en la preparación y propiedades de la mezcla cerámica y la calidad de los productos, en particular: la composición química del agua y el volumen a incorporar en la mezcla para obtener una consistencia óptima.
- Estudiar el efecto del contenido de residuos de coagulante en el LTAB en la demanda de agua para la mezcla cerámica.
- Trabajar con recursos minerales nacionales, arcillas que se utilizan actualmente o tienen potencial de uso en la fabricación de cerámica roja, de forma de integrar toda la cadena de uso y producción que estaría involucrada en la valorización del residuo, y las condiciones y características locales de dicha producción.
- Trabajar a diferentes temperaturas de cocción.
- Incorporar las dimensiones económicas, sociales y ambientales que permitan definir la factibilidad y sustentabilidad de la alternativa.

Bibliografía

- ABNT. (2005a). *Norma Brasileira ABNT NBR 15270-1:2005: Componentes cerâmicos - Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação — Terminologia e requisitos* (p. 11). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). www.abnt.org.br
- ABNT. (2005b). *Norma Brasileira ABNT NBR 15270-2: Componentes cerâmicos - Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos* (p. 15). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). www.abnt.org.br
- AENOR. (1999). *Norma UNE-EN 1015-6:1999/A1:2007: Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=norma-une-en-1015-6-1999-a1-2007-n0039895>
- AENOR. (2000). *Norma UNE-EN 1015-3:2000: Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas)*. (p. 11). Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0023381>
- AENOR. (2009). *Norma UNE-EN ISO 10304-1: Calidad de Agua. Determinación de aniones disueltos por cromatografía de iones en fase líquida. Parte 1: Determinación de bromuro, cloruro, fluoruro, nitrato, nitrito, fosfato y sulfato* (p. 23). Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?Tipo=N&c=N0044161>
- AENOR. (2011a). *Norma UNE-EN 772-21:2011: Métodos de ensayo de piezas para fábricas de albañilería. Parte 21: Determinación de la absorción de agua de piezas para fábrica de albañilería de arcilla cocida y silicocalcáreas por absorción de agua fría* (p. 8). Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).
- AENOR. (2011b). *UNE-EN 772-11:2011: Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 11: Determinación de la absorción de agua por capilaridad de piezas para fábrica de albañilería de hormigón, hormigón celular curado en autoclave, piedra artificial y piedra* (p. 12). Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).
- AENOR. (2011c). *UNE-EN 772-21:2011: Métodos de ensayo de piezas para fábricas de albañilería. Parte 21: Determinación de la absorción de agua de piezas para fábrica de albañilería de arcilla cocida y silicocalcáreas por absorción de agua fría* (p. 8).

- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).
- AENOR. (2015). *Reglamento Particular de Certificación RP 34.01: Piezas de arcilla cocida "U", para fábricas de albañilería no protegidas, de acuerdo a la Norma UNE-EN 771-1 (ladrillos de cara vista)*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).
- AENOR. (2016a). *Norma UNE-EN 16302:2016: Conservación del patrimonio cultural. Métodos de Ensayo. Medición de la absorción de agua por el método de la pipeta* (UNE-EN 16302:2016; p. 16). Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).
- AENOR. (2016b). *Norma UNE-ISO 12647-2: Tecnología gráfica. Control del proceso para la elaboración de separaciones de color, pruebas e impresos tramados. Parte 2: Procesos litográficos offset* (p. 30). Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0056069>
- Alexandre, E., & Luz, C. A. da. (2020). Substituição parcial do cimento CPV-ARI por lodo de estação de tratamento de água (ETA). *Matéria (Rio de Janeiro)*, 25(1). <https://doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0912>
- Algamil, Y., Khalil, N. M., & Saleem, Q. M. (2018). Usage of the sludge from water treatment plant in brick-making industry. *Journal of Chemical Technology & Metallurgy*, 53(3), 504–510. <http://proxy.timbo.org.uy/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=asn&AN=129346388&lang=es&site=eds-live>
- ANCAP. (2017). *Ficha de Seguridad: Queroseno*. <https://www.ancap.com.uy/innovaportal/file/1671/1/fs-queroseno.pdf>
- ASTM. (2010). *ASTM C216-10 Standard Specification for Facing Brick (Solid Masonry Units Made from Clay or Shale)* (p. 13). American Society for Testing and Materials (ASTM). www.astm.org
- Benlalla, A., Elmoussaouiti, M., Dahhou, M., & Assafi, M. (2015). Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks. *Applied Clay Science*, 118, 171–177. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.09.012>
- Borgno Martín, J. E. (2018). *Efectos de la incorporación de pigmentos empleados para la producción de pinturas en el comportamiento en estado fresco, la resistencia mecánica y la estabilidad frente a la acción de rayos UV de hormigones autocompactantes*. Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de la República.
- BSi. (2005a). *British Standard BS 5628-1:2005: Code of practice for the use of masonry*

- *Part 1: Structural use of unreinforced masonry* (p. 73). British Standards Institution (BSi). www.bsigroup.com
- BSi. (2005b). *British Standard BS 5628-2:2005: Code of practice for the use of masonry - Part 2: Structural use of reinforced and prestressed masonry* (BS 5628-2:2005; p. 68). British Standards Institution (BSi). www.bsigroup.com
- BSi. (2005c). *British Standard BS 5628-3:2005: Code of practice for the use of masonry — Part 3: Materials and components, design and workmanship* (p. 129). British Standards Institution (BSi). www.bsigroup.com
- Chen, H., Ma, X., & Dai, H. (2010). Reuse of water purification sludge as raw material in cement production. *Cement and Concrete Composites*, 32(6), 436–439. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.02.009>
- Chiang, K. Y., Chou, P. H., Hua, C. R., Chien, K. L., & Cheeseman, C. (2009). Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks. *Journal of Hazardous Materials*, 171(1–3), 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.144>
- Chowdhuri, N. (1965). *Building materials* (11th ed.). Calcutta Maya Chowdhury For Bani Book Co.
- Cremades, L. V., Cusidó, J. A., & Arteaga, F. (2018). Recycling of sludge from drinking water treatment as ceramic material for the manufacture of tiles. *Journal of Cleaner Production*, 201, 1071–1080. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.094>
- Da Silva, E. M., Morita, D. M., Lima, A. C. M., & Teixeira, L. G. (2015). Manufacturing ceramic bricks with polyaluminum chloride (PAC) sludge from a water treatment plant. *Water Science and Technology*, 71(11), 1638–1645. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.132>
- Dayaratnam, P. (1987). *Brick and Reinforced Brick Structures*. M. Primplani. <https://books.google.com.uy/books?id=iFuwAAAIAAJ>
- De Carvalho Gomes, S., Zhou, J. L., Li, W., & Long, G. (2019). Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 145, 148–159. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.032>
- Dondi, M., Fabbri, B., & Guarini, G. (1996). Grain size distribution of the Italian raw materials for structural clay products: a reappraisal of Winkler's diagram. In M. Ortega-Euertas, A. López-Galindo, & I. Palomo-Delgado (Eds.), *Advances in Clay Minerals. Proceedings of the Spanish-Italian Meeting on Clay Minerals held in Granada, Spain, 19-21 September 1996* (pp. 214–216). Sociedad Espafiola de

Arcillas.

- Dourado da Cunha, G., Vieira Lima, J. A., Stachiw, R., & de Quadros Tronco, K. M. (2019). Caracterización e destinação ambientalmente corretas do lodo gerado pelas estações de tratamento de água. *Nature and Conservation*, 12(2), 19–30. <https://doi.org/http://doi.org/10.6008/CBPC2318-2881.2019.002.0003>
- Duggal, S. K. (2009). *Building Materials*. New Age International (P) Limited. <https://books.google.com.uy/books?id=7AaBev3DjZAC>
- Ewais, E. M. M., Elsaadany, R. M., Ahmed, A. A., Shalaby, N. H., & Al-Anadouli, B. E. H. (2017). Insulating Refractory Bricks from Water Treatment Sludge and Rice Husk Ash. *Refractories and Industrial Ceramics*, 58(2), 136–144. <https://doi.org/10.1007/s11148-017-0071-6>
- Facultad de Química. (2021). *Informe de Asesoramiento N° 2103/46: Difracción de rayos X en 3 muestras*.
- FADU. (2020). *Cerámicos 1*. Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de la República. www.youtube.com/watch?v=BBU3Ha7h3Xo
- Fontana Cabezas, J. J. (2011). Características geométricas, físicas y mecánicas de mampuestos cerámicos huecos fabricados en Uruguay. *Ciencia, Docencia y Tecnología*, XXII(42), 207–240. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=14518444008>
- Gallegos, H., & Casabonne Rasselet, C. (2005). *Albañilería Estructural* (3ra ed.). Pontificia Universidad Católica del Perú. Fondo Editorial. <https://doi.org/10.18800/9789972427541>
- Geraldo, R. H., Fernandes, L. F. R., & Camarini, G. (2017). Water treatment sludge and rice husk ash to sustainable geopolymer production. *Journal of Cleaner Production*, 149, 146–155. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.076>
- Gilboa, F., Haroutun, C., & Rodríguez de Sensale, G. (1994). Estudio Preliminar de las Unidades de Albañilería Producidas en Uruguay para o uso en Estructuras Corrientes - Análisis Estadístico. *5th International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries, 21-24 August, Florianópolis, Brazil*, 676–681.
- Godoy, L. G. G. de, Rohden, A. B., Garcez, M. R., Costa, E. B. da, Da Dalt, S., & Andrade, J. J. de O. (2019). Valorization of water treatment sludge waste by application as supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, 223, 939–950. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.333>
- Hernández Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2006). *Metodología de la Investigación* (4ta ed.). McGraw Hill Interamericana.
- Hoppen, C., Portella, K. F., Joukoski, A., Baron, O., Franck, R., Sales, A., Andreoli, C.

- V, Paulon, V. A., Carlos, S., & Campinas, U. E. De. (2005). Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto : método alternativo de preservação ambiental (Disposal of centrifuged sludge from Water Treatment Plant (WTP) in concrete matrix : an alternative method. *Cerâmica*, 51, 85–95. https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_issuetoc&pid=0366-691320050002&lng=pt
- Huang, C. H., & Wang, S. Y. (2013). Application of water treatment sludge in the manufacturing of lightweight aggregate. *Construction and Building Materials*, 43, 174–183. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.016>
- Husillos Rodríguez, N., Martínez-Ramírez, S., Blanco-Varela, M. T., Guillem, M., Puig, J., Larrotcha, E., & Flores, J. (2010). Re-use of drinking water treatment plant (DWTP) sludge: Characterization and technological behaviour of cement mortars with atomized sludge additions. *Cement and Concrete Research*, 40(5), 778–786. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.11.012>
- Husillos Rodríguez, N., Martínez-Ramírez, S., Blanco-Varela, M. T., Guillem, M., Puig, J., Larrotcha, E., & Flores, J. (2011). Evaluation of spray-dried sludge from drinking water treatment plants as a prime material for clinker manufacture. *Cement and Concrete Composites*, 33(2), 267–275. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.10.020>
- ICONTEC. (2009a). *Norma Técnica Colombiana NTC 4205-1: Unidades de Mampostería de Arcilla Cocida. Ladrillos y Bloques Cerámicos. Parte 1: Mampostería Estructural* (p. 24). Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). www.icontec.org
- ICONTEC. (2009b). *Norma Técnica Colombiana NTC 4205-2: Unidades de Mampostería de Arcilla Cocida. Ladrillos y Bloques Cerámicos. Parte 2: Mampostería No Estructural* (p. 15). Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). www.icontec.org
- IEM. (2021). *Informe Final. Proyecto: Alternativas de Valorización de Lodos, UPM (CTS_X_2016_1_1 / P_2019_06)*.
- IET. (1998). *Recomendaciones para la Construcción en Mampostería Estructural en Uruguay. Parte 1: Mampostería Simple*.
- IIQ. (2021a). *Informe de Ensayo (02/06/2021): Composición elemental (FRX) de lodos "A", "B", "C" y "1C."*
- IIQ. (2021b). *Informe de Ensayo (04/08/2021): Composición elemental (FRX) de lodos "2A" y "2C."*

- IIQ. (2021c). *Informe de Ensayo (31/08/2021): Composición elemental (FRX) de “arcilla” y “cemento.”*
- INEN. (2018). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 3049-1: Ladrillos Cerámicos. Parte 1: Términos y definiciones, clasificación y requisitos de las dimensiones modulares* (p. 8). Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN). www.normalizacion.gob.ec
- INEN. (2019). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 3049-4: Ladrillos Cerámicos. Parte 4: Unidades de Mampostería de Fachada. Requisitos* (p. 15). Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN). www.normalizacion.gob.ec
- INN. (2001a). *Norma Chilena Oficial NCh 167.Of2001: Construcción - Ladrillos cerámicos - Ensayos* (p. 20). Instituto Nacional de Normalización (INN). www.inn.cl
- INN. (2001b). *Norma Chilena Oficial NCh169.Of2001: Construcción - Ladrillos cerámicos - Clasificación y requisitos* (p. 9). Instituto Nacional de Normalización (INN). www.inn.cl
- INN. (2003). *Norma Chilena Oficial NCh2123.Of1997 Modificada en 2003: Albañilería confinada - Requisitos de diseño y cálculo* (p. 37). Instituto Nacional de Normalización (INN). www.inn.cl
- INN. (2013). *Norma Técnica Nacional NCh2256/1:2013: Morteros - Parte 1: Requisitos* (NCh2256/1:2013; p. 39). Instituto Nacional de Normalización (INN).
- IRAM. (2005). *IRAM 12566-1:2005: Ladrillos y bloques cerámicos para la construcción de tabiques y muros. Parte 1: Macizos* (IRAM 12566-1:2005; p. 11). Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). <https://catalogo.iram.org.ar/#/normas/detalles/9211>
- ISO. (2021). *ISO 10390:2021: Soil, treated biowaste and sludge – Determination of pH* (No. 10390; p. 8). International Organization for Standardization (ISO). <https://www.iso.org/standard/75243.html>
- JENCK. (2015). *Entendiendo el Espacio de Color CIE L*C*H**. El Boletín de Novedades de JENCK. www.notijenck.com.ar/notas
- Kizinievič, O., Žurauskiene, R., Kizinievič, V., & Žurauskas, R. (2013). Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products. *Construction and Building Materials*, 41, 464–473. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.041>
- Laboratorio Ecotech. (2021a). *Informe de Ensayo N° 65980: Sulfato en Lixiviado en arcilla, cemento y lodos.*
- Laboratorio Ecotech. (2021b). *Informe de Ensayo N° 65981: Sulfato en Lixiviado en prototipos cerámicos.*
- LATU. (2022). *Informe de Ensayo N° 2004302. Distribución de Tamaño de Partícula.*

Arcilla Comercial (ARCAL).

- Ling, Y. P., Tham, R.-H., Lim, S.-M., Fahim, M., Ooi, C.-H., Krishnan, P., Matsumoto, A., & Yeoh, F.-Y. (2017). Evaluation and reutilization of water sludge from fresh water processing plant as a green clay substituent. *Applied Clay Science*, *143*, 300–306. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.04.007>
- Liu, Y., Zhuge, Y., Chow, C. W. K., Keegan, A., Li, D., Pham, P. N., Huang, J., & Siddique, R. (2020). Utilization of drinking water treatment sludge in concrete paving blocks: Microstructural analysis, durability and leaching properties. *Journal of Environmental Management*, *262*, 110352. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110352>
- Ministerio de Ambiente. (2021). Observatorio Ambiental Nacional: Datos Abiertos. Generación de Residuos. In *Observatorio Ambiental Nacional*.
- Monteiro, S. N., Alexandre, J., Margem, J. I., Sánchez, R., & Vieira, C. M. F. (2008). Incorporation of sludge waste from water treatment plant into red ceramic. *Construction and Building Materials*, *22*(6), 1281–1287. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.013>
- Monteiro, S. N., & Vieira, C. M. F. (2014). On the production of fired clay bricks from waste materials: A critical update. *Construction and Building Materials*, *68*, 599–610. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.006>
- Morquio, A., Aulet, A., Cetrangolo, G., Domenech, L., Moltini, G., Sabalsagaray, S., Romay, C., Mussio, G., & Dalchiele, E. (2015). *Informe Académico: Evaluación y Control de Estructuras del Patrimonio Arquitectónico Nacional en Mampostería Cerámica Aplicando Técnicas no Destructivas*.
- NEN. (1995). *NEN 7345:1995: Leaching characteristics of solid earthy and stony building and waste materials - Leaching tests - Determination of the leaching of inorganic components from buildings and monolithic waste materials with the diffusion test* (p. 20). Royal Netherlands Standardization Institute (NEN). www.nen.nl
- Nimwinya, E., Arjharn, W., Horpibulsuk, S., Phoo-Ngernkham, T., & Poowancum, A. (2016). A sustainable calcined water treatment sludge and rice husk ash geopolymer. *Journal of Cleaner Production*, *119*, 128–134. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.060>
- Pan, J. R., Huang, C., & Lin, S. (2004). Reuse of fresh water sludge in cement making. *Water Science and Technology*, *50*(9), 183–188. <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0566>
- Petterle, A. R., Santiago, G. G., Chong, W., Somensi, L., & Tamborim, S. M. (2018). Ceramic plates containing sludge from a water treatment plant and the rice husk

- ash: Relation between physical-chemistry properties and microstructure. *Quimica Nova*, 41(10), 1117–1126. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170288>
- Decreto N° 182/013. Reglamentación del Artículo 21 de la Ley 17.283 (Ley General de Protección del Medio Ambiente), Pub. L. No. Decreto 182/013, 17 (2013).
- Decreto N° 182/013. Reglamentación del Artículo 21 de la Ley 17.283 (Ley General de Protección del Medio Ambiente), 17 (2013).
- Pokhara, P., Ekamparam, A. S. S., Gupta, A. B., Rai, D. C., & Singh, A. (2019). Activated alumina sludge as partial substitute for fine aggregates in brick making. *Construction and Building Materials*, 221, 244–252. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.002>
- Pracidelli, S., & Melchiades, F. G. (1997). Importância da Composição Granulométrica de Massas para a Cerâmica Vermelha. *Cerâmica Industrial*, 2(1–2).
- Ramadan, M. A., Fouad, H. A., Hassanain, A. M., Ramadan, M. O., & Hassanain, A. M. (2008). Reuse of Water Treatment Plant Sludge in Brick Manufacturing. *Journal of Applied Sciences Research*, 4(10), 1223–1229. <https://www.researchgate.net/publication/295548404>
- Rodrigues, L. P., & Holanda, J. N. F. (2015). Recycling of Water Treatment Plant Waste for Production of Soil-Cement Bricks. *Procedia Materials Science*, 8, 197–202. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.04.064>
- Rodríguez, G., & Taroco, N. (1995). Resistencia a la compresión de ladrillos cerámicos macizos determinada según diferentes métodos de ensayo. *Actas de Las XXVII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, 18-22 de Septiembre, Tucumán, Argentina*.
- Sarabia Guarín, A., Sánchez Molina, J., & Bermúdez Carrillo, J. C. (2020). Efecto del uso del lodo residual de plantas de tratamiento de agua como un sustituto parcial de arcilla en la producción de ladrillos refractarios. *Revista UIS Ingenierías*, 20(1), 11–22. <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n1-2021002>
- Shamaki, M., Adu-Amankwah, S., & Black, L. (2021). Reuse of UK alum water treatment sludge in cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 275, 122047. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122047>
- Suksiripattanapong, C., Horpibulsuk, S., Chanprasert, P., Sukmak, P., & Arulrajah, A. (2015). Compressive strength development in fly ash geopolymer masonry units manufactured from water treatment sludge. *Construction and Building Materials*, 82, 20–30. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.040>
- Talens Oliag, P. (2019). *Descripción del Color en el Espacio Ciel*a*b**. Universidad Politécnica de Valencia. <https://www.youtube.com/watch?v=Q7afXHJNpnQ>

- Techera, J., Arriguetti, R., & Spoturno, J. (2004). *Mapa Geológico y de Recursos Minerales del Departamento de San José a Escala 1/100.000. Memoria Explicativa. Parte III: Recursos Minerales.*
- Teixeira, S. R., Santos, G. T. A., Souza, A. E., Alessio, P., Souza, S. A., & Souza, N. R. (2011). The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials. *Applied Clay Science*, 53(4), 561–565. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.05.004>
- Toya, T., Nakamura, A., Kameshima, Y., Nakajima, A., & Okada, K. (2007). Glass-ceramics prepared from sludge generated by a water purification plant. *Ceramics International*, 33(4), 573–577. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2005.11.009>
- U.S. EPA. (1992). *SW-846 Test Method 1311 (EPA 1311): Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (p. 35). Environmental Protection Agency (EPA). <https://www.epa.gov/hw-sw846/sw-846-test-method-1311-toxicity-characteristic-leaching-procedure>
- U.S. EPA. (2011). *Drinking Water Treatment Plant Residuals Management. Technical Report. Summary of Residuals Generation, Treatment, and Disposal at Large Community Water Systems.* <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-11/documents/dw-treatment-residuals-mgmt-tech-report-sept-2011.pdf>
- U.S. EPA. (2016). *Methodology for Evaluating Beneficial Uses of Industrial Non-Hazardous Secondary Materials (EPA 530-R-16-011).*
- U.S. EPA. (2017). *Method 1315 (EPA 1315): Mass Transfer Rates of Constituents in Monolithic or Compacted Granular Materials using a Semi-Dynamic Tank Leaching Procedure* (p. 37). Environmental Protection Agency (EPA).
- UNI. (2010). *UNI EN 15886: 2010: Conservation of cultural property - Test methods - Colour measurement of surfaces* (p. 40). Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI).
- UNIT. (1951). *Norma UNIT 82:1951: Granulometría de agregados finos para hormigones* (No. 82; p. 3). Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT). www.unit.org.uy/normalizacion/norma/90/
- UNIT. (2002). *Norma UNIT-NM 248:2002: Agregados. Determinación de la composición granulométrica* (No. 248; p. 12). Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT). www.unit.org.uy/normalizacion/norma/1451
- UNIT. (2004). *Norma UNIT-NM 23:2004: Cemento Portland. Método de determinación de la densidad absoluta* (No. 23; p. 5). Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT). www.unit.org.uy/normalizacion/norma/100000227/

- UNIT. (2009). *Norma UNIT-ISO 679:2009: Métodos de ensayo de cementos. Determinación de resistencias mecánicas* (p. 38). Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT). <https://www.unit.org.uy/normalizacion/norma/100000503/>
- UNIT. (2012). *Norma UNIT-NM 18:2012: Cemento Portland. Análisis químico. Determinación de la pérdida por calcinación* (UNIT-NM 18:2012; p. 10). Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT). <https://www.unit.org.uy/normalizacion/norma/100000513>
- UNIT. (2020). *Norma UNIT 1243:2020: Cemento – Equipamiento para la realización de ensayos físicos* (p. 33). Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT). <https://www.unit.org.uy/normalizacion/norma/100001192/1243:2018>
- UNIT. (2021). *Norma UNIT-ISO 20290-1:2021: Agregados para hormigón - Métodos de ensayo de las propiedades mecánicas y físicas - Parte 1: Determinación de la densidad aparente, la densidad de las partículas, la masa por volumen de las partículas y la absorción de agua* (No. 20290–1; p. 20). Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT). www.unit.org.uy/normalizacion/norma/100001368/20290
- UPM. (2022). *Así producimos celulosa*. UPM Uruguay. <https://www.upm.uy/planta/proceso-productivo/>
- UPM Forestal Oriental. (2021). *Producimos Futuro. Informe Público 2021*. <https://www.upm.uy/forestal/informe-anual/>
- Wang, L., Zou, F., Fang, X., Tsang, D. C. W., Poon, C. S., Leng, Z., & Baek, K. (2018). A novel type of controlled low strength material derived from alum sludge and green materials. *Construction and Building Materials*, 165, 792–800. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.078>
- Winkler, H. G. F. (1954). Bedeutung der korngößenverteilung und des mineralbestandes von tonen für die herstellung grobkeramischer erzeugnisse. *Berichte Der Deutschen Keramischen Gesellschaft*, 31, 337–343.
- Wolff, E., Schwabe, W. K., & Conceição, S. V. (2015). Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics. *Journal of Cleaner Production*, 96, 282–289. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.018>
- Wolff, E., Schwabe, W. K., Conceição, S. V., Santanna-Greco, J. A., Greco, M., & Machado, R. R. (2017). Using mathematical methods for designing optimal mixtures for building bricks prepared by solid industrial waste. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19(2), 379–389. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1223-y>
- Yagüe, A., Valls, S., Vázquez, E., & Albareda, F. (2005). Durability of concrete with addition of dry sludge from waste water treatment plants. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1064–1073. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.043>

Anexos

En estos anexos se presentan datos y resultados de ensayos obtenidos a partir de la investigación experimental.

