Estudio y caracterización de materias primas y productos de una empresa ladrillera marplatense

Trabajo final

Ingeniería en Materiales

Joaquín Gustavo Montaña

(Montanaj504@gmail.com)

Directora: Dra. María Laura Sandoval

Co-director: Dr. Adrián Cristóbal

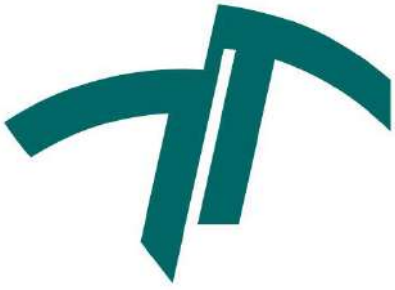
Área Cerámicos - INTEMA

UNMDP - Facultad de Ingeniería- Departamento de Ingeniería en Materiales

Proyecto final para optar al titulo de Ingeniero en Materiales

Fecha: Septiembre 2026

Lugar: Mar del Plata





UNIVERSIDAD NACIONAL DE MAR DEL PLATA

Estudio y caracterización de materias primas y productos de una empresa ladrillera marplatense

Autor: Joaquín Gustavo Montaña

Mail de contacto: Montanaj504@gmail.com

Directora: Dra. María Laura Sandoval

Co-director: Dr. Adrián Cristóbal

Comisión Evaluadora:

Dra. Valeria Pettarin

Dr. Carlos Diaz

Dr. Pablo Botta

AGRADECIMIENTOS:

A mis directores, la Dra. María Laura Sandoval y el Dr. Adrián Cristóbal, por su incansable apoyo ante cada inquietud y por el acompañamiento brindado a lo largo de este último año.

A mis compañeros de oficina, Xavier, Vanessa y Marcos, por las conversaciones compartidas y la ayuda durante la etapa experimental de este trabajo.

A la Dra. María Andrea Camerucci y a la Dra. Analía G. Tomba Martínez, por sus claras explicaciones en cuestiones teóricas vinculadas a los materiales cerámicos.

A mis compañeros de estudio, por la compañía a lo largo de estos años de cursada.

A mis amigos Lucas y Gonzalo, por acompañarme desde los primeros años de la carrera.

A mis amigos Tania, Rocío y Tobias, por su apoyo constante y por motivarme a seguir adelante.

A mis abuelos, Elsa y Esteban, por los valores inculcados en mi infancia, que me permitieron ser quien soy hoy.

A todo el grupo de División Cerámicos de INTEMA, por su predisposición y colaboración permanente.

A mis padrinos, Carla y Martín por mostrarme la importancia del estudio y apoyarme en todos estos años de carrera con su acompañamiento y cariño.

A mi madre, Paola, por impulsarme siempre a comprometerme con mis objetivos y por brindarme la posibilidad de acceder a un título universitario.

Índice:

RESUMEN:..... 3
ABSTRACT: 5
INTRODUCCIÓN GENERAL 6
Objetivos 7
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO..... 8
1.1. Materias primas 8
1.1.1. Materias primas plásticas..... 10
1.1.1.1. Minerales arcillosos..... 11
1.1.2. Materias primas no plásticas 17
1.1.2.1. Cuarzo..... 17
1.1.2.2. Feldespatos 18
1.1.2.3. Pirofilita 19
1.1.3. Propiedades físicas de las materias primas 20
1.1.3.1. Distribución de tamaño de partícula y clasificación granulométrica . 20
1.1.3.2. Plasticidad..... 21
1.2. Producción de ladrillos..... 25
1.2.1. Extracción y preparación de la materia prima 26
1.2.1.1. Extracción..... 26
1.2.1.2. Reducción de granulometría 28
1.2.2. Conformado por extrusión..... 30
1.2.3. Secado 34
1.2.4. Cocción 36
CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS..... 40
2.1. Recepción de las muestras..... 40
2.2. Preparación y acondicionamiento de las arcillas..... 40
2.3. Caracterización de las arcillas..... 43
2.3.1. Análisis mineralógico cualitativo y cuantitativo 43
2.3.2. Análisis textural 44
2.3.3. Determinación del contenido de materia orgánica 44
2.3.4. Determinación de la densidad picnométrica 45
2.3.5. Análisis termogravimétrico 45

2.3.6. Determinación del índice de plasticidad 45
2.4. Preparación y acondicionamiento de los ladrillos 46
2.5. Caracterización de los ladrillos 49
2.5.1. Análisis mineralógico cualitativo y cuantitativo 49
2.5.2. Análisis de la composición química 50
2.5.3. Análisis térmico 50
2.5.4. Determinación de densidad y porosidades 50
2.5.5. Determinación de la absorción de agua 51
2.5.6. Análisis microestructural 51
CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN 53
3.1. Caracterización de las arcillas 53
3.1.1. Análisis mineralógico 53
3.1.2. Análisis textural 58
3.1.3. Determinación del contenido de materia orgánica. 60
3.1.4. Determinación de la densidad picnométrica 61
3.1.5. Análisis termogravimétrico 62
3.1.6. Determinación de los índices de Atterberg 64
3.2. Caracterización de los ladrillos 67
3.2.1. Ladrillos secos 67
3.2.1.1. Análisis mineralógico cualitativo y cuantitativo 68
3.2.1.2. Análisis térmico diferencial y termogravimétrico 70
3.2.1.3. Determinación de densidad y porosidad 73
3.2.1.4. Análisis Microestructural 74
3.2.2. Ladrillos cocidos 78
3.2.2.1. Análisis mineralógico cualitativo y cuantitativo 78
3.2.2.2. Análisis de la composición química 80
3.2.2.3. Análisis térmico diferencial y termogravimétrico 81
3.2.2.4. Determinación de densidad y porosidades 83
3.2.2.5. Análisis de la absorción de agua 84
3.2.2.6. Análisis Microestructural 84
CONCLUSIONES 96
BIBLIOGRAFÍA: 98

RESUMEN:

En el presente trabajo se analizaron cuatro rocas arcillosas, denominadas Mezcla, Ocre, Roja y Yaraví, con el objetivo de evaluar su factibilidad de uso como materias primas para la producción de ladrillos huecos en una empresa local, que buscaba optimizar las propiedades de sus productos tomando como referencia los ladrillos elaborados por otra empresa en Córdoba. Las arcillas fueron caracterizadas mineralógicamente mediante difracción de rayos X con refinamiento por el método de Rietveld. Se determinó que las arcillas Mezcla, Ocre y Roja presentan una fracción significativa de minerales arcillosos, predominantemente illita, mientras que la arcilla Yaraví posee una menor fracción arcillosa, compuesta principalmente por caolinita. El contenido de materia orgánica, determinado mediante el método de Walkley-Black, resultó insignificante en todas las muestras. El análisis textural, realizado mediante el método de Bouyoucos, mostró que las arcillas Mezcla, Ocre y Roja presentan una distribución granulométrica similar a la de la materia prima empleada en la planta de Córdoba. Además, se evaluó su comportamiento térmico mediante análisis termogravimétrico y su plasticidad mediante los índices de Atterberg, observándose en todos los casos una plasticidad baja a media.

Con el objetivo de identificar posibles diferencias entre los productos elaborados en ambas plantas, se caracterizaron ladrillos en estado seco y cocido, determinándose sus fases mineralógicas, comportamiento térmico, densidad y porosidad. El ladrillo seco de Mar del Plata presentó una menor proporción de minerales arcillosos y una mayor pérdida de masa que el de Córdoba. En los ladrillos cocidos se observó un incremento relativo de cuarzo, feldespato y hematita respecto de los correspondientes ladrillos secos, compatible con la formación de una fracción amorfa durante la cocción, no cuantificable mediante el refinamiento de Rietveld. Asimismo, se observó un incremento de la porosidad total en ambos ladrillos, asociado a la generación de microfisuras durante el proceso de cocción. Mediante microscopía electrónica de barrido se identificó la formación de fase líquida en ambos ladrillos cocidos, que se presentó de manera más continua y con menor porosidad en el ladrillo de Córdoba, mientras que en el de Mar del Plata se observó de forma más localizada y asociada a una mayor presencia de poros.

En conjunto, los resultados indican que las diferencias observadas entre los ladrillos de ambas plantas no parecen estar asociadas principalmente con variaciones en la densidad o la porosidad, sino que podrían relacionarse con diferencias en el desarrollo y continuidad de la fase vítrea durante la cocción. Entre las materias primas analizadas, la arcilla Ocre se destaca como la alternativa más favorable, debido a su mayor fracción de minerales

arcillosos, mayor plasticidad y una distribución granulométrica más próxima a la materia prima empleada actualmente por la empresa. Por su parte, la arcilla Mezcla, si bien presenta una textura fina, posee el menor índice de plasticidad entre las muestras consideradas aptas. En función de estos resultados, la incorporación de arcilla Ocre, en combinación con las tierras empleadas actualmente en el proceso productivo, se presenta como una alternativa promisoria para la formulación de nuevas mezclas, cuya incidencia sobre las propiedades del producto final deberá ser validada mediante ensayos a escala de laboratorio y/o piloto.

ABSTRACT:

In this study, four clayey rocks, designated as Mezcla, Ocre, Roja, and Yaraví, were evaluated as potential raw materials for the production of hollow bricks by a local company using bricks manufactured by a second company located in Córdoba as a reference. The clays were mineralogically characterized by X-ray diffraction with Rietveld refinement. Mezcla, Ocre, and Roja were found to contain a significant fraction of clay minerals, predominantly illite, whereas Yaraví exhibited a lower clay fraction, mainly composed of kaolinite. The organic matter content, determined using the Walkley–Black method, was negligible in all samples. Textural analysis, performed using the Bouyoucos method, showed that Mezcla, Ocre, and Roja had particle-size distributions similar to that of the raw material currently used at the Córdoba plant. Their thermal behavior was evaluated by thermogravimetric analysis, while their plasticity was assessed using the Atterberg limits. All samples exhibited low to medium plasticity.

To identify potential differences between the products manufactured at both plants, dry and fired bricks were characterized in terms of their mineralogical phases, thermal behavior, density, and porosity. The dry brick from Mar del Plata exhibited a lower proportion of clay minerals and a higher mass loss than the brick from Córdoba. In the fired bricks, a relative increase in quartz, feldspar, and hematite was observed compared with the corresponding dry bricks, consistent with the formation of an amorphous fraction during firing that could not be quantified by Rietveld refinement. An increase in total porosity was also observed in both bricks, which was associated with the formation of microcracks during firing. Scanning electron microscopy revealed the formation of a liquid phase in both fired bricks. This phase appeared more continuous and associated with lower porosity in the Córdoba brick, whereas in the Mar del Plata brick it was more localized and associated with a higher pore content.

Overall, the results indicate that the differences observed between the bricks produced at the two plants do not appear to be mainly associated with variations in density or porosity, but could instead be related to differences in the development and continuity of the glassy phase during firing. Among the raw materials analyzed, Ocre emerged as the most promising alternative due to its higher clay-mineral fraction, greater plasticity, and particle-size distribution more closely matching that of the raw material currently used by the company. In contrast, although Mezcla exhibited a fine texture, it had the lowest plasticity index among the samples considered suitable. Based on these results, the incorporation of Ocre clay in combination with the materials currently used in the production process represents a promising alternative for the formulation of new mixtures. Its effect on the final product properties should be further validated through laboratory- and/or pilot-scale testing.

INTRODUCCIÓN GENERAL

El ladrillo cerámico es uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción debido a su amplia disponibilidad, bajo costo y adecuadas propiedades mecánicas. En la región de Mar del Plata, su producción constituye una actividad industrial de relevancia, vinculada a la disponibilidad de yacimientos arcillosos locales. El presente trabajo surge a partir del interés de una empresa local en optimizar las propiedades de sus ladrillos huecos, a fin de mejorar su desempeño y competitividad en el mercado.

Su proceso de fabricación consta de cuatro etapas principales. En primer lugar, se realiza la extracción de la materia prima, seguida de la reducción de su granulometría. Luego, se lleva a cabo la extrusión, mediante la cual se conforma la pieza. Posteriormente, el material es sometido a un proceso de secado para eliminar la humedad, y finalmente se realiza la cocción a temperaturas comprendidas entre 960 y 1000 °C, etapa en la que se desarrollan las propiedades finales del producto.

La fabricación de estos materiales se basa en el uso de arcillas y suelos provenientes de canteras cercanas. Desde el punto de vista composicional, es importante distinguir entre la arcilla como material natural y los minerales arcillosos que la constituyen. Mientras que la arcilla corresponde a una roca sedimentaria compleja, los minerales arcillosos son principalmente aluminosilicatos hidratados pertenecientes al grupo de los filosilicatos. Además de estos minerales, las arcillas contienen proporciones variables de cuarzo, feldespatos, micas y materia orgánica, los cuales influyen significativamente en su comportamiento durante el procesamiento (Wang et al., 2022).

Las características mineralógicas, químicas y granulométricas de estas materias primas condicionan tanto su comportamiento en las etapas de conformado y secado como su evolución durante la cocción. En particular, la plasticidad constituye una propiedad importante, ya que determina la capacidad de conformado de la pasta cerámica y se encuentra estrechamente relacionada con la granulometría y la naturaleza de los minerales arcillosos presentes. Asimismo, el tamaño de partícula influye en la superficie específica y en la reactividad del sistema.

En este contexto, se analizaron diferentes arcillas provenientes de canteras locales mediante técnicas de caracterización mineralógica, térmica y granulométrica, junto con la evaluación de su plasticidad. Además, se realizó un estudio comparativo entre ladrillos en estado seco y cocido fabricados en Mar del Plata, tomando como referencia productos en los mismos estados elaborados por una empresa de Córdoba, evaluando su composición mineralógica y química, densidad, porosidad, absorción de agua y microestructura. Este enfoque permitió

establecer relaciones entre las propiedades de las materias primas, su evolución durante la cocción y las características finales de los ladrillos.

Objetivos

El *objetivo general* de este proyecto final es evaluar diferentes arcillas disponibles en la cercanía a una planta ladrillera local para su uso como materia prima en la fabricación de ladrillos huecos, y analizar el impacto de sus características sobre las propiedades del producto final.

Para ello se plantea alcanzar los siguientes objetivos específicos:

- Determinar y analizar la composición química y mineralógica, las características granulométricas, las propiedades fisicoquímicas y la evolución térmica de las arcillas disponibles.
- Evaluar la conformabilidad de las arcillas para su uso como materias primas.
- Determinar las propiedades físicas (densidades y porosidades) y analizar la microestructura y las fases de los ladrillos secos fabricados con las arcillas actualmente en uso por la empresa.
- Determinar las propiedades físicas (densidades, porosidades y absorción de agua) y analizar la microestructura y las fases desarrolladas de los ladrillos cocidos.
- Correlacionar las propiedades de las arcillas disponibles con las propiedades de los ladrillos actualmente fabricados, para evaluar su potencial de uso como materia prima alternativa.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

1.1. Materias primas

Las materias primas empleadas en la producción de piezas cerámicas se encuentran en la naturaleza en forma de rocas presentes en la superficie terrestre. Estas rocas constituyen agregados naturales formados por uno o más minerales o mineraloides.

Un *mineral* se define como un sólido homogéneo de origen natural, con una composición química definida y una estructura cristalina ordenada. Su origen está asociado, en muchos casos, a procesos geológicos vinculados al magma, el cual puede describirse como una mezcla fundida o parcialmente fundida de silicatos a alta temperatura, con presencia de compuestos volátiles. A partir de este material fundido se generan distintos tipos de minerales mediante procesos de enfriamiento, cristalización y transformación. Desde el punto de vista de su formación, los minerales pueden clasificarse en dos grandes grupos: primarios y secundarios.

Los minerales primarios son aquellos que se originan directamente a partir del magma y conservan su composición desde su consolidación original. Dentro de este grupo se incluyen: (i) minerales formados por cristalización directa del magma, característicos de rocas ígneas tales como el basalto y el granito; (ii) fases minerales formados por procesos de enfriamiento lento con diferenciación composicional, entre las que se encuentran cromitas, magnetitas, feldespatos y micas; y (iii) minerales producidos por interacción del magma o sus componentes volátiles con rocas circundantes, como el cuarzo y el corindón.

Además, cuando el enfriamiento del magma es muy rápido pueden generarse materiales amorfos (mineraloides) que carecen de estructura cristalina, tales como la obsidiana (vidrio volcánico).

Por otro lado, los minerales secundarios se forman a partir de la alteración, descomposición o transformación de los minerales primarios (así como de los vidrios volcánicos precursores) cuando estos quedan expuestos a las condiciones de la superficie terrestre. Estos procesos, conocidos como meteorización, pueden ser de tipo físico, químico o biológico. Como resultado, se generan dos tipos principales de depósitos: los depósitos residuales, en los cuales los materiales permanecen en su lugar de origen, y los depósitos sedimentarios, donde los minerales son transportados y redepositados en otras zonas.

Dentro de las materias primas empleadas en la fabricación de productos cerámicos, es posible distinguir dos grandes categorías según su comportamiento frente al agua y su función en la pasta cerámica: materias primas plásticas y materias primas no plásticas).

Se denomina *materia prima plástica* a aquella que, en presencia de agua, es capaz de desarrollar plasticidad: la propiedad que permite deformar el material bajo la acción de un

esfuerzo, sin que se produzca fractura, y conservar la forma adquirida una vez retirado dicho esfuerzo (Reeves et al., 2006). Esta capacidad constituye un requisito indispensable para el conformado de piezas cerámicas por métodos como la extrusión, ya que permite dar forma a la pasta y que esta la mantenga durante las etapas siguientes del proceso (secado y manipulación previa a la cocción). Las arcillas son, por excelencia, las materias primas plásticas empleadas en la fabricación de ladrillos.

Por el contrario, las *materias primas no plásticas* (también llamadas áridas) no desarrollan plasticidad en presencia de agua. Se incorporan a la pasta cerámica, ya sea porque están naturalmente presentes en la arcilla o porque se agregan de manera intencional, con el fin de modificar su comportamiento durante el conformado, el secado y la cocción: reduciendo la plasticidad excesiva de arcillas muy grasas, disminuyendo la contracción durante el secado, o favoreciendo la formación de fase líquida durante la cocción. Ejemplos típicos de este grupo son el cuarzo, los feldespatos, la chamota y las cenizas.

La proporción relativa entre componentes plásticos y no plásticos condiciona de manera directa la conformabilidad de la pasta y las propiedades del producto cocido, por lo que resulta un aspecto central en la caracterización de materias primas cerámicas.

En este sentido, la industria cerámica exige que las materias primas empleadas cumplan con cuatro requisitos fundamentales. En primer lugar, deben presentar una calidad constante en el tiempo, es decir, mantener su composición química y mineralógica y sus propiedades fisicoquímicas dentro de valores estables. En segundo lugar, deben ajustarse a especificaciones y tolerancias rigurosas, tanto en la concentración mínima de los componentes mineralógicos y químicos deseados como en los porcentajes máximos admisibles de minerales o elementos no deseados. Además, es necesario contar con cantidades suficientes y un suministro ininterrumpido de materia prima que garantice la continuidad del proceso productivo. Finalmente, debe procurarse una economicidad adecuada, que permita mantener los costos de producción dentro de niveles competitivos (Mari, 1999).

Estos requisitos ponen de manifiesto la importancia de una caracterización sistemática de las materias primas, particularmente de los minerales arcillosos, dado que son estos los que determinan en mayor medida el comportamiento plástico y, por lo tanto, la aptitud tecnológica de la arcilla para su uso cerámico.

1.1.1. Materias primas plásticas

En términos generales, la *arcilla* puede definirse como un material natural de grano fino que presenta plasticidad en presencia de agua, mantiene su forma al secarse y adquiere resistencia mecánica de manera irreversible tras la cocción (Reeves et al., 2006). En este mismo sentido, Ralph E. Grim sostenía que el término arcilla implica, en general, un material terroso natural de grano fino que desarrolla plasticidad al mezclarse con una cantidad limitada de agua, cuyo origen puede vincularse a procesos de meteorización, acción hidrotermal o sedimentación (Grim, 1968).

Por otro lado, desde un criterio granulométrico, se denomina arcilla a la fracción de partículas de tamaño inferior a 2 µm, en contraposición con las fracciones de mayor tamaño como el limo y la arena. Es decir, se trata de una categoría textural y no composicional: cualquier partícula (sea un mineral arcilloso, cuarzo finamente molido u otro material) que caiga dentro de ese rango de tamaño se clasifica granulométricamente como "fracción arcilla" (Wentworth, 1922).

Como puede observarse, el término "arcilla" no posee una definición única, sino que adquiere distintos significados según el contexto disciplinar en el que se emplee, ya sea tecnológico, genético o granulométrico. En todos los casos, sin embargo, resulta clave distinguirlo de los minerales arcillosos, que constituyen únicamente una de las fases minerales presentes en la arcilla, responsable en gran medida de su comportamiento plástico, pero no la totalidad del material.

Además de la arcilla propiamente dicha, en la fabricación de productos de cerámica roja (como los ladrillos huecos) suele emplearse también el término *tierra* para referirse a materiales de similares características, extraídos directamente de yacimientos superficiales sin selección ni beneficio previo. A diferencia de las arcillas más puras (empleadas, por ejemplo, en cerámica blanca o refractaria), las tierras utilizadas en cerámica roja provienen típicamente de depósitos residuales o sedimentarios formados por meteorización *in situ* o por transporte y acumulación de materiales, y conservan una fracción importante de minerales primarios (cuarzo, feldespatos, micas) junto con los minerales arcillosos secundarios propiamente dichos.

Esta heterogeneidad composicional es, precisamente, una de las razones por las cuales estas materias primas requieren caracterización sistemática antes de su uso industrial: además de los minerales arcillosos y no arcillosos, las tierras suelen contener proporciones variables de materia orgánica, carbonatos y óxidos de hierro, cuya presencia influye directamente en el comportamiento durante el secado, la coloración tras la cocción y las propiedades mecánicas del producto final. En la industria del ladrillo, los términos "tierra" y "arcilla común" se emplean con frecuencia de manera indistinta para designar estas materias primas naturales de bajo

costo, ampliamente disponibles y de escaso procesamiento previo, características que las distinguen de las arcillas más selectas empleadas en otras ramas de la industria cerámica.
En este sentido, la planificación racional de una formulación destinada a la fabricación de un producto cerámico requiere de una caracterización completa de las materias primas empleadas, más allá de si se trata de arcillas propiamente dichas o de tierras. En el caso particular de las arcillas, dada la complejidad y heterogeneidad de su composición, dicha caracterización debe incluir el análisis de su composición química y mineralógica, así como de sus características granulométricas, junto con la evaluación de las propiedades físicas vinculadas a su comportamiento como componente plástico al ponerse en contacto con agua y conformar una pasta cerámica.
Por lo tanto, resulta necesario profundizar en la naturaleza de los minerales arcillosos que componen la arcilla, dado que son estos los responsables directos de su comportamiento plástico y de gran parte de sus propiedades tecnológicas.

1.1.1.1. Minerales arcillosos

Los minerales arcillosos son aluminosilicatos hidratados que pertenecen al grupo de los filosilicatos o silicatos laminares. Su estructura se caracteriza por la combinación de capas tetraédricas y capas octaédricas, las cuales se combinan entre sí dando lugar a láminas (también denominadas estratos); el apilamiento de dichas láminas constituye una partícula.
Las capas tetraédricas (capas T) están constituidas por grupos tetraédricos $(SiO_4)^{-4}$, en los que un átomo de silicio se encuentra coordinado con cuatro átomos de oxígeno. Estos tetraedros se unen entre sí compartiendo tres de sus cuatro oxígenos con tetraedros vecinos, dando lugar a una red bidimensional de extensión infinita y fórmula $(Si_2O_5)^{-2}$. En esta disposición, los tetraedros se distribuyen formando anillos de seis oxígenos, lo que le confiere a la capa una simetría hexagonal, mientras que el cuarto oxígeno de cada tetraedro, denominado oxígeno apical, no se comparte con otros tetraedros y queda orientado en dirección normal a la capa, disponible para actuar posteriormente como puente de unión con otra capa.
Las capas octaédricas (capas O) están constituidas por octaedros formados por un catión central, típicamente Al^{3+} o Mg^{2+}, coordinado con seis átomos de oxígeno o grupos hidroxilo (OH^-), los cuales se unen entre sí formando un empaquetamiento hexagonal compacto. Según el grado de ocupación de las posiciones octaédricas disponibles, estas capas se clasifican en dos tipos: si todos los huecos octaédricos se encuentran ocupados (caso típico cuando el catión central es Mg^{2+}), la capa se denomina trioctaédrica; en cambio, si solo dos tercios de las posiciones están ocupadas y el tercio restante permanece vacante (caso típico cuando el catión central es Al^{3+}), la capa se denomina dioctaédrica. En la Figura 1.1 se

presentan los elementos estructurales que componen cada tipo de capa (tetraedros y octaedros) junto con su disposición espacial característica.

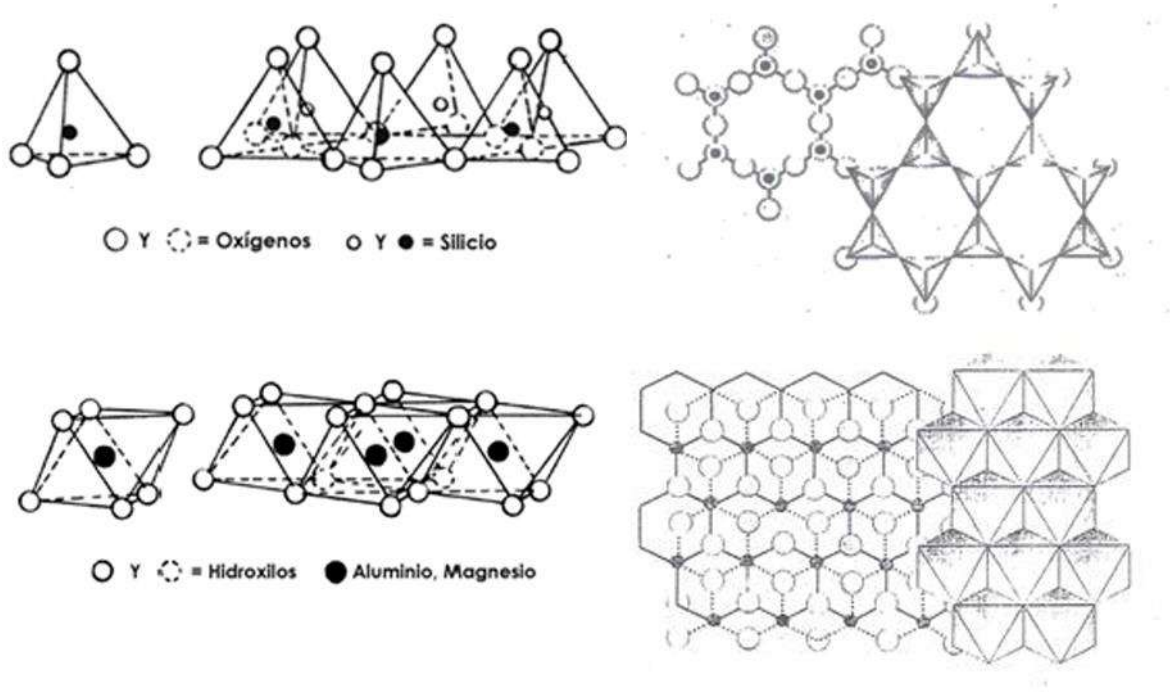


Figura 1.1. Estructura de a) capa tetraédrica (T) y b) octaédrica.

La unión entre una capa tetraédrica y una capa octaédrica se produce a través del oxígeno apical, el cual actúa como puente entre ambas. Esta unión es posible debido a que ambos tipos de capas presentan una simetría hexagonal análoga y dimensiones semejantes, lo que permite su acople estructural. A partir de esta combinación se forma la lámina, unidad estructural fundamental de los filosilicatos, que puede constituirse de dos maneras: por la unión de una capa tetraédrica con una capa octaédrica (lámina tipo T-O), o por la unión de una capa octaédrica ubicada entre dos capas tetraédricas (lámina tipo T-O-T). En el primer caso, los minerales se denominan estratificados 1:1, grupo que incluye a la caolinita, la dickita, la nacrita y la halloysita, entre otros (Figura 1.2); mientras que en el segundo caso se denominan estratificados 2:1, grupo que comprende a la illita, las esmectitas y la vermiculita (Figura 1.3).

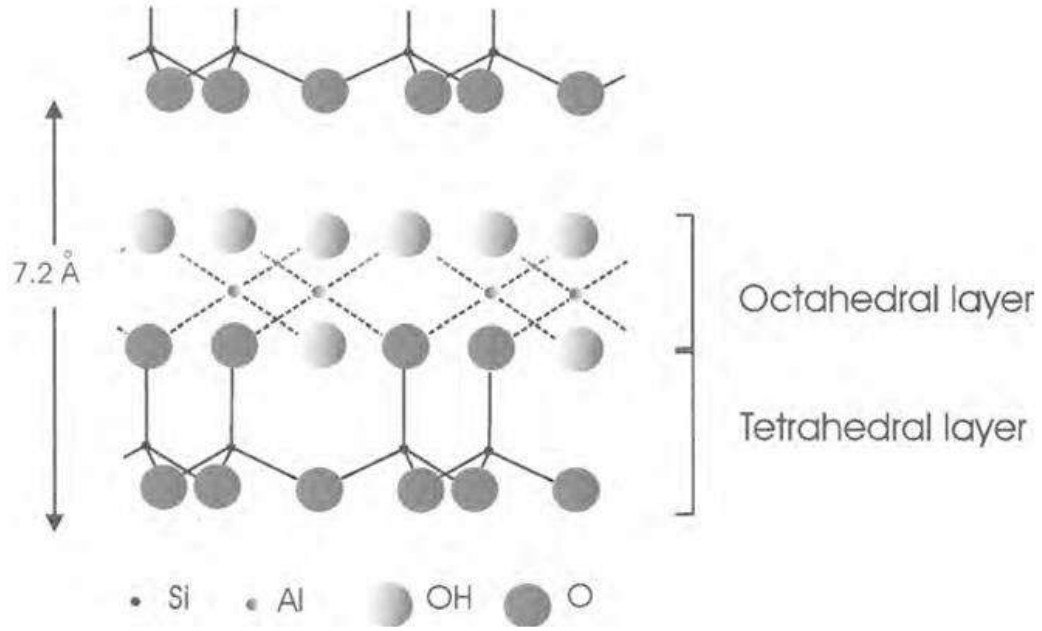


Figura 1.2. Estructura de capas de un mineral estratificado 1:1.

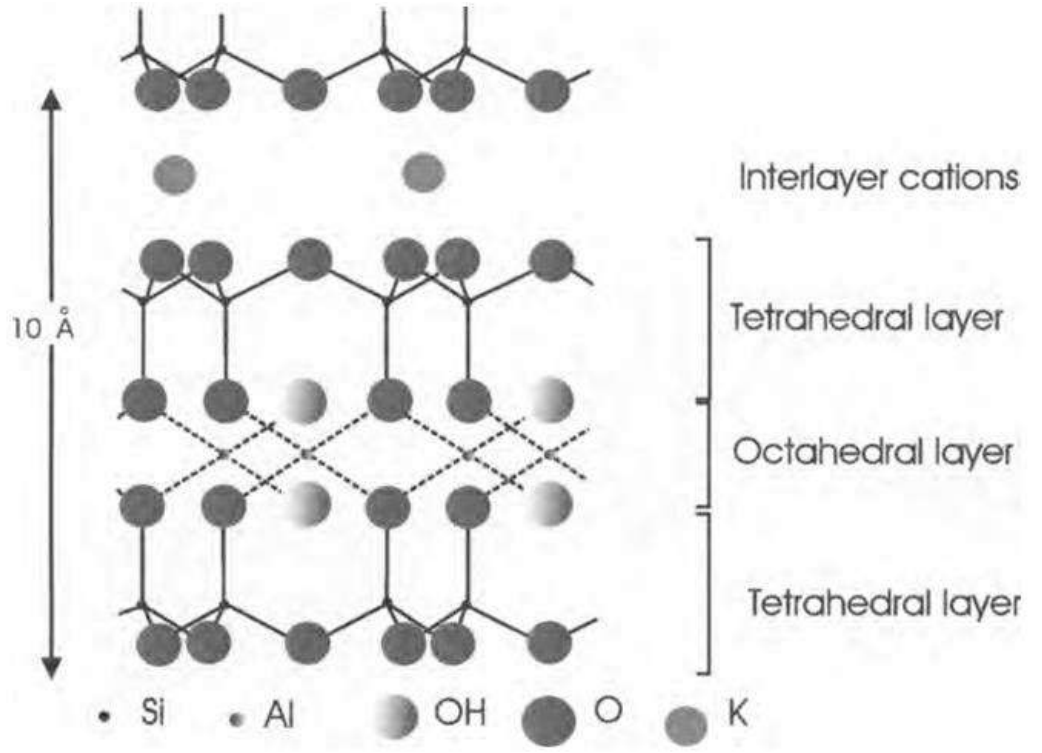


Figura 1.3. Estructura de capas de un mineral estratificado 2:1.

Las láminas (o estratos) se apilan sucesivamente dando lugar a la partícula del mineral arcilloso, cuya periodicidad se caracteriza mediante el espaciado basal (también denominado espaciado d), definido como la distancia entre un plano determinado de una lámina y el plano equivalente de la lámina siguiente. Este espaciado es característico de cada tipo de estructura: en los minerales estratificados 1:1 su valor es de aproximadamente 7 Å, mientras que en los minerales estratificados 2:1 es de aproximadamente 10 Å (en su forma colapsada, sin cationes ni agua interlaminar).

Las fuerzas que mantienen unidas a las láminas también difieren según el tipo de estructura. En los minerales estratificados 1:1, las láminas se encuentran unidas mediante enlaces de hidrógeno entre los grupos hidroxilo de la capa octaédrica y los átomos de oxígeno de la capa tetraédrica adyacente, lo que resulta en una unión relativamente fuerte. En los minerales estratificados 2:1, en cambio, las superficies expuestas de láminas adyacentes están constituidas únicamente por capas tetraédricas, que carecen de grupos hidroxilo capaces de formar puentes de hidrógeno; en este caso, la unión entre láminas se produce mediante fuerzas de Van der Waals, considerablemente más débiles, lo que explica la mayor facilidad de estos minerales para incorporar cationes y moléculas de agua en el espacio interlaminar.

En la estructura de los minerales arcillosos, es frecuente que se produzcan sustituciones isomórficas: el reemplazo de un catión de la red cristalina por otro de tamaño similar, pero de menor valencia, sin que se altere la disposición estructural del mineral. En la capa tetraédrica, el ejemplo más común es la sustitución de Si^{4+} por Al^{3+}; en la capa octaédrica, son frecuentes las sustituciones de Al^{3+} por Fe^{2+} o Mg^{2+}, y con menor frecuencia por otros cationes como Li^{+}, Cr^{3+}, Mn^{2+}, Ni^{2+}, Cu^{2+} o Zn^{2+}. Dado que en cada sustitución el catión entrante posee menor carga positiva que el catión original, este mecanismo genera un exceso de carga negativa neta en la superficie de las láminas, particularmente en el plano basal.

Esta carga negativa debe ser compensada por cationes positivos, cuyo mecanismo de fijación varía según el grupo mineralógico. En la illita, la compensación se realiza principalmente mediante iones K^{+}, que quedan fuertemente fijados en el espacio interlaminar debido a su tamaño, ajustado a los huecos hexagonales de las capas tetraédricas adyacentes; esta fijación impide la hidratación del catión y, en consecuencia, la expansión del mineral. En las esmectitas, en cambio, la compensación se realiza mediante cationes como Na^{+}, Ca^{2+} o Mg^{2+}, débilmente fijados y susceptibles de hidratarse e intercambiarse, lo que permite la incorporación de agua en el espacio interlaminar. En las cloritas, la compensación de carga ocurre mediante una lámina octaédrica interlaminar adicional, en lugar de cationes intercambiables. En la caolinita (estructura 1:1), la sustitución isomórfica es mínima, por lo que idealmente no existe carga neta significativa; no obstante, pueden producirse

sustituciones limitadas que generan una carga negativa muy pequeña, compensada por escasos cationes.