Anexo A: Datos de caracterización de los LTAB

Tabla 98: pH del LTAB

	V1	V2	V3	pH
LTAB	6,10	6,20	6,20	6,10

Tabla 99: Porcentaje de Humedad del LTAB

Recipiente (C= 1 a 5)	T (°C)	Peso bandeja (g)	Peso b + m (g)	Peso muestra (g)	P (Kg)	H (%)
LTAB-C1	To	1337,50	1614,70	277,20	0,277	Ho
	105	958,20	1011,50	53,30	0,053	80,77
	To	1614,70	1891,00	276,30	0,276	Ho
	105	958,20	1012,20	54,00	0,054	80,46
	To	1891,00	2167,20	276,20	0,276	Ho
	105	958,20	1012,20	54,00	0,054	80,45
LTAB-C2	To	1350,60	1624,50	273,90	0,274	Ho
	105	958,20	1010,60	52,40	0,052	80,87
	To	1624,50	1894,30	269,80	0,270	Ho
	105	958,20	1009,70	51,50	0,052	80,91
	To	1894,30	2172,10	277,80	0,278	Ho
	105	958,20	1013,10	54,90	0,055	80,24
LTAB-C3	To	2166,00	2433,00	267,00	0,267	Ho
	105	958,20	1010,70	52,50	0,053	80,34
	To	2169,10	2436,40	267,30	0,267	Ho
	105	958,20	1010,60	52,40	0,052	80,40
	To	2436,40	2704,00	267,60	0,268	Ho
	105	958,20	1010,70	52,50	0,053	80,38
LTAB-C4	To	1359,50	1633,80	274,30	0,274	Ho
	105	958,10	1010,80	52,70	0,053	80,79
	To	1633,80	1894,70	260,90	0,261	Ho
	105	958,10	1008,40	50,30	0,050	80,72
	To	1894,70	2160,20	265,50	0,266	Ho
	105	958,10	1009,20	51,10	0,051	80,75
LTAB-C5	To	2160,20	2439,40	279,20	0,279	Ho
	105	958,10	1012,10	54,00	0,054	80,66
	To	958,30	1240,00	281,70	0,282	Ho
	105	958,10	1014,10	56,00	0,056	80,12
	To	1240,00	1519,20	279,20	0,279	Ho
	105	958,10	1013,40	55,30	0,055	80,19

Tabla 100: Densidad del LTAB crudo

Recipiente (C= 1 a 5)	P (Kg)	V (m3)	ρ (kg/m3)
LTAB-M1	0,2772	0,0003	1082,81
	0,2763	0,0003	1079,30
	0,2762	0,0003	1078,91
LTAB-M2	0,2739	0,0003	1069,92
	0,2698	0,0003	1053,91
	0,2778	0,0003	1085,16
LTAB-M3	0,267	0,0003	1042,97
	0,2673	0,0003	1044,14
	0,2676	0,0003	1045,31
LTAB-M4	0,2743	0,0003	1071,48
	0,2609	0,0003	1019,14
	0,2655	0,0003	1037,11
LTAB-M5	0,2792	0,0003	1090,63
	0,2817	0,0003	1100,39
	0,2792	0,0003	1090,63

Tabla 101: Densidad del LTAB crudo

	ρ (kg/m3)					ρ (kg/m3)
LTAB	1080,34	1069,66	1044,14	1044,58	1093,88	1066,12

Tabla 102: Densidad del LTAB deshidratado

Muestra	V1 (cm3)	m (g)	V2 (cm3)	ρ (g/cm3)	ρ (g/cm3)
LTAB	0,40	38,98	19,00	2,09	2,09
	0,30	38,91	19,00	2,08	

Tabla 103: Pérdida por calcinación del LTAB

Muestra compuesta (M= 1 a 3)	Peso crisol seco (g)	Peso crisol seco + muestra (g)	Peso crisol+ muestra calcinado (g)	Peso muestra inicial (g)	Peso muestra final (g)	PPC (%)
LTAB-M1	53,46	54,46	54,09	1,00	0,63	37,00
LTAB- M2	58,89	59,89	59,52	1,00	0,64	36,80
LTAB- M3	58,26	59,26	58,89	1,00	0,63	36,70

Anexo B: Datos de ensayo de densidad de la arena

Tabla 104: Calibración del volumen del recipiente: datos y ecuaciones.

$Vr = \frac{Ma}{\rho}; Ma = Mt - Mr - Mp$						
Masa del Recipiente, Mr (g)	Masa de la Placa, Mp (g)	Masa total, Mt (g)	Masa de agua, Ma (g)	Temperatura del agua T (°C)	Densidad agua a 18 °C ρ (kg/m3)	Volumen del recipiente, Vr (m3)
1176,6	265,6	2443,1	1000,9	18	998,59	0,00100231

Tabla 105: Cálculo de la densidad de la arena sin compactar.

M1 (g)	M2(g)	V (m3)	ρ (kg/m3)
1176,60	2700,60	0,001002	1520,48
1176,60	2729,30	0,001002	1549,12
1176,60	2710,50	0,001002	1530,36

Tabla 106: Cálculo de la densidad de la arena compactada.

M1 (g)	M2(g)	V (m3)	ρ (kg/m3)
1176,60	2775,40	0,001002	1595,11
1176,60	2796,00	0,001002	1615,66
1176,60	2795,00	0,001002	1614,66

Anexo C: Datos ensayos de densidad

Tabla 107: Ensayos de Densidad (0 % LTAB)

ID	% LTAB	T (°C)	peso seco (g)	peso saturado 48 h (g)	masa en agua (g)	Densidad ρ (g)
S0 - 4	0	700	204,7	230,5	120,50	2095,45
S0 - 5	0	700	204,1	229,6	120,80	2110,29
S0 - 10	0	800	218,1	245,9	127,80	2082,13
S0 - 11	0	800	219,3	246,8	128,40	2084,46
S0 - 16	0	900	208,5	235,5	122,20	2078,55
S0 - 17	0	900	206,1	232,7	119,80	2061,12
S0 - 22	0	1000	197,5	222,2	112,90	2032,94
S0 - 23	0	1000	196,9	221,7	111,50	2011,80

Tabla 108: Datos de Densidad (5 % LTAB)

ID	% LTAB	T (°C)	peso seco (g)	peso saturado 48 h (g)	masa en agua (g)	Densidad ρ (g)
S5 - 4	5	700	196,3	228,6	115,60	2023,01
S5 - 5	5	700	200	233,5	117,00	2004,29
S5 - 6	5	700	204,2	237	120,00	2025,64
S5 - 10	5	800	196,2	230,6	115,00	1994,81
S5 - 11	5	800	197,9	233	116,90	2006,89

ID	% LTAB	T (°C)	peso seco (g)	peso saturado 48 h (g)	masa en agua (g)	Densidad ρ (g)
S5 - 12	5	800	201,6	235,2	118,80	2020,62
S5 - 16	5	900	196,2	230,4	116,50	2022,83
S5 - 17	5	900	200	235	118,80	2022,38
S5 - 18	5	900	199,4	235	117,30	1996,60
S5 - 22	5	1000	194,1	228,4	116,20	2035,65
S5 - 23	5	1000	196,1	230,7	117,40	2036,19
S5 - 24	5	1000	196,6	230,4	114,30	1984,50

Tabla 109: Datos de Densidad (10 % LTAB)

ID	% LTAB	T (°C)	peso seco (g)	peso saturado 48 h (g)	masa en agua (g)	Densidad ρ (g)
S10 - 4	10	700	196,1	231,2	113,20	1959,32
S10 - 5	10	700	192,9	227,2	111,30	1960,31
S10 - 6	10	700	191,5	226	110,70	1960,10
S10 - 10	10	800	194,2	232,7	113,60	1953,82
S10 - 11	10	800	191,1	226,7	110,60	1952,63
S10 - 12	10	800	193,2	230	111,70	1944,21
S10 - 16	10	900	189,4	230	111,20	1936,03
S10 - 17	10	900	190,1	229,4	111,10	1939,14

ID	% LTAB	T (°C)	peso seco (g)	peso saturado 48 h (g)	masa en agua (g)	Densidad ρ (g)
S10 - 18	10	900	189,2	228,8	111,10	1943,93
S10 - 22	10	1000	188,5	226,4	111,20	1965,28
S10 - 23	10	1000	188,2	226,8	111,00	1958,55

Tabla 110: Datos de Densidad (15 % LTAB)

ID	% LTAB	T (°C)	peso seco (g)	peso saturado 48 h (g)	masa en agua (g)	Densidad ρ (g)
S15 - 4	15	700	184,6	225,9	108,70	1927,47
S15 - 5	15	700	178,2	219,8	99,20	1822,55
S15 - 6	15	700	177,9	219,9	104,10	1898,96
S15 - 10	15	800	182,1	225,8	107,80	1913,56
S15 - 11	15	800	182,9	227,7	106,70	1881,82
S15 - 12	15	800	184,3	228,6	107,90	1893,95
S15 - 16	15	900	185,5	229	110,00	1924,37
S15 - 17	15	900	182,2	225	107,70	1918,16
S15 - 18	15	900	183,6	227,1	107,50	1898,83
S15 - 22	15	1000	183,7	225	107,40	1913,27
S15 - 23	15	1000	184,2	226,1	107,40	1904,80
S15 - 24	15	1000	183,5	225,1	106,50	1897,98

Tabla 111: Datos de Densidad (20 % LTAB)

ID	% LTAB	T (°C)	peso seco (g)	peso saturado 48 h (g)	masa en agua (g)	Densidad ρ (g)
S20 - 4	20	700	174,1	216,9	100,50	1863,40
S20 - 5	20	700	175,9	224	106,20	1901,53
S20 - 6	20	700	184,2	229,7	107,20	1875,10
S20 - 10	20	800	173	218,1	101,10	1864,10
S20 - 11	20	800	159	204,3	95,30	1874,31
S20 - 12	20	800	167,3	207,3	94,30	1834,51
S20 - 16	20	900	163,5	210,5	99,60	1898,11
S20 - 17	20	900	166,5	213,4	99,40	1871,93
S20 - 18	20	900	168,3	209,1	96,10	1850,44
S20 - 22	20	1000	167	210,7	97,90	1867,91
S20 - 23	20	1000	167,1	211,8	99,30	1882,67
S20 - 24	20	1000	169,7	210,1	95,80	1838,15

Anexo D: Datos ensayos de pérdida de peso

Tabla 112: Datos de Pérdida de Peso (0 % LTAB)

ID	% LTAB	T(°C)	Pi (g)	Ps (g)	Pc (g)	Pérdida de peso (%)	
						Por secado	Por cocción
S 0 - 1	0	700	243,4	211,9	204,7	3,4	12,94
S 0 - 2	0	700	252,8	211,3	204,1	3,4	16,42
S 0 - 3	0	700	252,9	211,7	204,6	3,4	16,29
S 0 - 4	0	700	262,5	219,5	212,3	3,3	16,38
S 0 - 5	0	700	263,2	220,5	213,4	3,2	16,22
S 0 - 6	0	700	261,9	219,3	212,3	3,2	16,27
S 0 - 7	0	800	271,9	227,2	218,1	4,0	16,44
S 0 - 8	0	800	272,0	228,2	219,3	3,9	16,10
S 0 - 9	0	800	267,8	224,1	215,4	3,9	16,32
S 0 - 10	0	800	248,5	207,2	198,9	4,0	16,62
S 0 - 11	0	800	252,3	210,3	201,9	4,0	16,65
S 0 - 12	0	800	255,0	213,4	205,0	3,9	16,31
S 0 - 13	0	900	263,1	217,9	208,5	4,3	17,18
S 0 - 14	0	900	260,2	215,2	206,1	4,2	17,29
S 0 - 15	0	900	260,8	216,2	206,9	4,3	17,10
S 0 - 16	0	900	264,7	219,7	210,2	4,3	17,00
S 0 - 17	0	900	266,5	220,1	210,5	4,4	17,41
S 0 - 18	0	900	264,2	218,9	209,6	4,2	17,15

ID	% LTAB	T(°C)	Pi (g)	Ps (g)	Pc (g)	Pérdida de peso (%)	
						Por secado	Por cocción
S 0 - 19	0	1000	248,9	206,4	197,5	4,3	17,08
S 0 - 20	0	1000	248,3	205,7	196,9	4,3	17,16
S 0 - 21	0	1000	253,0	210,0	201,0	4,3	17,00
S 0 - 22	0	1000	253,7	210,7	201,5	4,4	16,95
S 0 - 23	0	1000	255,0	210,2	201,0	4,4	17,57
S 0 - 24	0	1000	252,4	209,2	200,2	4,3	17,12

Tabla 113: Datos de Pérdida de Peso (5 % LTAB)

ID	% LTAB	T(°C)	Pi (g)	Ps (g)	Pc (g)	Pérdida de peso (%)	
						Por secado	Por cocción
S5 - 4	5	700	243,5	204,5	196,3	4,0	16,02
S5 - 5	5	700	248,4	208,3	200	4,0	16,14
S5 - 6	5	700	251,1	212,4	204,2	3,9	15,41
S5 - 10	5	800	244,0	205,8	196,2	4,7	15,66
S5 - 11	5	800	246,1	207,6	197,9	4,7	15,64
S5 - 12	5	800	248,4	211,2	201,6	4,5	14,98
S5 - 16	5	900	250,2	206,2	196,2	4,8	17,59
S5 - 17	5	900	244,2	210,4	200,0	4,9	13,84
S5 - 18	5	900	245,3	209,8	199,4	5,0	14,47
S5 - 22	5	1000	251,8	205,3	194,1	5,5	18,47
S5 - 23	5	1000	248,4	206,8	196,1	5,2	16,75

ID	% LTAB	T(°C)	Pi (g)	Ps (g)	Pc (g)	Pérdida de peso (%)	
						Por secado	Por cocción
S5 - 24	5	1000	244,7	206,9	196,6	5,0	15,45

Tabla 114: Datos de Pérdida de Peso (10 % LTAB)

ID	% LTAB	T(°C)	Pi (g)	Ps (g)	Pc (g)	Pérdida de peso (%)	
						Por secado	Por cocción
S10 - 4	10	700	249,7	206,7	196,1	17,22	5,13
S10 - 5	10	700	248,0	204,3	192,9	17,62	5,58
S10 - 6	10	700	248,6	208,1	191,5	16,29	7,98
S10 - 10	10	800	244,5	207,1	194,2	15,30	6,23
S10- 11	10	800	250,8	202,8	191,1	19,14	5,77
S10 - 12	10	800	250,4	206,1	193,2	17,69	6,26
S10 - 16	10	900	245,0	203,4	189,4	16,98	6,88
S10 - 17	10	900	245,2	203,0	190,1	17,21	6,35
S10 - 18	10	900	244,3	202,8	189,2	16,99	6,71
S10 - 22	10	1000	243,2	202,3	188,5	16,82	6,82
S10 - 23	10	1000	244,3	202,5	188,2	17,11	7,06
S10 - 24	10	1000	246,7	205,5	191,5	16,70	6,81

Tabla 115: Datos de Pérdida de Peso (15 % LTAB)

ID	% LTAB	T(°C)	Pi (g)	Ps (g)	Pc (g)	Pérdida de peso (%)	
						Por secado	Por cocción
S15 - 4	15	700	239,6	197,6	184,6	17,53	6,58
S15 - 5	15	700	234,7	191,2	178,2	18,53	6,80
S15 - 6	15	700	235,0	190,9	177,9	18,77	6,81
S15 - 10	15	800	241,1	197,3	182,1	18,17	7,70
S15 - 11	15	800	241,5	198,2	182,9	17,93	7,72
S15 - 12	15	800	242,9	199,3	184,3	17,95	7,53
S15 - 16	15	900	238,6	200,7	185,5	15,88	7,57
S15 - 17	15	900	235,3	197,5	182,2	16,06	7,75
S15 - 18	15	900	239,6	199,6	183,6	16,69	8,02
S15 - 22	15	1000	236,5	199,7	183,7	15,56	8,01
S15 - 23	15	1000	238,6	200,1	184,2	16,14	7,95
S15 - 24	15	1000	235,7	199,3	183,5	15,44	7,93

Tabla 116: Datos de Pérdida de Peso (20 % LTAB)

ID	% LTAB	T(°C)	Pi (g)	Ps (g)	Pc (g)	Pérdida de peso (%)	
						Por secado	Por cocción
S20 - 4	20	700	248,6	198,2	174,1	20,27	12,16
S20 - 5	20	700	250,7	199,7	175,9	20,34	11,92
S20 - 6	20	700	250,5	200,1	184,2	20,12	7,95
S20 - 10	20	800	243,5	198,9	173,0	18,32	13,02

ID	% LTAB	T(°C)	Pi (g)	Ps (g)	Pc (g)	Pérdida de peso (%)	
						Por secado	Por cocción
S20 - 11	20	800	236,9	188,8	159,0	20,30	15,78
S20 - 12	20	800	234,1	185,8	167,3	20,63	9,96
S20 - 16	20	900	242,8	192,9	163,5	20,55	15,24
S20 - 17	20	900	239,1	190,0	166,5	20,54	12,37
S20 - 18	20	900	238,5	188,7	168,3	20,88	10,81
S20 - 22	20	1000	237,7	188,9	167,0	20,53	11,59
S20 - 23	20	1000	240,2	190,8	167,1	20,57	12,42
S20 - 24	20	1000	239,7	189,8	169,7	20,82	10,59

Anexo E: Datos del ensayo de Resistencia a la Compresión

Tabla 117: Datos de Resistencia a la Compresión (0 % LTAB)

ID	% LTAB	T (°C)	L1 (mm)	L2 (mm)	Área (cm ²)	G (kN)	G (Kg)	Resistencia compresión (kg/cm ²)
S 0 - 1	0	700	4800	4800	23,04	2,8	286	12,39
S 0 - 2	0	700	4808	4852	23,33	1,7	173	7,43
S 0 - 3	0	700	4845	4830	23,40	3,4	347	14,82
S 0 - 4	0	700	4861	4908	23,86	3,3	337	14,10
S 0 - 5	0	700	4924	4822	23,74	4,2	428	18,04
S 0 - 6	0	700	4894	4837	23,67	4	408	17,23
S 0 - 7	0	800	4974	4880	24,27	5,8	591	24,37
S 0 - 8	0	800	4870	4963	24,17	4,3	438	18,14
S 0 - 9	0	800	4856	4926	23,92	5,1	520	21,74
S 0 - 10	0	800	4794	4827	23,14	5,5	561	24,24
S 0 - 11	0	800	4826	4844	23,38	3,7	377	16,14
S 0 - 12	0	800	4878	4835	23,59	5,4	551	23,35
S 0 - 13	0	900	4978	4849	24,14	8,7	887	36,75
S 0 - 14	0	900	4702	4781	22,48	3,7	377	16,78
S 0 - 15	0	900	4883	4863	23,75	7,5	765	32,21
S 0 - 16	0	900	4933	4951	24,42	6,9	704	28,81
S 0 - 17	0	900	4909	4884	23,98	5	510	21,27
S 0 - 18	0	900	4948	4962	24,55	5,9	602	24,50
S 0 - 19	0	1000	4881	4770	23,28	11,2	1142	49,05
S 0 - 20	0	1000	4763	4808	22,90	5,7	581	25,38
S 0 - 21	0	1000	4929	4876	24,03	6,2	632	26,31
S 0 - 22	0	1000	4921	4864	23,94	8,2	836	34,93
S 0 - 23	0	1000	4902	4824	23,65	10,6	1081	45,71
S 0 - 24	0	1000	4951	4788	23,71	6,7	683	28,82

Tabla 118: Datos de Resistencia a la Compresión (5 % LTAB)

ID	% LTA B	T (°C)	L1 (mm)	L2 (mm)	Área (cm ²)	G (kN)	G (Kg)	Resistencia compresión (kg/ cm ²)
S 5 - 1	5	700	4901	4926	24,14	3,4	347	14,36
S 5 - 2	5	700	4895	4873	23,85	3,4	347	14,53
S 5 - 3	5	700	4934	4835	23,86	3,6	367	15,39
S 5 - 4	5	700	4920	4934	24,28	3,4	347	14,28
S 5 - 5	5	700	4820	4824	23,25	3,1	316	13,60
S 5 - 6	5	700	4814	4810	23,16	3	306	13,21
S 5 - 7	5	800	4868	4935	24,02	3,4	347	14,43
S 5 - 8	5	800	4893	4960	24,27	3,7	377	15,55
S 5 - 9	5	800	4896	4939	24,18	3,4	347	14,34
S 5 - 10	5	800	4933	4920	24,27	3,1	316	13,02
S 5 - 11	5	800	4898	4921	24,10	3,4	347	14,38
S 5 - 12	5	800	4903	4910	24,07	3,5	357	14,83
S 5 - 13	5	900	4996	4920	24,58	7,3	744	30,28
S 5 - 14	5	900	4947	4936	24,42	6,5	663	27,14
S 5 - 15	5	900	4968	4949	24,59	6	612	24,88
S 5 - 16	5	900	4898	4903	24,01	7,6	775	32,27
S 5 - 17	5	900	4921	4910	24,16	6,7	683	28,28
S 5 - 18	5	900	4954	4920	24,37	6,7	683	28,03
S 5 - 19	5	1000	4904	4898	24,02	9,9	1010	42,03
S 5 - 20	5	1000	4903	4921	24,13	6	612	25,36
S 5 - 21	5	1000	4942	4933	24,38	7,2	734	30,12
S 5 - 22	5	1000	4868	4890	23,80	10,2	1040	43,69
S 5 - 23	5	1000	4933	4898	24,16	7,2	734	30,39
S 5 - 24	5	1000	4903	4920	24,12	7,8	795	32,97

Tabla 119: Datos de Resistencia a la Compresión (10 % LTAB)

ID	% LTAB	T (°C)	L1 (mm)	L2 (mm)	Área (cm ²)	G (kN)	G (Kg)	Resistencia compresión (kg/cm ²)
S 10 - 1	10	700	4957	4967	24,62	2	204	8,28
S 10 - 2	10	700	4933	4968	24,51	2,2	224	9,15
S 10 - 3	10	700	4896	4956	24,26	2	204	8,40
S 10 - 4	10	700	4921	4986	24,54	2,4	245	9,97
S 10 - 5	10	700	4915	4972	24,44	2,1	214	8,76
S 10 - 6	10	700	4889	4945	24,18	2,5	255	10,54
S 10 - 7	10	800	5060	4960	25,10	3	306	12,19
S 10 - 8	10	800	4996	4930	24,63	2,6	265	10,76
S 10 - 9	10	800	4885	4996	24,41	3,1	316	12,95
S 10-10	10	800	4945	4988	24,67	3	306	12,40
S 10-11	10	800	4887	4892	23,91	2,3	235	9,81
S 10-12	10	800	4897	4893	23,96	2,6	265	11,06
S 10-13	10	900	4895	4914	24,05	5,4	551	22,89
S 10-14	10	900	4943	4957	24,50	5,4	551	22,47
S 10-15	10	900	4958	4859	24,09	5,9	602	24,97
S 10-16	10	900	4998	4939	24,69	5,2	530	21,48
S 10-17	10	900	4916	5081	24,98	4,2	428	17,15
S 10-18	10	900	4890	4994	24,42	4,5	459	18,79
S 10-19	10	1000	4858	4923	23,92	6,8	693	28,99
S 10-20	10	1000	4891	4950	24,21	5,3	540	22,32
S 10-21	10	1000	4872	4907	23,91	8,4	857	35,83
S 10-22	10	1000	4955	4872	24,14	6,8	693	28,72
S 10-23	10	1000	4895	4944	24,20	5,2	530	21,91
S 10-24	10	1000	4895	4852	23,75	5,9	602	25,33

Tabla 120: Datos de Resistencia a la Compresión (15 % LTAB)

ID	% LTAB	T (°C)	L1 (mm)	L2 (mm)	Área (cm ²)	G (kN)	G (Kg)	Resistencia compresión (kg/cm ²)
S 15 - 1	15	700	4953	5000	24,77	2	204	8,24
S 15 - 2	15	700	4998	4981	24,90	1,8	184	7,37
S 15 - 3	15	700	4915	4965	24,40	1,9	194	7,94
S 15 - 4	15	700	5001	4997	24,99	2,3	235	9,38
S 15 - 5	15	700	4998	4987	24,93	1,1	112	4,50
S 15 - 6	15	700	4996	4985	24,91	1,2	122	4,91
S 15 - 7	15	800	5118	4991	25,54	1,9	194	7,58
S 15 - 8	15	800	5111	4923	25,16	2	204	8,11
S 15 - 9	15	800	4944	5092	25,17	1,7	173	6,89
S 15-10	15	800	4992	4970	24,81	2,3	235	9,45
S 15-11	15	800	5000	4998	24,99	1,9	194	7,75
S 15-12	15	800	4950	4962	24,56	1,7	173	7,06
S 15-13	15	900	5032	4977	25,04	3,9	398	15,88
S 15-14	15	900	4968	5000	24,84	3,8	387	15,60
S 15-15	15	900	4983	5000	24,92	4	408	16,37
S 15-16	15	900	4982	4981	24,82	4	408	16,44
S 15-17	15	900	4964	4978	24,71	3,5	357	14,44
S 15-18	15	900	5002	4998	25,00	3,4	347	13,87
S 15-19	15	1000	4916	4950	24,33	4,2	428	17,60
S 15-20	15	1000	4949	5000	24,75	5,2	530	21,43
S 15-21	15	1000	4906	4937	24,22	4,5	459	18,94
S 15-22	15	1000	4984	4992	24,88	3,7	377	15,16
S 15-23	15	1000	4993	4996	24,95	3,7	377	15,12
S 15-24	15	1000	4895	4994	24,45	3,5	357	14,60

Tabla 121: Datos de Resistencia a la Compresión (20 % LTAB)

ID	% LTAB	T (°C)	L1 (mm)	L2 (mm)	Área (cm ²)	G (kN)	G (Kg)	Resistencia compresión (kg/cm ²)
S 20 - 1	20	700	5182	4968	25,74	0,9	92	3,56
S 20 - 2	20	700	5070	5047	25,59	1,2	122	4,78
S 20 - 3	20	700	5103	5030	25,67	1,3	133	5,16
S 20 - 4	20	700	5005	4984	24,94	0,9	92	3,68
S 20 - 5	20	700	4975	4989	24,82	1,4	143	5,75
S 20 - 6	20	700	5075	5033	25,54	1,4	143	5,59
S 20 - 7	20	800	5070	5124	25,98	1,4	143	5,50
S 20 - 8	20	800	5093	4958	25,25	1,3	133	5,25
S 20 - 9	20	800	5114	4930	25,21	1,4	143	5,66
S 20-10	20	800	4831	4936	23,85	1,3	133	5,56
S 20-11	20	800	4862	4834	23,50	0,7	71	3,04
S 20-12	20	800	4877	4846	23,63	0,9	92	3,88
S 20-13	20	900	4806	5019	24,12	1,9	194	8,03
S 20-14	20	900	5065	5025	25,45	1,8	184	7,21
S 20-15	20	900	4862	4910	23,87	1,8	184	7,69
S 20-16	20	900	4885	4865	23,77	1,2	122	5,15
S 20-17	20	900	4865	4870	23,69	1,2	122	5,16
S 20-18	20	900	4934	4949	24,42	1,5	153	6,26
S 20-19	20	1000	4903	4920	24,12	2	204	8,45
S 20-20	20	1000	4922	4922	24,23	1,8	184	7,58
S 20-21	20	1000	4863	4942	24,03	2,3	235	9,76
S 20-22	20	1000	4856	4835	23,48	1,3	133	5,65
S 20-23	20	1000	4862	4850	23,58	1,5	153	6,49
S 20-24	20	1000	4940	4946	24,43	1,6	163	6,68

Anexo F: Datos ensayos de contracción volumétrica

Tabla 122: Contracción Volumétrica (0 % LTAB)