Los cationes compensatorios de carga que se hidratan lo hacen porque las moléculas de agua, de naturaleza polar, son atraídas hacia ellos y se disponen a su alrededor formando una esfera de solvatación, cuyo tamaño depende de la carga y el radio del catión. Cuando la energía de hidratación de estos cationes supera a la energía de atracción electrostática que los mantiene unidos a la lámina, el agua logra incorporarse al espacio interlaminar, separando progresivamente las láminas entre sí (fenómeno conocido como hinchamiento). Este fenómeno es particularmente marcado en las esmectitas, sobre todo cuando el catión interlaminar es Na^{+} (capaz de producir la disociación casi completa de los estratos individuales), y mucho más limitado cuando el catión es Ca^{2+} o Mg^{2+}, de menor energía de hidratación. En cambio, minerales como la illita y la caolinita, cuyos cationes interlaminares están fuertemente fijados o directamente ausentes, no experimentan hinchamiento y se clasifican como arcillas no expandibles.

La presencia de cationes intercambiables y de agua en el espacio interlaminar es, en definitiva, responsable de varias de las propiedades tecnológicas más relevantes de los minerales arcillosos, entre ellas la plasticidad, la capacidad de hinchamiento y la capacidad de intercambio catiónico.

Los filosilicatos presentan, además, un fenómeno estructural conocido como politipismo, un caso particular de polimorfismo que consiste en la existencia de distintas secuencias de apilamiento de láminas estructuralmente idénticas, sin que se modifique la composición química del mineral. Como resultado, un mismo mineral arcilloso puede presentar distintos politipos, identificables mediante técnicas como la difracción de rayos X. La identificación del politipo presente es relevante para el correcto ajuste de los modelos estructurales empleados en el análisis cuantitativo por el método de Rietveld, y además permite inferir condiciones de formación geológica del material (Reeves et al., 2006).

Entre los principales minerales arcillosos pueden mencionarse la caolinita, la illita y la montmorillonita. Sus características más relevantes se describen a continuación.

Caolinita

El grupo de la caolinita es uno de los más comunes dentro de los minerales arcillosos con estructura tipo 1:1. Está constituido principalmente por tres politipos: caolinita, dickita y nacrita, los cuales presentan la misma composición química teórica, $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$, (equivalente a $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) pero difieren en el modo de apilamiento de sus capas.

A diferencia de otros minerales arcillosos, el grupo de la caolinita presenta un bajo grado de sustitución isomórfica, por lo que la carga estructural negativa es mínima y no requiere una compensación significativa mediante cationes en el espacio interlaminar.

El espaciado basal es muy reducido (7,2 Å), lo que impide la incorporación de agua o de cationes entre estratos, en consecuencia, los cationes compensatorios de carga se adsorben únicamente en la superficie basal. Las fuerzas que mantienen unidos a los estratos son principalmente de naturaleza electrostática, con contribución de fuerzas de Van der Waals y de puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo de un estrato y los oxígenos del estrato contiguo.

Estas características estructurales explican que los minerales del grupo de la caolinita sean no expandibles, con una capacidad de intercambio catiónico muy baja (1–10 meq/100 g) y una plasticidad reducida en comparación con otras arcillas, como las esmectitas. Asimismo, esta misma rigidez cristalina le confiere una mayor estabilidad dimensional durante los procesos de secado y cocción, al minimizar la contracción volumétrica y prevenir grietas o deformaciones en el material.

Iliita

La illita es uno de los componentes más comunes dentro de los minerales arcillosos con estructura tipo 2:1 dioctaédrica. Representa un término general para designar micas de tamaño arcilla y su composición química teórica aproximada es $Al_2(Si_3AlO_{10})K(OH)_2$, caracterizada por una relación molar SiO_2/Al_2O_3 que varía entre 2 y 4 (siendo frecuentemente cercana a 3).

A diferencia de la caolinita, la illita presenta un elevado grado de sustitución isomórfica, localizada predominantemente en la lámina tetraédrica (Si^{4+} por Al^{3+}) y en menor medida en la octaédrica (Al^{3+} por Fe^{2+} o Mg^{2+}). Esto genera una importante carga estructural negativa (-0,7 a -1,0 por unidad fórmula) que es compensada por cationes de potasio alojados en el espacio interlaminar. Dado que la carga se origina principalmente en los tetraedros y el K^+ encaja en las cavidades hexagonales con un elevado número de coordinación, las fuerzas de atracción electrostática son muy intensas, reteniendo al potasio de forma fija e impidiendo la entrada de agua o moléculas orgánicas entre los estratos.

Estas características estructurales explican que la illita presente un espaciado basal fijo de aproximadamente 10 Å y sea un mineral no expandible. Además, posee una capacidad de intercambio catiónico reducida (20-40 meq/100 g), ya que el intercambio se limita a la superficie externa, y presenta una plasticidad menor que la de las esmectitas, aunque ligeramente superior a la de la caolinita.

Montmorillonita

La montmorillonita es el mineral más representativo del grupo de las esmectitas y constituye el componente principal de las bentonitas (arcillas de origen volcánico). Presenta una estructura del tipo 2:1 dioctaédrica que responde al modelo estructural de la pirofilita (filosilicato neutro de referencia), con una composición química ideal aproximada de $Al_2Si_4AlO_{10}(OH)_2$. n H_2O y una relación molar SiO_2/Al_2O_3 cercana a 4.

A diferencia de la illita, en la montmorillonita las sustituciones isomórficas tienen lugar predominantemente en la lámina octaédrica (sustitución parcial de Al^{3+} por cationes divalentes como Fe^{2+} o Mg^{2+}), con un menor reemplazo de Si^{4+} por Al^{3+} en los tetraedros. Esta configuración genera una carga negativa neta moderada (-0,33 a -0,6 por unidad fórmula) localizada a mayor distancia del espacio interlaminar. En consecuencia, las fuerzas de unión interlaminares (electrostáticas y de Van der Waals) son sumamente débiles, y los cationes compensatorios (Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}) quedan débilmente retenidos.

Estas características estructurales y el tamaño extremadamente reducido de sus partículas explican sus propiedades tecnológicas distintivas: es un mineral altamente expandible, cuyo espaciado basal es variable (desde ~9,6 Å en estado deshidratado hasta más de 18 Å o la exfoliación completa en medio acuoso). Presenta una elevada capacidad de intercambio catiónico (70-200 meq/100 g), la mayor plasticidad dentro de los minerales arcillosos considerados y la capacidad de formar geles altamente viscosos y estables en agua.

1.1.2. Materias primas no plásticas

Las materias primas no plásticas (también llamados *áridos*) tienen una influencia significativa sobre las propiedades fisicoquímicas del cuerpo cerámico en verde (pre-cocción) y durante el proceso de cocción. Actúan como carga, como reductores de la plasticidad (desgrasante) o de la contracción del cuerpo, principalmente, durante el secado. Otras materias primas se emplean para mejorar la sinterización o incrementar la formación de fase vítrea, y otras se emplean para incrementar la refractariedad. Los áridos cumplen las siguientes funciones:

- Limitar la contracción de la pasta en el secado y en la cocción.
- Disminuir el tiempo de secado y facilitar el acortamiento de los ciclos de cocción.

1.1.2.1. Cuarzo

El cuarzo es la forma cristalina más abundante de la sílice (SiO_2) en la naturaleza, desde el punto de vista mineralógico es la forma alotrópica estable a temperatura y presión estándar. Su estructura está constituida por una unidad tetraédrica, en la cual el centro está ocupado

por un átomo de Si y los vértices del mismo por átomos de oxígenos. La unión entre los distintos tetraedros, la cual da lugar a la estructura del compuesto, se realiza a través de los átomos de oxígeno, dando así origen a una estructura tridimensional compuesta. Existen otras formas de sílice menos comunes, como la tridimita, la cristobalita y la sílice amorfa, que incluye materiales como el ópalo y las diatomeas (restos de organismos marinos). En su forma más pura y transparente, el cuarzo se denomina cristal de roca.

Este mineral se encuentra tanto en depósitos puros como asociado a otros minerales, tales como feldespatos y micas. Además, puede aparecer como subproducto en procesos industriales, por ejemplo, durante el lavado de caolines. En la industria cerámica y del vidrio, el cuarzo se utiliza generalmente en forma molida y en distintos grados de pureza, dependiendo de la aplicación.

En la producción de ladrillos, la fracción arenosa rica en cuarzo cumple un rol fundamental como material desgrasante. Su presencia contribuye a disminuir la plasticidad de la pasta cerámica y a controlar la contracción durante las etapas de secado y cocción, reduciendo así la probabilidad de defectos como fisuras o deformaciones.

Desde el punto de vista térmico, el cuarzo presenta una transformación alotrópica relevante a aproximadamente 573 °C, correspondiente al pasaje de cuarzo α (baja temperatura) a cuarzo β (alta temperatura). Esta transformación es reversible y se produce con un cambio de volumen significativo, generando expansión durante el calentamiento y contracción durante el enfriamiento. Este fenómeno constituye uno de los principales aspectos a considerar en el control del proceso de cocción, debido a su impacto en la integridad estructural del material cerámico (Rivas y Conconi, 2024).

1.1.2.2. Feldespatos

La función de los feldespatos en el procesamiento cerámico es disminuir la temperatura de formación de fase líquida, favoreciendo su generación y, en consecuencia, el transporte de material durante la cocción.

Los feldespatos son minerales generados a partir de la cristalización del magma. Estos constituyen los minerales más abundantes de la corteza terrestre (aproximadamente un 60%). Su estructura está formada por una red de tetraedros de Si y Al, en la cual se producen sustituciones que generan cargas negativas, compensadas por cationes alcalinos y alcalinotérreos.

En la naturaleza, raramente se presentan como especies puras, por lo que su composición puede variar ampliamente. La presencia de álcalis en su estructura reduce significativamente su punto de fusión en comparación con la sílice y la alúmina puras, lo que les permite cumplir

eficazmente su rol como fundentes. Entre los feldespatos de mayor importancia, pueden citarse la ortoclasa ($K(AlSi_3O_8)$), la albita ($Na(AlSi_3O_8)$) y la anortita ($Ca(Al_2Si_2O_8)$). En particular, a alta temperatura, la albita y la anortita forman una serie continua de soluciones cristalinas conocidas como plagioclasas

1.1.2.3. Pirofilita

La pirofilita es un mineral de carácter refractario que, en presencia de impurezas alcalinas, puede presentar comportamiento fundente. Su composición química corresponde a $Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$ y presenta una elevada estabilidad química. Al igual que los minerales arcillosos, pertenece al grupo de los filosilicatos y corresponde a un silicato de aluminio hidratado. Su estructura es del tipo 2:1, formada por dos capas tetraédricas que rodean una capa octaédrica, conformando una secuencia T-O-T. La capa octaédrica es dioctaédrica debido a que el aluminio es el único catión presente en ella.

La pirofilita presenta un espaciado basal de aproximadamente 9,1 Å. La unión entre sus diferentes estratos se produce principalmente mediante fuerzas de Van der Waals. Aunque se trata de un mineral de baja dureza, la presencia de cuarzo como principal impureza puede conferirle un carácter abrasivo.

1.1.2.4. Componentes minoritarios

Además de los componentes mayoritarios antes mencionados, pueden aparecer componentes minoritarios tales como óxidos de hierro (hematita y magnetita), óxidos de titanio (rutilo y anatasa), carbonatos, sales solubles y materia orgánica. Estos, a pesar de encontrarse en baja proporción, pueden influir en el procesamiento cerámico.

Los óxidos de hierro afectan principalmente el color del ladrillo durante la cocción, otorgando el característico color rojizo. Por su parte, la materia orgánica es volatilizada en el proceso de cocción, provocando una pérdida de masa y contracción, lo que puede generar fisuras si no es controlado.

El principal aspecto a tener en cuenta en los componentes minoritarios es la presencia de especies que afectan al producto final, generando defectos. Las partículas gruesas de calcita ($CaCO_3$) o dolomita ($CaCO_3.MgCO_3$) pueden provocar defectos superficiales debido a su descomposición durante la cocción, alrededor de los 800 a 900 °C, formando CaO y CO_2. Cuando las partículas son pequeñas, la descomposición será completa y el óxido de calcio reaccionará con otros componentes para formar silicatos o silicoaluminatos de calcio. Sin embargo, cuando las partículas son grandes, puede quedar óxido de calcio libre, el cual reacciona con la humedad formando $Ca(OH)_2$, generando un defecto.

Otro componente perjudicial es la pirita (FeS_2), la cual se descompone durante la cocción entre los 400 y 500 °C, generando dióxido de azufre y produciendo una expansión que genera defectos en el ladrillo.

La presencia de partículas de carbono como residuo luego de la molienda puede generar defectos puntuales debido a su combustión durante la cocción, formando dióxido y monóxido de carbono. Cuando la difusión es baja, el carbono no reacciona completamente y permanece en el producto, generando un defecto conocido como "*black core*".

Si el porcentaje de sales solubles supera cierto nivel, puede producirse un defecto denominado eflorescencia. Estas concentraciones se atribuyen a la migración de soluciones salinas a través de la textura porosa del ladrillo, causando la acumulación de estas sales en zonas donde la evaporación del agua es más rápida. Esta acumulación conduce a la precipitación de sales solubles cuando la solución queda sobresaturada. Los defectos de fabricación atribuibles a la presencia de sales solubles pueden manifestarse como manchas amarillo-parduscas (SACMI, 2001).

1.1.3. Propiedades físicas de las materias primas

La aptitud de las materias primas para la formulación de pastas cerámicas está condicionada principalmente por sus características físicas a escala granular. En particular, la distribución del tamaño de partícula (que define el empaquetamiento y el área superficial expuesta) y la plasticidad (que determina la respuesta mecánica de la masa húmeda frente a los esfuerzos de deformación) constituyen los dos parámetros tecnológicos fundamentales para evaluar la trabajabilidad de los materiales y su idoneidad en las etapas previas al procesamiento térmico.

1.1.3.1. Distribución de tamaño de partícula y clasificación granulométrica

La distribución de tamaño de partícula de las materias primas, en general, varía en un amplio rango y constituye uno de los parámetros físicos de mayor relevancia, ya que condiciona el empaquetamiento granular, la superficie específica y la respuesta reológica de la pasta cerámica. Desde el punto de vista granulométrico, las materias primas se dividen en tres fracciones elementales según el diámetro equivalente de sus partículas: arena, limo y arcilla. La fracción de arena comprende las partículas de mayor tamaño, con diámetros que oscilan entre 50 µm y 2mm. La fracción de limo corresponde a una textura intermedia, con tamaños de partículas comprendidos entre 2 µm y 50 µm. Por último, la fracción granulométrica arcilla comprende todas aquellas partículas con diámetros inferiores a 2 µm.

Los componentes varían en proporción entre los distintos tipos de suelos, dando lugar a la clasificación como suelos arenosos, limosos, arcillosos y francos, tal como se presenta en el denominado diagrama de Winkler, que se muestra en la Figura 1.4

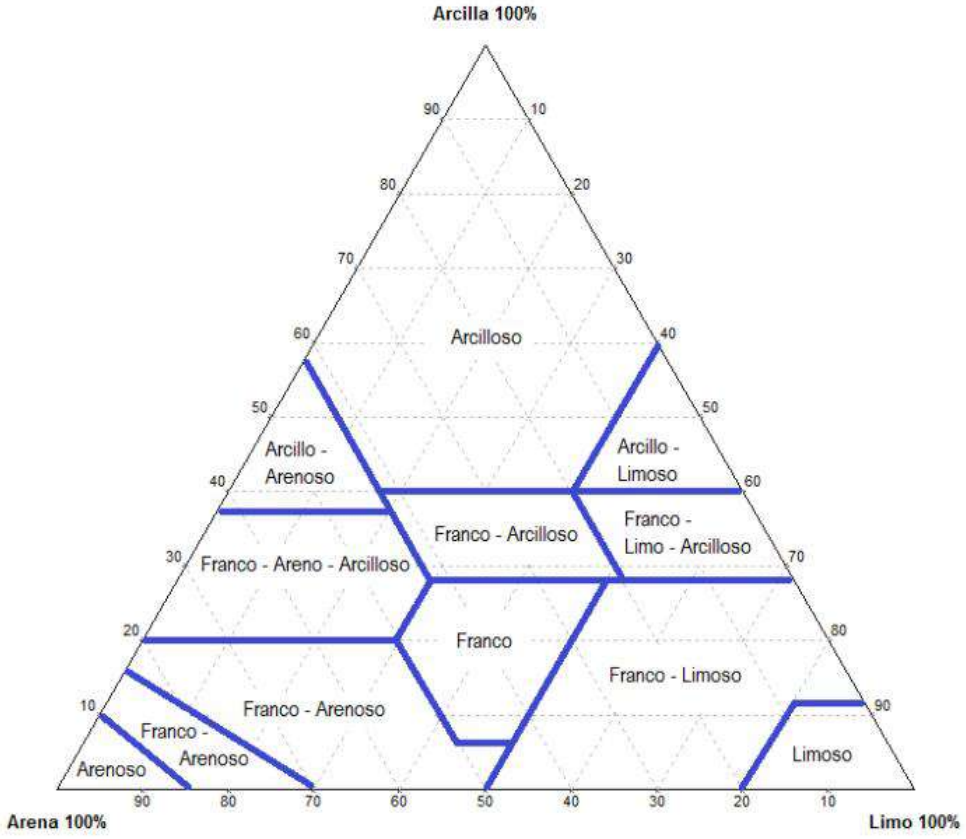


Figura 1.4. Diagrama textural de Winkler para determinar tipo de suelos.

1.1.3.2. Plasticidad

La plasticidad es una propiedad fundamental de los minerales arcillosos, ya que define los parámetros técnicos para transformar una pasta cerámica en una forma determinada bajo la aplicación de presión. Se define como la propiedad de un material que le permite ser deformado sin ruptura cuando actúa sobre él una fuerza suficiente, y que le permite conservar su nueva forma adquirida una vez que dicha fuerza es removida.

Una pasta cerámica de alta plasticidad requiere mayor esfuerzo para iniciar su deformación permanente y puede experimentar mayores deformaciones sin agrietarse, en comparación con una de baja plasticidad, que se deforma bajo un esfuerzo menor, pero se fractura con menor deformación.

La plasticidad está estrechamente relacionada con la morfología laminar de las partículas de los minerales arcillosos y con la presencia de agua, que actúa como agente lubricante entre ellas. Para que una mezcla de mineral arcilloso y agua se deforme plásticamente, debe producirse un flujo de partículas que, al cesar el esfuerzo aplicado, sea capaz de resistirse a seguir fluyendo para conservar la nueva forma. Esto es posible porque las partículas quedan rodeadas por una película de agua adsorbida, que facilita el deslizamiento de unas sobre otras sin permitir que se separen, gracias al balance entre fuerzas de repulsión electrostática (entre partículas de igual carga superficial) y fuerzas de atracción (Van der Waals y tensión superficial), estas últimas responsables de la cohesión de la pasta.

El espesor y la rigidez de esta película de agua y, en consecuencia, la plasticidad desarrollada, dependen de la densidad de carga superficial del mineral y de la naturaleza de los cationes adsorbidos. Los cationes de menor tamaño y mayor carga retienen el agua con mayor fuerza, generando películas más rígidas que reducen la plasticidad; por el contrario, cationes como el Na^{+} forman películas menos rígidas que favorecen el deslizamiento entre partículas y una mayor plasticidad. Esto explica, por ejemplo, que una montmorillonita sódica resulte más plástica que una montmorillonita cálcica, dado que el Ca^{2+} genera una película de agua más rígida en torno a las partículas.

En la Figura 1.5 se muestra la resistencia aparente al corte en función del contenido de agua para un mineral arcilloso típico. A medida que se agrega agua a una arcilla seca, aumenta el grado de cohesión, alcanzando un máximo cuando el agua ha desplazado el aire contenido en los poros. La cantidad mínima de agua necesaria para que la arcilla adquiera comportamiento plástico se denomina *límite plástico (LP)*.

Un cuerpo arcilloso plástico puede admitir la adición de cantidades considerables de agua, atravesando una etapa en la que permanece seco al tacto y es fácilmente moldeable. A medida que el contenido de agua aumenta, la resistencia a la fluencia disminuye progresivamente, y la arcilla se transforma en una pasta húmeda y pegajosa que ya no mantiene su forma. El contenido de agua correspondiente a este estado se denomina *límite líquido* (LL). Para contenidos de agua aún mayores, el sistema se comporta como una dispersión (Andrade et al., 2010).

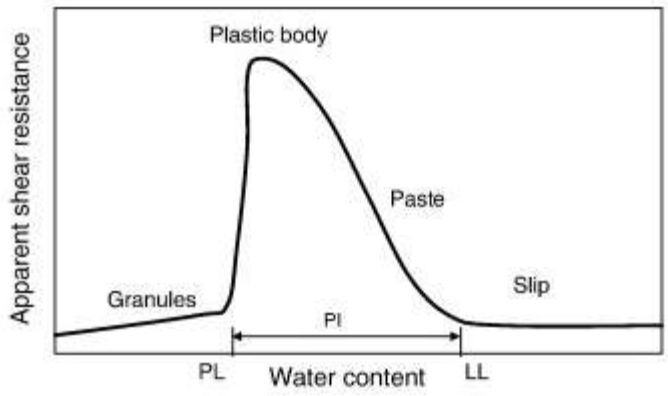


Figura 1.5. Resistencia aparente al corte vs contenido de agua.

La plasticidad depende de diversos factores, tales como la composición mineralógica, el tamaño de partícula, la distribución y tamaño de poros, y el grado de empaquetamiento. En términos mineralógicos, una montmorillonita presenta mayor plasticidad que una caolinita o illita, debido a su capacidad de incorporar agua en el espacio interlaminar.

Por otro lado, la granulometría también influye, una distribución de partículas más finas implica una mayor área superficial específica, lo que favorece la formación de películas líquidas alrededor de las partículas y aumenta la plasticidad. De manera similar, un mayor grado de empaquetamiento reduce el volumen de poros, requiriéndose menor cantidad de agua para llenar los espacios vacíos. En estas condiciones, el agua se distribuye principalmente sobre la superficie de las partículas, formando películas lubricantes. Por último, la presencia de materia orgánica también favorece la plasticidad ya que mejora la cohesión del sistema al retener agua y formar película líquida alrededor de las partículas.

Para cuantificar la plasticidad de un sistema se utiliza el *índice de Atterberg (IP)*, definido como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico. Cuanto mayor es este valor, mayor es la plasticidad de la arcilla y más adecuada resulta para procesos como la extrusión.

Para la clasificación de tipos de suelos en función de su plasticidad se utiliza el diagrama de Casagrande que se puede observar en la Figura 1.6 (Casagrande, 1948). En este diagrama se representa el índice de plasticidad en función del límite líquido, y resulta muy útil para medir la calidad de los suelos o arcillas.

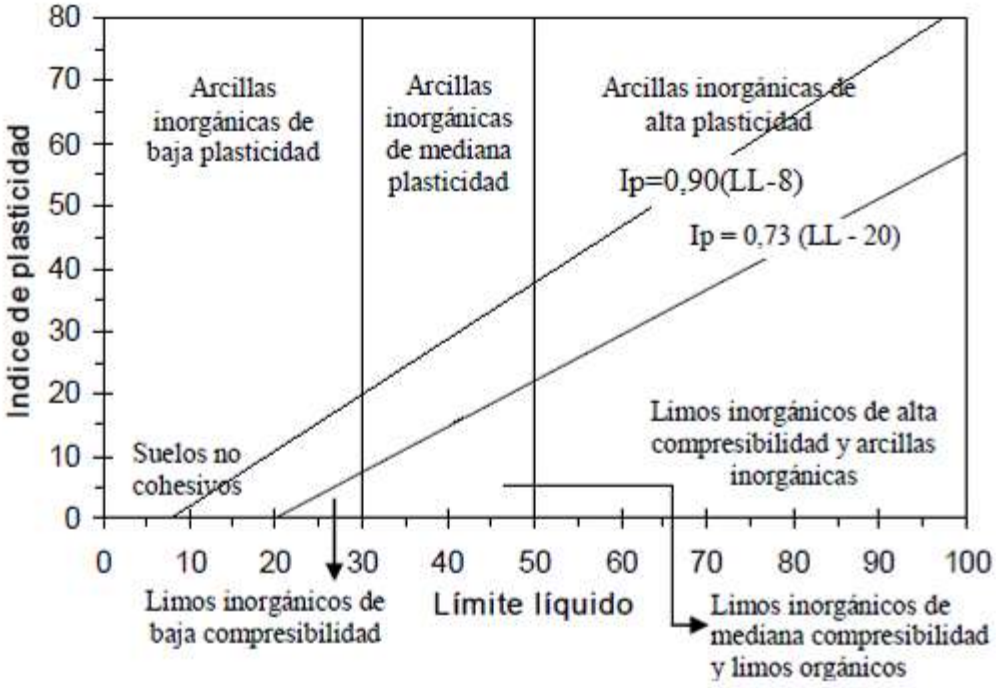


Figura 1.6. Diagrama de Casagrande.

Este diagrama posee una línea de importancia empírica, cuya ecuación es IP = 0,73 (LL - 20) que separa las materias primas puras (situadas por encima) de las materias primas no tan puras que pueden poseer algún tipo de coloide orgánico. Además, la recta vertical que pasa por el punto LL = 50 es una línea convencional que separa las arcillas de alta plasticidad, a la derecha, de las de media y baja plasticidad, a la izquierda. La recta de ecuación IP = 0,9 (LL - 8) es el límite superior experimental, ya que hasta ahora no se ha estudiado ninguna materia prima cuya representación se encuentre por encima de dicha línea.

Un elemento útil para la correcta caracterización de las arcillas y la evaluación de su aptitud para el procesamiento es el gráfico de comportamiento frente a la extrusión, desarrollado por Bain y Highley (Bain, 1971), el cual se presenta en la Figura 1.7. En este diagrama se establece si una extrusión será óptima, aceptable o difícil en función del límite plástico y del índice de Atterberg.

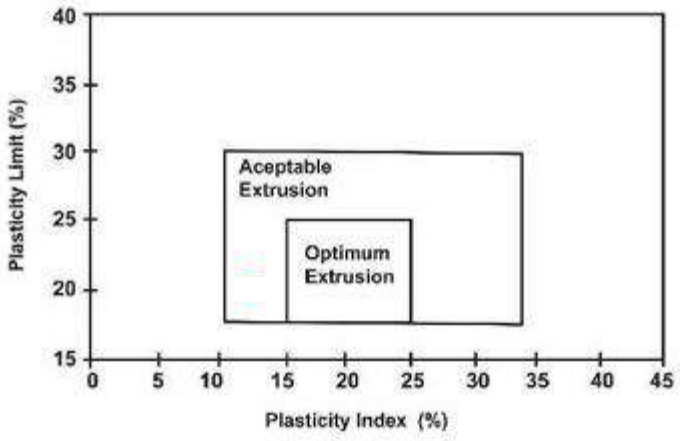


Figura 1.7. Diagrama de aptitud para la evaluación de una pasta cerámica frente al procesamiento por extrusión.

1.2. Producción de ladrillos

Los primeros materiales cerámicos fueron elaborados a partir de materias primas naturales. Las civilizaciones antiguas observaron que las arcillas minerales, al ser mezcladas con agua, adquirían plasticidad, lo que permitía su moldeo en diferentes formas. Estas piezas podían secarse al sol y posteriormente endurecerse mediante la acción del fuego.

El término *cerámico* proviene del vocablo griego *keramos*, que puede traducirse como "*material quemado*", haciendo referencia a la necesidad de un tratamiento térmico para el desarrollo de sus propiedades finales. Muchas de las materias primas empleadas en la antigüedad continúan utilizándose en la actualidad, formando parte de lo que se conoce como cerámicos tradicionales (Rocha Rangel, 2005).

Dentro de este grupo, el ladrillo constituye uno de los materiales más relevantes en la industria de la construcción. Su uso se remonta a etapas tempranas de la historia humana, inicialmente en forma de adobe (ladrillo no cocido). Posteriormente, civilizaciones como los sumerios y babilónicos incorporaron la cocción, lo que permitió mejorar significativamente sus propiedades mecánicas y ampliar sus aplicaciones.

En la actualidad, la fabricación de ladrillos mantiene los mismos principios básicos, aunque con avances en la caracterización de materias primas y en las técnicas de producción. Según su estructura interna, los ladrillos cerámicos se clasifican en *macizos* y *huecos*, según posean o no perforaciones que atraviesan total o parcialmente la pieza. El ladrillo hueco se define como aquel que presenta un porcentaje de huecos superior al 20 % de su volumen total (IRAM 12502, 2004), dispuestos habitualmente en forma de celdas paralelas, que pueden orientarse en sentido horizontal o vertical según su aplicación constructiva. Dentro de los ladrillos

huecos, y en función de su capacidad para soportar cargas estructurales, se distinguen los ladrillos huecos portantes de los ladrillos huecos no portantes (empleados en tabiques o cerramientos). Los ladrillos huecos portantes cerámicos deben cumplir, en Argentina, con la norma IRAM 12566-2, que exige una sección neta no menor al 40% del área bruta en cualquier plano paralelo a la superficie de asiento, un ancho mínimo de 120 mm. En el mercado local, estos bloques se comercializan en distintos espesores, siendo los más habituales los denominados "del 12" y "del 18" (12×19×33 cm y 18×19×33 cm, respectivamente), que corresponden al tipo de producto fabricado en la planta local sobre la cual se centra este trabajo.

Esta configuración estructural le confiere al ladrillo hueco ventajas tecnológicas y productivas respecto del ladrillo macizo, reduce el peso de la pieza y el volumen de material y energía requeridos para su cocción, mejora su capacidad de aislación térmica gracias a las cámaras de aire generadas por las perforaciones, y facilita su manipulación y colocación en obra. Por estas razones, es actualmente el tipo de ladrillo predominante en la construcción de viviendas en Argentina. En la Figura 1.8 se presenta un ejemplo de ladrillos huecos portantes de uso habitual en el mercado argentino.



Figura 1.8. Ladrillo hueco cerámico portante de uso comercial en Argentina.

El proceso de fabricación de este tipo de ladrillos comprende cuatro etapas principales: selección, extracción y acondicionamiento de las materias primas; conformado, generalmente por extrusión; secado y cocción. A continuación, se describe en detalle cada una de estas etapas.

1.2.1. Extracción y preparación de la materia prima

1.2.1.1. Extracción

La arcilla es obtenida de la cantera mediante excavación o, en algunos casos, mediante voladura con material explosivo. Dado que en la mayoría de los depósitos arcillosos la composición del estrato presenta variaciones, resulta necesario seleccionar cuidadosamente las porciones del mismo de las que se extraerá la materia prima.

Con el fin de mantener una mayor homogeneidad, es común trabajar en escalones horizontales, permitiendo la explotación de un mismo nivel estratigráfico. Para ello, se requiere contar con personal calificado y con información mineralógica y química de la cantera, evitando la mezcla de estratos deseados con otros indeseados que puedan contener impurezas.

El material arcilloso puede mezclarse con fracciones de suelo provenientes de campos cercanos a la cantera, con el objetivo de reducir los costos del proceso de producción. Para ello, se realiza la limpieza del terreno y la remoción del manto superficial hasta alcanzar la fracción utilizable.

Una vez extraída, la materia prima es transportada en camiones hasta la planta, donde se almacena en acopios al aire libre. Durante este período, el material se deja expuesto a las condiciones climáticas, en particular a las heladas, favoreciendo su ablandamiento y desmenuzamiento (Figura 1.9). Este proceso se conoce como *intemperismo* o *meteorización*, y tiene como objetivo la separación de las partículas, facilitando el desarrollo de la plasticidad y la obtención de una mezcla de composición más uniforme al momento de su posterior procesamiento con agua.

En general, las arcillas y tierras utilizadas no reciben tratamientos de beneficiado, tales como lavado o purificación, ya que se busca mantener bajos los costos de producción. (Searle,1911).



Figura 1.9. Acopio de materias primas en empresa ladrillera.

1.2.1.2. Reducción de granulometría

Las materias primas extraídas de la cantera son trasladadas hacia la planta de procesamiento mediante sistemas de cintas transportadoras (Figura 1.10). El acondicionamiento granulométrico de sólidos comprende un conjunto de operaciones orientadas a la reducción del tamaño de partícula, desde etapas de pretrituración gruesa hasta niveles de pulverización fina. Este proceso no solo busca disminuir el tamaño inicial del material, sino también obtener un diámetro medio de partícula y una distribución granulométrica adecuados para el producto final.

En general, la reducción de tamaño tiene como objetivo aumentar la superficie específica de los materiales, lo que favorece la homogeneidad de la mezcla y permite el desarrollo más eficiente de reacciones químicas en etapas posteriores. Además, contribuye a disminuir la porosidad entre partículas, favoreciendo un mayor empaquetamiento de la pasta y mejores condiciones para su conformado y posterior densificación durante la cocción.

Diversas propiedades de los materiales influyen en la eficacia de la molienda. Entre las más relevantes se encuentran las dimensiones de las partículas, tanto en términos de tamaño como de superficie externa. En el caso de las arcillas, estas suelen presentarse tras la extracción en forma de terrones subesféricos, con morfologías variables que pueden ser equidimensionales, alargadas o laminares.

La dureza constituye otro parámetro fundamental, ya que condiciona la resistencia del material al impacto y a la abrasión durante el proceso de molienda. Además, la estructura del material ya sea compacta o con planos de fractura definidos, influye en su comportamiento frente a la reducción de tamaño.

El peso específico no resulta determinante en materiales homogéneos, pero adquiere importancia en mezclas de distinta composición mineralógica, donde pueden producirse fenómenos de segregación. Por otro lado, la humedad y la higroscopicidad afectan significativamente la eficiencia del proceso, ya que un aumento del contenido de agua reduce la capacidad productiva de los equipos de molienda.

Las acciones que pueden desarrollar las máquinas durante la molienda incluyen la compresión, el impacto, la abrasión y el corte. La compresión proporciona pocos finos a partir de sólidos gruesos, frágiles y muy duros. El impacto, producido por el choque del material contra partes de la máquina, permite obtener polvos gruesos, medios o finos. La abrasión genera productos muy finos a partir de materiales blandos no abrasivos. Finalmente, el corte permite obtener polvos de tamaño definido, con escasa o nula generación de finos.



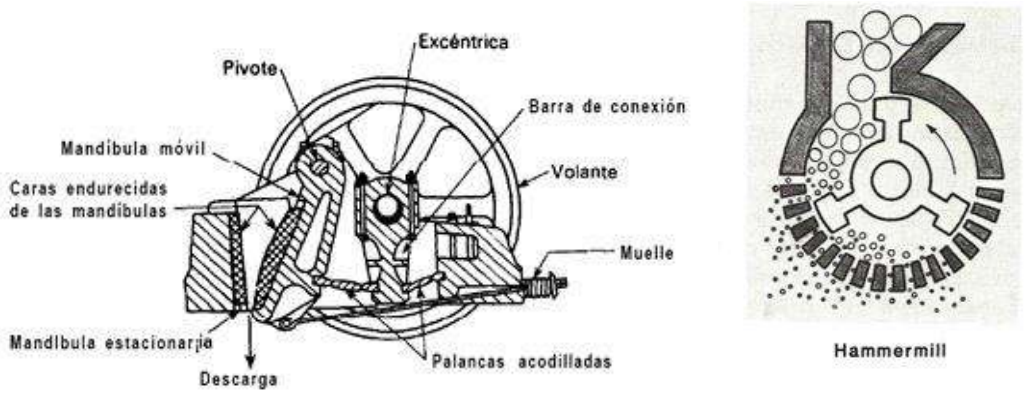
Figura 1.10. Cinta transportadora que envía la materia prima hacia molino en la empresa ladrillera.

El proceso de reducción granulométrica puede dividirse en dos etapas principales: la trituración y la molienda. La trituración abarca desde la reducción de bloques gruesos provenientes de la cantera hasta tamaños del orden de algunos milímetros. Dentro de esta etapa, se distingue una trituración primaria o pretrituración, en la que los bloques iniciales se reducen hasta aproximadamente 100 mm, y una trituración secundaria, que permite obtener gránulos de alrededor de 10 mm.

Por otro lado, la molienda comprende la reducción del tamaño de partícula hasta escalas mucho más finas, alcanzando dimensiones micrométricas. En esta etapa puede diferenciarse una molienda primaria, que reduce el tamaño hasta aproximadamente 0,5 mm, una molienda fina o secundaria, que produce partículas del orden de decenas de micrómetros, y finalmente una etapa de micronización, en la cual se alcanzan tamaños del orden de pocas micras.