ID	% LTAB	T (°C)	L1 (mm)	L2 (mm)	Área (cm ²)	Contracción Volumétrica (%)
S 0 - 1	0	700	4800	4800	23,04	7,84
S 0 - 2	0	700	4808	4852	23,33	6,69
S 0 - 3	0	700	4845	4830	23,40	6,39
S 0 - 4	0	700	4861	4908	23,86	4,57
S 0 - 5	0	700	4924	4822	23,74	5,03
S 0 - 6	0	700	4894	4837	23,67	5,31
S 0 - 7	0	800	4974	4880	24,27	2,91
S 0 - 8	0	800	4870	4963	24,17	3,32
S 0 - 9	0	800	4856	4926	23,92	4,32
S 0 - 10	0	800	4794	4827	23,14	7,44
S 0 - 11	0	800	4826	4844	23,38	6,49
S 0 - 12	0	800	4878	4835	23,59	5,66
S 0 - 13	0	900	4978	4849	24,14	3,45
S 0 - 14	0	900	4702	4781	22,48	10,08
S 0 - 15	0	900	4883	4863	23,75	5,02
S 0 - 16	0	900	4933	4951	24,42	2,31
S 0 - 17	0	900	4909	4884	23,98	4,10
S 0 - 18	0	900	4948	4962	24,55	1,79

ID	% LTAB	T (°C)	L1 (mm)	L2 (mm)	Área (cm ²)	Contracción Volumétrica (%)
S 0 - 19	0	1000	4881	4770	23,28	6,87
S 0 - 20	0	1000	4763	4808	22,90	8,40
S 0 - 21	0	1000	4929	4876	24,03	3,86
S 0 - 22	0	1000	4921	4864	23,94	4,26
S 0 - 23	0	1000	4902	4824	23,65	5,41
S 0 - 24	0	1000	4951	4788	23,71	5,18

Tabla 123: Contracción Volumétrica (5 % LTAB)

ID	% LTAB	T (°C)	L1 (mm)	L2 (mm)	Área (cm ²)	Contracción Volumétrica (%)
S 5 - 1	5	700	4901	4926	24,14	3,43
S 5 - 2	5	700	4895	4873	23,85	4,59
S 5 - 3	5	700	4934	4835	23,86	4,58
S 5 - 4	5	700	4920	4934	24,28	2,90
S 5 - 5	5	700	4820	4824	23,25	6,99
S 5 - 6	5	700	4814	4810	23,16	7,38
S 5 - 7	5	800	4868	4935	24,02	3,91
S 5 - 8	5	800	4893	4960	24,27	2,92
S 5 - 9	5	800	4896	4939	24,18	3,27
S 5 - 10	5	800	4933	4920	24,27	2,92
S 5 - 11	5	800	4898	4921	24,10	3,59

ID	% LTAB	T (°C)	L1 (mm)	L2 (mm)	Área (cm ²)	Contracción Volumétrica (%)
S 5 - 12	5	800	4903	4910	24,07	3,71
S 5 - 13	5	900	4996	4920	24,58	1,68
S 5 - 14	5	900	4947	4936	24,42	2,33
S 5 - 15	5	900	4968	4949	24,59	1,65
S 5 - 16	5	900	4898	4903	24,01	3,94
S 5 - 17	5	900	4921	4910	24,16	3,35
S 5 - 18	5	900	4954	4920	24,37	2,51
S 5 - 19	5	1000	4904	4898	24,02	3,92
S 5 - 20	5	1000	4903	4921	24,13	3,49
S 5 - 21	5	1000	4942	4933	24,38	2,48
S 5 - 22	5	1000	4868	4890	23,80	4,78
S 5 - 23	5	1000	4933	4898	24,16	3,35
S 5 - 24	5	1000	4903	4920	24,12	3,51

Tabla 124: Contracción Volumétrica (10 % LTAB)

ID	% LTAB	T (°C)	L1 (mm)	L2 (mm)	Área (cm ²)	Contracción Volumétrica (%)
S 10 - 1	10	700	4957	4967	24,62	1,51
S 10 - 2	10	700	4933	4968	24,51	1,97
S 10 - 3	10	700	4896	4956	24,26	2,94
S 10 - 4	10	700	4921	4986	24,54	1,86

ID	% LTAB	T (°C)	L1 (mm)	L2 (mm)	Área (cm ²)	Contracción Volumétrica (%)
S 10 - 5	10	700	4915	4972	24,44	2,25
S 10 - 6	10	700	4889	4945	24,18	3,30
S 10 - 7	10	800	5060	4960	25,10	-0,39
S 10 - 8	10	800	4996	4930	24,63	1,48
S 10 - 9	10	800	4885	4996	24,41	2,38
S 10 - 10	10	800	4945	4988	24,67	1,34
S 10 - 11	10	800	4887	4892	23,91	4,37
S 10 - 12	10	800	4897	4893	23,96	4,16
S 10 - 13	10	900	4895	4914	24,05	3,78
S 10 - 14	10	900	4943	4957	24,50	1,99
S 10 - 15	10	900	4958	4859	24,09	3,64
S 10 - 16	10	900	4998	4939	24,69	1,26
S 10 - 17	10	900	4916	5081	24,98	0,09
S 10 - 18	10	900	4890	4994	24,42	2,32
S 10 - 19	10	1000	4858	4923	23,92	4,34
S 10 - 20	10	1000	4891	4950	24,21	3,16
S 10 - 21	10	1000	4872	4907	23,91	4,37
S 10 - 22	10	1000	4955	4872	24,14	3,44
S 10 - 23	10	1000	4895	4944	24,20	3,20
S 10 - 24	10	1000	4895	4852	23,75	5,00

Tabla 125: Contracción Volumétrica (15 % LTAB)

ID	% LTAB	T (°C)	L1 (mm)	L2 (mm)	Área (cm ²)	Contracción Volumétrica (%)
S 15 - 1	15	700	4953	5000	24,77	0,94
S 15 - 2	15	700	4998	4981	24,90	0,42
S 15 - 3	15	700	4915	4965	24,40	2,39
S 15 - 4	15	700	5001	4997	24,99	0,04
S 15 - 5	15	700	4998	4987	24,93	0,30
S 15 - 6	15	700	4996	4985	24,91	0,38
S 15 - 7	15	800	5118	4991	25,54	-2,18
S 15 - 8	15	800	5111	4923	25,16	-0,65
S 15 - 9	15	800	4944	5092	25,17	-0,70
S 15 - 10	15	800	4992	4970	24,81	0,76
S 15 - 11	15	800	5000	4998	24,99	0,04
S 15 - 12	15	800	4950	4962	24,56	1,75
S 15 - 13	15	900	5032	4977	25,04	-0,18
S 15 - 14	15	900	4968	5000	24,84	0,64
S 15 - 15	15	900	4983	5000	24,92	0,34
S 15 - 16	15	900	4982	4981	24,82	0,74

ID	% LTAB	T (°C)	L1 (mm)	L2 (mm)	Área (cm ²)	Contracción Volumétrica (%)
S 15 - 17	15	900	4964	4978	24,71	1,16
S 15 - 18	15	900	5002	4998	25,00	0,00
S 15 - 19	15	1000	4916	4950	24,33	2,66
S 15 - 20	15	1000	4949	5000	24,75	1,02
S 15 - 21	15	1000	4906	4937	24,22	3,12
S 15 - 22	15	1000	4984	4992	24,88	0,48
S 15 - 23	15	1000	4993	4996	24,95	0,22
S 15 - 24	15	1000	4895	4994	24,45	2,22

Tabla 126: Contracción Volumétrica (20 % LTAB)

ID	% LTAB	T (°C)	L1 (mm)	L2 (mm)	Área (cm ²)	Contracción Volumétrica (%)
S 20 - 1	20	700	5182	4968	25,74	-2,98
S 20 - 2	20	700	5070	5047	25,59	-2,35
S 20 - 3	20	700	5103	5030	25,67	-2,67
S 20 - 4	20	700	5005	4984	24,94	0,22
S 20 - 5	20	700	4975	4989	24,82	0,72
S 20 - 6	20	700	5075	5033	25,54	-2,17

ID	% LTAB	T (°C)	L1 (mm)	L2 (mm)	Área (cm ²)	Contracción Volumétrica (%)
S 20 - 7	20	800	5070	5124	25,98	-3,91
S 20 - 8	20	800	5093	4958	25,25	-1,00
S 20 - 9	20	800	5114	4930	25,21	-0,85
S 20 - 10	20	800	4831	4936	23,85	4,62
S 20 - 11	20	800	4862	4834	23,50	5,99
S 20 - 12	20	800	4877	4846	23,63	5,46
S 20 - 13	20	900	4806	5019	24,12	3,51
S 20 - 14	20	900	5065	5025	25,45	-1,81
S 20 - 15	20	900	4862	4910	23,87	4,51
S 20 - 16	20	900	4885	4865	23,77	4,94
S 20 - 17	20	900	4865	4870	23,69	5,23
S 20 - 18	20	900	4934	4949	24,42	2,33
S 20 - 19	20	1000	4903	4920	24,12	3,51
S 20 - 20	20	1000	4922	4922	24,23	3,10
S 20 - 21	20	1000	4863	4942	24,03	3,87
S 20 - 22	20	1000	4856	4835	23,48	6,08
S 20 - 23	20	1000	4862	4850	23,58	5,68

ID	% LTAB	T (°C)	L1 (mm)	L2 (mm)	Área (cm ²)	Contracción Volumétrica (%)
S 20 - 24	20	1000	4940	4946	24,43	2,27

Anexo G: Datos de los ensayos de Absorción de agua

Tabla 127: Absorción por Succión Capilar (0 % LTAB, 30min)

ID	% LTAB	T (°C)	peso seco (g)	Tiempo (min)										
				0,5	1	2	3	4	5	10	15	20	25	30
S0 - 1	0	700	204,7	207,3	208,5	209,9	211,0	212,1	212,9	215,0	216,8	216,5	216,5	216,5
S0 - 2	0	700	204,1	207,3	208,8	210,4	211,7	212,8	213,7	216,0	217,8	217,5	217,5	217,5
S0 - 3	0	700	204,6	207,3	208,6	210,1	211,4	212,5	213,4	215,6	217,4	217,1	217,1	217,1
S0 - 4	0	700	212,3	215,0	216,5	218,1	219,6	220,7	221,6	223,8	225,6	225,3	225,3	225,3
S0 - 5	0	700	213,4	215,8	217,1	218,7	220,0	221,2	222,2	224,4	226,2	225,9	225,9	225,9
S0 - 6	0	700	212,3	214,3	215,3	216,6	217,7	218,8	219,5	221,7	223,5	223,2	223,2	223,2
S0 - 7	0	800	218,1	220,9	222,3	223,7	225,0	226,1	227,0	229,4	231,2	230,9	230,9	230,9
S0 - 8	0	800	219,3	222,0	223,7	225,2	226,4	227,5	228,5	230,8	232,6	232,3	232,3	232,3
S0 - 9	0	800	215,4	218,2	220,0	221,7	222,8	223,9	224,9	227,2	229,0	228,7	228,7	228,7
S0 - 10	0	800	198,9	201,9	203,2	204,7	205,8	206,6	207,5	209,5	211,3	211,0	211,0	211,0
S0 - 11	0	800	201,9	205,3	207,0	208,5	209,8	210,6	211,6	213,6	215,4	215,1	215,1	215,1
S0 - 12	0	800	205,0	208,4	210,1	211,7	212,9	213,9	214,9	217,0	218,8	218,5	218,5	218,5
S0 - 13	0	900	208,5	211,0	212,7	214,2	215,3	216,6	217,5	220,1	221,9	221,6	221,6	221,6
S0 - 14	0	900	206,1	209,1	210,8	212,4	213,4	214,8	215,7	218,5	220,3	220,0	220,0	220,0
S0 - 15	0	900	206,9	209,4	210,7	212,3	213,4	214,4	215,3	217,8	219,6	219,3	219,3	219,3

ID	% LTAB	T (°C)	peso seco (g)	Tiempo (min)										
				0,5	1	2	3	4	5	10	15	20	25	30
S0 - 16	0	900	210,2	212,9	214,6	216,1	217,5	218,6	219,4	222,2	224,0	223,7	223,7	223,7
S0 - 17	0	900	210,5	213,2	214,8	216,2	217,4	218,4	219,3	221,9	223,7	223,4	223,4	223,4
S0 - 18	0	1000	209,6	212,4	213,9	215,3	216,3	217,6	218,3	220,5	222,3	222,0	222,0	222,0
S0 - 19	0	1000	197,5	201,7	203,9	206,3	208,2	209,4	210,4	213,2	215,0	214,7	214,7	214,7
S0 - 20	0	1000	196,9	201,6	203,5	206,0	207,6	208,8	209,5	212,1	213,9	213,6	213,6	213,6
S0 - 21	0	1000	201,0	205,4	207,7	210,2	212,1	213,2	214,3	217,2	219,0	218,7	218,7	218,7
S0 - 22	0	1000	201,5	206,3	208,6	210,9	212,8	214,0	215,2	218,1	219,9	219,6	219,6	219,6
S0 - 23	0	1000	201,0	204,8	206,6	208,8	210,4	211,7	212,6	215,2	217,0	216,7	216,7	216,7
S0 - 24	0	1000	200,2	204,4	206,4	208,5	210,4	211,6	212,7	215,6	217,4	217,1	217,1	217,1

Tabla 128: Absorción por Succión Capilar (0 % LTAB, 35-75 min)

ID	Tiempo (min)									lado a	lado b	área
	35	40	45	50	55	60	65	70	75	m	m	m2
S0 – 1	217,2	217,9	218,3	218,6	218,9	219,2	219,8	220,0	220,0	0,048	0,05	0,0024
S0 – 2	218,2	218,9	219,3	219,6	219,9	220,2	220,8	221,0	221,0	0,049	0,051	0,0025
S0 – 3	217,8	218,5	218,9	219,2	219,5	219,8	220,0	220,0	220,6	0,048	0,048	0,0023
S0 – 4	226,0	226,7	227,1	227,4	227,7	228,0	228,2	228,2	228,8	0,049	0,05	0,0025
S0 – 5	226,6	227,3	227,7	228,0	228,3	228,6	228,8	228,8	229,4	0,049	0,05	0,0025
S0 – 6	223,9	224,6	225,0	225,3	225,6	225,9	226,1	226,1	226,7	0,05	0,048	0,0024
S0 – 7	231,6	232,3	232,7	233,0	233,3	233,6	233,8	233,8	234,4	0,051	0,049	0,0025
S0 – 8	233,0	233,7	234,1	234,4	234,7	235,0	235,2	235,2	235,8	0,05	0,049	0,0025
S0 – 9	229,4	230,1	230,5	230,8	231,1	231,4	231,6	231,6	232,2	0,051	0,05	0,0026
S0 – 10	211,7	212,4	212,8	213,1	213,4	213,7	213,9	213,9	214,5	0,047	0,048	0,0023
S0 – 11	215,8	216,5	216,9	217,2	217,5	217,8	218,0	218,0	218,6	0,048	0,046	0,0022
S0 – 12	219,2	219,9	220,3	220,6	220,9	221,2	221,4	221,4	222,0	0,048	0,048	0,0023
S0 – 13	222,3	223,0	223,4	223,7	224,0	224,3	224,5	224,5	225,1	0,048	0,05	0,0024
S0 – 14	220,7	221,4	221,8	222,1	222,4	222,7	222,9	222,9	223,5	0,048	0,05	0,0024
S0 – 15	220,0	220,7	221,1	221,4	221,7	222,0	222,2	222,2	223,8	0,049	0,048	0,0024
S0 – 16	224,4	225,1	225,5	225,8	226,1	226,4	226,6	226,6	227,2	0,049	0,049	0,0024

ID	Tiempo (min)									lado a	lado b	área
	35	40	45	50	55	60	65	70	75	m	m	m2
S0 – 17	224,1	224,8	225,2	225,5	225,8	226,1	226,3	226,3	226,9	0,05	0,05	0,0025
S0 – 18	222,7	223,4	223,8	224,1	224,4	224,7	224,9	224,9	225,5	0,05	0,051	0,0026
S0 – 19	215,4	216,1	216,5	216,8	217,1	217,4	217,6	217,6	218,2	0,05	0,049	0,0025
S0 – 20	214,3	215,0	215,4	215,7	216,0	216,3	216,5	216,5	217,1	0,05	0,049	0,0025
S0 – 21	219,4	220,1	220,5	220,8	221,1	221,4	221,6	221,6	222,2	0,049	0,049	0,0024
S0 – 22	220,3	221,0	221,4	221,7	222,0	222,3	222,5	222,5	223,1	0,049	0,048	0,0024
S0 – 23	217,4	218,1	218,5	218,8	219,1	219,4	219,6	220,0	220,2	0,049	0,05	0,0025
S0 – 24	217,8	218,5	218,9	219,2	219,5	219,8	220,0	220,4	220,6	0,048	0,049	0,0024

Tabla 129: Absorción por Succión Capilar (5 % LTAB, 30 min)

ID	% LTAB	T (°C)	peso seco (g)	Tiempo (min)										
				0,5	1	2	3	4	5	10	15	20	25	30
S5 - 4	5	700	196,3	197,2	197,7	198,4	199,0	199,2	199,5	200,8	201,7	202,9	204,0	205,0
S5 - 5	5	700	200,0	201,2	201,8	202,6	202,5	202,9	203,4	204,2	205,4	206,7	207,6	208,1
S5 - 6	5	700	204,2	205,3	206,1	206,8	207,6	208,2	208,8	210,5	211,3	212,3	212,9	213,7
S5 - 10	5	800	196,2	197,4	198,5	199,1	199,6	200,3	200,7	203,0	204,3	205,3	206,7	207,5
S5 - 11	5	800	197,9	199,2	199,9	200,6	201,0	201,7	202,1	203,6	204,2	205,4	206,3	206,9
S5 - 12	5	800	201,6	202,8	203,7	204,7	205,5	206,3	206,8	209,1	211,0	212,0	213,4	214,4
S5 - 16	5	900	196,2	197,6	199,2	200,4	201,2	202,0	202,9	205,1	206,4	207,7	209,4	211,0
S5 - 17	5	900	200,0	201,4	202,7	203,4	204,1	205,0	205,6	208,7	210,8	212,0	213,2	214,2
S5 - 18	5	900	199,4	200,7	201,7	202,7	203,4	204,1	204,5	206,5	208,1	209,3	210,4	211,6
S5 - 22	5	1000	194,1	196,6	197,9	198,9	200,1	201,0	201,7	203,7	206,1	207,4	208,4	209,6
S5 - 23	5	1000	196,1	198,2	199,5	200,0	202,0	202,7	203,2	205,8	208,1	209,5	211,1	212,2
S5 - 24	5	1000	196,6	198,2	198,9	199,8	200,4	200,6	201,1	203,2	204,5	205,6	206,4	207,7

Tabla 130: Absorción por Succión Capilar (5 % LTAB,35-75 min)

ID	Tiempo (min)									lado a	lado b	área
	35	40	45	50	55	60	65	70	75	m	m	m2
S5 - 4	205,8	206,6	207,5	208,0	208,3	209,0	209,0	209,5	209,8	0,0489	0,0482	0,0024
S5 - 5	209,1	209,7	210,7	211,3	211,8	212,2	212,6	212,9	213,2	0,0490	0,0486	0,0024
S5 - 6	214,5	215,2	216,1	216,5	216,9	217,4	217,8	218,1	220,2	0,0488	0,0491	0,0024
S5 - 10	208,2	208,8	209,4	209,5	209,8	210,3	210,7	211,5	212,0	0,0482	0,0486	0,0023
S5 - 11	207,8	208,3	208,8	209,1	209,8	210,1	210,1	210,9	211,1	0,0488	0,0493	0,0024
S5 - 12	215,7	215,5	126,0	216,5	216,9	217,4	217,9	218,4	218,5	0,0486	0,0488	0,0024
S5 - 16	212,5	213,6	215,0	215,6	216,9	217,1	217,3	218,4	218,9	0,0488	0,0491	0,0024
S5 - 17	215,9	216,9	218,0	218,6	219,8	220,7	221,0	221,8	222,6	0,0494	0,0488	0,0024
S5 - 18	212,2	213,2	213,9	214,9	215,6	216,3	216,9	217,5	218,0	0,0495	0,0483	0,0024
S5 - 22	210,3	211,1	212,0	212,9	213,5	213,8	214,3	214,9	215,5	0,0505	0,0490	0,0025
S5 - 23	213,4	214,2	214,8	215,4	216,2	216,7	217,1	217,8	218,1	0,0492	0,0493	0,0024
S5 - 24	208,4	209,5	210,0	210,6	210,9	211,1	211,9	212,7	213,1	0,0491	0,0494	0,0024

Tabla 131: Absorción por Succión Capilar (10 % LTAB, 30 min)

ID	% LTAB	T (°C)	peso seco (g)	Tiempo (min)										
				0,5	1	2	3	4	5	10	15	20	25	30
S10 - 4	10	700	196,1	197,5	198,3	199,0	199,7	202,0	203,1	208,2	209,4	210,1	211,2	212,3
S10 - 5	10	700	192,9	196,1	197,2	199,4	200,5	201,4	202,3	207,1	208,1	209,2	210,3	211,5
S10 - 6	10	700	191,5	197,0	198,3	199,7	199,9	200,5	200,9	203,7	204,7	205,6	205,7	206,1
S10 -10	10	800	194,2	196,7	198,1	200,4	201,9	202,8	204,0	208,1	209,6	211,1	212,3	213,5
S10 -11	10	800	191,1	192,8	194,1	195,9	197,4	198,2	199,2	204,6	206,1	207,4	208,9	209,7
S10 -12	10	800	193,2	194,1	195,2	197,4	198,1	198,4	199,3	202,6	203,9	204,8	205,4	206,1
S10 -16	10	900	189,4	192,2	193,4	197,2	198,9	199,8	200,7	208,3	210,4	212,0	213,6	215,8
S10 -17	10	900	190,1	193,2	195,1	197,9	199,5	200,8	202,0	209,5	211,9	213,0	214,5	215,9
S10 -18	10	900	189,2	191,7	192,7	195,7	197,5	198,8	200,1	205,3	207,8	210,2	211,9	213,1
S10 -22	10	1000	188,5	191,1	192,5	194,1	195,1	200,3	203,1	208,1	213,0	216,0	218,4	220,7
S10 -23	10	1000	188,2	191,1	192,5	193,7	194,8	201,1	203,0	207,8	211,3	214,3	217,3	219,0
S10 -24	10	1000	191,5	193,5	194,7	195,7	196,8	201,8	204,1	208,7	213,2	217,0	220,0	222,5

Tabla 132: Absorción por Succión Capilar (10 % LTAB, 35-75 min)

ID	Tiempo (min)									lado a	lado b	área
	35	40	45	50	55	60	65	70	75	m	m	m2
S10 - 4	212,5	213,4	214,1	214,8	215,6	215,8	216,6	217,1	217,2	0,0496	0,0501	0,0025
S10 - 5	211,8	212,3	213,2	214,0	214,5	214,9	215,3	215,6	216,1	0,0493	0,0500	0,0025
S10 - 6	206,3	206,6	207,3	207,7	208,0	208,6	208,9	209,6	210,1	0,0491	0,0499	0,0025
S10 - 10	213,8	215,2	216,7	217,8	219,1	220,0	220,6	221,5	222,0	0,0495	0,0498	0,0025
S10- 11	210,3	211,6	212,7	213,7	214,7	215,3	216,1	217,1	217,8	0,0494	0,0489	0,0024
S10 - 12	206,1	207,1	207,9	208,2	209,3	209,5	210,0	210,8	210,8	0,0491	0,0498	0,0024
S10 - 16	217,9	218,4	218,5	220,0	222,8	223,6	224,1	224,6	224,9	0,0496	0,0494	0,0024
S10 - 17	217,0	218,2	219,5	221,1	222,2	223,0	223,7	224,5	225,1	0,0493	0,0494	0,0024
S10 - 18	214,2	215,4	217,2	218,0	219,9	220,8	221,6	222,7	223,4	0,0489	0,0494	0,0024
S10 - 22	221,9	222,7	223,6	224,0	224,2	225,0	226,1	227,1	227,1	0,0495	0,0495	0,0025
S10 - 23	221,9	222,0	223,5	224,3	225,1	226,6	227,8	228,5	228,5	0,0493	0,0494	0,0024
S10 - 24	224,8	226,3	227,4	228,3	229,1	229,3	229,4	229,4	229,4	0,0492	0,0502	0,0025

Tabla 133: Absorción por Succión Capilar (15 % LTAB, 30 min)

ID	% LTAB	T (°C)	peso seco (g)	Tiempo (min)										
				0,5	1	2	3	4	5	10	15	20	25	30
S15 - 4	15	700	184,6	187,0	187,8	188,0	189,7	191,0	192,0	194,7	195,8	197,0	197,7	198,4
S15 - 5	15	700	178,2	178,6	178,8	179,0	179,0	180,6	181,2	183,4	184,7	185,1	185,4	186,4
S15 - 6	15	700	177,9	178,7	179,1	179,9	179,9	182,5	183,4	186,5	188,3	189,5	190,8	192,0
S15- 10	15	800	182,1	182,3	182,7	183,2	183,2	185,3	185,9	188,2	190,0	191,5	192,4	193,5
S15- 11	15	800	182,9	183,6	184,1	184,5	184,5	186,3	186,9	189,1	190,6	191,9	193,2	194,1
S15- 12	15	800	184,3	184,5	185,1	185,6	185,6	187,5	188,3	190,6	192,6	194,2	196,1	197,6
S15- 16	15	900	185,5	186,8	187,7	189,0	189,0	191,5	192,8	196,1	198,3	199,8	200,0	203,1
S15- 17	15	900	182,2	183,9	184,5	185,8	185,8	188,0	188,5	191,4	194,2	196,2	198,0	200,7
S15- 18	15	900	183,6	185,6	187,3	189,4	189,4	191,8	192,6	195,8	198,6	201,0	203,1	205,1
S15- 22	15	1000	183,7	185,6	187,0	188,9	188,9	191,4	191,6	195,3	197,9	200,0	201,6	202,9
S15- 23	15	1000	184,2	186,4	188,2	190,7	190,7	193,3	194,2	196,7	199,3	201,2	202,4	203,0
S15- 24	15	1000	183,5	185,7	188,0	190,3	190,3	193,2	193,8	197,5	200,2	202,6	204,5	206,0

Tabla 134: Absorción por Succión Capilar (15 % LTAB, 35-75 min)