En particular, la fábrica productora de ladrillos local cuenta con una trituradora de mandíbulas para la etapa de trituración y un molino de martillos para la molienda. La trituradora recibe la materia prima directamente desde el acopio, en forma de terrones de aproximadamente 25 cm, los cuales son reducidos de tamaño mediante la compresión ejercida por la mandíbula móvil contra la mandíbula fija. Su funcionamiento se basa en un sistema de poleas que transmite el movimiento a un volante rotatorio, el cual genera el movimiento de la mandíbula móvil frente a una mandíbula fija, produciendo la compresión del material. La descarga del material es intermitente y se produce por gravedad una vez que las partículas alcanzan un tamaño suficientemente pequeño. Para que ocurra la fragmentación, la fuerza de fricción entre el material y las superficies de la trituradora debe ser mayor que las fuerzas que tienden a expulsar la partícula.

El molino de martillos reduce el tamaño del material proveniente de la trituradora hasta obtener un polvo. Se trata de un equipo que produce un material de granulometría intermedia a fina, con tamaños de partícula comprendidos aproximadamente entre 0,42 mm y 74 µm. El molino consta de un rotor que gira a alta velocidad en el interior de una carcasa cilíndrica, al cual se encuentran acoplados una serie de martillos móviles. Las partículas se fragmentan al ser proyectadas contra placas estacionarias y se pulverizan por la acción repetida de los impactos de los martillos. En la Figura 1.11 se presenta un esquema del funcionamiento de la trituradora de mandíbulas y del molino de martillos.



(a) (b)

Figura 1.11. (a) Trituradora de mandíbulas y (b) molino de martillos.

1.2.2. Conformado por extrusión

La extrusión es un método de conformado de productos cerámicos que consiste en forzar un material plástico cohesivo a pasar a través de un orificio de una matriz rígida mediante la aplicación de presión. A la salida de la extrusora se obtiene un producto de sección transversal constante, que es cortado con la longitud deseada.

La consistencia plástica de la pasta se consigue a partir del sistema arcilla–agua, o también mediante el uso de un aglutinante polimérico. En el caso de la empresa local, no se utilizan aditivos en el proceso de extrusión.

Para que el proceso de extrusión sea exitoso, es necesario cumplir con una serie de requisitos fundamentales: (i) la mezcla debe poseer la plasticidad suficiente para poder fluir adecuadamente cuando se le aplica presión, (ii) La pieza conformada debe tener la resistencia mecánica necesaria para soportar su propio peso y las manipulaciones posteriores sin deformarse, (iii) la mezcla no debe adherirse o pegarse a las superficies del molde o la matriz, (iv) debe evitarse la migración del líquido dentro de la pasta durante el

proceso, (v) la porosidad de la pasta sometida a presión debe ser reproducible y constante entre lotes y (vi) por último, los aditivos orgánicos utilizados no deben dejar residuos indeseados después de la etapa de cocción.

Existen dos tipos de extrusoras de cerámicos. La primera es la extrusora de pistón, de diseño simple, consistente en un cilindro, un pistón y una matriz. La segunda, más compleja, es la extrusora tipo *auger*, la cual se utiliza en la producción de piezas de cerámica roja, como ladrillos o tejas, así como en cerámica blanca y refractarios.

La extrusora tipo auger se divide en tres secciones y opera de manera continua. La primera es el amasador (*pug mill*), un tornillo sin fin con paletas interrumpidas, donde ocurre la mayor dispersión y mezclado, proporcionando homogeneidad a la mezcla y comprimiéndola mediante la eliminación de aire. Este empuja la mezcla hacia la cámara de desaireado, donde se remueve la mayor cantidad de aire posible; este proceso implica el amasado de una pasta bajo presión reducida para aumentar la plasticidad mediante la eliminación de burbujas. En algunas extrusoras, este proceso es asistido por una cámara de vacío. Finalmente, el material pasa a la cámara de compactación, donde el movimiento del tornillo precompacta la mezcla para remover el mayor volumen de espacios posible antes de extruirla a través del molde. En la Figura 1.12 se presenta un esquema de las tres secciones descriptas.

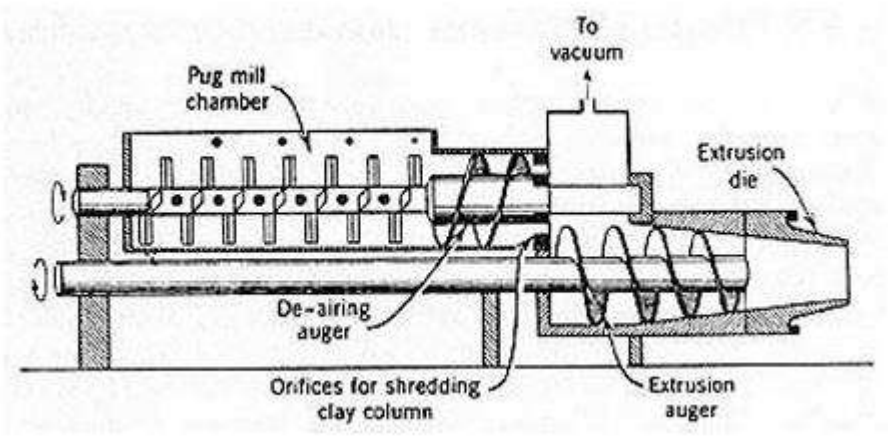


Figura 1.12. Sección transversal de una extrusora tipo *auger*.

En la Figura 1.13 se muestra la sección transversal de la cámara de compactación de una extrusora a pistón y una tipo *auger*. En esta última pueden reconocerse varias etapas del proceso: (1) alimentación del material, (2) consolidación y flujo del material en el cilindro, (3) flujo a través de una boquilla cónica u orificio, (4) flujo a través del canal de la matriz de sección transversal constante o casi constante, y (5) eyección.

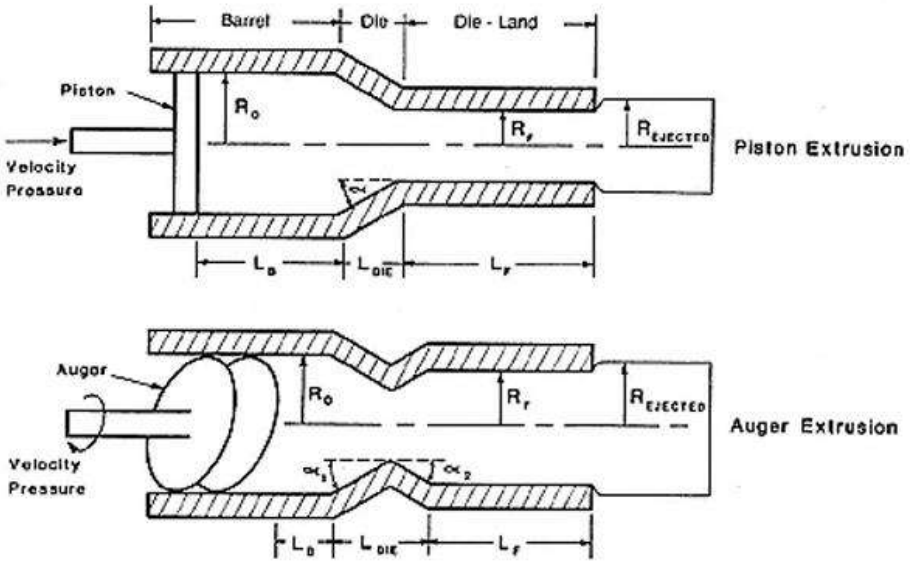


Figura 1.13. Esquema comparativo de la extrusión por pistón y tipo *auger*.

En la extrusión es fundamental que el material no resbale sobre la pared del cilindro; por ello, la adherencia de la pasta a la pared y la relación entre el área de la pared y el área del tornillo deben ser lo suficientemente altas. Para facilitar el deslizamiento del material, los tornillos deben estar muy bien pulidos.

Si se necesita generar mayor presión de extrusión, se pueden emplear tornillos más grandes o de forma cónica. La cantidad de paletas del tornillo determina cuántas columnas de alimentación se desplazan. Un ángulo de hélice mayor permite una mayor velocidad de alimentación, pero reduce la fuerza de compresión sobre el material; por esta razón, el ángulo de hélice más común es de aproximadamente 20 a 25°.

Por último, la relación entre el diámetro del tornillo y el diámetro del producto final debe ser mayor cuando el material presenta alta resistencia a la fluencia y cuando el área de fricción del canal de la matriz es grande. En la Figura 1.14 se presenta la extrusora empleada en la planta local, junto con los distintos cabezales utilizados para la conformación de los productos.



Figura 1.14. Extrusora y sus cabezales en empresa ladrillera.

Durante el conformado por extrusión pueden generarse diversos defectos, vinculados tanto al comportamiento reológico de la pasta como a las condiciones de operación del equipo. Al ser eyectada de la extrusora, la pieza experimenta una pequeña expansión debida a la recuperación elástica del material, fenómeno conocido como *springback*.

Uno de los defectos más relevantes es la resistencia y rigidez insuficientes del extruido: la resistencia cohesiva de la pieza debe ser suficientemente elevada para evitar deformaciones durante su manipulación y conservar la forma adquirida, lo cual puede mejorarse aumentando el contenido de aglutinantes de alto peso molecular y de partículas coloidales.

Las fisuras y laminaciones constituyen otro grupo de defectos frecuentes y pueden originarse por distintas causas. Las inhomogeneidades en la pasta generan defectos como la grieta de "pata de pájaro", producida por inclusiones duras (aglomerados mal humedecidos, partículas extrañas o desgaste del equipo) que presentan una menor contracción durante el secado que el material circundante; este tipo de defectos pueden prevenirse mediante con un mezclado más eficiente. La migración del líquido dentro de la pasta debido a la baja permeabilidad también puede ser fuente de contracciones diferenciales y ocasionar este tipo de defectos. Además, la orientación preferencial de partículas anisométricas, es decir. de forma no equidimensional, genera anisotropía durante el flujo, lo que puede provocar defectos por contracción diferencial o *springback* no uniforme; este efecto puede reducirse disminuyendo la velocidad de flujo. Por otra parte, una lubricación insuficiente genera mayor fricción contra las paredes del equipo, produciendo mayores tensiones en los bordes de la pieza que en su centro. Este gradiente de deformación elástica puede provocar desgarros durante el *springback*.

Otro defecto característico es la formación de cráteres y ampollas superficiales, causadas por el aire atrapado puede disolverse en el agua bajo presión y que, al producirse la descompresión durante la eyección, migra hacia la superficie y forma poros visibles. Para

evitar este tipo de defectos la extrusora debe encontrarse correctamente sellada. De manera relacionada, pueden producirse laminaciones superficiales periódicas por efecto de una fricción intermitente combinada con una elevada recuperación elástica, que generan grietas perpendiculares a la dirección de flujo; este defecto suele asociarse a una lubricación deficiente y a presiones de extrusión elevadas, y puede corregirse mejorando la lubricación, aumentando el contenido de líquido o ajustando las condiciones de operación.

La curvatura del extruido es otro defecto posible, originado por una distribución no uniforme de la presión; para evitarlo, es necesario centrar correctamente la matriz respecto del tornillo y, en el caso de matrices no simétricas, considerar el efecto de la fricción durante su diseño, mientras que en piezas huecas debe equilibrarse además la fricción interna. Además, pueden formarse laminaciones por falta de unión de las corrientes de flujo, que generan interfaces débiles con forma de S cuando distintas corrientes de material no logran unirse adecuadamente debido a presiones insuficientes.

Los defectos superficiales, como una textura rugosa, suelen deberse a una película de deslizamiento insuficiente entre la pasta y la matriz, y pueden corregirse mejorando la dispersión de las partículas finas, aumentando el contenido de líquido o lubricante, y puliendo la superficie de la matriz.

Se pueden ocasionar gradientes de rigidez: la migración del líquido durante la extrusión puede generar variaciones en la rigidez del extruido. Este fenómeno, denominado “sangrado”, puede minimizarse reduciendo la permeabilidad y asegurando la homogeneidad de la mezcla. Finalmente, durante la etapa de corte pueden producirse desgarros los cuales se deben principalmente a la fricción durante el corte; este defecto puede reducirse empleando herramientas lubricadas, realizando cortes rápidos y asegurando una adecuada cohesión del material (Reed, 1995)

1.2.3. Secado

El secado consiste en eliminar el agua contenida en la pieza sólida por evaporación, es decir, en la conversión del agua en estado líquido a estado vapor. Un líquido tiene mayor o menor tendencia a pasar a estado gaseoso dependiendo de sus características fisicoquímicas. En él, simultáneamente se evaporan moléculas de agua por efecto de su energía cinética y se condensan moléculas de vapor sobre su superficie. La evaporación es favorecida por el aumento de la temperatura, mientras que la condensación depende de la cantidad de moléculas gaseosas presentes en el ambiente y de su velocidad, es decir, de la presión.

Ambos procesos alcanzan un equilibrio a una presión de saturación, en la cual la cantidad de partículas que evaporan es igual a la que condensa. Esta presión aumenta con la temperatura

y, cuando alcanza la presión atmosférica, se produce la ebullición, donde el vapor se genera no solo en la superficie, sino también en el interior del líquido en forma de burbujas.

Por lo tanto, el secado implica simultáneamente la transferencia de calor desde el aire hacia el cuerpo por conducción, convección y radiación, y la transferencia de vapor de agua en sentido opuesto. En este proceso se desarrollan al mismo tiempo la transferencia de calor del aire a la pieza, la transformación del agua de líquido a vapor, la separación del vapor desde la superficie de la pieza y el transporte de agua en estado líquido desde el interior hacia la superficie (difusión).

Cuando la difusión de agua en el interior de la pieza es más lenta que la evaporación, el frente de evaporación se desplaza hacia el interior. Esto ocurre generalmente al inicio del secado, ya que la pieza ingresa con baja temperatura; por esta razón, los secaderos operan con aire relativamente húmedo en esta etapa. La calidad del secado se mantiene cuando ambos procesos (difusión y evaporación) presentan una cinética tal que la cantidad de agua evaporada en una unidad de tiempo es reemplazada por igual cantidad proveniente del interior.

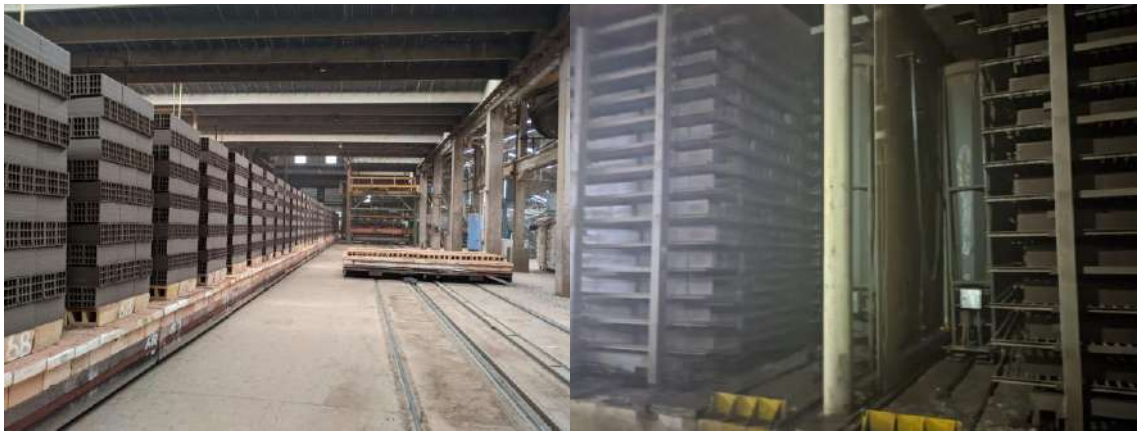
En materiales cerámicos, la evaporación del agua presenta una dificultad adicional, ya que el líquido no se encuentra libre, sino íntimamente ligado a las partículas sólidas de arcilla, que lo retienen. Puede considerarse que el agua forma una red capilar alrededor de las partículas, por lo que el problema del secado consiste en transportar el agua desde el interior hacia la superficie a través de estos capilares, donde puede evaporarse. Para ello, deben considerarse las variables que influyen en la velocidad de difusión y evaporación.

La velocidad de difusión del agua desde el interior hacia la superficie depende de diversos factores. Entre ellos, las características mineralógicas del material, que influyen en la orientación de las moléculas de agua y su movilidad; el tamaño y la forma de las partículas, que determinan la geometría de los capilares; y el contenido de agua de la pieza. A medida que el contenido de agua disminuye, las partículas se aproximan entre sí (contracción), reduciendo el tamaño de los poros capilares e incrementando la resistencia al flujo. También influyen la temperatura de la pieza y la velocidad de contracción, ambas relacionadas con la velocidad de evaporación. En conjunto, estos factores determinan si la difusión puede abastecer la superficie al mismo ritmo que ocurre la evaporación.

Por otro lado, la velocidad de evaporación del agua desde la superficie depende de factores externos. La temperatura del aire influye en su capacidad de retener vapor; la velocidad del aire favorece la renovación de la capa límite saturada; y la humedad relativa determina la capacidad del aire para absorber agua. Por otra parte, el área de la superficie expuesta y su orientación respecto al flujo de aire afectan la eficiencia del proceso. Finalmente, si la difusión interna no compensa la evaporación superficial, se produce un secado desigual que puede generar tensiones, formación de costras y grietas (SACMI, *2001).*

Los secaderos se distinguen según el tipo de operación, que puede ser discontinua (proceso *batch*) o continua, y según el tipo de contacto con la fuente calefactora. En función del tipo de contacto con la fuente de calor, pueden clasificarse en: secaderos de contacto directo, donde el gas caliente (vapor) suministra calor por convección al ladrillo y secaderos de contacto indirecto, donde el calor se transmite de forma independiente del gas que arrastra la humedad evaporada. En este caso, el calentamiento puede producirse mediante placas metálicas (conducción), exposición a una fuente térmica, radiación infrarroja o calentamiento dieléctrico. Dentro de los secaderos discontinuos se encuentra el secadero de bandejas, en el cual los ladrillos se colocan sobre plataformas para su secado. En este tipo de secadero, la fuente de calor puede ser directa o indirecta mediante bandejas calefaccionadas que transmiten el calor por conducción.