ID	Tiempo (min)									lado a	lado b	área
	35	40	45	50	55	60	65	70	75	m	m	m2
S15 - 4	199,2	200,2	201,1	202,0	203,0	204,1	205,0	205,8	206,4	0,0490	0,0493	0,0024
S15 - 5	187,1	187,7	188,4	189,4	190,0	190,5	191,0	191,4	194,9	0,0517	0,0498	0,0026
S15 - 6	192,6	193,4	194,2	194,9	195,7	196,4	197,4	198,2	198,9	0,0477	0,0507	0,0024
S15 - 10	194,4	195,4	196,1	196,8	197,6	198,1	198,6	199,2	199,6	0,0493	0,0503	0,0025
S15 - 11	194,8	195,7	196,4	197,0	197,7	198,4	199,2	200,1	200,7	0,0493	0,0504	0,0025
S15 - 12	198,5	199,5	200,2	201,7	202,3	202,8	203,4	204,3	205,0	0,0502	0,0490	0,0025
S15 - 16	204,1	205,1	206,2	207,1	208,5	209,7	210,3	211,2	211,9	0,0499	0,0483	0,0024
S15 - 17	201,1	202,2	202,7	205,1	205,7	206,2	206,9	207,6	208,3	0,0495	0,0488	0,0024
S15 - 18	206,4	208,0	209,0	210,2	210,9	211,5	212,3	213,2	213,9	0,0491	0,0497	0,0024
S15 - 22	204,0	205,1	205,8	206,2	206,9	207,3	207,9	208,8	209,7	0,0491	0,0491	0,0024
S15 - 23	203,6	204,7	205,4	206,0	206,6	207,0	207,6	208,5	209,1	0,0494	0,0498	0,0025
S15 - 24	207,4	208,6	209,2	209,9	210,4	210,7	211,4	212,1	212,6	0,0491	0,0497	0,0024

Tabla 135: Absorción por Succión Capilar (20 % LTAB, 30 min)

ID	% LTAB	T (°C)	peso seco (g)	Tiempo (min)										
				0,5	1	2	3	4	5	10	15	20	25	30
S20 - 4	20	700	174,1	182,2	187,9	190,1	192,7	195,5	197,0	198,3	203,2	207,2	209,1	210,9
S20 - 5	20	700	175,9	183,8	188,9	191,1	194,0	196,1	197,2	198,9	203,5	206,7	209,1	211,4
S20 - 6	20	700	184,2	185,3	187,0	190,1	192,3	194,5	196,4	197,6	202,8	206,9	209,0	210,8
S20- 10	20	800	173,0	176,1	180,0	182,4	184,4	186,7	187,9	189,4	193,3	198,1	201,4	203,9
S20- 11	20	800	159,0	169,2	175,4	177,2	180,0	181,7	183,5	184,8	188,0	192,3	195,4	198,8
S20- 12	20	800	167,3	168,5	175,2	177,9	180,5	182,3	184,0	186,2	190,1	194,8	197,3	200,1
S20- 16	20	900	163,5	172,0	178,5	181,5	184,4	187,7	189,2	191,3	195,9	200,1	203,6	204,8
S20- 17	20	900	166,5	170,3	178,4	181,4	185,7	189,0	190,8	192,7	197,8	201,6	203,8	206,0
S20- 18	20	1000	168,3	169,3	177,8	180,8	184,1	187,5	189,1	191,5	196,5	200,5	203,1	205,6
S20- 22	20	1000	167,0	169,5	179,4	185,1	189,7	193,9	197,5	200,4	208,8	209,6	209,7	209,8
S20- 23	20	1000	167,1	170,6	182,6	188,2	193,9	198,5	201,6	204,9	210,8	211,6	211,8	212,0
S20- 24	20	1000	169,7	171,0	180,1	185,5	190,1	195,2	200,1	203,1	209,5	210,6	211,5	212,1

Tabla 136: Absorción por Succión Capilar (20 % LTAB, 35-75 min)

ID	Tiempo (min)									lado a	lado b	área
	35	40	45	50	55	60	65	70	75	m	m	m2
S20 - 4	212,4	214,1	216,2	216,2	218,3	219,3	221,2	222,4	223,2	0,0497	0,0509	0,0025
S20 - 5	213,2	214,1	215,4	216,0	217,2	218,0	220,2	221,5	222,8	0,0506	0,0506	0,0026
S20 - 6	213,1	214,2	215,1	216,1	217,5	218,1	220,3	221,8	222,9	0,0517	0,0505	0,0026
S20 - 10	207,2	209,7	212,0	213,3	215,9	217,6	219,8	221,2	222,0	0,0488	0,0509	0,0025
S20 - 11	201,5	204,4	207,1	208,3	209,8	210,3	210,7	210,8	210,9	0,0484	0,0500	0,0024
S20 - 12	204,3	207,5	210,8	212,5	214,6	216,8	218,9	220,1	221,4	0,0503	0,0483	0,0024
S20 - 16	207,7	209,2	210,6	212,0	212,7	212,9	214,1	214,1	214,4	0,0496	0,0495	0,0025
S20 - 17	208,0	209,0	210,4	210,8	211,2	211,3	211,9	212,1	212,4	0,0495	0,0485	0,0024
S20 - 18	207,5	208,9	210,1	211,5	211,8	212,0	212,2	212,2	212,2	0,0494	0,0496	0,0024
S20 - 22	209,8	209,8	209,7	209,7	209,7	209,8	209,8	209,8	209,8	0,0487	0,0498	0,0024
S20 - 23	212,1	212,1	212,1	212,1	212,1	212,1	212,1	212,1	212,1	0,0493	0,0501	0,0025
S20 - 24	212,1	212,1	212,1	212,1	212,1	212,1	212,1	212,1	212,1	0,0490	0,0506	0,0025

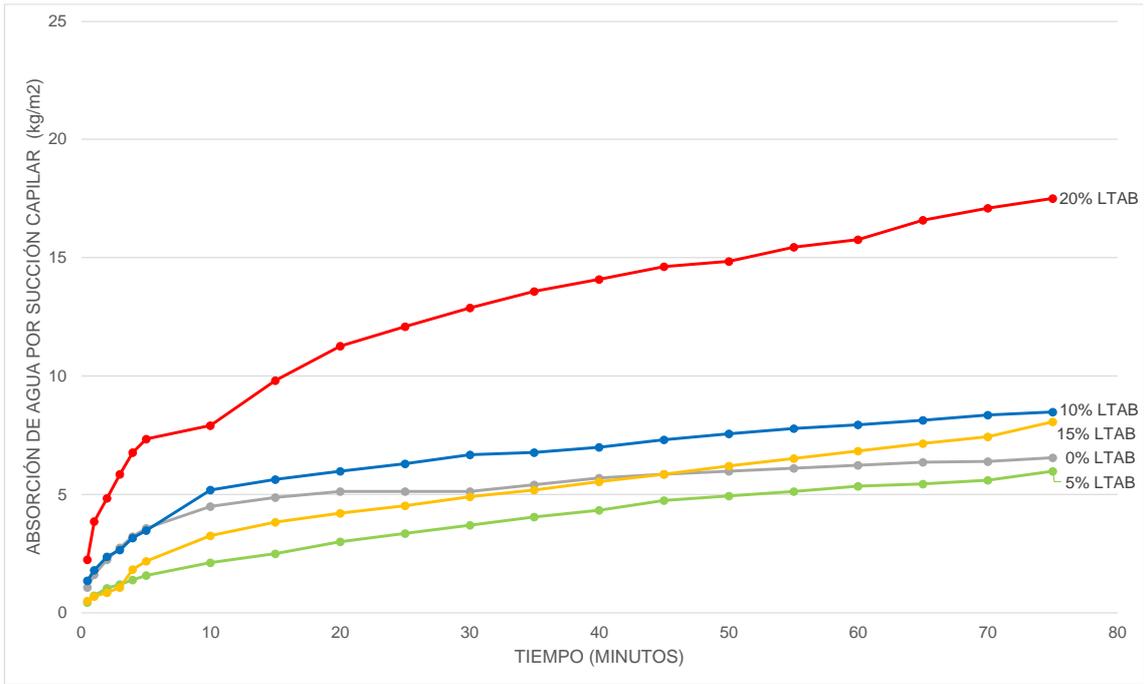


Figura 124: Absorción de agua por succión capilar (700°C)

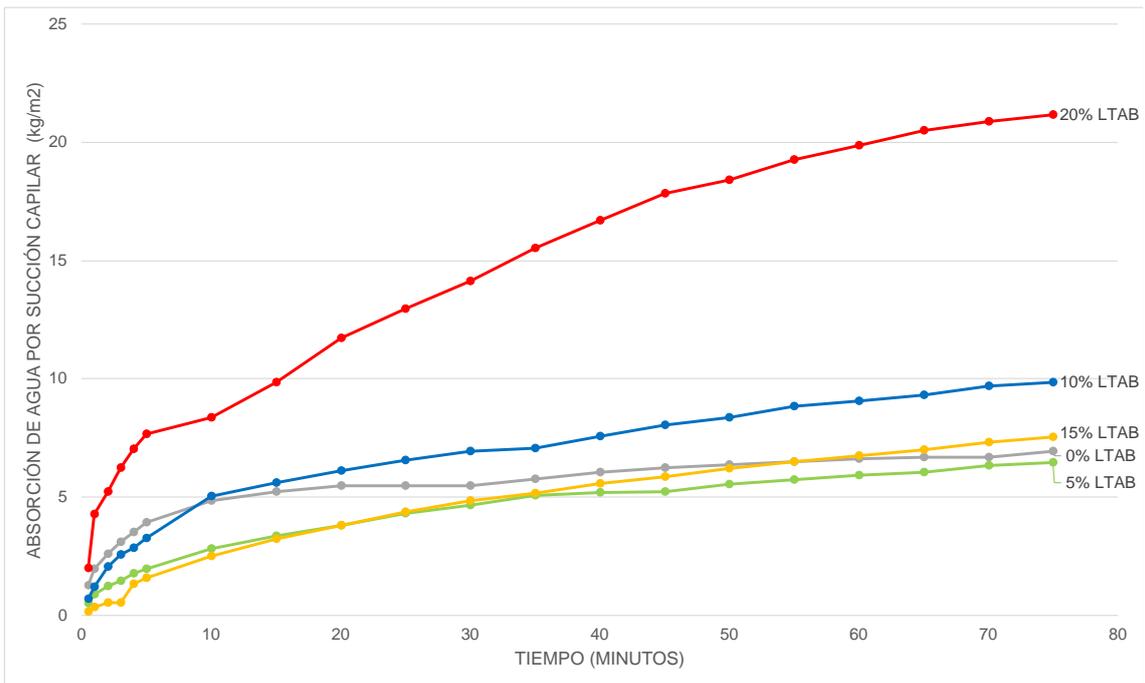


Figura 125: Absorción de agua por succión capilar (800°C)

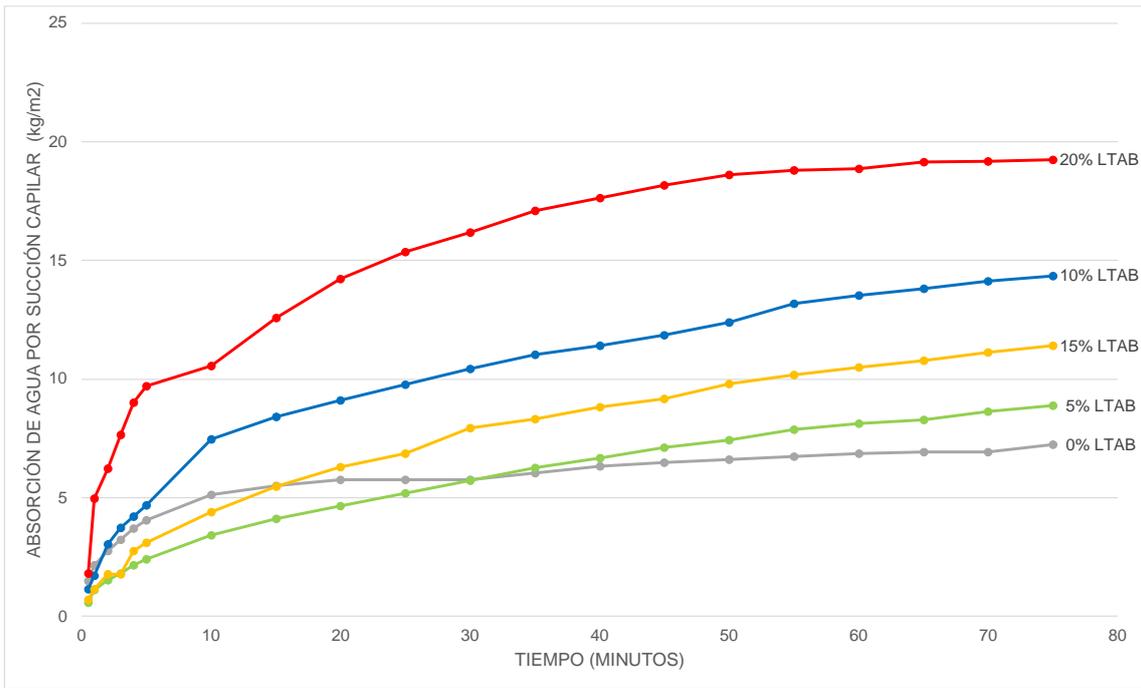


Figura 126: Absorción de agua por succión capilar (900°C)

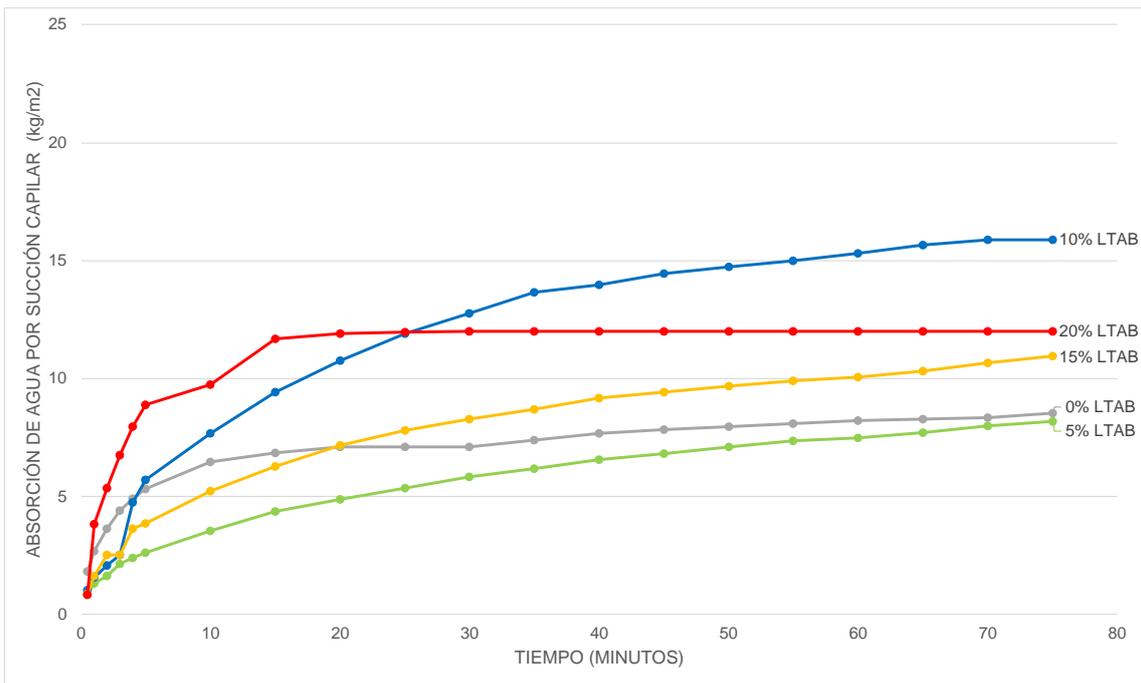


Figura 127: Absorción de agua por succión capilar (1000°C)

Tabla 137: Datos de Absorción por Método de la Pipeta (5 % LTAB)

ID	% LTAB	T (°C)	Peso seco (g)	Peso con tubo (g)	Tiempo (min)										
					1	2	3	4	5	10	15	20	30	40	60
S5 - 4	5	700	195,1	219,3	246,5	246,5	246,5	246,5	246,8	247,5	248,1	248,8	250,0	253,5	255,2
S5 - 5	5	700	198,3	224,6	251,8	251,8	252,0	252,0	252,3	253,0	253,6	254,3	255,4	256,6	258,9
S5 - 6	5	700	202,8	230,9	259,0	259,3	259,6	259,9	260,1	261,6	263,2	264,0	266,5	268,5	272,5
S5- 10	5	800	195,4	223,6	251,8	252,3	252,8	253,3	253,7	255,5	257,2	259,0	261,8	264,5	269,5
S5- 11	5	800	196,9	223,0	253,5	255,2	256,4	257,5	258,4	262,3	265,0	267,6	272,0	276,0	281,2
S5- 12	5	800	199,8	226,5	256,7	257,6	258,5	259,3	260,0	263,2	265,6	267,9	271,9	275,6	281,8
S5- 16	5	900	195,9	219,3	247,0	247,6	248,4	248,9	249,5	252,2	254,9	258,9	261,74	267,48	273,55
S5- 17	5	900	199,7	227,4	254,9	255,8	256,0	256,5	257,0	258,9	261,1	262,76	266,21	269,53	275,39
S5- 18	5	900	199,2	229,1	260,4	262,5	263,6	264,2	264,8	265,4	268,8	273,7	277	281,1	288
S5- 22	5	1000	194,1	222,8	259,5	263,2	266,3	261,1	271,5	278,2	-	-	-	-	-
S5- 23	5	1000	196,1	221,5	248,9	249,8	250,4	251,0	251,8	257,2	261,4	264,59	270,24	275,22	281,85
S5- 24	5	1000	196,6	227,3	255,4	255,4	255,4	255,4	255,4	255,5	255,6	255,67	255,87	256,64	258,04

Tabla 138: Absorción por Método de la Pipeta (10 % LTAB)

ID	% LTAB	T (°C)	Peso seco (g)	Peso con tubo (g)	Tiempo (min)										
					1	2	3	4	5	10	15	20	30	40	60
S10 - 4	10	700	196,1	221,6	247,8	248,2	248,4	249,1	249,3	251,9	252,8	253,2	255,5	257,1	259
S10 - 5	10	700	192,9	219,5	247,4	247,9	248,4	248,8	249,3	251,7	253,5	255,5	259,7	262,9	268,9
S10 - 6	10	700	191,5	218,5	247,2	248,0	248,5	249,0	249,4	251,7	252,7	253,8	255,9	257,5	261,3
S10-10	10	800	194,2	220,5	250,1	250,9	251,8	252,7	253,3	257,0	260,1	263,2	268,7	273,8	282,2
S10-11	10	800	191,1	217	244,9	245,2	245,4	245,9	246,2	246,9	248	249	252,4	254	260
S10-12	10	800	192	218,7	246,8	246,8	247,2	247,2	247,2	247,9	249,1	250,4	253	254,5	260,9
S10-16	10	900	189,4	213,8	248,7	252,7	255,7	258,1	260,2	265,8	268,5	270	-	-	-
S10-17	10	900	189,7	214,3	251,6	255,9	259,2	261,7	264	271,8	275,8	277,1			
S10-18	10	900	189,2	217,4	247	247,3	247,9	248,6	249,4	255,3	259,9	263,4	269,1	273,1	277
S10-22	10	1000	188,5	215,1	268,4	277	286,2	290,8	299,2	-	-	-	-	-	-
S10-23	10	1000	188,2	213,2	270,1	280,9	285	291,2	293,1	-	-	-	-	-	-
S10-24	10	1000	191,5	215,6	246,2	247,3	249,2	251	252,7	258	269,2	266,7	273,3	275,3	-

Tabla 139: Absorción por Método de la Pipeta (15 % LTAB)

ID	% LTAB	T (°C)	Peso seco (g)	Peso con tubo (g)	Tiempo (min)										
					1	2	3	4	5	10	15	20	30	40	60
S15 - 4	15	700	182,8	208,6	238,2	238,8	239,6	240,5	241,3	244,2	246,8	249,5	254,0	257,2	264,8
S15 - 5	15	700	175,6	207,6	237,2	238,1	239,0	239,8	240,7	243,5	246,2	248,4	253,2	257,0	264,2
S15 - 6	15	700	176,6	202,2	231,9	233,0	234,0	234,8	235,7	238,4	241,2	242,9	248,1	252,4	259,2
S15-10	15	800	180,5	205,2	235,1	236,4	236,9	237,4	238,6	242,9	246,0	249,3	255,2	260,0	268,5
S15-11	15	800	181,4	209,1	239,9	240,7	241,3	241,8	242,4	244,3	247,5	249,1	253,8	256,4	264,2
S15-12	15	800	183,4	213,2	242,3	243,3	243,9	244,2	244,5	247,6	249,6	251,6	255,5	259,3	264,5
S15- 16	15	900	185,1	213,0	247,7	251,1	254,0	256,2	258,1	266,5	271,8	276,7	278,3	-	-
S15- 17	15	900	181,5	209,8	242,8	245,5	247,5	249,4	251,6	257,9	264,9	270	275,5	-	-
S15- 18	15	900	182,9	209,0	238,6	240,2	241,6	243,1	244,1	252,4	257,7	262,9	271,9	276,8	
S15- 22	15	1000	183,4	209,4	241,4	244,3	246,6	248,5	249,9	256,7	263,3	266,7	270,7	-	-
S15- 23	15	1000	184,1	209,3	240,9	244,4	247,3	249,6	251,7	259,6	267,0	270,6	272,9	-	-
S15- 24	15	1000	183,4	210,2	250,3	255,6	258,6	261,6	262,7	270,2	274,0	-	-	-	-

Tabla 140: Absorción por Método de la Pipeta (20 % LTAB)

ID	% LTAB	T (°C)	Peso seco (g)	Peso con tubo (g)	Tiempo (min)										
					1	2	3	4	5	10	15	20	30	40	60
S20 - 4	20	700	174,1	199,2	231,3	236,5	241,3	242,9	243,9	245,5	246,9	248,9	252,6	258,1	263,5
S20 - 5	20	700	175,9	207,6	236,7	237,7	238,7	239,9	240,7	242,4	243,4	244,5	247,5	250,1	258,6
S20 - 6	20	700	184,2	210,1	240,1	241,5	242,5	243,6	244,4	247,6	250,3	253,8	259,2	264,0	269,9
S20- 10	20	800	173	201,9	232,0	233,3	235,1	236,2	237,6	244,0	249,4	253,7	262,1	269,6	274,7
S20- 11	20	800	159	188,4	216,3	217,7	218,9	219,4	219,7	224,3	228,8	233,6	241,8	248,9	253,8
S20- 12	20	800	167,3	195,9	229,0	230,9	232,8	234,5	235,4	242,1	246,2	251,0	258,2	262,9	265,6
S20- 16	20	900	163,5	198,0	237,6	244,6	249,1	253,1	258,1	269,6	272,1	-	-	-	-
S20- 17	20	900	166,5	194,5	228,3	239,2	245,4	252,1	257,3	268,0	-	-	-	-	-
S20- 18	20	900	168,3	196,1	236,7	244,1	249,8	254,8	259,1	270,0	-	-	-	-	-
S20- 22	20	1000	167	193,6	237,2	248,0	254,8	260,5	265,0	271,8	-	-	-	-	-
S20- 23	20	1000	167,1	193,7	235,2	245,4	250,8	256,1	260,4	270,0	-	-	-	-	-
S20- 24	20	1000	169,7	200,1	240,5	248,0	253,8	258,5	262,5	270,1	-	-	-	-	-

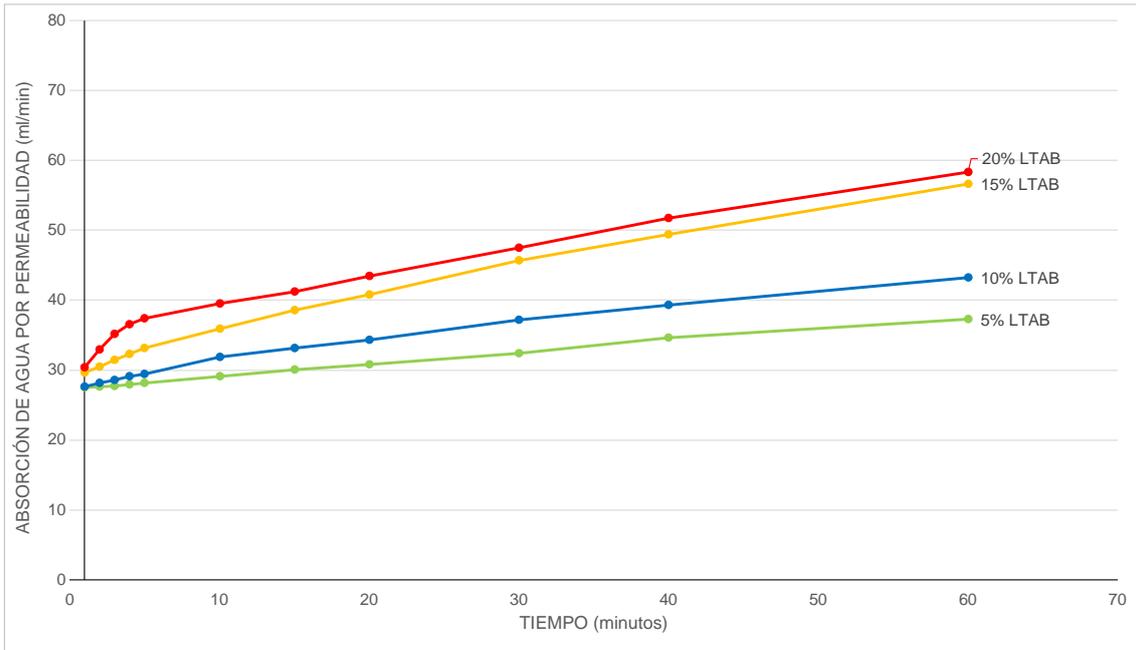


Figura 128: Absorción de agua por permeabilidad (700°C)

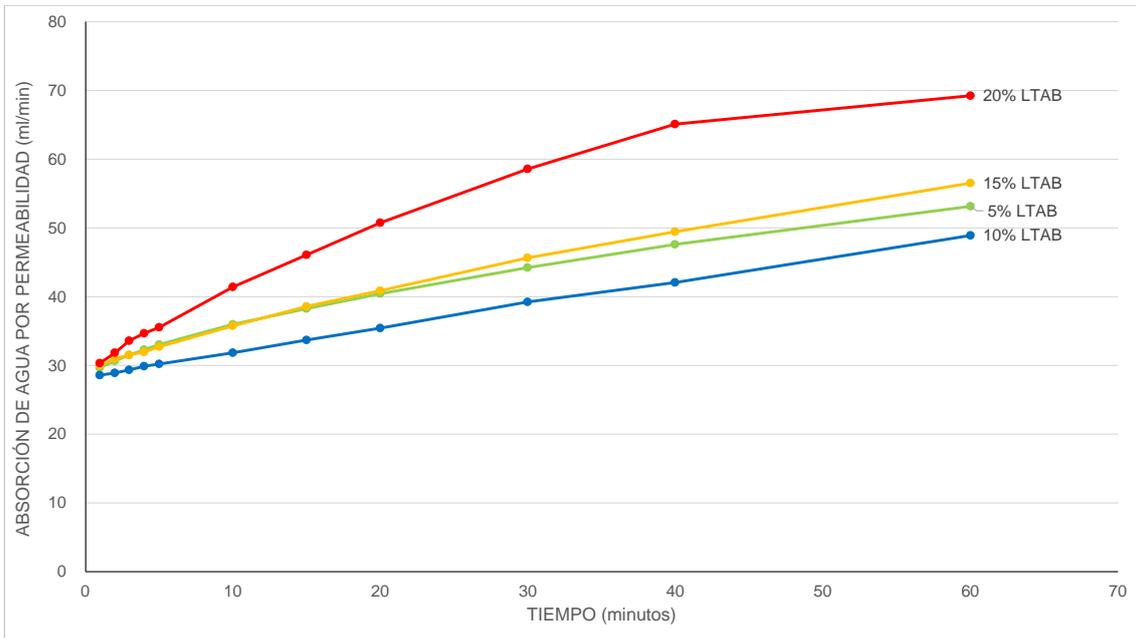


Figura 129: Absorción de agua por permeabilidad (800°C)

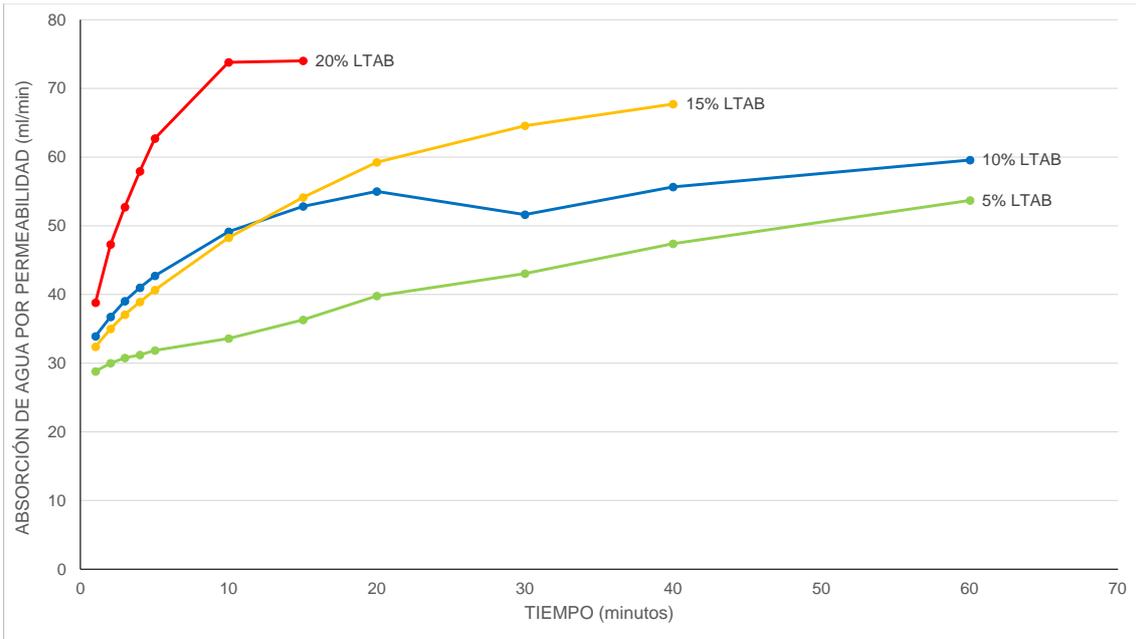


Figura 130: Absorción de agua por permeabilidad (900°C)

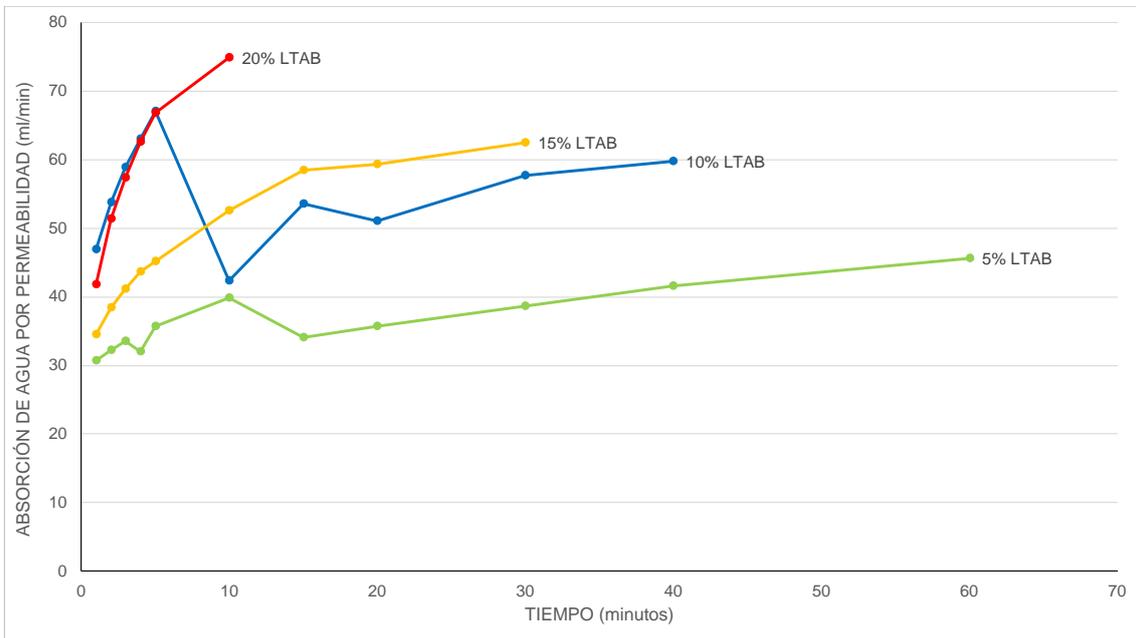


Figura 131: Absorción de agua por permeabilidad (1000°C)

Tabla 141: Absorción por Inmersión en Agua Fría (0 % LTAB)

ID	% LTAB	T (°C)	peso seco (g)	Peso saturado 24 h (g)	Peso saturado 48 h (g)	Absorción 48 hs (%)
S0 - 4	0	700	204,70	230,50	230,50	12,60
S0 - 5	0	700	204,10	229,60	229,60	12,49
S0 - 10	0	800	218,10	245,90	245,90	12,75
S0 - 11	0	800	219,30	246,80	246,80	12,54
S0 - 16	0	900	208,50	235,50	235,50	12,95
S0 - 17	0	900	206,10	232,70	232,70	12,91
S0 - 22	0	1000	197,50	222,20	222,20	12,51
S0 - 23	0	1000	196,90	221,70	221,70	12,60

Tabla 142: Absorción por Inmersión en Agua Fría (5 % LTAB)

ID	% LTAB	T (°C)	peso seco (g)	Peso saturado 24 h (g)	Peso saturado 48 h (g)	Absorción 48 hs (%)
S5 - 4	5	700	196,30	228,30	228,60	16,45
S5 - 5	5	700	200,00	232,90	233,50	16,75
S5 - 6	5	700	204,20	236,90	237,00	16,06
S5 - 10	5	800	196,20	230,30	230,60	17,53
S5 - 11	5	800	197,90	232,00	233,00	17,74
S5 - 12	5	800	201,60	234,40	235,20	16,67
S5 - 16	5	900	196,20	229,70	230,40	17,43
S5 - 17	5	900	200,00	234,40	235,00	17,50
S5 - 18	5	900	199,40	234,40	235,00	17,85
S5 - 22	5	1000	194,10	228,40	228,40	17,67
S5 - 23	5	1000	196,10	230,70	230,70	17,64
S5 - 24	5	1000	196,60	230,20	230,40	17,19

Tabla 143: Absorción por Inmersión en Agua Fría (10 % LTAB)

ID	% LTAB	T (°C)	peso seco (g)	Peso saturado 24 h (g)	Peso saturado 48 h (g)	Absorción 48 hs (%)
S10 - 4	10	700	196,10	231,20	231,20	17,90
S10 - 5	10	700	192,90	227,20	227,20	17,78
S10 - 6	5	700	196,10	231,20	231,20	17,90
S10 - 10	5	800	192,90	227,20	227,20	17,78
S10- 11	5	800	191,50	225,80	226,00	18,02
S10 - 12	5	800	194,20	232,60	232,70	19,82
S10 - 16	5	900	191,10	225,40	226,70	18,63
S10 - 17	5	900	193,20	228,30	230,00	19,05
S10 - 18	5	900	189,40	228,70	230,00	21,44
S10 - 22	5	1000	190,10	228,20	229,40	20,67
S10 - 23	5	1000	189,20	227,60	228,80	20,93
S10 - 24	5	1000	188,50	223,90	226,40	20,11

Tabla 144: Absorción por Inmersión en Agua Fría (15 % LTAB)

ID	% LTAB	T (°C)	peso seco (g)	Peso saturado 24 h (g)	Peso saturado 48 h (g)	Absorción 48 hs (%)
S15 - 4	15	700	184,60	225,80	225,90	22,37
S15 - 5	15	700	178,20	219,60	219,80	23,34
S15 - 6	15	700	177,90	219,80	219,90	23,61
S15 - 10	15	800	182,10	225,60	225,80	24,00
S15 - 11	15	800	182,90	227,60	227,70	24,49
S15 - 12	15	800	184,30	228,40	228,60	24,04
S15 - 16	15	900	185,50	228,90	229,00	23,45
S15 - 17	15	900	182,20	224,80	225,00	23,49
S15 - 18	15	900	183,60	226,90	227,10	23,69
S15 - 22	15	1000	183,70	224,70	225,00	22,48
S15 - 23	15	1000	184,20	226,00	226,10	22,75
S15 - 24	15	1000	183,50	224,70	225,10	22,67

Tabla 145: Absorción por Inmersión en Agua Fría (20 % LTAB)

ID	% LTAB	T (°C)	peso seco (g)	Peso saturado 24 h (g)	Peso saturado 48 h (g)	Absorción 48 hs (%)
S20 - 4	15	700	174,10	216,90	216,90	24,58
S20 - 5	15	700	175,90	224,00	224,00	27,35
S20 - 6	15	700	184,20	229,70	229,70	24,70
S20 - 10	15	800	173,00	218,00	218,10	26,07
S20 - 11	15	800	159,00	204,30	204,30	28,49
S20 - 12	15	800	167,30	207,30	207,30	23,91
S20 - 16	15	900	163,50	210,10	210,50	28,75
S20 - 17	15	900	166,50	211,80	213,40	28,17
S20 - 18	15	900	168,30	209,10	209,10	24,24
S20 - 22	15	1000	167,00	208,30	210,70	26,17
S20 - 23	15	1000	167,10	209,70	211,80	26,75
S20 - 24	15	1000	169,70	210,10	210,10	23,81

Anexo H: Datos ensayos de porosidad

Tabla 146: Datos de Porosidad (0 % LTAB)

ID			peso seco (g)	peso saturado 48 h (g)	masa en agua (g)	Porosidad (%)
S0 - 4	0	700	204,7	230,5	120,50	23,45
S0 - 5	0	700	204,1	229,6	120,80	23,44
S0 - 10	0	800	218,1	245,9	127,80	23,54
S0 - 11	0	800	219,3	246,8	128,40	23,23
S0 - 16	0	900	208,5	235,5	122,20	23,83
S0 - 17	0	900	206,1	232,7	119,80	23,56
S0 - 22	0	1000	197,5	222,2	112,90	22,60
S0 - 23	0	1000	196,9	221,7	111,50	22,50

Tabla 147: Datos de Porosidad (5 % LTAB)

ID			peso seco (g)	peso saturado 48 h (g)	masa en agua (g)	Porosidad (%)
S5 - 4	5	700	196,30	228,60	115,60	28,58
S5 - 5	5	700	200,00	233,50	117,00	28,76
S5 - 6	5	700	204,20	237,00	120,00	28,03
S5 - 10	5	800	196,20	230,60	115,00	29,76
S5 - 11	5	800	197,90	233,00	116,90	30,23
S5 - 12	5	800	201,60	235,20	118,80	28,87
S5 - 16	5	900	196,20	230,40	116,50	30,03
S5 - 17	5	900	200,00	235,00	118,80	30,12
S5 - 18	5	900	199,40	235,00	117,30	30,25
S5 - 22	5	1000	194,10	228,40	116,20	30,57
S5 - 23	5	1000	196,10	230,70	117,40	30,54
S5 - 24	5	1000	196,60	230,40	114,30	29,11

Tabla 148: Datos de Porosidad (10 % LTAB)

ID	% LTAB	T (°C)	peso seco (g)	peso saturado 48 h (g)	masa en agua (g)	Porosidad (%)
S10 - 4	10	700	196,10	231,20	113,20	29,75
S10 - 5	10	700	192,90	227,20	111,30	29,59
S10 - 6	10	700	191,50	226,00	110,70	29,92
S10 - 10	10	800	194,20	232,70	113,60	32,33
S10- 11	10	800	191,10	226,70	110,60	30,66
S10 - 12	10	800	193,20	230,00	111,70	31,11
S10 - 16	10	900	189,40	230,00	111,20	34,18
S10 - 17	10	900	190,10	229,40	111,10	33,22
S10 - 18	10	900	189,20	228,80	111,10	33,64
S10 - 22	10	1000	188,50	226,40	111,20	32,90
S10 - 23	10	1000	188,20	226,80	111,00	33,33
S10 - 24	10	1000	191,50	230,50	113,00	33,19

Tabla 149: Datos de Porosidad (15 % LTAB)

ID	% LTAB	T (°C)	peso seco (g)	peso saturado 48 h (g)	masa en agua (g)	Porosidad (%)
S15 - 4	15	700	184,60	225,90	108,70	35,24
S15 - 5	15	700	178,20	219,80	99,20	34,49
S15 - 6	15	700	177,90	219,90	104,10	36,27
S15 - 10	15	800	182,10	225,80	107,80	37,03
S15 - 11	15	800	182,90	227,70	106,70	37,02
S15 - 12	15	800	184,30	228,60	107,90	36,70
S15 - 16	15	900	185,50	229,00	110,00	36,55
S15 - 17	15	900	182,20	225,00	107,70	36,49
S15 - 18	15	900	183,60	227,10	107,50	36,37
S15 - 22	15	1000	183,70	225,00	107,40	35,12
S15 - 23	15	1000	184,20	226,10	107,40	35,30
S15 - 24	15	1000	183,50	225,10	106,50	35,08

Tabla 150: Datos de Porosidad (20 % LTAB)

ID	% LTAB	T (°C)	peso seco (g)	peso saturado 48 h (g)	masa en agua (g)	Porosidad (%)
S20 - 4	20	700	174,10	216,90	100,50	36,77
S20 - 5	20	700	175,90	224,00	106,20	40,83
S20 - 6	20	700	184,20	229,70	107,20	37,14
S20 - 10	20	800	173,00	218,10	101,10	38,55
S20 - 11	20	800	159,00	204,30	95,30	41,56
S20 - 12	20	800	167,30	207,30	94,30	35,40
S20 - 16	20	900	163,50	210,50	99,60	42,38
S20 - 17	20	900	166,50	213,40	99,40	41,14
S20 - 18	20	900	168,30	209,10	96,10	36,11
S20 - 22	20	1000	167,00	210,70	97,90	38,74
S20 - 23	20	1000	167,10	211,80	99,30	39,73
S20 - 24	20	1000	169,70	210,10	95,80	35,35

Anexo I: Datos del ensayo de colorimetría

Tabla 151: Datos de Colorimetría (0 % LTAB, 700°C)

ID	TOMA DE COLOR – CARA 1					TOMA DE COLOR – CARA 2					ΔE^*
	L	a	b	C	h	L	a	b	C	h	
S0-1	77,9	8,6	15,9	18,1	61,5	78,9	8,9	16,1	18,4	61,1	0,39
	77,7	8,8	16,5	18,7	61,9	78,3	8,1	15,1	17,1	61,8	
	77,2	9	16	18,3	60,6	77,2	8,6	15,9	18,1	61,5	
	78,9	8,6	15,9	18	61,6	78,4	8,5	16	18,1	61,9	
	77,7	9	16,1	18,4	60,8	76,9	8,6	15,9	18,1	61,6	
S0-2	77,9	8,7	16	18,2	61,6	78,8	8,5	16,2	18,3	62,4	0,14
	77,6	8	15,3	17,2	62,4	77,3	8,3	15,5	17,6	62	
	77,7	8,6	16,2	18,3	61,9	77,6	8,5	16,2	18,3	62,3	
	78,3	8,7	16,2	18,4	61,7	77,9	8,8	16,4	18,6	61,8	
	78,4	8,7	16	18,2	61,5	78,2	8,6	16,1	18,3	61,8	
S0-3	78,7	8,7	16,2	18,4	61,7	77,9	8,9	16,1	18,4	60,9	0,62
	78,3	8,6	15,7	17,9	61,1	76,9	8,7	15,4	17,7	60,6	
	77,6	8,8	16,3	18,5	61,6	78,1	9,1	16,6	18,9	61,2	
	78,6	8,7	16,2	18,4	61,6	78,4	8,6	16	18,1	61,7	
	77,8	8,9	16,4	18,7	61,3	76,7	8,7	15,9	18,2	61,3	
S0-4	76,1	6,7	14,3	15,8	64,7	76,1	6,7	14,2	15,7	64,7	0,37
	75,3	7,3	14,8	16,5	63,6	75,2	7,2	14,7	16,4	63,8	
	76,2	7,3	15,1	16,8	64	76,2	7,3	14,6	16,4	63,4	
	76,2	7,8	15	16,9	62,6	77,2	7,7	14,7	16,6	62,5	
	78,6	7,9	15,4	17,3	63	78,1	7,9	15,4	17,3	62,8	
S0-5	76,7	7,1	14,5	16,1	63,8	76,8	7,2	14,4	16,1	63,4	0,55
	75,1	8,2	15,6	17,6	62,4	75,6	8	15,5	17,5	62,8	
	77,2	8,1	15,5	17,5	62,3	77,7	8	15,5	17,4	62,8	
	76,8	7,9	14,9	16,8	62,1	78,3	7,6	14,7	16,5	62,7	
	78,3	8,7	16,1	18,3	61,7	78,2	8,4	15,6	17,7	61,7	
S0-6	76,0	6,2	13,7	15	65,5	75,7	6,3	13,7	15	65,4	0,11
	74,9	7,1	14,9	16,5	64,6	75,6	7	15	16,5	65,1	
	77,0	7,1	14,7	16,3	64,3	75,8	7,1	14,4	16,1	63,9	

ID	TOMA DE COLOR – CARA 1					TOMA DE COLOR – CARA 2					ΔE^*
	L	a	b	C	h	L	a	b	C	h	
	76,0	7,5	14,6	16,4	62,8	75,8	7,5	14,7	16,6	62,9	
	76,3	7,9	15,3	17,2	62,7	76,8	7,9	15,2	17,2	62,7	

Tabla 152: Colorimetría (0 % LTAB, 800°C)

ID	TOMA DE COLOR – CARA 1					TOMA DE COLOR – CARA 2					ΔE^*
	L	a	b	C	h	L	a	b	C	h	
S0-7	79,0	9,3	16,3	18,7	60,4	78,8	9,9	16,7	19,4	59,3	0,57
	77,8	9,3	16,2	18,7	60	78,9	9,4	16,3	18,8	60	
	78,9	9,5	16,5	19	60	79,4	9,2	16,2	18,7	60,4	
	78,4	9,4	16,1	18,7	59,9	78,7	9,4	16,6	19,1	60,3	
	78,6	9,3	15,9	18,4	59,8	79,6	9,2	16,1	18,6	60,2	
S0-8	79,7	9,5	16,4	18,9	59,9	80,1	9,2	16,2	18,7	60,6	0,32
	79,4	8,9	15,8	18,1	60,6	79,1	8,9	15,7	18	60,3	
	80,1	9,2	16,1	18,6	60,3	78,9	9	15,5	17,9	59,9	
	79	9,3	16	18,5	59,9	79,1	9,1	16	18,4	60,2	
	78,8	9,4	16,1	18,6	59,7	79,1	9,1	16	18,4	60,3	
S0-9	78,5	9,2	15,7	18,3	59,6	79,5	9,1	16,1	18,5	60,6	0,12
	80,1	8,9	15,8	18,1	60,5	79,1	8,8	15,7	18	60,8	
	80,4	9	16,2	18,6	60,9	79,9	9,2	16,2	18,6	60,5	
	79	9,1	15,9	18,4	60,3	79,5	9,2	16,1	18,6	60,4	
	79,2	9,1	15,7	18,2	60	79,3	9,1	15,8	18,2	60	
S0-10	78,3	9,5	16,8	19,3	60,6	78,5	9,5	16,7	19,2	60,5	0,52
	79,1	8,7	16,2	18,3	61,8	78,8	9,2	16,4	18,9	60,7	
	78,5	9,4	16,5	19	60,4	78,5	9,4	16,5	19	60,4	
	78,5	9,4	15,9	18,5	59,5	78,3	9,5	16,2	18,7	59,6	
	79,5	9,1	16,3	18,7	60,8	77,5	9,6	16,3	19	59,4	
S0-11	75,6	12,4	19,7	23,3	58	76,5	10	18,4	20,9	61,6	0,84
	78,2	10,3	18,4	21,1	60,8	77	10	17,6	20,3	60,4	
	77,7	9,9	17,9	20,4	61,1	78,1	9,7	17,6	20,1	61,1	
	75,3	10,8	21,5	24,1	63,3	74,9	10,9	21,5	24,1	63,2	
	78,4	10	18,1	20,6	61	77,9	9,8	17,7	20,2	61,1	

ID	TOMA DE COLOR – CARA 1					TOMA DE COLOR – CARA 2					ΔE^*
	L	a	b	C	h	L	a	b	C	h	
S0-12	78,7	9,1	16,6	18,9	61,2	79	9,1	16,3	18,6	60,8	0,12
	77,4	9,3	16,3	18,8	60,4	78	9,3	16,1	18,6	60,1	
	78,2	9,1	16,2	18,5	60,6	77	9,1	16,2	18,6	60,6	
	77,6	9,3	16,9	19,3	61,1	76,6	9,2	17,1	19,4	61,6	
	76,7	9,4	16,7	19,2	60,8	78	9,2	16,5	18,9	61	

Tabla 153: Colorimetría (0 % LTAB, 900°C)

ID	TOMA DE COLOR – CARA 1					TOMA DE COLOR – CARA 2					ΔE^*
	L	a	b	C	h	L	a	b	C	h	
S0-13	81,2	8,3	14,7	16,9	60,6	80,5	8,4	14,7	16,9	60,1	0,40
	82,7	8,4	15,1	17,3	60,8	81,2	8,2	14,5	16,7	60,4	
	81,6	8,3	14,9	17	60,8	81,7	8,4	14,7	16,9	60,4	
	80,7	8,3	14,2	16,4	59,8	81,2	8,1	14,3	16,5	60,6	
	81,4	8,4	14,6	16,8	60,2	81,2	8,4	14,5	16,8	60	
S0-14	80,7	8,7	15	17,3	59,7	80,6	8,6	14,7	17	59,9	0,58
	80,5	9	16,2	18,5	60,9	80,6	8,4	15,1	17,3	60,8	
	78,9	8,4	15	17,2	60,8	80	8,1	13,9	16,1	59,8	
	81,2	8,4	14,8	17	60,6	80,7	8,3	14,8	17	60,6	
	81,2	8,3	14,9	17,1	60,9	80,6	8,4	14,7	17	60,3	
S0-15	80,7	8,3	14,4	16,6	60,1	79,4	8,2	14	16,2	59,7	0,27
	79,6	8,6	15	17,3	60	80,3	8,6	14,8	17,2	59,9	
	79,9	8,6	14,9	17,2	60	79,9	8,5	14,6	16,9	59,9	
	80	8,5	14,5	16,8	59,7	81	8,2	14,7	16,8	60,9	
	80,7	8,5	14,8	17,1	60,1	81,1	8,3	14,7	16,9	60,6	
S0-16	79,4	9,7	16	18,7	58,7	79,9	8,5	14,9	17,2	60,2	0,29
	80,9	8,4	14,4	16,7	59,6	79,9	8,4	14,4	16,7	59,6	
	80,7	8,5	14,7	17	60	80,6	8,6	15	17,3	60,1	
	80,2	8,5	15,6	17,8	61,6	80	8,4	15,1	17,2	60,9	
	81,4	8,4	14,2	16,5	59,5	81,9	8,6	14,5	16,8	59,3	
S0-17	78	9,1	15,7	18,2	60	77,4	9,1	15,9	18,3	60,2	0,20
	78,3	9	15,2	17,6	59,5	79	8,8	15,2	17,6	59,9	

ID	TOMA DE COLOR – CARA 1					TOMA DE COLOR – CARA 2					ΔE^*
	L	a	b	C	h	L	a	b	C	h	
	77,6	9,1	15,6	18,1	59,9	78	9,1	15,7	18,1	59,9	
	77,5	9,3	15,8	18,4	59,5	77,3	9,2	15,8	18,3	59,7	
	79,3	9,1	15,9	18,3	60,1	78,1	9	15,7	18,1	60,1	
S0-18	79,3	8,1	14,2	16,4	60,3	79,8	8	14,2	16,3	60,7	0,18
	79,5	8,5	14,9	17,1	60,2	79,6	8,5	14,9	17,2	60,2	
	80,4	8,3	14,6	16,8	60,5	80,3	8,2	14,4	16,6	60,3	
	79,3	8,6	14,7	17,1	59,9	79,2	8,6	14,8	17,1	59,9	
	78,8	8,5	14,1	16,4	58,9	79,2	8,3	14	16,2	59,3	