La planta de ladrillos local cuenta con un secador tipo túnel, el cual es de operación continua y de contacto directo, en el cual los ladrillos se transportan en gavias que se ponen en contacto con una corriente de gas caliente a lo largo del secadero, como se observa en la Figura 1.15. Este tipo de secadero permite reducir el costo de secado en grandes volúmenes de producción y aumentar la capacidad productiva.



(a) (b)

Figura 1.15. (a) Ladrillos secos en gavias y (b) secadero.

1.2.4. Cocción

El tratamiento térmico de las piezas obtenidas luego del secado se denomina, habitualmente en el campo industrial, *cocción*. El proceso consiste en el calentamiento de la pieza seca durante un tiempo establecido, lo cual aporta energía y permite diversas transformaciones fisicoquímicas. Durante este tratamiento se producen modificaciones significativas en la estructura y las propiedades del material, dando lugar al producto cerámico final. Los principales procesos fisicoquímicos que ocurren durante la cocción (muchos de ellos

impulsados por el transporte de materia por difusión) son: reacciones químicas, transformaciones de fase, eliminación de gases (tales como aire, vapor de agua y CO_2), formación de fase vítrea, crecimiento de grano y sinterizado de las partículas, este último asociado a la formación de cuellos sólidos entre partículas y a la eliminación de porosidad intersticial. Estas transformaciones le confieren a la pieza final las propiedades requeridas para su comercialización, tales como resistencia mecánica, estabilidad dimensional, color y porosidad.

Para obtener dichas propiedades es fundamental el conocimiento de las distintas transformaciones y productos obtenidos, así como el mantenimiento de los parámetros operativos para que estas se den de forma homogénea en toda la pieza.

Entre las transformaciones físicas que se producen durante el calentamiento se encuentran la dilatación térmica de las fases cristalinas y la fusión de los fundentes. En los materiales cerámicos, la presencia de distintos óxidos permite la fusión de mezclas eutécticas, lo cual conduce a la obtención de fase líquida a temperaturas considerablemente menores que las necesarias para fundir los materiales individuales. Dicha fusión es fundamental para el procesamiento cerámico de los ladrillos, ya que permite la sinterización, la cual consiste en la consolidación de un material pulverulento sin alcanzar la temperatura necesaria para su fusión total. En la cerámica roja, la sinterización se produce por liga vítrea: a mayor temperatura, mayor es la cantidad de fase vítrea que une a los granos cristalinos. Esta fase vítrea surge del enfriamiento de la fase líquida generada durante la cocción, ya que algunos de sus componentes no alcanzan a cristalizar completamente. Además, la fase vítrea genera una disminución de la porosidad y del tamaño de los poros, así como la interrupción de sus interconexiones, debido a la infiltración del líquido en las cavidades del material por difusión.

Otro fenómeno físico a tener en cuenta es la transformación *alotrópica* del cuarzo de α a β alrededor de los 573 °C, la cual produce una expansión. Esta transformación es reversible, por lo que durante el enfriamiento se producirá una contracción.

En la cocción se pueden identificar distintas zonas térmicas críticas asociadas a procesos de origen químico. Hasta aproximadamente a los 100 °C, ocurre la evaporación del agua superficial remanente del secado, mientras que, hasta aproximadamente los 200 °C, se elimina el agua zeolítica (moléculas de agua ligadas por adsorción a estructuras cristalinas). Entre los 350 y 650 °C, se produce la descomposición de la materia orgánica, en la cual los compuestos basados en carbono se volatilizan generando CO_2 y CO. Entre los 450 y 650 °C tiene lugar la deshidroxilación de los minerales arcillosos, donde se elimina el agua constitucional y se destruye el retículo cristalino, en el caso de la caolinita, al producirse la deshidroxilación se transforma en metacaolinita (Wang et al., 2022). Entre 800 °C y 950 °C ocurre la descarbonatación de la caliza y la dolomita, con liberación de CO_2.

A 950–1000 °C, los granos de feldespato reaccionan con la sílice amorfa y las fases derivadas de los minerales arcillosos para formar una fase vítrea. A estas temperaturas, la metacaolinita e illita se transforman en una fase intermedia de tipo espinela, mientras que los granos más finos de cuarzo comienzan a disolverse en la fase vítrea (Moongom Obam et al., 2026; Wang et al., 2022). La presencia de componentes alcalinos y alcalinotérreos favorece la formación de la fase líquida a temperaturas más bajas y mejora el transporte de materia durante la cocción, promoviendo los procesos de sinterización y densificación (SACMI, 2001). Como resultado, el cuerpo cerámico cocido desarrolla una microestructura constituida por partículas cristalinas residuales, como cuarzo y feldespatos, inmersas en una matriz parcialmente vitrificada. El grado de vitrificación y la porosidad resultante dependen de la composición de las materias primas y de las condiciones de cocción.

En la empresa marplatense, los ladrillos que salen del secadero se colocan en vagonetas que recorren un horno continuo de tipo túnel. Entre la entrada y la salida, las piezas están sometidas a distintas etapas de cocción, entre las que se distinguen el pre-horno, el precalentamiento, la cocción, el enfriamiento rápido, el enfriamiento lento y el enfriamiento final. En todas estas etapas se controla rigurosamente la temperatura para garantizar un ciclo térmico y un gradiente de temperaturas que asegure el control de las diversas transformaciones en las materias primas y su homogeneidad en la totalidad de los ladrillos.

En la etapa de pre-horno se produce la eliminación del agua higroscópica residual del secadero y se inicia la eliminación del agua zeolítica en las arcillas. En la mayoría de los hornos, esta etapa no tiene sistema de calentamiento autónomo, sino que el calor proviene de vapores y gases de otras etapas. El intervalo de temperatura va desde la temperatura ambiente hasta aproximadamente 200–500 °C. El precalentamiento se ubica inmediatamente después del prehorno y se extiende hasta la aparición de la primera fase líquida. Su objetivo principal es la eliminación de gases para prevenir la formación de burbujas, hinchamientos o fisuras en la pieza cerámica durante la cocción. Para mitigar estos defectos, es fundamental definir el gradiente de temperatura y los intervalos térmicos en función de la composición de las materias primas, ya que la proporción y el tipo de mineral arcilloso determinan la liberación de vapor de agua durante la deshidroxilación, mientras que la combustión y volatilización de la materia orgánica generan emisiones de dióxido de carbon que deben evacuarse de manera controlada. Otra función de esta etapa es acompañar la transformación alotrópica del cuarzo de alfa a beta, para evitar que esta genere roturas en la pieza por exceso de elongación.

La cocción es la etapa en la que el ladrillo se mantiene a las máximas temperaturas. Las paredes del horno en esta zona son de ladrillo refractario aislante, con características que permiten mantener el aislamiento térmico y asegurar la homogeneidad de temperaturas en todos los ladrillos y a lo largo de su geometría. En esta etapa el ladrillo adquiere sus propiedades finales, por lo que el control de la temperatura es crítico. En esta etapa, los

compuestos fundidos difunden hacia las cavidades del material, lo que produce la densificación de la pieza. A su vez, se generan modificaciones en la estructura porosa: los poros conectados con la superficie (porosidad abierta) tienden a perder sus interconexiones, disminuyendo la permeabilidad del material. Como consecuencia, se incrementa la proporción de porosidad cerrada, es decir, poros que no se encuentran conectados a la superficie y a los cuales no puede penetrar el agua.

La etapa de enfriamiento rápido es fundamental en el procesamiento. El intervalo de temperaturas va desde la temperatura máxima hasta aproximadamente 600 °C, previo a la transformación alotrópica. El gradiente térmico en esta etapa es elevado para evitar que los compuestos fundidos cristalicen y se mantengan como material vítreo, garantizando la liga entre partículas cristalinas. Este enfriamiento es asistido mediante sopladores de aire dentro del horno.

El enfriamiento lento se realiza con el objetivo de que la disminución volumétrica asociada a la transformación del cuarzo no produzca la rotura de la pieza ya rígida. Esta etapa está comprendida entre aproximadamente 600 y 450 °C.

Finalmente, el enfriamiento final tiene como fin reducir al máximo el calor latente del producto posterior a la transformación del cuarzo (SACMI, *2001*).



(a) (b)

Figura 1.16. (a) Salida del horno de los ladrillos y (b) acopio.

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Recepción de las muestras

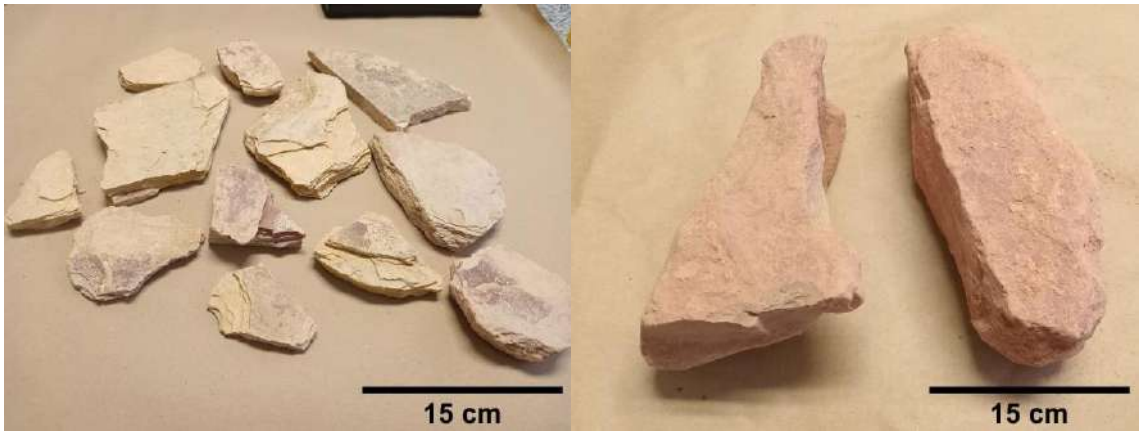
En el presente trabajo se analizaron cuatro tipos de arcillas y cuatro tipos de ladrillos. Las arcillas se denominaron arcilla Ocre, arcilla Mezcla, arcilla Roja (Cantera Ross) y arcilla Yaraví.

En cuanto a los ladrillos, dos corresponden a productos fabricados en la planta de Mar del Plata con la formulación que la empresa utiliza actualmente, mientras que los dos restantes provienen de una empresa ubicada en la provincia de Córdoba. En ambos casos, se analizaron un ladrillo en estado seco y otro en estado cocido.

2.2. Preparación y acondicionamiento de las arcillas

Se recibieron por parte de la empresa ladrillera 4 muestras en forma de fragmentos de roca con tamaños entre 5 a 20 cm, en la Figura 2.1 se muestran algunos terrones a modo de ejemplo.

Las muestras de arcillas fueron secadas hasta peso constante en una estufa a 80 °C. En general, las muestras de arcillas presentaron un grado de humedad inferior entre 0,63 y 1,12 %, excepto por la arcilla Yaraví la cual presentó un grado de humedad de 17,63 %. El contenido de humedad que presentaron las arcillas también dependió de las condiciones climatológicas a las cuales estuvieron sometidos los acopios, la arcilla Yaraví presentaba una notable humedad al momento de la recepción.



(a) (b)

Figura 2.1. Muestras arcilla Ocre (a) y arcilla Roja antes de desaglomerar (b).

Con el objetivo de facilitar el cuarteo se realizó una desaglomeración utilizando un martillo para reducir el tamaño de los aglomerados a ≤ 2 cm, a continuación, se muestra las muestras trituradas.



Figura 2.2. Reducción de la granulometría de la arcilla luego de la desaglomeración con martillo.

El cuarteo es un método por el cual se obtiene una muestra representativa a partir de una de mayor tamaño, mediante sucesivas particiones. Cada muestra de arcilla acondicionada se distribuyó sobre una superficie plana, formando una capa (25 cm x 20 cm x 1 cm, que se dividió en 16 partes iguales como se muestra en la Figura 2.3. Se extrajeron cuatro particiones y se pesaron en balanza. A continuación, se mezclaron y se distribuyeron nuevamente en la superficie plana, se repite el proceso. El procedimiento de extracción y mezcla se realizó 4 veces, hasta llegar a una cantidad final de muestra cuarteada de aproximadamente 700 g.



Figura 2.3. Patrón de cuarteo manual para la obtención de una muestra representativa de arcilla.

La molienda de las muestras cuarteadas se realizó en un mortero de ágata (Figura 2.4a), hasta alcanzar un tamaño de partícula inferior a 75 µm que pase por un tamiz N° 200, como el que se observa en la figura 2.4.b, adecuado para llevar a cabo su análisis mediante las diversas técnicas de caracterización a ser usadas (difracción de rayos X, análisis químico, térmico y termogravimétrico, y determinación de índices de Atterberg y de la densidad picnométrica). Para algunos fragmentos más duros de la arcilla Mezcla y la arcilla Yaraví fue necesario el uso de un mortero de carburo de tungsteno el cual se muestra en la Figura 2.5



(a) (b)

Figura 2.4. Molienda en mortero de ágata y (a) tamizado (b)



Figura 2.5. Molienda con mortero de carburo de tungsteno.

2.3. Caracterización de las arcillas

Las muestras de arcilla se caracterizaron utilizando las siguientes metodologías:

- Análisis mineralógico cualitativo y cuantitativo por difracción de rayos X (DRX) empleando el método de Rietveld.
- Análisis textural por el método de Bouyoucos.
- Determinación del contenido de materia orgánica por el método Walkley – Black.
- Determinación de la densidad del sólido por picnometría
- Análisis termogravimétrico (ATG).
- Determinación de los índices de Atterberg para evaluar plasticidad.

2.3.1. Análisis mineralógico cualitativo y cuantitativo

Las muestras, previamente molidas y tamizadas a un tamaño de partícula inferior a 75 µm se colocaron en un portamuestra de silicona, procurando evitar la orientación preferencial de las partículas.

Los difractogramas se obtuvieron utilizando un difractómetro (Bruker, D8 Advance A25), equipado con tubo de Cu (radiación Kα), filtro de Ni y detector lineal (LYNXEYE XE). El barrido estándar se realizó en un rango angular de 3° a 70° 2θ, con un paso de 0,02°, un tiempo de conteo de 0,5 s por paso y condiciones de operación de 40 kV y 30 mA.

La identificación de las fases cristalinas presentes se llevó a cabo utilizando el software X'Pert HighScore (PANalytical). Por otro lado, el análisis cuantitativo se realizó utilizando el programa de refinamiento estructural Siroquant, basado en el método de Rietveld (CETMIC).

Este método consiste en el ajuste de un difractograma experimental mediante un patrón teórico generado a partir de modelos cristalográficos y parámetros instrumentales, con el objetivo de minimizar la diferencia entre las intensidades observadas y calculadas punto a punto sobre todo el espectro (Bish y Howard, 1988).
Cabe aclarar que este análisis no contempla la presencia de fases amorfas o aquellas no detectables mediante difracción de rayos X. El error estadístico asociado al método es del orden de ± 5 % m/m para las fases identificadas.

2.3.2. Análisis textural

La determinación de las fracciones de arena (2 mm–50 µm), limo (50–2 µm) y arcilla (< 2 µm) se realizó mediante análisis granulométrico por sedimentación por el método de Bouyoucos (Bouyoucos, 1962) en el Laboratorio de Manejo y Conservación de Suelos de la Universidad de Buenos Aires. Este método se basa en la Ley de Stokes, que establece que la velocidad de sedimentación de una partícula esférica en un fluido es proporcional al cuadrado de su radio, por lo que partículas de distinto tamaño quedan en suspensión durante tiempos predecibles y diferenciados. La densidad de la suspensión, medida con un hidrómetro en momentos específicos, permite estimar la concentración de partículas finas aún no sedimentadas y calcular así la proporción de cada fracción granulométrica.
La determinación se realizó sobre 50 g de muestra de arcilla seca, previamente tamizada a 2 mm (tamiz N° 10), la cual se dispersó con 125 mL de una solución de hexametafosfato de sodio (4 % m/v). Las muestras fueron agitadas mecánicamente durante 2 horas y posteriormente transferidas a probetas de 1000 mL, completando el volumen con agua destilada. Las lecturas del hidrómetro se realizaron a los 1, 2, 3, 4, 8, 15, 30, 60 y 90 minutos, y a las 2, 4, 8, 16, 32, 64 y 96 horas de iniciada la sedimentación, registrándose en cada oportunidad la temperatura de la suspensión para aplicar la corrección por viscosidad correspondiente. La clase textural fue asignada según el triángulo textural del USDA (USDA Natural Resources Conservation Service,NRCS, 2017).

2.3.3. Determinación del contenido de materia orgánica

La cuantificación de materia orgánica en las arcillas se realizó mediante el método de Walkley–Black, el cual se basa en la cuantificación del carbono oxidado con un volumen conocido de una solución de dicromato de potasio en ácido sulfúrico concentrado. La cantidad de C se determina en forma indirecta, por titulación del contenido residual de dicromato que no reaccionó con solución de sulfato de hierro y fenantrolina ferrosa (ferroína) como indicador.

El procedimiento experimental consistió en la titulación de un blanco (sin arcilla) mezclando, bajo campana, 10 mL de dicromato de potasio y 20 mL de ácido sulfúrico concentrado. Tras un minuto de agitación y 30 minutos de reposo, se añadieron 200 mL de agua destilada y 3 gotas de ferroína (0,0025 M). La solución se tituló con una solución de sulfato ferroso heptahidratado (0,05 N) hasta observar el viraje de verde a castaño oscuro. Para la determinación en las muestras, el análisis se llevó a cabo por duplicado empleando 5 g de arcilla (< 75 µm). Se adicionaron 10 mL de dicromato de potasio (1 N) y, bajo campana, 20 mL de ácido sulfúrico concentrado (96 %), ocurriendo una reacción fuertemente exotérmica. Finalmente, la mezcla se filtró para separar la arcilla y el dicromato en exceso se tituló con sulfato ferroso bajo las mismas condiciones empleadas en el blanco.

Es importante destacar que el método de Walkley – Black considera ciertos factores de corrección para el cálculo final. El método considera que la reacción de oxidación del C en la materia orgánica es incompleta, estimándose que solo el 77 % del carbono orgánico resulta oxidado bajo estas condiciones. Asimismo, se contempla que solo el 58 % de la materia orgánica corresponde a carbono, mientras que el porcentaje restante está constituido por otros elementos como oxígeno e hidrógeno.

2.3.4. Determinación de la densidad picnométrica

La densidad picnométrica de las arcillas se determinó por el método de Arquímedes empleando muestras en polvo (< 75 µm), por duplicado, utilizando kerosén a 37°C como fluido, un baño termostático (Vicking 4100) y una balanza analítica (Sartorius BP 221 S). Adicionalmente, se calculó la densidad teórica de cada arcilla mediante la regla de las mezclas, utilizando las fracciones másicas de las fases minerales obtenidas del refinamiento de Rietveld y sus respectivas densidades cristalográficas de referencia (fichas ICDD).

2.3.5. Análisis termogravimétrico

Los análisis termogravimétricos (Shimadzu TGA-50) fueron realizados sobre 20 mg de muestras en polvo con tamaño de partícula < 75 µm, usando cápsulas de platino, en atmósfera de aire, a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min y hasta una temperatura de 1000 °C.

2.3.6. Determinación del índice de plasticidad

La determinación de los índices de Atterberg para evaluar la plasticidad de las arcillas se realizó bajo las normas IRAM 10501. Para ello, la muestra se secó previamente (en estufa a

110 °C) y se molió en mortero de ágata hasta obtener 200 g de material con tamaño de partícula inferior a 0,42mm. Posteriormente se humectaron las muestras con un 20 % de agua (base seca) y se dejaron estacionar 24 h.

El límite líquido (LL) se determinó utilizando la Cuchara de Casagrande que se muestra en la Figura 2.6. El procedimiento consistió en colocar una pasta de la muestra homogeneizada en la copa del equipo, realizando una ranura central con el acanalador normalizado. Se accionó el equipo a una razón de dos golpes por segundo hasta que las paredes del surco se unieron en una longitud de 12 mm. Para validar el ensayo, se controló que el cierre ocurriera en un rango de entre 10 y 40 golpes, procediendo luego a determinar el contenido de humedad de la zona de contacto mediante secado hasta peso constante en estufa a 110 °C.

Para el límite plástico (LP), se utilizaron 20 g de la masa húmeda, moldeándola manualmente sobre una superficie de vidrio esmerilado. El valor corresponde al contenido de humedad en el cual cilindros de 3 mm de diámetro comienzan a presentar fisuras o desmenuzamiento, indicando el límite inferior de la consistencia plástica del material.

Finalmente, el índice de plasticidad (IP) se calculó como la diferencia aritmética entre ambos límites (IP = LL - LP), definiendo el rango de humedad en el que el material se comporta plásticamente.

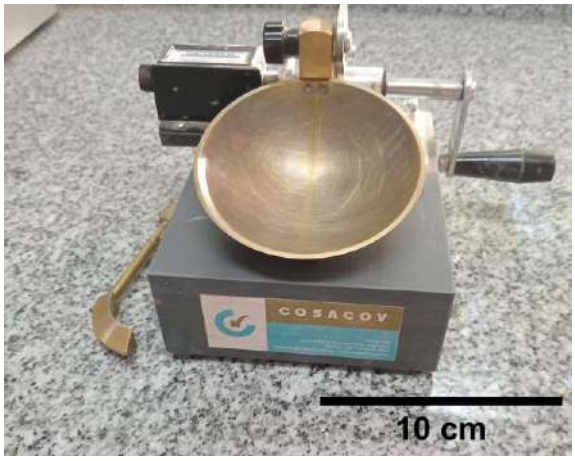


Figura 2.6. Cuchara de Casagrande.

2.4. Preparación y acondicionamiento de los ladrillos

Se recibieron un total de cuatro ladrillos (Figura 2.7): dos procedentes de la empresa marplatense (uno en estado seco y otro en estado cocido), y dos provenientes de una fábrica localizada en la provincia de Córdoba, correspondientes a los estados seco y cocido. Estas

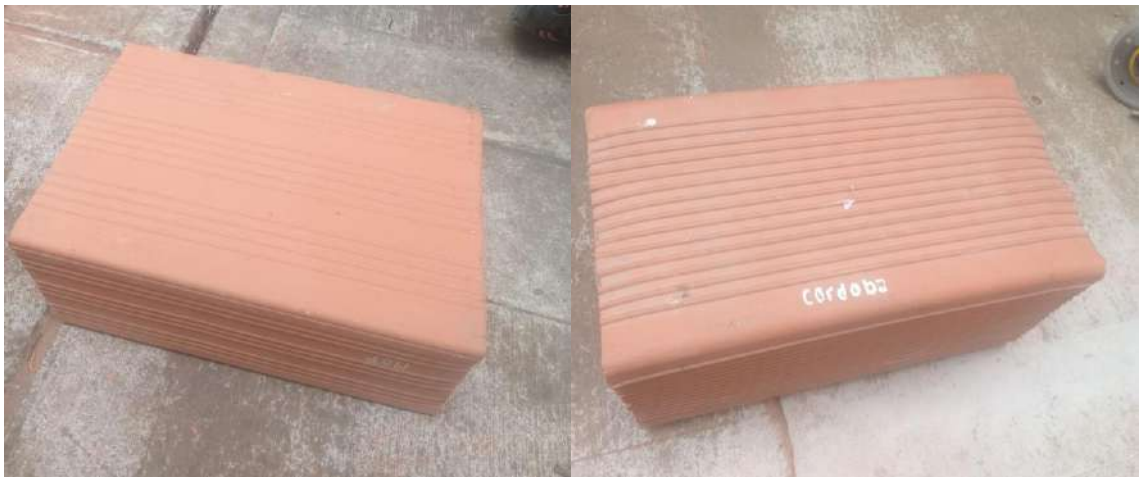
últimas muestras se incluyeron con el propósito de contar con un marco de referencia comparativo para evaluar el desempeño físico-mecánico y tecnológico de los ladrillos marplatenses frente a un estándar consolidado en el mercado nacional. Los ladrillos presentaron dimensiones de 33 cm x 48 cm x 11,5 cm y un peso de 4 kg. A partir de las piezas, se obtuvieron fragmentos de 5 cm x 7 cm x 1 cm mediante corte con amoladora (Figura 2.8.a), los cuales fueron utilizados posteriormente en los ensayos de determinación de densidades y porosidades por el método de Arquímedes, así como en el ensayo de absorción de agua.

Las muestras provenientes de la empresa ubicada en Mar del Plata se identificaron con la raíz LM, subdividiéndose en: LMS para los ladrillos en estado seco (pre-cocción) y LMC para aquellos en estado cocido (post-tratamiento térmico). Por su parte, las muestras originarias de la provincia de Córdoba se designaron con la raíz LC, correspondiendo la sigla LCS al estado seco y LCC al estado cocido. Esta nomenclatura será utilizada de manera sistemática en la presentación de los resultados y su posterior discusión.

Las muestras en polvo (Figura 2.8.b) se obtuvieron por trituración gruesa con martillo y mortero de ágata hasta obtener un tamaño de partícula inferior a 75 µm (tamiz N° 200). Este tamaño de partícula es adecuado para los análisis de caracterización posteriores, incluyendo la determinación de composición química por fluorescencia, composición mineralógica, el análisis termogravimétrico y la picnometría.

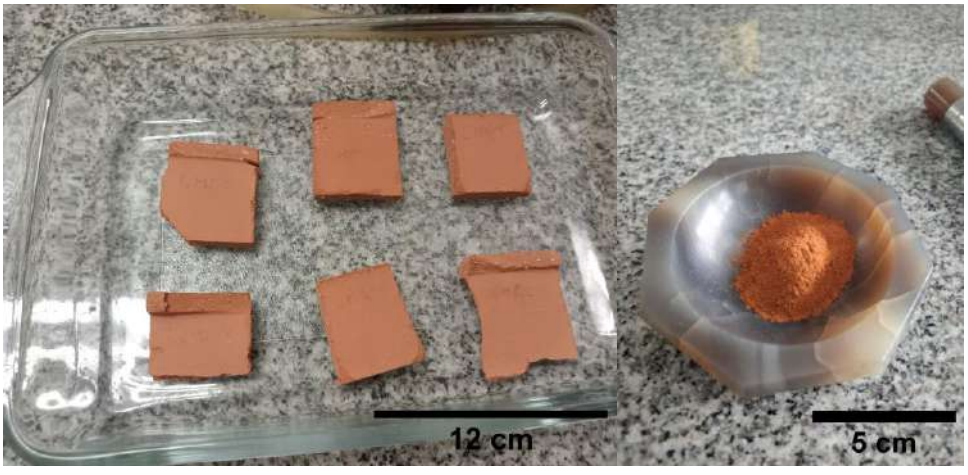


(a) (b)



(c) (d)

Figura 2.7. Ladrillos secos (a) LMS y (b) LCS, y cocidos (c) LMC, (d) LCC.



(a) (b)

Figura 2.8. Fragmentos de ladrillo (a) y polvo de ladrillo obtenido (b).

2.5. Caracterización de los ladrillos

Las muestras de los ladrillos secos se caracterizaron utilizando las siguientes metodologías:

- Análisis mineralógico cualitativo y cuantitativo por difracción de rayos X empleando el método de Rietveld.
- Análisis térmico diferencial (ATD) y termogravimétrico (ATG).
- Determinación de la densidad del sólido por picnometría.
- Determinación de densidad aparente y porosidad total por el método de Arquímedes en Hg.
- Análisis microestructural.

Mientras que los ladrillos cocidos fueron caracterizados mediante:

- Análisis mineralógico cualitativo y cuantitativo por difracción de rayos X empleando el método de Rietveld.
- Análisis de la composición química por espectrometría de fluorescencia de rayos X.
- Análisis térmico diferencial (ATD) y termogravimétrico (ATG).
- Determinación de la densidad del sólido por picnometría.
- Determinación de densidad aparente y porosidades abierta, cerrada y total por el método de Arquímedes en agua.
- Análisis de absorción de agua.
- Análisis microestructural.

2.5.1. Análisis mineralógico cualitativo y cuantitativo

Las muestras de los ladrillos secos y cocidos (pasante tamiz N° 200) se analizaron utilizando un difractómetro (Bruker D8 Advance A25) (radiación Cu-Kα). Para evitar la orientación preferencial, se montaron en porta muestras de silicona, empleando un barrido de 3 ° a 70 ° 2θ con pasos de 0,02° cada 0,5 s.

La identificación de fases se realizó con el software X'Pert HighScore, mientras que la cuantificación se ejecutó con el programa de refinamiento estructural Siroquant basado en el método de Rietveld. Este ajuste estructural minimiza la diferencia entre el patrón teórico y el experimental, considerando un error estadístico de ±5 % m/m.

En el caso del ladrillo marplatense seco (LMS), se llevó a cabo un cálculo de la composición estimada en función de las proporciones de las materias primas con la que se producen los ladrillos, y se las comparó con los resultados obtenidos por el análisis de Rietveld.

2.5.2. Análisis de la composición química

La composición química elemental de las muestras en polvo de los ladrillos cocidos Mar del Plata (LMC) se determinó mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X (FRX) (PW4024 Minipal 2 PANalytical X-ray).

2.5.3. Análisis térmico

El análisis termogravimétrico y térmico diferencial (Shimadzu TGA-50, y DTA-50) fueron realizados sobre muestras de los ladrillos secos y cocidos (20 mg) en polvo (< 75 µm), usando cápsulas de platino, en atmósfera de aire, a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min y hasta una temperatura máxima de 1000 °C.

2.5.4. Determinación de densidad y porosidades

Las densidades picnométricas (ρ_{pic}) de los ladrillos secos y cocidos se determinaron por el método de Arquímedes empleando muestras en polvo (< 75 µm), por duplicado, utilizando kerosén a 37 °C como fluido, un baño termostático (Vicking 4100) y una balanza analítica (Sartorius BP 221 S).

Por otra parte, los ladrillos secos se caracterizaron mediante la determinación de la densidad aparente y porosidad total utilizando el método de Arquímedes, empleando mercurio como fluido de inmersión.

Previamente al ensayo, las muestras se secaron en estufa a 110 °C hasta masa constante y se enfriaron en desecador hasta temperatura ambiente, determinando la masa seca (m_1).

Posteriormente, se determinó el empuje de la muestra sumergida en mercurio (m_2) mediante balanza.

A partir de estas mediciones, se calcularon la densidad aparente ($\rho_{aparente}$) y la porosidad total (P_{total}) del material con las siguientes ecuaciones:

$$\rho_{aparente} = \frac{m_1 * \rho_{agua}}{m_2} \qquad (1)$$

$$P_{total} = \left(1 - \frac{\rho_{aparente}}{\rho_{pic}}\right) \cdot 100 \qquad (2)$$

La densidad aparente ($\rho_{aparente}$) y la porosidad abierta ($P_{abierta}$) de los ladrillos cocidos se determinaron mediante el método de Arquímedes, empleando agua como fluido de inmersión.

Las probetas se secaron en estufa a 110 °C hasta masa constante y luego se enfriaron en desecador hasta temperatura ambiente, determinándose la masa seca (m_1).
Posteriormente, las muestras fueron se sumergieron en agua destilada y se mantuvieron en ebullición a 100 °C, con el fin de asegurar la completa saturación de los poros abiertos.
Una vez saturadas, se determinó la masa sumergida (m_2) mediante balanza hidrostática. Luego, las muestras se retiraron del líquido, se eliminó el exceso de agua superficial y se registró la masa saturada (m_3).
A partir de estos valores, se calcularon la densidad aparente ($\rho_{aparente}$) y la porosidad abierta ($P_{abierta}$), cerrada ($P_{cerrada}$) y total (P_{total}) utilizando las siguientes expresiones:

$$\rho_{aparente} = \frac{m_1 * \rho_{agua}}{m_3 - m_2} \qquad (3)$$

$$P_{abierta} = \frac{(m_3 - m_1) \cdot 100}{m_3 - m_2} \qquad (4)$$

$$P_{total} = \frac{(\rho_{pic} - \rho_{aparente}) \cdot 100}{\rho_{pic}} \qquad (5)$$

$$P_{cerrada} = P_{total} - P_{abierta} \qquad (6)$$

2.5.5. Determinación de la absorción de agua

La absorción de agua de los ladrillos cocidos se determinó mediante inmersión en agua durante 24 horas (IRAM 12588, 2026).
Para ello, las muestras se secaron previamente hasta masa constante y posteriormente se pesaron obteniéndose la masa seca (m_s). Luego, se sumergieron completamente en agua a temperatura ambiente durante 24 h. Transcurrido este tiempo, las muestras se retiraron, se eliminó el exceso de agua superficial y se determinó su masa húmeda (m_h).
La absorción de agua se calculó como el incremento porcentual de masa respecto a la masa seca inicial siguiendo la ecuación:

$$Abs(\%) = \frac{m_h - m_s}{m_h} * 100 \qquad (7)$$

2.5.6. Análisis microestructural

El análisis de la microestructura de los materiales se realizó a partir de imágenes obtenidas por microscopía óptica en lupa binocular estereoscópica (Zeiss Stecmic 2000C) y microscopio óptico metalográfico (Leica DMI 3000M) y microscopía electrónica de barrido (MEB). En

algunas zonas de las muestras se realizó un mapeo de elementos por espectroscopía de energía dispersa (EDS) para analizar la composición química elemental. En los ladrillos secos, el análisis se centró exclusivamente en superficies de fractura, mientras que en los ladrillos cocidos se examinaron tanto superficies de fractura como superficies pulidas. Para la obtención de las superficies de fractura en ambos estados, se generaron fragmentos mediante fractura frágil de la región interior de los ladrillos.

En cuanto a las muestras pulidas de ladrillos cocidos, se embutieron en resina poliéster y se realizó un desbaste inicial con pulidora automática utilizando lijas de granulometría progresivamente decreciente (N° 320, N° 600 y N° 1200), finalizando con un pulido mediante paño y pasta abrasiva de grano fino (6 µm).

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización de las arcillas

3.1.1. Análisis mineralógico

En la Figura 3.1 se presentan los difractogramas de rayos X de las cuatro arcillas analizadas, a partir de los cuales se llevó a cabo la identificación cualitativa de las fases mineralógicas presentes. Con el fin de observar las reflexiones de menor intensidad, los Difractogramas se presentan con el eje de intensidad truncado, debido a la elevada magnitud del pico principal.

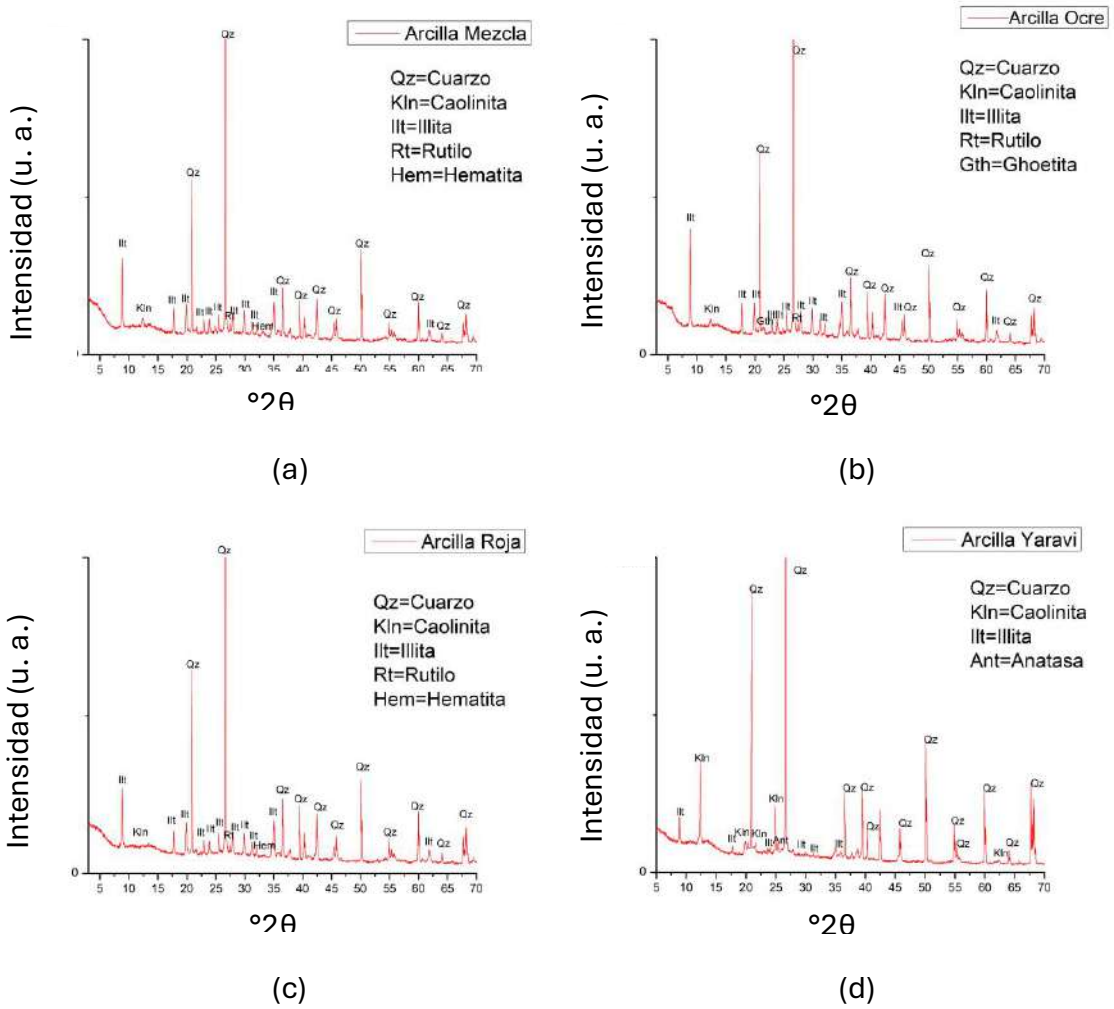


Figura 3.1. Difractogramas correspondientes a (a) arcilla Mezcla, (b) arcilla Ocre, (c) arcilla Roja, (d) arcilla Yaraví.