Tabla 154: Datos de Colorimetría (0 % LTAB, 1000°C)

ID	TOMA DE COLOR – CARA 1					TOMA DE COLOR – CARA 2					ΔE^*
	L	a	b	C	h	L	a	b	C	h	
S0-19	82,2	8,8	17,1	19,2	62,7	82,8	8,3	16,6	18,6	63,4	0,18
	81,1	8,3	16,4	18,4	63	80,7	8,2	16,2	18,2	63,2	
	82,3	8,1	16	18	63,1	81,1	8,3	15,9	17,9	62,5	
	82,1	8,5	16,4	18,5	62,7	83	8,5	16,6	18,7	62,8	
	82,4	8,2	16	18	62,8	83,2	8,3	16,1	18,1	62,7	
S0-20	82,9	8,4	17	19	63,6	80,9	9	17,4	19,6	62,6	0,26
	82,3	8,7	17,3	19,3	63,2	82,6	8,6	17,2	19,2	63,4	
	82,1	8,8	16,4	18,6	61,7	82,4	8,3	16,2	18,2	63	
	82	8,7	17,1	19,2	62,9	82	9	17,4	19,6	62,6	
	81,1	8,4	16,9	18,9	63,4	81,4	8,5	17,1	19,1	63,6	
S0-21	84,1	8,3	16,7	18,6	63,6	83,4	8,3	16,7	18,7	63,5	0,39
	78,1	9,4	16,3	18,8	60,1	79	8,2	16	18	62,8	
	80,4	8,5	16,6	18,7	62,8	80,4	8,4	16,5	18,5	62,9	
	81,1	9	17,3	19,5	62,3	81,4	8,9	17,2	19,3	62,6	
	79,8	8,4	16,2	18,2	62,7	80,2	8,2	16	18,1	63,2	
S0-22	81,5	8,4	16,6	18,6	63,1	81,4	8,5	16,5	18,6	62,8	0,13
	83,2	8,5	17	19	63,5	82	8,6	16,9	19	63	
	81,5	9,1	16,3	18,7	60,9	81,3	8,5	16,7	18,7	62,9	
	80,4	8,7	16,6	18,8	62,3	81,9	8,4	16,7	18,7	63,2	

ID	TOMA DE COLOR – CARA 1					TOMA DE COLOR – CARA 2					ΔE^*
	L	a	b	C	h	L	a	b	C	h	
	81,8	8,7	17	19,1	62,8	81,9	8,8	16,9	19,1	62,5	
S0-23	83,1	8,5	16,5	18,5	62,8	82,7	8,7	16,6	18,7	62,4	0,39
	79,3	8,5	16,1	18,2	62,2	79,2	9	16,8	19	61,6	
	80,8	8,7	16,1	18,3	61,6	82	8,8	16,8	19	62,3	
	82,1	8,2	15,2	17,3	61,7	82,4	8,4	15,2	17,4	61,1	
	81	8,5	16	18,1	62	80,2	8,4	16,2	18,2	62,6	
S0-24	82,2	8,4	16,7	18,7	63,3	82,3	8,7	16,5	18,6	62,3	0,91
	82,6	8,1	15,4	17,4	62,3	80,5	8,2	15,4	17,5	62	
	83,1	8,3	15,8	17,9	62,4	81,5	8,5	16,2	18,3	62,2	
	82,3	8,2	15,3	17,4	61,9	82,1	8,4	15,7	17,8	61,7	
	82,7	8,4	15,8	17,9	61,9	82,1	8,4	15,9	18	62,3	

Tabla 155: Colorimetría (5 % LTAB, 700°C)

ID	TOMA DE COLOR – CARA 1					TOMA DE COLOR – CARA 2					ΔE^*
	L	a	b	C	h	L	a	b	C	h	
S05-1	77,5	6,6	14,2	15,7	65	77	6,6	14,1	15,5	65	0,22
	77,7	6,9	14,8	16,3	64,8	77,2	7	14,8	16,4	64,5	
	77,4	6,2	13,8	15,1	65,9	77,5	6,2	13,8	15,2	65,8	
	78,2	7,2	14,9	16,5	64,3	78	7	14,8	16,3	64,8	
	78,4	6,8	14,5	16	65	78,4	6,9	14,7	16,2	64,8	
S05-2	78,2	5,9	12,5	13,8	64,9	78,8	5,9	12,6	13,9	65	0,37
	80,9	6,6	14	15,5	64,8	80,1	6,7	14,3	15,8	65,1	
	78,1	6,1	13,1	14,5	65,1	77,1	6,2	13,2	14,6	64,7	
	82,5	5,2	11,5	12,6	65,4	82,7	5,3	11,6	12,8	65,6	
	81,6	5	11,2	12,3	65,8	80,9	5,2	11,2	12,3	65	
S05-3	76,5	6,2	13,3	14,7	65,2	75,8	6,1	13,4	14,8	65,5	0,04
	77,8	7	14,3	15,9	63,8	79,1	6,9	14,3	15,9	64,1	
	77	6	13,5	14,8	66	76,9	6,2	13,7	15	65,7	
	76,6	6,1	13,5	14,8	65,7	76,1	6,1	13,5	14,8	65,7	
	77,4	6,1	13,6	14,9	65,8	77,3	6,1	13,5	14,8	65,7	
S05-4	81,6	4,5	10	11	65,8	80,6	4,6	10	11	65,4	0,54

ID	TOMA DE COLOR – CARA 1					TOMA DE COLOR – CARA 2					ΔE^*
	L	a	b	C	h	L	a	b	C	h	
	84,7	4,8	9,9	11	64,3	84,6	4,8	10	11,1	64,4	
	80,7	4,9	10,8	11,9	65,8	80,2	4,5	10,7	11,6	67,3	
	84,2	4,6	10,1	11,1	65,5	83,8	4,7	10	11	64,9	
	82,9	4,5	10,4	11,3	66,5	82,2	4,6	10,5	11,4	66,5	
S05-5	77,7	5,7	12,6	13,8	65,7	76,5	5,7	12,6	13,8	65,6	0,32
	81,9	6	13,4	14,7	65,8	80,4	6,1	13,4	14,7	65,5	
	77,1	5,7	12,2	13,4	64,9	78,4	5,6	12,2	13,4	65,4	
	82,4	5,8	12,6	13,8	65,4	82,4	5,6	12,6	12,8	66,1	
	78,3	6,1	13,3	14,7	65,5	78,1	6,1	13,1	14,5	65,2	
S05-6	78,3	5,5	12,6	13,7	66,5	77,7	5,6	12,5	13,7	66	0,46
	82,8	4,9	11,1	12,2	66,2	82,8	5	11,2	12,2	66,1	
	78,5	5,6	12,3	13,5	65,8	78,5	5,4	12,3	13,5	66,2	
	82	5,6	12,4	13,6	65,9	81,4	5,5	12,2	13,4	65,8	
	79,2	5,6	12,6	13,8	66,1	78,1	5,8	12,5	13,8	65	

Tabla 156: Colorimetría (5 % LTAB, 800°C)

ID	TOMA DE COLOR – CARA 1					TOMA DE COLOR – CARA 2					ΔE^*
	L	a	b	C	h	L	a	b	C	h	
S05-7	80,0	8,6	16,0	18,1	61,5	78,9	8,7	15,8	18,1	61,2	0,31
	80,6	8,9	16,1	18,4	61,0	81,1	9,0	16,0	18,4	60,6	
	79,5	8,7	15,7	18,0	61,0	79,8	8,8	15,9	18,2	61,0	
	81,3	8,5	15,6	17,7	61,2	81,5	8,7	15,7	18,0	61,0	
	80,4	9,2	16,9	19,2	61,5	79,3	8,9	15,9	18,2	60,9	
S05-8	85,4	6,6	13,5	15,0	64,1	84,7	6,7	13,6	15,1	63,9	0,15
	82,4	7,5	14,1	15,9	62,1	81,6	7,7	14,1	16,1	61,5	
	84,2	6,8	13,8	15,3	63,8	85,4	6,8	13,7	15,3	63,8	
	81,5	8,3	15,3	17,4	61,6	81,4	8,3	15,4	17,5	61,7	
	84,5	6,9	14,3	15,9	64,2	84,3	7,0	14,4	16,0	64,3	
S05-9	79,5	9,2	16,7	19,0	61,1	79,1	9,3	17,0	19,3	61,4	0,10
	79,3	9,2	16,4	18,8	60,8	79,4	9,1	16,4	18,8	61,1	
	79,5	8,5	15,5	17,7	61,2	79,4	8,7	15,5	17,7	60,8	

	80,2	8,7	15,9	18,2	61,4	80,2	8,5	15,9	18,0	61,9	
	79,3	8,7	15,9	18,1	61,4	79,7	8,8	16,1	18,3	61,3	
S05-10	79,7	9,3	16,9	19,3	61,1	79,8	9,0	16,6	18,9	61,6	0,23
	78,6	8,7	16,0	18,2	61,5	79,2	8,8	16,3	18,5	61,6	
	78,9	9,0	16,3	18,6	61,2	79,7	8,9	16,5	18,7	61,5	
	78,9	9,0	16,6	18,9	61,5	79,0	8,9	16,5	18,8	61,6	
	80,2	9,1	16,8	19,1	61,7	79,5	8,8	16,5	18,7	62,0	
S05-11	83,1	6,9	13,7	15,4	63,2	82,8	7,1	14,1	15,8	63,2	0,04
	80,4	8,3	15,4	17,5	61,8	79,8	8,4	15,3	17,5	61,4	
	83,6	7,0	14,5	16,1	64,1	83,4	7,2	14,8	16,5	64,1	
	79,9	8,8	16,5	18,7	62,0	80,8	8,6	16,4	18,5	62,5	
	80,8	8,1	15,9	17,9	63,1	81,0	7,7	15,2	17,1	63,1	
S05-12	84,6	6,8	13,4	15,1	63,0	83,9	6,9	13,3	15,0	62,7	0,32
	81,2	7,5	14,3	16,1	62,3	82,5	7,5	14,6	16,4	62,9	
	84,9	6,5	13,2	14,7	64,0	85,5	6,3	12,9	14,3	64,0	
	83,7	6,7	13,3	14,9	63,3	83,0	6,8	13,2	14,9	62,6	
	83,2	7,2	14,1	15,9	63,1	83,7	6,6	13,2	14,7	63,6	

Tabla 157: Colorimetría (5 % LTAB, 900°C)

ID	TOMA DE COLOR – CARA 1					TOMA DE COLOR – CARA 2					ΔE^*
	L	a	b	C	h	L	a	b	C	h	
S05-13	81,6	9,0	15,8	18,2	60,4	80,9	8,8	15,5	17,8	60,5	0,12
	82,5	8,6	15,7	17,9	61,3	82,1	8,8	15,7	18,0	60,9	
	80,9	9,5	16,6	19,1	60,3	80,4	9,4	16,6	19,1	60,6	
	82,0	8,7	16,1	18,3	61,7	82,0	8,6	15,8	18,0	61,4	
	80,4	8,9	15,4	17,8	60,1	81,4	9,0	15,9	18,3	60,4	
S05-14	84,4	7,6	14,3	16,2	62,0	84,1	7,6	14,3	16,2	62,0	0,08
	81,6	8,3	15,3	17,4	61,4	82,7	8,4	15,5	17,7	61,5	
	84,2	7,1	12,9	14,7	61,3	83,8	7,0	12,9	14,7	61,5	
	82,5	8,5	15,7	17,9	61,5	82,5	8,6	15,6	17,8	61,3	
	82,9	8,5	15,6	17,7	61,4	82,9	8,3	15,4	17,4	61,7	
S05-15	81,6	8,6	15,0	17,3	60,3	81,7	8,5	14,9	17,2	60,3	0,07

	84,7	6,6	12,5	14,2	62,1	84,4	6,6	12,5	14,1	62,3	
	82,3	8,5	15,2	17,4	60,6	82,6	8,5	14,9	17,2	60,4	
	85,8	7,0	14,0	15,6	63,5	86,2	6,8	14,3	15,9	64,5	
	82,9	8,1	14,6	16,8	61,0	82,7	8,2	14,7	16,8	60,8	
S05-16	81,4	8,9	15,6	18,0	60,3	81,4	8,9	15,6	18,0	60,3	0,07
	80,8	9,0	16,1	18,4	60,7	80,4	9,0	15,9	18,2	60,5	
	80,6	9,4	16,3	18,9	59,9	80,9	9,2	16,3	18,7	60,6	
	81,6	8,7	15,4	17,7	60,5	81,3	9,0	15,6	18,0	60,1	
	81,9	9,1	15,9	18,3	60,3	82,0	8,9	15,7	18,0	60,5	
S05-17	85,1	7,0	13,3	15,1	62,3	85,1	7,0	13,0	14,8	61,8	0,70
	85,1	7,0	13,8	15,5	63,0	84,9	6,9	13,5	15,2	62,8	
	83,3	8,6	15,4	17,6	60,9	82,5	8,7	15,4	17,7	60,5	
	83,7	8,0	14,7	16,8	61,6	82,3	8,3	14,8	16,9	60,7	
	84,8	7,4	13,5	15,4	61,3	83,8	7,5	13,4	15,3	60,7	
S05-18	80,8	9,1	16,3	18,6	60,8	80,9	9,1	16,2	18,6	60,6	0,24
	81,4	8,9	15,4	17,8	60,1	80,7	9,0	15,5	17,9	59,7	
	80,8	8,8	15,2	17,6	60,0	80,3	8,8	15,1	17,4	59,8	
	80,5	9,2	15,9	18,3	59,8	79,9	9,2	15,7	18,2	59,7	
	79,7	9,2	15,6	18,1	59,6	80,2	9,3	15,9	18,4	59,7	

Tabla 158: Colorimetría (5 % LTAB, 1000°C)

ID	TOMA DE COLOR – CARA 1					TOMA DE COLOR – CARA 2					ΔE^*
	L	a	b	C	h	L	a	b	C	h	
S05-19	82,1	8,6	15,9	18	61,6	82,3	8,6	15,9	18,1	61,6	0,05
	82,9	8,5	16,1	18,2	62,1	83,9	8,4	16	18,1	62,2	
	83,6	8,3	15,5	17,6	61,9	82,6	8,3	15,5	17,6	61,9	
	82,4	8,2	15,8	17,8	62,4	83,3	8,3	15,9	17,9	62,4	
	83,2	8,8	16,3	18,6	61,6	82,2	8,6	16,2	18,3	62	
S05-20	81,9	8	15,7	17,6	63	82,9	7,9	15,5	17,4	63,1	0,47
	82,9	7,9	15,5	17,4	63,1	82,7	8	15,8	17,7	63	
	83,3	6,6	12,9	14,5	62,8	83,7	6,8	13	14,6	62,4	

	84	6,4	12,9	14,4	63,7	83,7	6	12,7	14,1	64,8	
	82,2	7,4	14,6	16,4	63	83,6	7,7	15	16,8	62,8	
S05-21	82,9	7,8	16	17,8	63,8	83	8	16,1	17,9	63,6	0,11
	84,7	5,4	11,4	12,6	64,6	85	5,6	11,4	12,7	64	
	83,3	7,7	15,6	17,4	63,8	82,7	7,7	15,6	17,5	63,7	
	83,1	6,6	13,1	14,7	63,1	83,7	6,2	12,6	14,1	63,8	
	82,8	6,9	13,9	15,5	63,8	82,2	6,7	13,8	15,4	64,1	
S05-22	82,8	8,8	16,7	18,9	62,2	81,8	8,6	16,3	18,4	62,1	0,57
	82,2	8,8	13,1	18,4	61,5	81,3	8,6	15,9	18	61,7	
	83,4	8,4	15,8	17,9	62	84,2	8,5	15,9	18	61,9	
	82,5	8,8	16,4	18,6	61,8	82,1	8,9	16,3	18,5	61,4	
	82,2	8,9	16,5	18,8	61,6	82,2	9	16,5	18,8	61,4	
S05-23	82,8	7,6	15,7	17,5	64,2	83,8	7,9	16	17,9	63,7	0,38
	82,9	6,9	13,8	15,4	63,5	83,9	6,6	13,4	15	63,8	
	83	7,8	16,2	18	64,2	83,8	7,9	16,2	18,1	64,1	
	84,2	6,4	13	14,5	63,9	83,3	6,5	13,6	15,1	64,4	
	83,4	7,6	15,5	17,3	63,8	83,4	7,5	14,9	16,6	63,4	
S05-24	83,7	8,2	15,2	17,2	61,7	83,9	8	15,3	17,3	62,5	0,65
	86,7	6,2	11,6	13,1	61,9	85,7	6,8	13	14,7	62,6	
	84,1	8,5	16,3	18,4	62,4	83	8,5	16	18,1	62,2	
	87,3	5,5	10,9	12,2	63,1	87	5,6	11	12,3	62,9	
	85,1	7,3	13,7	15,5	62	84,3	7,2	13,6	15,4	61,9	

Tabla 159: Colorimetría (10 % LTAB, 700°C)

ID	TOMA DE COLOR – CARA 1					TOMA DE COLOR – CARA 2					ΔE^*
	L	a	b	C	h	L	a	b	C	h	
S10-1	77,1	7,4	15,3	17	64,3	78,1	7,4	15,2	16,9	64	0,14
	78,2	7,5	15,2	16,9	63,8	78,3	7,3	15,1	16,8	64,3	
	77,6	7,1	14,8	16,5	64,4	77,7	7,1	14,7	16,3	64,2	
	78	7,8	15,4	17,2	63,1	76,8	7,7	15,3	17,1	63,4	
	76,9	7,3	15,1	16,8	64,2	76,6	7,8	14,9	16,8	62,3	
S10-2	78	7,7	15,5	17,3	63,5	77,9	7,7	15,4	17,3	63,5	0,10
	77,4	7,6	15,3	17	63,6	77,6	7,4	15,3	17	64,2	

	78,4	7,8	16,2	18	64,3	78,4	7,9	16,1	17,9	64	
	76,3	7,8	15,6	17,5	63,3	77	7,5	15,9	17,6	64,6	
	78,7	7,4	15,9	17,6	65,1	78	7,3	15,7	17,3	64,9	
S10-3	78,6	7,7	15,6	17,4	63,8	77,9	7,6	15,5	17,3	63,7	0,40
	78,9	7,6	15,2	17	63,5	78,9	7,6	15,3	17,1	63,7	
	77,5	7,5	15,6	17,3	64,4	78,1	7,4	15,6	17,3	64,8	
	77,2	7,5	15,7	17,4	64,4	78,8	7,4	15,6	17,3	64,7	
	77,3	7,7	16	17,8	64,3	77,8	7,7	16,2	17,9	64,6	
S10-4	77,2	7,8	16	17,8	63,8	77,4	7,9	16	17,8	63,7	0,29
	77,7	8	16,4	18,2	64	77,8	8,1	16,5	18,3	63,9	
	76,3	7,8	16	17,8	63,9	77,7	7,7	15,7	17,5	64	
	77,8	7,6	16	17,8	64,5	77,2	7,4	15,2	17	64	
	78,4	7,7	15,6	17,4	63,6	78,3	7,4	15,6	17,3	64,5	
S10-5	76,6	7,3	15,1	16,8	64,2	77,4	7,3	15,3	16,9	64,4	0,75
	77	7,5	15,5	17,2	64,3	77,5	7,6	15,6	17,4	64	
	76	6,9	14,5	16,1	64,7	77	6,7	14,8	16,2	65,5	
	77,5	7,5	15,7	17,4	64,5	78,2	7,5	15,8	17,5	64,7	
	75,3	7,3	15,4	17	64,5	76	7,3	15,4	17	64,6	
S10-6	77,4	7,4	15,3	17,1	64,1	76,8	7,5	15,4	17,1	63,9	0,20
	77,3	7,2	15,5	17,1	65,2	77,3	7,3	15,7	17,3	65,1	
	78	7,2	15,5	17,1	65,2	78	7,3	15,7	17,3	65,2	
	75,7	7	15,3	16,9	65,3	75,9	7,2	15,4	17	64,9	
	76,8	6,8	14,9	16,4	65,4	77,6	6,7	15,1	16,5	66,1	

Tabla 160: Colorimetría (10 % LTAB, 800°C)

ID	TOMA DE COLOR – CARA 1					TOMA DE COLOR – CARA 2					ΔE^*
	L	a	b	C	h	L	a	b	C	h	
S10-7	84,2	7,8	15,1	17	62,7	83,3	7,7	15	16,9	62,7	0,42
	81,2	8,2	15,5	17,5	62	81,4	8,1	15,3	17,3	62,1	
	83,4	7,7	15,1	16,9	62,9	83	7,5	14,7	16,6	62,9	
	80,9	8,7	16,2	18,3	61,8	80,4	8,9	16,1	18,4	61,1	
	78,1	8,8	16,1	18,3	61,3	77,8	8,9	16	18,3	60,9	
S10-8	83,9	6,8	13,4	15	63,3	84	6,6	13	14,6	63,2	0,33

	83,7	7,4	14,3	16,1	62,6	83,8	7,3	14,2	15,9	62,9	
	82,8	7,4	14,2	16	62,6	82,1	7,5	14,1	16	62	
	82,9	7,7	14,3	16,3	61,6	82,1	7,8	14	16,1	60,9	
	83	7	13,1	14,9	61,9	82,9	7,1	13,1	14,9	61,6	
S10-9	85	7,1	13,8	15,5	62,9	84,7	7	13,8	15,5	63,1	0,13
	84,5	7,3	14,1	15,9	62,7	84,9	7,1	14,2	15,9	63,4	
	82,3	8,4	16	18,1	62,2	82,3	8,5	16	18,1	62,1	
	83,4	7,8	14,8	16,8	62,4	83,2	7,5	14,8	16,6	63,1	
	83,5	7,5	14,9	16,7	63,2	83,1	7,6	14,8	16,6	62,7	
S10-10	82,2	7,7	14,7	16,6	62,4	82	7,7	14,9	16,8	62,7	0,22
	83,9	6,9	13,1	14,8	62,1	84,2	6,8	12,8	14,5	61,9	
	83,2	7,5	14,6	16,4	62,7	82,2	7,6	14,7	16,5	62,5	
	83,6	7,4	13,8	15,6	61,9	83,6	7,3	13,8	15,6	62	
	83,1	7,7	14,8	16,7	62,5	82,9	7,9	14,8	16,7	61,9	
S10-11	82,9	7,7	14,3	16,2	61,9	82,8	7,7	14,3	16,3	61,6	0,15
	83,4	7,8	14,1	16,1	61	82,7	7,9	14,4	16,4	61	
	83,6	7,3	13,7	15,5	62,1	83,8	7,4	14	15,8	62,2	
	83,3	8	15	17	62	83,4	7,9	14,9	16,8	62,2	
	83,1	7,5	14,2	16,1	62	83,3	7,7	14,3	16,2	61,8	
S10-12	80,8	8,2	15,2	17,3	61,8	82	7,9	15,4	17	62,8	0,16
	83	7,7	13,8	15,8	60,8	82,7	7,6	14,1	16	61,8	
	83,4	7,1	14	15,7	63,1	82,6	7,3	14,1	15,9	62,7	
	83,3	7,3	14,5	16,2	63,2	83,1	7,5	14,6	16,4	62,8	
	82,5	8	15,2	17,2	62,1	82,6	8,1	15,3	17,3	62,2	

Tabla 161: Colorimetría (10 % LTAB, 900°C)

ID	TOMA DE COLOR – CARA 1					TOMA DE COLOR – CARA 2					ΔE^*
	L	a	b	C	h	L	a	b	C	h	
S10-13	85	7,8	15,8	17,6	63,6	84,5	7,8	15,8	17,7	63,8	0,11
	84,1	8,6	17,1	19,1	63,4	83,5	8,5	17	19	63,4	
	83,4	7,7	15	16,8	62,9	83	7,7	15,1	17	63,1	
	82,4	8,7	16,7	18,9	62,5	83	8,9	16,7	18,9	62	
	84,5	8	15,4	17,4	62,7	85	7,5	15,3	17	63,9	

S10-14	84,2	8	16,1	18	63,5	84,8	7,9	15,9	17,8	63,5	0,57
	83,9	8,6	16,7	18,8	62,8	83	8,5	16,5	18,6	62,6	
	83	8,4	16,9	18,8	63,5	84,9	7,6	15,7	17,4	64,3	
	85,5	7,2	14,8	16,4	64,2	85,5	7,1	14,7	16,4	64,2	
	85,4	7,3	14,9	16,6	64	85,4	7,2	14,6	16,3	63,8	
S10-15	84,5	8,6	17,1	19,1	63,4	83,7	8,7	17	19,1	62,9	0,28
	82,8	9	16,6	18,9	61,5	82,7	9,2	16,8	19,2	61,4	
	85,4	7,2	13,9	15,7	62,6	85,1	7,4	14,4	16,2	62,8	
	83,8	8,3	15,5	17,6	61,8	82,9	8,3	15,4	17,5	61,6	
	83,3	7,3	13,6	15,4	61,8	84,3	7,4	13,7	15,6	61,6	
S10-16	84,9	8	16,2	18,1	63,7	84,4	8,1	16,4	18,3	63,6	0,48
	83,7	7,9	16	17,8	63,7	85,6	7,6	15,6	17,4	64,2	
	83,8	8,8	16	18,2	61,2	83,5	8,9	16,1	18,4	61,1	
	82,6	8,3	15,8	17,8	62,3	82,3	8,2	15,6	17,6	62,2	
	82,2	8,5	16,5	18,5	62,8	83,8	8,6	16,7	18,8	62,7	
S10-17	84,6	8,2	16,8	18,7	63,9	83,9	8,3	16,9	18,8	63,8	0,10
	84,7	8,2	16,3	18,2	63,3	84,9	8,1	16,3	18,2	63,5	
	82,7	8,4	16,8	18,8	63,3	82,6	8,5	16,7	18,8	63	
	82,3	8,6	15,9	18,1	61,5	83	8,7	16,1	18,3	61,6	
	83,6	8,2	15,9	17,9	62,9	83,5	8,3	16,1	18,1	62,7	
S10-18	85,3	7,3	14,3	16	62,7	84,7	7,6	15,8	17,5	64,4	0,34
	84,9	7,5	15,8	17,5	64,5	84,1	7,9	16	17,9	63,7	
	83,6	7,9	15,2	17,1	62,6	84,4	7,4	14,9	16,6	63,7	
	83,5	8,1	15,8	17,7	62,9	84,1	8,2	16,1	18,7	63	
	84,4	8,4	16,2	18,3	62,7	84,5	8,1	16,2	18,1	63,5	

Tabla 162: Colorimetría (10 % LTAB, 1000°C)

ID	TOMA DE COLOR – CARA 1					TOMA DE COLOR – CARA 2					ΔE^*
	L	a	b	C	h	L	a	b	C	h	
S10-19	81,8	7,8	16,8	18,5	65,1	82	7,8	16,9	18,6	65,2	0,42
	84,3	6,2	15,1	16,4	67,6	85,1	6,2	15,2	16,4	67,9	
	83,2	7,3	17,1	18,6	67	82,5	7,3	17	18,4	66,8	
	82,5	6,8	14,8	16,3	65,3	84,1	6	14,6	15,7	67,7	

	82,5	7,4	17,4	18,9	67	82,4	7,2	17	18,4	67	
S10-20	87,9	4,7	11	12	67	87,9	4,7	11,1	12,1	67	0,16
	84,2	6,7	15,4	16,8	66,4	83,5	6,8	15,4	16,8	66,3	
	85,8	6,1	14,1	15,4	66,4	86	6,1	14,1	15,3	66,6	
	83,9	5,4	20,7	21,4	75,3	83,5	5,3	19,8	20,5	75	
	82,4	6,6	15,5	16,8	67	83,6	5,9	16	17	69,9	
S10-21	83,7	6,2	18	19	71	82,4	6,5	17,7	18,9	70	0,55
	82,9	6,8	17,5	18,8	68,8	82,9	6,4	17	18,2	69,3	
	83,1	8,6	16,4	18,5	62,4	82,5	8,5	16,3	18,4	62,3	
	84,1	8,4	16,6	18,6	63,2	83,3	8,5	16,9	18,9	63,3	
	83	7,6	16,1	17,8	64,7	83	7,5	16,3	18	65,2	
S10-22	82,3	9	16,8	19	61,7	82,7	8,9	16,8	19	61,9	0,30
	84,5	6	17,8	18,8	71,2	84,5	6	19,4	20,3	72,8	
	83,3	9	17	19,2	62	83,4	9	16,8	19	61,9	
	84,4	6,1	17,7	18,7	70,9	83,7	6,4	17,5	18,6	69,9	
	82,9	8	16,9	18,7	64,7	82,2	7,9	16,9	18,7	65	
S10-23	83,1	6,6	15,6	16,9	67,1	82,5	6,8	15,9	17,3	66,9	0,10
	83,9	7	15,2	16,8	65,4	84,1	6,9	15,2	16,6	65,6	
	83,4	7,4	16,6	18,2	66	83,6	7,2	16,2	17,7	66	
	84,2	8,2	16	17,9	62,9	84,1	8,1	16	17,9	63,2	
	83,7	6,7	15,3	16,7	66,4	84,5	6,8	15,3	16,8	66,1	
S10-24	86,1	6,3	14	15,4	65,8	85,4	6,5	14	15,4	65,1	0,48
	85,8	6,2	14,2	15,5	66,6	84,4	6,2	14,1	15,4	66,3	
	83,6	7,4	15	16,7	63,7	84,3	7	14,3	15,9	63,8	
	84,8	7,3	15,5	17,1	64,9	84,2	7,2	15,4	17	64,8	
	83,6	7,2	15,7	17,3	65,4	83,5	6,9	15,6	17	66,1	

Tabla 163: Colorimetría (15 % LTAB, 700°C)

ID	TOMA DE COLOR – CARA 1					TOMA DE COLOR – CARA 2					ΔE^*
	L	a	b	C	h	L	a	b	C	h	
S15-1	79,9	9,4	17,4	19,8	61,7	79,9	9,7	17,7	20,2	61,4	0,18
	80,7	9,2	17,7	20,0	62,5	80,8	9,4	17,9	20,2	62,3	
	79,7	9,7	18,1	20,6	61,8	80,0	9,9	18,1	20,6	61,3	

	79,9	9,9	18,0	20,6	61,2	79,3	9,9	17,8	20,4	61,0	
	80,1	9,8	17,8	20,3	61,3	79,6	9,6	17,7	20,2	61,7	
S15-2	79,1	9,4	17,5	19,9	61,8	80,0	9,5	17,5	19,9	61,7	0,27
	79,7	9,5	17,4	19,8	61,4	79,5	9,4	17,4	19,8	61,6	
	79,7	9,8	17,8	20,3	61,1	79,9	9,2	17,2	19,6	61,9	
	79,8	10,0	18,0	20,6	60,9	80,4	9,6	18,0	20,4	62,0	
	79,8	9,4	17,6	20,0	61,8	79,2	9,5	17,7	20,1	61,7	
S15-3	79,8	8,8	15,9	18,1	61,1	80,4	8,6	15,6	17,8	61,2	0,15
	81,3	8,6	16,7	18,8	62,8	80,4	8,6	16,9	19,0	63,0	
	79,4	9,8	17,5	20,0	60,8	79,6	9,7	17,3	19,8	60,7	
	78,4	8,6	16,2	18,4	62,2	78,3	8,9	16,6	18,9	61,8	
	78,9	8,5	16,0	18,1	62,2	78,5	8,2	15,6	17,6	62,1	
S15-4	79,0	8,4	15,8	17,9	62,0	79,0	8,3	15,8	17,8	62,2	0,33
	78,1	7,5	15,5	17,3	64,2	78,3	7,3	14,9	16,6	64,1	
	78,0	8,0	16,0	17,9	63,6	77,6	8,4	16,3	18,3	62,7	
	77,3	9,2	17,9	20,2	62,7	76,5	9,5	18,6	20,9	63,0	
	78,8	8,3	16,9	18,9	63,9	78,2	8,2	16,8	18,7	63,9	
S15-5	79,9	8,8	17,4	19,5	63,1	80,0	8,7	17,5	19,6	63,9	0,11
	78,8	9,0	18,2	20,3	63,9	78,3	9,1	18,1	20,2	63,2	
	78,7	8,9	17,5	19,6	63,1	78,6	9,0	17,6	19,8	62,8	
	77,6	9,3	18,0	20,3	62,7	78,2	9,4	18,2	20,5	62,7	
	79,1	9,0	17,4	19,6	62,6	79,5	8,7	16,9	19,0	62,7	
S15-6	78,3	9,2	18,2	20,4	63,3	77,6	9,2	18,3	20,5	63,1	0,18
	79,5	8,9	18,1	20,2	63,6	79,4	9,2	18,4	20,6	63,5	
	78,7	8,7	17,9	19,9	64,1	78,8	8,9	17,9	19,9	63,6	
	77,3	9,5	19,4	21,6	63,8	77,2	9,0	19,0	21,1	64,6	
	78,3	8,9	18,0	20,1	63,8	78,2	9,0	18,1	20,2	63,7	

Tabla 164: Colorimetría (15 % LTAB, 800°C)

ID	TOMA DE COLOR – CARA 1					TOMA DE COLOR – CARA 2					ΔE^*
	L	a	b	C	h	L	a	b	C	h	
S15-7	79,5	9,9	18,2	20,7	61,5	80,2	10	18,3	20,9	61,3	0,37

	82	9,4	18	20,3	62,5	81,2	9,4	17,8	20,1	62,3	
	80,9	9,2	18,2	20,4	63,1	80,3	9,2	18,3	20,4	63,3	
	80,8	9,3	17,6	19,9	62,2	80,7	9,2	17,4	19,7	62,3	
	80,2	9,8	18,7	21,1	62,3	79,2	10,1	18,8	21,4	61,8	
S15-8	81,4	9	17,3	19,5	62,5	81,6	9	17,2	19,5	62,3	0,08
	79,4	9,8	18	20,5	61,3	79,6	10	18,3	20,9	61,4	
	82,8	8,7	16,5	18,6	62,2	82,8	8,7	16,5	18,7	62,2	
	80,4	10	18,5	21	61,5	79,8	10,1	18,6	21,1	6,4	
	79,2	8,9	15,8	18,1	60,5	79,1	8,8	15,7	18	60,7	
S15-9	80	9,3	17,1	19,5	61,4	80,2	9,2	17,1	19,4	61,6	0,05
	79,2	8,9	16,5	18,8	61,7	78,7	8,9	16,7	18,9	61,8	
	80,5	9,3	17,3	19,6	61,8	80,7	9,1	17,4	19,7	62,3	
	80	8,9	17	19,2	62,5	79,9	9	16,8	19	61,7	
	79,9	8,8	16,6	18,8	62,2	80	8,9	16,7	19	62,1	
S15-10	81,4	9,5	17,4	19,8	61,5	81,1	9,3	17,5	19,8	62,2	0,32
	80,7	8,8	16,1	18,4	61,5	81,1	8,7	15,9	18,1	61,2	
	80,3	8,8	16,2	18,5	61,5	80,7	9,3	16,5	18,9	60,6	
	81,6	8	15,8	17,7	63,2	81,7	8	16,1	18	63,7	
	79,9	9,1	17	19,3	61,8	80,7	9,1	17,2	19,4	21,1	
S15-11	82	8,9	17,1	19,2	62,5	82,6	9	17,2	19,5	62,3	0,20
	81,2	9,4	17,8	20,1	62,2	81,3	9,5	18	20,4	62,1	
	81,3	9,5	17,5	19,9	61,5	80,1	9,6	18	20,4	61,8	
	81,2	9,1	16,8	19,1	61,7	81,4	9	16,9	19,1	61,8	
	81	8,9	16,5	18,8	61,7	81,2	8,9	16,6	18,8	61,9	
S15-12	81,3	8,8	16,6	18,8	61,9	81,4	0,9	16,6	18,8	61,8	1,58
	81	8,6	15,3	17,6	60,6	80,9	8,8	15,9	18,2	61,1	
	80,9	8,9	16,5	18,7	61,8	81	8,8	16,2	18,4	61,3	
	81,1	8,5	15,9	18,1	62	81,3	8,6	16,1	18,2	61,9	
	82,3	8	15,1	17,1	61,9	81,8	7,8	14,9	16,8	62,5	

Tabla 165: Colorimetría (15 % LTAB, 900°C)

	TOMA DE COLOR – CARA 1	TOMA DE COLOR – CARA 2	
--	------------------------	------------------------	--

ID	L	a	b	C	h	L	a	b	C	h	ΔE^*
S15-13	82,3	8	15,1	17,1	61,9	80	8,8	16,4	18,6	61,7	0,77
	81,1	8,7	15,9	18,1	61,3	80,7	8,6	16,6	18,7	62,5	
	83,5	5,5	14,3	15,3	68,8	83,8	5,4	14,2	15,2	69,2	
	83,4	6,4	14,5	15,8	66,2	83,6	6,7	15,5	16,8	66,5	
	83,5	7,6	15,7	17,4	64,2	83,3	7,5	15,7	17,4	64,3	
S15-14	80,5	9,9	17,8	20,3	60,9	81,3	9,5	17,6	20	61,6	0,50
	80,8	9,9	17,7	20,3	60,7	81,5	9,9	18	20,6	61,2	
	80,6	9,9	17	19,7	59,9	81,5	9,5	16,8	19,3	60,5	
	83,3	7,3	16,9	18,4	66,7	83,1	7,6	16,9	18,5	65,9	
	81,8	9,2	16,7	19,1	61,2	81,9	8,9	16,2	18,5	61,3	
S15-15	80,9	10,5	19,8	22,4	61,9	81	10,5	19,8	22,4	62,1	0,68
	82,4	10,3	18,9	21,5	61,3	82,4	10,4	18,9	21,5	61,2	
	81,1	9,8	18,4	20,9	62,1	82,4	9,8	18,5	21	62,2	
	81	10,3	19,3	21,8	61,9	81,8	10,4	19,5	22,1	62	
	80,7	10,2	18,9	21,5	61,6	81,9	10,1	18,9	21,4	61,9	
S15-16	83,4	5	20	20,6	75,9	83,5	4,9	20	20,6	76,1	0,28
	85,4	4,4	18,3	18,8	76,5	85,5	4,6	18,2	18,8	75,9	
	84,1	4,5	19,2	19,7	76,9	84,6	4,7	19,8	20,3	76,6	
	84	5,5	18,7	19,5	73,6	85	5,1	18,4	19,1	74,3	
	85,3	4,4	19,5	20	77,2	85	4,4	19,2	19,7	77	
S15-17	82,2	8,7	16,3	18,5	61,8	82,3	8,6	16,1	18,2	61,9	0,43
	79,8	9,3	16,5	19	60,6	79,9	9,2	16,4	18,8	60,7	
	81,7	7,8	14,9	16,8	62,5	82,1	7,8	15	16,9	62,3	
	81,9	9,6	17,4	19,9	61	81,9	9,8	17,7	20,3	61,1	
	82	8,6	16,1	18,3	61,8	81,5	10	17,6	20,2	60,5	
S15-18	82,5	9,8	18,4	20,8	62	82,6	9,8	18,5	21	62,2	0,07
	82,8	9,2	18,3	20,5	63,3	83,3	9,3	18,5	20,7	63,2	
	82,8	9,5	18	20,4	62,2	82	9,4	17,9	20,2	62,3	
	82,7	9,4	18,3	20,6	62,7	83,1	9,1	18	20,2	63,1	
	83,4	9,1	18,4	20,5	63,5	83,5	9,2	18,4	20,6	63,3	

Tabla 166: Colorimetría (15 % LTAB, 1000°C)

ID	TOMA DE COLOR – CARA 1					TOMA DE COLOR – CARA 2					ΔE^*
	L	a	b	C	h	L	a	b	C	h	
S15-19	82	7,2	19,6	20,9	69,9	81,2	7,6	19,2	20,7	68,6	0,15
	82,1	9	17,5	19,7	62,7	82,2	8,8	17,3	19,4	63	
	83,3	5,1	21,9	22,5	76,9	83,4	5,3	22,1	22,7	76,6	
	82,8	6,5	22,5	23,4	74	83,7	6,1	22,8	23,6	75,1	
	82,9	5,6	22,5	23,2	76	83,3	5,8	22,7	23,5	75,6	
S15-20	83,6	8,2	18	19,8	65,6	83,3	7,5	19,6	21	68,9	0,49
	81,1	8,2	26,2	27,5	72,6	81,1	8,2	26,2	27,5	72,5	
	81,8	7,3	24,9	26	73,7	80,6	7,4	24,8	25,9	73,3	
	83,5	6,3	23,3	24,2	75	83,6	6,3	23,5	24,4	75,1	
	83,5	6,5	24	24,9	74,9	83,2	6,7	24	24,9	74,5	
S15-21	79,9	9,6	25,2	27	69,1	80,2	9,7	24,9	26,7	68,8	0,11
	81,8	6,8	23,6	24,6	73,9	81,7	7	24	25	73,7	
	80,1	8,5	24,6	26	70,9	80,3	7,8	23,7	25	71,9	
	82,7	6,4	22,3	23,2	74	82,7	6	22,5	23,3	75,1	
	81,1	7	23,5	24,6	73,4	80,6	7,6	23,6	24,8	72,1	
S15-22	84,7	6,6	17,6	18,8	69,4	84,5	6,6	17,5	18,7	69,4	0,20
	84,4	5,1	18,9	19,6	74,9	84,7	5,5	18,3	19,1	73,4	
	84,1	7,6	17,3	18,9	66,4	84,1	7,6	17,4	19	66,5	
	83	7,1	17,8	19,1	68,3	83,4	7,3	18	19,4	68	
	85,8	5,8	16,9	17,9	71,2	85,3	6	16,7	17,7	70,2	
S15-23	83,2	6,5	21,3	22,3	73,1	83,1	6,9	19,7	20,9	70,6	0,48
	83,2	6,4	23,3	24,1	74,7	83,2	5,9	23	23,7	75,6	
	83,1	5,5	22,3	23	76,1	82,6	5,7	22,3	23	75,7	
	82,3	5,4	23,2	23,8	76,9	83,1	5,3	23	23,6	77	
	83	5	22	22,5	77,2	83,7	4,8	21,9	22,4	77,7	
S15-24	85,3	5,2	19,3	20	75	84,7	5,8	18,8	19,7	72,9	0,19
	83	6,5	25	25,9	75,5	82,8	6,6	25,2	26	75,4	
	81,5	8,1	26,1	27,3	72,7	81,4	8,3	25,9	27,2	72,2	
	83,2	5,4	22,1	22,8	76,4	83,4	5,2	22	22,6	76,6	
	82,5	6,5	24,5	25,3	75	83	6,6	24,6	25,5	75	

Tabla 167.: Colorimetría (20 % LTAB, 700°C)

ID	TOMA DE COLOR – CARA 1					TOMA DE COLOR – CARA 2					ΔE^*
	L	a	b	C	h	L	a	b	C	h	
S20-1	77,2	9,9	18,9	21,3	62,3	80,3	3,1	12,1	12,5	75,4	7,17
	79,7	5,6	15,0	16,0	69,6	78,5	4,5	12,9	13,7	70,9	
	76,3	10,0	18,8	21,3	62,1	81,2	3,4	12,2	12,7	74,3	
	78,8	7,1	15,9	17,4	66,0	81,8	3,5	12,4	12,9	74,2	
	79,4	7,8	16,2	18,0	64,3	81,5	2,8	10,5	10,9	75,2	
S20-2	79,7	4,9	13,1	14,0	69,7	77,3	9,6	18,7	21,1	62,8	6,52
	78,3	6,5	15,6	17,0	67,3	77,6	8,7	17,6	19,6	63,7	
	80,2	6,0	15,2	16,4	68,5	77,2	9,3	18,7	20,9	63,5	
	80,8	4,9	13,4	14,3	69,8	76,7	9,3	18,5	20,7	63,3	
	79,7	4,4	13,2	13,9	71,5	76,2	9,6	19,0	21,3	63,2	
S20-3	80,9	7,1	16,3	17,8	66,4	81,0	2,9	10,9	11,3	74,9	5,30
	81,1	6,2	15,5	16,7	68,2	80,9	3,1	10,5	11,0	73,5	
	80,4	7,4	15,7	17,3	64,8	80,1	5,4	13,9	14,9	69,0	
	80,0	7,8	16,5	18,2	64,5	79,3	3,6	12,7	13,2	74,4	
	81,3	6,9	15,6	17,1	66,0	80,9	3,2	11,5	11,9	74,6	
S20-4	76,7	8,4	17,2	19,2	63,9	78,0	4,0	12,1	12,7	71,9	6,92
	76,2	9,1	18,3	20,4	63,6	77,3	4,9	12,7	13,6	69,0	
	75,5	8,5	17,3	19,3	64,0	79,5	6,7	15,1	16,5	66,0	
	76,6	9,0	18,9	20,9	64,4	78,4	4,1	12,8	13,5	72,2	
	75,8	9,0	18,0	20,1	63,4	80,2	4,1	11,9	12,6	70,8	
S20-5	76,9	9,4	18,3	20,6	62,7	76,8	9,5	18,5	20,8	62,8	1,75
	77,4	9,5	19,1	21,3	63,7	76,2	9,2	18,8	20,9	64,0	
	78,0	9,4	18,0	20,3	62,4	77,9	9,2	17,9	20,1	62,7	
	78,9	7,1	14,3	16,0	63,7	76,1	9,3	18,1	20,4	62,7	
	78,2	7,9	16,1	17,9	63,9	77,2	9,4	18,7	20,9	63,2	
S20-6	75,7	8,3	16,6	18,6	63,4	77,2	6,7	14,5	16,0	65,3	2,10
	76,7	8,3	17,2	19,1	64,1	77,7	7,7	15,5	17,3	63,7	
	77,4	8,0	16,8	18,6	64,4	78,7	7,6	16,2	17,9	64,8	

	76,5	8,5	17,3	19,3	63,9	77,8	8,7	16,6	18,7	62,4	
	76,3	8,0	16,8	18,6	64,7	78,7	7,4	15,2	16,9	64,0	

Tabla 168: Colorimetría (20 % LTAB, 800°C)

ID	TOMA DE COLOR – CARA 1					TOMA DE COLOR – CARA 2					ΔE^*
	L	a	b	C	h	L	a	b	C	h	
S20-7	81,3	9,4	17,6	20,0	61,8	82,1	6,3	15,2	16,5	67,6	5,15
	80,1	10,3	19,4	21,9	62,0	82,0	7,0	15,6	17,1	65,9	
	81,5	8,6	17,6	19,6	63,8	85,2	3,9	14,0	14,6	74,5	
	79,7	10,0	19,0	21,4	62,2	80,7	7,9	15,2	17,1	62,7	
	80,7	9,5	18,6	20,9	62,9	82,7	6,4	14,6	15,9	66,4	
S20-8	83,6	6,4	14,3	15,7	66,0	85,5	4,6	14,1	14,8	72,1	3,85
	82,0	7,3	16,8	18,3	66,6	85,3	4,3	14,9	15,5	73,7	
	81,8	8,0	16,9	18,7	64,5	84,3	3,5	13,7	14,1	75,7	
	81,0	8,3	17,2	19,1	64,1	83,2	4,9	14,2	15,0	71,0	
	83,2	6,1	14,9	16,1	67,7	83,1	4,5	14,8	15,5	73,0	
S20-9	81,3	6,1	14,5	15,7	67,2	81,8	8,2	16,5	18,4	63,6	2,43
	81,5	5,5	14,6	15,6	69,4	83,7	5,2	14,7	15,6	70,7	
	81,0	6,8	15,3	16,8	66,1	83,0	5,8	13,5	14,7	66,7	
	81,3	7,0	15,5	17,0	65,8	85,1	3,7	13,5	14,0	74,7	
	81,5	6,5	14,7	16,1	66,1	84,0	5,0	13,2	14,1	69,6	
S20-10	84,9	3,7	13,9	14,4	75,1	78,5	9,6	17,7	20,1	61,5	8,90
	85,1	4,9	14,4	15,2	71,4	80,3	10,2	18,4	21,0	61,0	
	85,4	3,0	12,5	12,8	76,4	80,2	8,1	16,7	18,5	64,2	
	84,4	5,1	14,1	15,0	70,0	79,4	10,4	19,0	21,6	61,4	
	85,4	3,8	13,6	14,1	74,5	78,8	9,6	17,8	20,3	61,7	
S20-11	79,5	10,6	19,9	22,6	62,0	81,2	6,6	16,9	18,1	68,6	8,65
	77,6	10,8	20,2	22,9	61,8	82,8	4,9	15,9	16,7	72,8	
	78,0	11,1	20,7	23,5	61,9	82,9	5,2	15,6	16,4	71,7	
	78,2	11,1	21,3	54,0	62,5	82,9	5,1	15,5	16,3	71,8	
	77,6	10,8	20,4	23,1	62,2	84,3	4,2	15,7	16,2	75,1	
S20-12	77,7	11,3	21,0	23,9	61,7	82,7	5,1	14,9	15,7	71,2	10,22
	77,7	11,1	21,2	23,9	62,3	82,6	6,8	17,0	18,3	68,3	

	76,1	11,7	21,7	24,6	61,7	85,0	4,2	14,5	15,1	74,0	
	79,3	11,5	21,9	24,8	62,3	83,7	5,4	15,2	16,1	70,6	
	77,9	11,4	21,0	23,9	61,5	82,7	4,5	15,8	16,4	73,9	

Tabla 169: Colorimetría (20 % LTAB, 900°C)

ID	TOMA DE COLOR – CARA 1					TOMA DE COLOR – CARA 2					ΔE^*
	L	a	b	C	h	L	a	b	C	h	
S20-13	80,4	11,5	20,9	23,9	61,3	83,2	4,7	20,1	20,6	76,7	6,17
	78,1	11,9	21,5	24,5	61,1	82,0	3,9	18,9	19,3	78,3	
	82,2	6,3	17,9	19,0	70,6	82,1	4,3	19,2	19,7	77,4	
	80,2	10,2	19,1	21,7	62,0	81,6	3,2	17,5	17,8	79,9	
	81,3	9,9	20,0	22,3	63,8	80,3	4,0	19,2	19,6	78,3	
S20-14	82,0	5,0	21,3	21,9	76,7	78,8	12,0	22,8	25,8	62,3	5,41
	80,2	4,1	19,3	19,7	77,9	84,1	6,0	18,2	19,1	71,8	
	81,4	5,2	21,5	22,2	76,5	81,7	8,9	17,9	20,0	63,6	
	82,0	3,2	17,5	17,8	79,6	80,1	11,8	21,8	24,8	61,5	
	81,3	3,7	18,0	18,4	78,5	79,9	9,2	20,5	22,5	65,7	
S20-15	80,8	21,8	16,4	16,6	80,3	83,2	4,6	20,5	21,0	77,3	4,03
	80,1	3,4	17,0	17,3	78,8	81,2	4,2	19,7	20,1	77,9	
	81,8	4,1	18,8	19,3	77,6	81,1	3,1	16,8	17,1	79,6	
	81,8	3,9	18,6	19,0	78,2	81,7	2,3	15,0	15,2	81,1	
	82,7	3,9	18,7	19,1	78,2	82,3	2,9	16,3	16,5	79,8	
S20-16	81,5	7,7	24,4	25,6	72,6	81,8	4,3	20,6	21,0	78,3	6,68
	79,7	7,4	24,0	25,1	72,8	82,7	4,8	20,7	21,3	77,0	
	80,1	7,3	22,5	23,6	71,9	82,2	2,7	16,1	16,3	80,4	
	81,3	6,5	22,2	23,1	73,6	81,6	2,8	15,8	16,0	80,1	
	80,7	8,0	24,3	25,6	71,8	80,2	3,5	17,1	17,4	78,4	
S20-17	79,0	11,6	21,3	24,2	61,3	86,0	3,8	17,6	18,0	77,8	10,21
	79,2	11,7	21,6	24,6	61,5	84,7	6,9	16,3	17,7	67,0	
	80,5	11,3	21,5	24,3	62,2	85,1	3,8	18,3	18,7	78,4	
	79,8	11,3	21,0	23,8	61,7	86,2	5,6	16,4	17,3	71,3	
	78,7	11,5	21,1	24,1	61,4	87,3	3,5	17,1	17,5	78,3	
S20-18	82,5	11,5	20,9	23,8	61,3	83,4	4,2	19,2	19,6	77,7	6,12

	81,2	11,2	21,0	23,8	62,0	82,4	7,4	24,8	25,8	73,4	
	81,7	11,1	20,8	23,6	61,9	83,2	3,0	17,7	17,3	79,9	
	81,9	10,9	20,5	23,3	62,0	83,9	6,6	24,3	25,2	74,7	
	82,7	10,6	20,0	22,7	62,1	82,0	3,9	18,4	18,8	78,1	

Tabla 170: Colorimetría (20 % LTAB, 1000°C)

ID	TOMA DE COLOR – CARA 1					TOMA DE COLOR – CARA 2					ΔE^*
	L	a	b	C	h	L	a	b	C	h	
S20-19	83,8	5,9	22,9	23,6	75,4	79,7	8,2	24,8	26,1	71,7	11,21
	82,9	7,4	24,0	25,1	72,9	81,4	7,8	24,8	26,0	72,6	
	81,5	7,2	25,0	26,0	73,9	70,8	17,5	31,0	35,6	60,5	
	82,6	7,3	24,0	25,1	73,1	70,0	17,4	30,2	34,9	60,0	
	80,8	6,7	23,6	24,5	74,1	70,7	17,5	30,4	35,1	60,1	
S20-20	82,9	6,3	23,4	24,2	74,9	83,9	6,3	24,2	25,0	75,3	3,20
	81,5	6,0	22,5	23,3	75,0	83,9	6,5	24,7	25,5	75,3	
	80,8	6,5	23,2	24,0	74,4	83,2	7,5	25,6	26,7	73,7	
	80,4	6,1	23,2	24,0	75,4	80,7	8,1	25,3	26,5	72,3	
	80,7	6,2	23,4	24,2	75,2	81,1	9,8	28,7	30,3	71,1	
S20-21	79,7	6,5	29,3	24,7	74,7	76,3	13,0	27,2	30,1	64,4	6,71
	81,1	6,9	23,4	24,5	73,5	74,9	14,9	27,6	31,4	61,6	
	80,5	6,4	24,2	25,0	75,2	79,9	6,9	23,5	24,5	73,7	
	80,1	7,0	23,3	24,3	73,3	75,0	12,5	27,6	30,3	65,7	
	80,0	6,6	24,0	24,9	74,5	75,8	12,2	26,4	29,1	65,1	
S20-22	78,1	10,8	27,2	29,2	68,3	78,1	10,8	25,9	28,0	67,3	1,79
	78,5	9,4	26,3	27,9	70,4	81,6	6,2	22,3	23,1	74,5	
	79,3	10,0	26,8	28,6	69,6	76,4	12,4	27,6	30,2	65,7	
	79,8	9,3	26,4	28,0	70,7	79,7	8,3	25,3	26,7	71,8	
	79,1	9,7	27,1	28,8	70,3	78,7	8,2	24,4	25,7	71,3	
S20-23	80,0	8,5	24,9	26,3	71,1	78,8	9,2	25,3	26,9	70,1	5,67
	81,5	5,2	21,3	21,9	76,3	75,0	14,1	27,0	30,4	62,4	
	80,8	8,0	25,4	26,6	72,5	79,5	7,7	24,2	25,4	72,4	
	81,6	5,6	22,0	22,7	75,6	77,4	10,5	24,3	26,5	66,7	
	81,9	6,2	23,0	23,8	75,0	79,7	6,3	22,6	23,5	74,4	

S20-24	80,9	5,6	22,6	23,3	76,1	78,5	11,2	25,8	28,1	66,5	3,29
	80,5	5,3	21,6	22,2	76,2	79,6	10,2	26,2	28,1	68,8	
	81,8	5,7	22,7	23,4	75,9	81,0	6,8	23,3	24,2	73,8	
	81,3	5,8	22,6	23,3	75,6	82,0	5,6	21,9	22,6	75,8	
	80,5	5,8	23,2	23,9	76,1	79,9	7,8	24,2	25,4	72,0	

Tabla 171: Colorimetría. Cálculos. Prototipos 0 % LTAB

ID	ΔE^*	DIFERENCIA DE COLOR CORREGIDA								COLOR PROMEDIO			ISO 12647-2
		ΔL^*	C1	C2	ΔC^*	ΔH^*	SC	SH	VALOR	L*	a*	b*	
S0-1	0,39	0,06	18,33	17,96	-0,37	0,09	1,82	1,27	0,225	77,91	8,67	15,94	EXCELENTE
S0-2	0,14	-0,02	18,08	18,21	0,12	0,07	1,82	1,27	0,088	77,97	8,54	16,01	EXCELENTE
S0-3	0,62	-0,60	18,37	18,26	-0,11	0,13	1,82	1,27	0,612	77,90	8,77	16,08	EXCELENTE
S0-4	0,37	-0,30	16,65	16,46	-0,20	0,05	1,75	1,25	0,328	76,33	7,38	14,82	EXCELENTE
S0-5	0,55	0,50	17,28	17,05	-0,23	0,06	1,77	1,26	0,519	77,07	7,92	15,23	EXCELENTE
S0-6	0,11	-0,10	16,30	16,26	-0,04	0,02	1,73	1,24	0,103	75,99	7,16	14,62	EXCELENTE
S0-7	0,57	0,54	18,71	18,90	0,19	0,04	1,85	1,28	0,550	78,81	9,39	16,29	EXCELENTE
S0-8	0,32	-0,14	18,56	18,28	-0,27	0,07	1,83	1,28	0,213	79,33	9,16	15,98	EXCELENTE
S0-9	0,12	0,02	18,27	18,38	0,11	0,04	1,82	1,27	0,073	79,45	9,07	15,92	EXCELENTE
S0-10	0,52	-0,46	18,76	18,94	0,18	0,15	1,85	1,28	0,485	78,55	9,33	16,38	EXCELENTE
S0-11	0,84	-0,16	21,90	21,12	-0,78	0,26	1,97	1,32	0,469	76,96	10,38	18,84	EXCELENTE
S0-12	0,12	0,00	18,95	18,83	-0,12	0,00	1,85	1,28	0,063	77,72	9,21	16,49	EXCELENTE
S0-13	0,40	-0,36	16,90	16,74	-0,16	0,04	1,76	1,25	0,373	81,34	8,32	14,62	EXCELENTE
S0-14	0,58	0,00	17,43	16,86	-0,57	0,09	1,77	1,26	0,329	80,50	8,46	14,91	EXCELENTE
S0-15	0,27	0,16	17,00	16,79	-0,21	0,04	1,76	1,25	0,202	80,26	8,43	14,64	EXCELENTE
S0-16	0,29	-0,06	17,32	17,05	-0,27	0,07	1,77	1,26	0,175	80,49	8,60	14,88	EXCELENTE
S0-17	0,20	-0,18	18,10	18,08	-0,02	0,08	1,81	1,27	0,191	78,05	9,08	15,65	EXCELENTE

Tabla 172: Colorimetría. Cálculos. Prototipos 0 % LTAB

ID	ΔE^*	DIFERENCIA DE COLOR CORREGIDA								COLOR PROMEDIO			ISO 12647-2
		ΔL^*	C1	C2	ΔC^*	ΔH^*	SC	SH	VALOR	L*	a*	b*	CALIDAD
S0-18	0,18	0,16	16,76	16,68	-0,07	0,05	1,75	1,25	0,170	79,54	8,36	14,48	EXCELENTE
S0-19	0,18	0,14	18,40	18,28	-0,12	0,01	1,83	1,28	0,154	82,09	8,35	16,33	EXCELENTE
S0-20	0,26	-0,22	19,00	19,14	0,14	0,02	1,86	1,29	0,233	81,97	8,64	17,00	EXCELENTE
S0-21	0,39	0,18	18,77	18,50	-0,27	0,22	1,84	1,28	0,289	80,79	8,56	16,55	EXCELENTE
S0-22	0,13	0,02	18,82	18,80	-0,02	0,12	1,85	1,28	0,100	81,69	8,62	16,72	EXCELENTE
S0-23	0,39	0,04	18,09	18,48	0,38	0,00	1,82	1,27	0,215	81,28	8,57	16,15	EXCELENTE
S0-24	0,91	-0,88	17,84	18,04	0,20	0,08	1,81	1,27	0,889	82,14	8,36	15,87	EXCELENTE

Tabla 173: Colorimetría. Cálculos. Prototipos 5 % LTAB

ID	ΔE^*	DIFERENCIA DE COLOR CORREGIDA								COLOR PROMEDIO			ISO 12647-2
		ΔL^*	C1	C2	ΔC^*	ΔH^*	SC	SH	VALOR	L*	a*	b*	CALIDAD
S5 - 1	0,22	-0,22	15,94	15,94	0,00	0,00	1,72	1,24	0,22	77,73	6,74	14,44	EXCELENTE
S5 - 2	0,37	-0,34	13,73	13,88	0,15	0,04	1,62	1,21	0,35	80,09	5,81	12,52	EXCELENTE
S5 - 3	0,04	-0,02	15,02	15,05	0,04	0,02	1,68	1,23	0,03	77,05	6,28	13,66	EXCELENTE
S5 - 4	0,54	-0,54	11,25	11,24	-0,01	0,02	1,51	1,17	0,54	82,55	4,65	10,24	EXCELENTE
S5 - 5	0,32	-0,32	14,10	14,04	-0,05	0,02	1,63	1,21	0,32	79,32	5,84	12,80	EXCELENTE
S5 - 6	0,46	-0,46	13,36	13,31	-0,05	0,04	1,60	1,20	0,46	79,93	5,45	12,17	EXCELENTE
S5 - 7	0,31	-0,24	18,30	18,15	-0,16	0,13	1,82	1,27	0,27	80,24	8,80	15,96	EXCELENTE
S5 - 8	0,15	-0,12	15,93	16,00	0,07	0,05	1,72	1,24	0,13	83,54	7,26	14,22	EXCELENTE
S5 - 9	0,10	0,00	18,36	18,46	0,10	0,03	1,83	1,28	0,06	79,56	8,87	16,13	EXCELENTE
S5 - 10	0,23	0,18	18,82	18,72	-0,10	0,10	1,84	1,28	0,21	79,35	8,95	16,50	EXCELENTE
S5 - 11	0,04	0,00	17,09	17,05	-0,04	0,00	1,77	1,26	0,03	81,56	7,81	15,18	EXCELENTE
S5 - 12	0,32	0,20	15,32	15,07	-0,25	0,01	1,68	1,23	0,25	83,62	6,88	13,55	EXCELENTE
S5 - 13	0,12	-0,12	18,26	18,23	-0,03	0,01	1,82	1,27	0,12	81,42	8,93	15,91	EXCELENTE
S5 - 14	0,08	0,08	16,79	16,76	-0,03	0,01	1,75	1,25	0,08	83,16	7,99	14,75	EXCELENTE
S5 - 15	0,07	0,06	16,23	16,22	-0,02	0,04	1,73	1,24	0,07	83,49	7,74	14,26	EXCELENTE
S5 - 16	0,07	-0,06	18,25	18,20	-0,04	0,00	1,82	1,27	0,06	81,23	9,01	15,84	EXCELENTE
S5 - 17	0,70	-0,68	16,05	15,99	-0,07	0,13	1,72	1,24	0,69	84,06	7,64	14,08	EXCELENTE

Tabla 174: Colorimetría. Cálculos. Prototipos 5 % LTAB

ID	ΔE^*	DIFERENCIA DE COLOR CORREGIDA								COLOR PROMEDIO			ISO 12647-2
		ΔL^*	C1	C2	ΔC^*	ΔH^*	SC	SH	VALOR	L*	a*	b*	CALIDAD
S5-18	0,24	-0,24	18,10	18,12	0,02	0,03	1,81	1,27	0,24	80,52	9,06	15,68	EXCELENTE
S5-19	0,05	0,02	18,04	18,00	-0,04	0,03	1,81	1,27	0,03	82,85	8,46	15,91	EXCELENTE
S5-20	0,47	0,46	16,06	16,14	0,08	0,02	1,72	1,24	0,46	83,09	7,27	14,36	EXCELENTE
S5-21	0,11	-0,04	15,60	15,49	-0,11	0,01	1,70	1,23	0,08	83,34	6,86	13,95	EXCELENTE
S5-22	0,57	-0,30	17,97	18,38	0,41	0,25	1,82	1,27	0,42	82,47	8,73	15,94	EXCELENTE
S5-23	0,38	0,38	16,52	16,51	-0,01	0,03	1,74	1,25	0,38	83,45	7,27	14,83	EXCELENTE
S5-24	0,65	-0,60	15,31	15,56	0,25	0,04	1,69	1,23	0,62	85,08	7,18	13,66	EXCELENTE

Tabla 175: Colorimetría. Cálculos. Prototipos 10 % LTAB

ID	ΔE^*	DIFERENCIA DE COLOR CORREGIDA								COLOR PROMEDIO			ISO 12647-2
		ΔL^*	C1	C2	ΔC^*	ΔH^*	SC	SH	VALOR	L*	a*	b*	CALIDAD
S10 - 1	0,14	-0,06	16,88	16,79	-0,09	0,09	1,76	1,25	0,11	77,53	7,44	15,10	EXCELENTE
S10 - 2	0,10	0,02	17,47	17,41	-0,06	0,08	1,78	1,26	0,08	77,77	7,61	15,69	EXCELENTE
S10 - 3	0,40	0,40	17,37	17,36	-0,01	0,06	1,78	1,26	0,40	78,10	7,57	15,63	EXCELENTE
S10 - 4	0,29	0,20	17,79	17,58	-0,21	0,02	1,80	1,27	0,23	77,58	7,74	15,90	EXCELENTE
S10 - 5	0,75	0,74	16,90	17,02	0,12	0,08	1,76	1,25	0,75	76,85	7,29	15,31	EXCELENTE
S10 - 6	0,20	0,08	16,88	17,05	0,18	0,00	1,76	1,25	0,13	77,08	7,16	15,38	EXCELENTE
S10 - 7	0,42	-0,38	17,64	17,47	-0,17	0,07	1,79	1,26	0,40	81,37	8,23	15,51	EXCELENTE
S10 - 8	0,33	-0,28	15,65	15,49	-0,16	0,08	1,70	1,23	0,30	83,12	7,26	13,77	EXCELENTE
S10 - 9	0,13	-0,10	16,58	16,54	-0,04	0,07	1,75	1,25	0,12	83,69	7,58	14,72	EXCELENTE
S10- 10	0,22	-0,22	16,03	16,04	0,01	0,02	1,72	1,24	0,22	83,09	7,45	14,20	EXCELENTE
S10- 11	0,15	-0,06	16,19	16,32	0,13	0,00	1,73	1,24	0,10	83,23	7,69	14,32	EXCELENTE
S10- 12	0,16	0,00	16,43	16,59	0,15	0,06	1,74	1,25	0,10	82,60	7,67	14,62	EXCELENTE
S10- 13	0,11	-0,08	17,96	17,91	-0,05	0,06	1,81	1,27	0,10	83,84	8,12	15,99	EXCELENTE
S10- 14	0,57	0,32	17,74	17,27	-0,46	0,04	1,79	1,26	0,41	84,56	7,78	15,68	EXCELENTE
S10- 15	0,28	-0,22	17,34	17,50	0,16	0,05	1,78	1,26	0,24	83,85	8,14	15,40	EXCELENTE
S10- 16	0,48	0,48	18,11	18,09	-0,03	0,01	1,81	1,27	0,48	83,68	8,29	16,09	EXCELENTE
S10- 17	0,10	0,00	18,34	18,43	0,10	0,02	1,83	1,28	0,06	83,58	8,35	16,38	EXCELENTE

Tabla 176: Colorimetría. Cálculos. Prototipos 10 % LTAB

ID	ΔE^*	DIFERENCIA DE COLOR CORREGIDA								COLOR PROMEDIO			ISO 12647-2
		ΔL^*	C1	C2	ΔC^*	ΔH^*	SC	SH	VALOR	L*	a*	b*	CALIDAD
S10-18	0,34	0,02	17,33	17,64	0,30	0,15	1,79	1,26	0,21	84,35	7,84	15,63	EXCELENTE
S10-19	0,42	0,36	17,72	17,55	-0,17	0,14	1,79	1,26	0,39	83,04	7,00	16,19	EXCELENTE
S10-20	0,16	0,06	16,44	16,33	-0,11	0,11	1,74	1,25	0,12	84,87	5,83	15,31	EXCELENTE
S10-21	0,55	-0,54	18,52	18,43	-0,09	0,00	1,83	1,28	0,54	83,09	7,50	16,88	EXCELENTE
S10-22	0,30	-0,18	18,85	19,08	0,23	0,08	1,85	1,28	0,23	83,39	7,63	17,36	EXCELENTE
S10-23	0,10	0,10	17,30	17,27	-0,03	0,01	1,78	1,26	0,10	83,71	7,17	15,73	EXCELENTE
S10-24	0,48	-0,42	16,39	16,16	-0,23	0,03	1,73	1,24	0,44	84,57	6,82	14,78	EXCELENTE

Tabla 177: Colorimetría. Cálculos. Prototipos 15 % LTAB

ID	ΔE^*	DIFERENCIA DE COLOR CORREGIDA								COLOR PROMEDIO			ISO 12647-2
		ΔL^*	C1	C2	ΔC^*	ΔH^*	SC	SH	VALOR	L*	a*	b*	CALIDAD
S15 - 1	0,18	-0,14	20,22	20,31	0,08	0,07	1,91	1,30	0,16	79,99	9,65	17,82	EXCELENTE
S15 - 2	0,27	0,18	20,11	19,94	-0,17	0,11	1,90	1,30	0,22	79,71	9,53	17,61	EXCELENTE
S15 - 3	0,15	-0,12	18,69	18,61	-0,08	0,02	1,84	1,28	0,13	79,50	8,83	16,43	EXCELENTE
S15 - 4	0,33	-0,32	18,39	18,47	0,08	0,03	1,83	1,28	0,32	78,08	8,31	16,45	EXCELENTE
S15 - 5	0,11	0,10	19,86	19,81	-0,04	0,00	1,89	1,30	0,10	78,87	8,99	17,68	EXCELENTE
S15 - 6	0,18	-0,18	20,43	20,46	0,03	0,01	1,92	1,31	0,18	78,33	9,05	18,33	EXCELENTE
S15 - 7	0,37	-0,36	20,49	20,50	0,01	0,06	1,92	1,31	0,36	80,50	9,55	18,13	EXCELENTE
S15 - 8	0,08	-0,06	19,56	19,62	0,05	0,02	1,88	1,29	0,07	80,61	9,30	17,24	EXCELENTE
S15 - 9	0,05	-0,02	19,17	19,19	0,03	0,04	1,86	1,29	0,04	79,91	9,03	16,92	EXCELENTE
S15- 10	0,32	0,28	18,72	18,86	0,14	0,03	1,85	1,28	0,29	80,92	8,86	16,57	EXCELENTE
S15- 11	0,20	-0,02	19,43	19,63	0,20	0,06	1,88	1,29	0,12	81,33	9,18	17,24	EXCELENTE
S15- 12	1,58	-0,04	18,04	17,40	-0,64	1,45	1,80	1,27	1,20	81,30	7,77	15,91	BUENA
S15- 13	0,77	-0,48	16,75	17,34	0,59	0,10	1,77	1,26	0,59	82,52	7,32	15,39	EXCELENTE
S15- 14	0,50	0,46	19,54	19,36	-0,18	0,08	1,88	1,29	0,47	81,63	9,16	17,16	EXCELENTE
S15- 15	0,68	0,68	21,63	21,69	0,06	0,01	1,97	1,32	0,68	81,56	10,23	19,09	EXCELENTE
S15- 16	0,28	0,28	19,72	19,70	-0,02	0,01	1,89	1,30	0,28	84,58	4,75	19,13	EXCELENTE
S15- 17	0,43	0,02	18,47	18,89	0,41	0,09	1,84	1,28	0,24	81,53	8,94	16,40	EXCELENTE

Tabla 178: Colorimetría. Cálculos. Prototipos 15 % LTAB

ID	ΔE^*	DIFERENCIA DE COLOR CORREGIDA								COLOR PROMEDIO			ISO 12647-2
		ΔL^*	C1	C2	ΔC^*	ΔH^*	SC	SH	VALOR	L*	a*	b*	CALIDAD
S15-18	0,07	0,06	20,56	20,52	-0,04	0,03	1,92	1,31	0,07	82,87	9,38	18,27	EXCELENTE
S15-19	0,15	0,14	21,85	21,88	0,03	0,03	1,98	1,33	0,14	82,69	6,70	20,81	EXCELENTE
S15-20	0,49	-0,34	24,40	24,70	0,30	0,18	2,10	1,37	0,39	82,53	7,26	23,45	EXCELENTE
S15-21	0,11	-0,02	25,04	24,93	-0,11	0,01	2,12	1,37	0,05	81,11	7,64	23,79	EXCELENTE
S15-22	0,20	0,00	18,84	18,78	-0,06	0,19	1,85	1,28	0,15	84,40	6,52	17,64	EXCELENTE
S15-23	0,48	0,18	23,15	22,71	-0,44	0,07	2,03	1,34	0,29	83,05	5,74	22,20	EXCELENTE
S15-24	0,19	-0,04	24,24	24,19	-0,05	0,18	2,09	1,36	0,14	83,08	6,42	23,35	EXCELENTE

Tabla 179: Colorimetría. Cálculos. Prototipos 20 % LTAB

ID	DIFERENCIA DE COLOR CORREGIDA									COLOR PROMEDIO			ISO 12647-2
	ΔE^*	ΔL^*	C1	C2	ΔC^*	ΔH^*	SC	SH	VALOR	L*	a*	b*	CALIDAD
S20 - 1	7,17	2,38	18,79	12,51	-6,28	2,52	1,69	1,23	4,86	79,47	5,77	14,49	SUFICIENTE
S20 - 2	6,52	-2,74	15,08	20,71	5,63	1,83	1,80	1,27	4,41	78,37	7,32	16,30	SUFICIENTE
S20 - 3	5,30	-0,30	17,42	12,44	-4,98	1,79	1,66	1,22	3,35	80,59	5,36	13,91	NORMAL
S20 - 4	6,92	2,52	19,98	13,77	-6,21	1,71	1,75	1,25	4,57	77,42	6,78	15,43	SUFICIENTE
S20 - 5	1,75	-1,04	19,22	20,63	1,40	0,03	1,90	1,30	1,28	77,36	8,99	17,78	BUENA
S20 - 6	2,10	1,50	18,83	17,36	-1,47	0,05	1,81	1,27	1,70	77,27	7,92	16,27	BUENA
S20 - 7	5,15	1,88	20,77	16,20	-4,58	1,44	1,83	1,28	3,33	81,60	7,93	16,68	NORMAL
S20 - 8	3,85	1,96	17,57	14,99	-2,58	2,08	1,73	1,24	2,98	83,30	5,79	15,18	NORMAL
S20 - 9	2,43	2,20	16,23	15,33	-0,90	0,50	1,71	1,24	2,30	82,42	5,98	14,60	NORMAL
S20- 10	8,90	-5,60	14,30	20,32	6,02	3,41	1,77	1,26	7,09	82,24	6,84	15,81	MALA
S20- 11	8,65	4,64	23,21	16,75	-6,46	3,39	1,89	1,30	6,33	80,50	8,04	18,21	MALA
S20- 12	10,22	5,60	24,21	16,33	-7,88	3,30	1,89	1,30	7,42	80,54	8,30	18,42	MALA
S20- 13	6,17	1,40	22,24	19,40	-2,83	5,30	1,93	1,31	4,52	81,14	6,99	19,43	SUFICIENTE
S20- 14	5,41	-0,46	19,98	22,39	2,42	4,82	1,95	1,32	3,89	81,15	6,91	19,88	NORMAL
S20- 15	4,03	0,46	19,38	17,99	-1,39	3,76	1,84	1,28	3,07	81,67	5,42	17,78	NORMAL
S20- 16	6,68	1,04	24,61	18,42	-6,19	2,27	1,96	1,32	3,75	81,18	5,50	20,77	NORMAL
S20- 17	10,21	6,42	24,20	17,78	-6,42	4,67	1,93	1,31	8,06	82,65	8,10	19,22	MALA

Tabla 180: Colorimetría. Cálculos. Prototipos 20 % LTAB

ID	ΔE^*	DIFERENCIA DE COLOR CORREGIDA								COLOR PROMEDIO			ISO 12647-2
		ΔL^*	C1	C2	ΔC^*	ΔH^*	SC	SH	VALOR	L*	a*	b*	CALIDAD
S20-18	6,12	0,98	23,42	21,47	-1,94	5,72	2,01	1,34	4,50	82,49	8,04	20,76	SUFICIENTE
S20-19	11,21	-7,80	24,88	31,38	6,50	4,75	2,26	1,42	8,96	78,42	10,29	26,07	MALA
S20-20	3,20	1,30	23,96	26,81	2,85	0,67	2,14	1,38	1,92	81,91	6,93	24,42	BUENA
S20-21	6,71	-3,90	25,72	29,01	3,29	4,36	2,23	1,41	5,19	78,33	9,29	25,65	MALA
S20-22	1,79	-0,06	28,51	26,73	-1,79	0,05	2,24	1,41	0,80	78,93	9,51	25,93	EXCELENTE
S20-23	5,67	-4,06	24,26	27,39	3,13	2,42	2,16	1,39	4,65	79,13	8,35	24,41	SUFICIENTE
S20-24	3,29	-0,80	23,23	25,67	2,43	2,07	2,10	1,37	2,07	80,60	6,98	23,41	BUENA

Anexo J: Datos del ensayo de lixiviación

Tabla 181: Ensayo de Lixiviación (0-15 % LTAB y 700-1000 °C)

LTAB	ID	% LTAB	T (°C)	Sulfato en lixiviado (mg S04/L)
LTAB	S0-1 al S0-6	0	700	30
	S0-7 al S0-12	0	800	34
	S0-13 al S0-18	0	900	28
	S0-19 al S0-24	0	1000	38
	S5-1 al S5-6	5	700	140
	S5-7 al S5-12	5	800	150
	S5-13 al S5-18	5	900	175
	S5-19 al S5-24	5	1000	172
	S10-1 al S10-6	10	700	230
	S10-7 al S10-12	10	800	290
	S10-13 al S10-18	10	900	235
	S10-19 al S10-24	10	1000	160
	S15-1 al S15-6	15	700	265
	S15-7 al S15-12	15	800	260
	S15-13 al S15-18	15	900	225
	S15-19 al S15-24	15	1000	138