En todos los casos se observan picos intensos y bien definidos, indicativos de fases de elevada cristalinidad. En todas las muestras se identificaron los mismos componentes mayoritarios: cuarzo como fase principal no plástica y minerales arcillosos como fases plásticas secundarias, acompañados de impurezas minoritarias portadoras de hierro

(hematita y goethita) y titanio (rutilo y anatasa). El cuarzo (Qz) (ICDD 01-079-1910) constituye la fase mayoritaria en todas las muestras, evidenciado por los picos de mayor intensidad relativa en los difractogramas. La illita (Ilt) (ICDD 00-026-0911) se identifica como la principal fase arcillosa en las arcillas Roja, Ocre y Mezcla, cuyos picos se presentan con intensidad moderada a continuación del cuarzo. En la arcilla Yaraví, en cambio, la fase arcillosa dominante es la caolinita (Kln) (ICDD 00-005-0143), mientras que la illita aparece con menor intensidad. En las arcillas Roja, Ocre y Mezcla la caolinita se identifica como fase minoritaria, con picos de baja intensidad. El rutilo (Rt) (ICDD 01-072-1148) se detecta mediante picos de pequeña intensidad en las arcillas Roja, Ocre y Mezcla, en tanto que la arcilla Yaraví no presenta esta fase sino posible presencia de anatasa (Ant) (ICDD 01-086-1156). Finalmente, en las arcillas Roja, Ocre y Mezcla se identifican picos característicos de hematita (Hem) (ICDD 01-073-0603), mientras que en la arcilla Ocre se detectan picos atribuibles a goethita (Gth) (ICDD 00-003-0251). La composición mineralógica cuantitativa de fases cristalinas obtenida por el método de Rietveld para las cuatro arcillas analizadas se reporta en la Tabla 3.1 Con fines comparativos, en la Tabla 3.2 se presentan los datos correspondientes a otras materias primas (tierras y arcillas) utilizadas por la empresa en la fabricación de los ladrillos, así como los de una muestra de arcilla utilizada por la empresa cordobesa, previamente caracterizadas por el grupo de trabajo mediante el método de Rietveld. El diseño de la pasta utilizada para la elaboración de los ladrillos marplatenses contempla una relación donde el agua representa el 20 % de la masa total y la fracción sólida el 80 % restante. Los sólidos se dividen en dos grandes bloques: un 30 % correspondiente a una mezcla arcillosa y un 70 % a una combinación de cuatro tierras (M1, M2, M3 y M4) distribuidas en partes iguales de 25 % cada una. Detallando el primer bloque, la mezcla de arcillas se formula específicamente con un 67 % de arcilla Roja San Manuel y un 33 % de la arcilla Roja que analizamos en este trabajo.

Tabla 3.1. Composición mineralógica de las arcillas.

Fases	Proporción [% m/m]			
	Mezcla	Ocre	Roja	Yaraví
Cuarzo	54	56	63	76
Plagioclasas	-	-	-	-
Pirofilita	-	-		-
Feldespato potásico	-	-	-	-
Illita	40	37	33	8
Caolinita	4	3	1	15
Pirita	-	-	-	-
Magnetita	-	-	-	-
Calcita	-	-	-	-
Rutilo	2	2	2	-
Hematita	trazas	trazas	trazas	-
Goethita	-	1	-	-
Esmectita	-	trazas	-	-
Anatasa	-	-	-	1
Total mineral arcilloso	44	40	34	23

Tabla 3.2. Composición mineralógica de materias primas actualmente utilizadas.

Fases	Proporción [% m/m]					
	M1	M2	M3	M4	Arcilla Roja San Manuel	Arcilla Córdoba
Cuarzo	26	23	24	24	6	29
Plagioclasas	53	52	56	51	-	34
Pirofilita	-	-	-	-	61	-
Feldespato potásico	10	8	9	10	-	11
Illita	9	14	9	6	8	20
Caolinita	-	-	-	-	15	5
Pirita	1	-	-	-	-	-
Magnetita	trazas	2	2	3	-	-
Calcita	-	1	-	-	-	-
Mineral arcilloso*	-	-	-	6	-	-
Rutilo	-	-	2	-	1	-
Hematita	-	-	-	-	9	-
Total mineral arcilloso	9	14	9	12	23	25

*Mineral arcilloso no identificado

En todas las muestras el cuarzo constituye la fase mayoritaria, con contenidos que varían entre el 54 y el 76 % m/m. La arcilla Yaraví es la que presenta el mayor contenido de cuarzo, mientras que la arcilla Mezcla exhibe el valor más bajo.

Los minerales arcillosos, presentes en todas las muestras, corresponden en todos los casos a illita y caolinita en proporciones variables. Las arcillas Ocre y Mezcla son las que presentan mayor contenido de fracción arcillosa (40 y 44 % m/m, respectivamente), con illita como componente dominante de dicha fracción (92 y 91 %, respectivamente). La arcilla Roja presenta una proporción algo menor de minerales arcillosos (34 % m/m), constituida casi en su totalidad por illita (97 %). La arcilla Yaraví es la que contiene menor proporción de minerales arcillosos (23 % m/m) y, a diferencia del resto de las muestras, es la caolinita la fase arcillosa dominante (65 % de la fracción arcillosa), siendo la illita la que aparece en menor proporción.

En cuanto a las fases minoritarias, las impurezas de titanio y hierro se distribuyen de manera diferencial entre las muestras. El rutilo se detecta en las arcillas Roja, Ocre y Mezcla (2 % m/m en todos los casos), mientras que la arcilla Yaraví presenta anatasa (1 % m/m) como única fase de titanio. Las impurezas de hierro se identifican en las arcillas Roja (hematita en trazas) y Ocre (goethita, 1 % m/m).

Es importante destacar la ausencia, en todas las muestras, de fases que afecten negativamente la calidad de las piezas cocidas, como calcita o pirita. La calcita, al descomponerse durante la cocción entre 800 y 900 °C según la reacción $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$, genera óxido de calcio libre que, al hidratarse posteriormente, puede provocar expansiones y roturas en las piezas (Laird y Worcester, 1956). La pirita, por su parte, experimenta oxidación durante la cocción generando SO_2 y óxidos de hierro, lo que puede dar lugar a eflorescencias sulfatadas y daños estéticos y estructurales en el producto terminado (Brownell, 1958).

En comparación con las materias primas actualmente utilizadas por la empresa (tierras M1-M4 y arcilla Roja San Manuel, Tabla 3.2), las cuatro arcillas analizadas presentan un mayor contenido de cuarzo, dado que el máximo porcentaje de esta fase identificado en aquellas materias primas no supera el 26 % m/m, frente a valores de entre 54 y 76 % m/m en las nuevas arcillas. Además, el contenido de minerales arcillosos es superior en todas las arcillas analizadas respecto a las muestras de las tierras (M1-M4), cuyos valores se encuentran entre 9 y 14 % m/m. Cabe destacar que, a diferencia de las muestras de las tierras, en ninguna de las cuatro arcillas se identificaron por DRX minerales que actúen como fundentes en el procesamiento cerámico, tales como plagioclasas y feldespato potásico; no se descarta, sin embargo, que estos componentes puedan estar presentes en proporciones inferiores al límite de detección de la técnica.

En cuanto a la arcilla Roja San Manuel, materia prima de uso corriente en la empresa, la arcilla Yaraví presenta la composición mineralógica más similar, particularmente en el contenido y distribución de la fracción arcillosa (illita y caolinita). La principal diferencia radica en la fase no plástica dominante: mientras que la arcilla Roja San Manuel contiene pirofilita como mineral no plástico mayoritario (61 % m/m), la arcilla Yaraví presenta cuarzo en esa función. En ninguna de estas dos arcillas se detectaron minerales del grupo de los feldespatos.

Respecto a la arcilla de referencia de Córdoba, su composición mineralógica difiere notablemente de las cuatro arcillas analizadas. Si bien comparte cuarzo e illita como fases principales, su contenido de cuarzo (29 % m/m) es significativamente menor al de todas las arcillas locales, mientras que presenta feldespatos (plagioclasas, 34 % m/m, y feldespato potásico, 11 % m/m) que actúan como fundentes naturales y que no fueron detectados en ninguna de las arcillas locales. El contenido total de minerales arcillosos de la muestra empresa Córdoba (25 % m/m) es comparable al de la arcilla Yaraví (23 % m/m), pero inferior al de las arcillas Roja, Ocre y Mezcla.

3.1.2. Análisis textural

A continuación, en la Tabla 3.3 se presentan las fracciones de arcilla, limo y arena de las muestras analizadas, junto con su clasificación textural según el diagrama de Winkler, incluyendo además la materia prima de la empresa radicada en Córdoba.

Tabla 3.3. Determinación cuantitativa de arena, limo y arcilla.

Muestra	Proporción [% m/m]			Clase textural
	% arcilla [< 2 µm]	% limo [2-50 µm]	% arena [> 50 µm]	
Arcilla Mezcla	30,4	57,53	12,08	Franco Arcillo Limoso
Arcilla Ocre	32,9	62,3	4,8	Franco Arcillo Limoso
Arcilla Roja	19,15	61,28	19,58	Franco Limoso
Arcilla Yaraví	20,4	47,93	31,68	Franco
Arcilla Córdoba	15,8	61,1	23,1	Franco limoso

En las cuatro muestras de arcillas evaluadas se observa una composición granulométrica predominantemente limosa, con una fracción de limo (2-50 µm) que supera el 47% m/m en todos los casos. Dentro de este grupo, la arcilla Ocre y la arcilla Roja se destacan por presentar las proporciones más altas de esta fracción intermedia.

La fracción arcillosa (< 2 µm) muestra diferencias marcadas entre las muestras: la arcilla Mezcla y la arcilla Ocre presentan valores superiores al 30 % m/m (30,4 % y 32,9 %, respectivamente), mientras que las arcillas Roja y Yaraví exhiben valores cercanos al 20 % m/m (19,2 % y 20,4 %). En cuanto a la fracción arena (> 50 µm), resulta minoritaria en la mayoría de las muestras, con excepción de la arcilla Yaraví, que alcanza un valor cercano al 32 % m/m. Los valores más bajos de esta fracción corresponden a la arcilla Ocre (4,8 %) y la arcilla Mezcla (12,1 %). Al comparar con la materia prima proveniente de Córdoba, la arcilla Roja es la que presenta mayor similitud textural, con proporciones de limo y arena comparables. Sin embargo, la arcilla Ocre y la arcilla Mezcla contienen una proporción de finos significativamente superior a la referencia cordobesa, mientras que la arcilla Yaraví presenta una mayor proporción de arena.

En la Figura 3.2 se muestra la ubicación de cada muestra de arcilla con su respectiva proporción de arena, limo y arcilla en el diagrama ternario de Winkler, permitiendo visualizar la clasificación textural de cada arcilla. (*Winkler, 1955)*

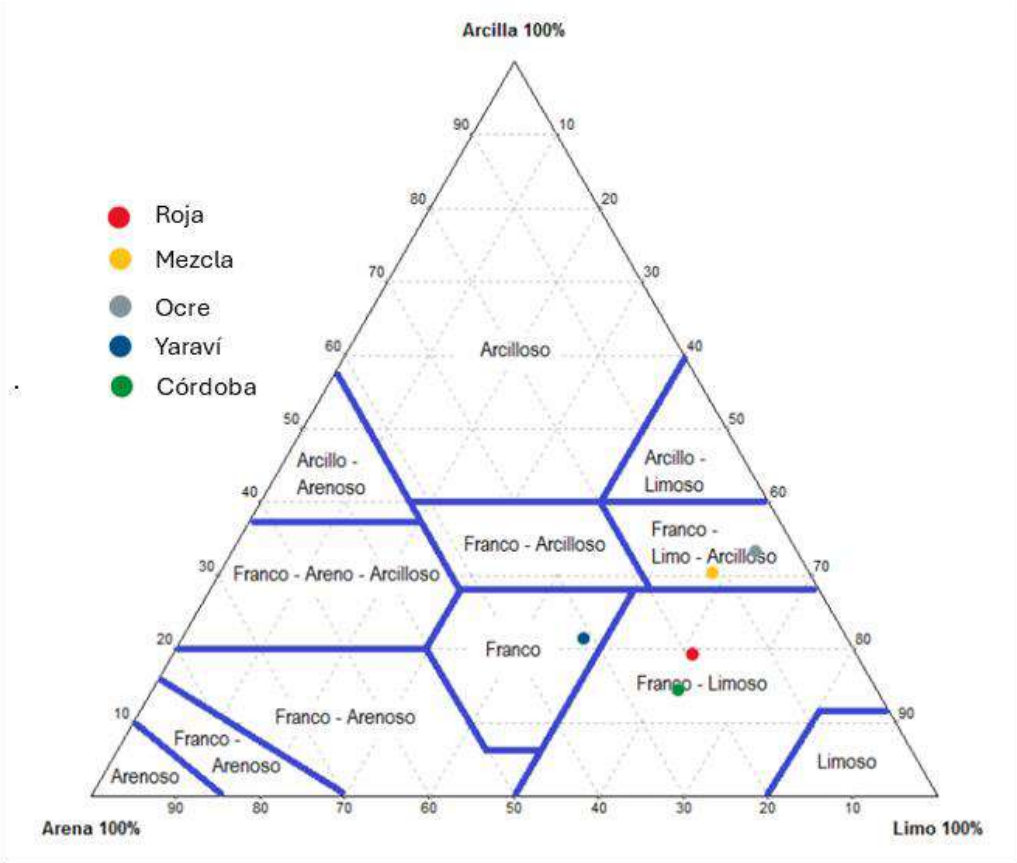


Figura 3.2. Clasificación de las muestras según el diagrama de Winkler.

3.1.3. Determinación del contenido de materia orgánica.

A continuación, en la Tabla 3.4, se presenta el contenido de materia orgánica obtenido por el método de Walkley-Black para cada arcilla:

Tabla 3.4. Contenido de materia orgánica en las arcillas.

Muestra	Materia Orgánica [%]
Arcilla Mezcla	0,09 ± 0,03
Arcilla Ocre	0,11 ± 0,02
Arcilla Roja	0,07 ± 0,03
Arcilla Yaraví	0,08 ± 0,02

El contenido de materia orgánica en las cuatro muestras de arcilla se encuentra dentro de un rango sumamente acotado, con valores que oscilan entre 0,07 % y 0,11 %. Estos valores se consideran muy bajos para producir efectos tecnológicos notorios (Lewo et al., 2025). Estos valores resultan significativamente bajos en comparación con los medidos anteriormente por el grupo a las tierras M1-M4, que se encontraban cerca del 5 %, el contenido orgánico además se comparó con datos bibliográficos de arcillas (Feeney et al., 2024), en los cuales los valores de materia orgánica oscilan entre 2,1 y 6,8 % m/m siendo comparativamente menor las arcillas locales. Con valores tan reducidos de materia orgánica, se minimiza la generación de porosidad descontrolada que puede producirse por la volatilización de compuestos orgánicos durante la cocción. Sin embargo, cabe destacar que estos resultados no son directamente extrapolables al comportamiento de la pasta cerámica en su conjunto. Al prepararse la pasta cerámica en la empresa ladrillera utilizan una composición 70 % de tierras (analizadas previamente por el grupo, y denominadas M1-M4) mientras que el contenido de arcilla que utilizan es del 30 % restante. En consecuencia, el contenido de materia orgánica de la pasta estará dominado probablemente por el aporte de las tierras.

3.1.4. Determinación de la densidad picnométrica

En la Tabla 3.5 se presenta los resultados de las densidades de las arcillas obtenidas por picnometría (ρ_{pic}). Teniendo en cuenta las densidades de las fases cristalinas y las proporciones de las fases determinadas por el análisis cuantitativo de Rietvield (Tabla 3.1), se estimaron las densidades de las arcillas a partir de la regla de las mezclas (ρ_{rm}).

Tabla 3.5. Densidades picnométricas y densidades calculadas de las arcillas.

Material	ρ_{pic} $[\frac{g}{cm^3}]$	ρ_{rm} $[\frac{g}{cm^3}]$
Arcilla Mezcla	2,71 ± 0,04	2,72
Arcilla Ocre	2,79 ± 0,06	2,70
Arcilla Roja	2,76 ± 0,03	2,74
Arcilla Yaraví	2,76 ± 0,01	2,66

Los resultados indican que, para todas las muestras analizadas, la diferencia entre los valores medidos experimentalmente y los valores estimados es inferior al 3,5 %.

3.1.5. Análisis termogravimétrico

En la Figura 3.3 se muestran los termogramas de análisis termogravimétrico (TGA) de las cuatro arcillas estudiadas.

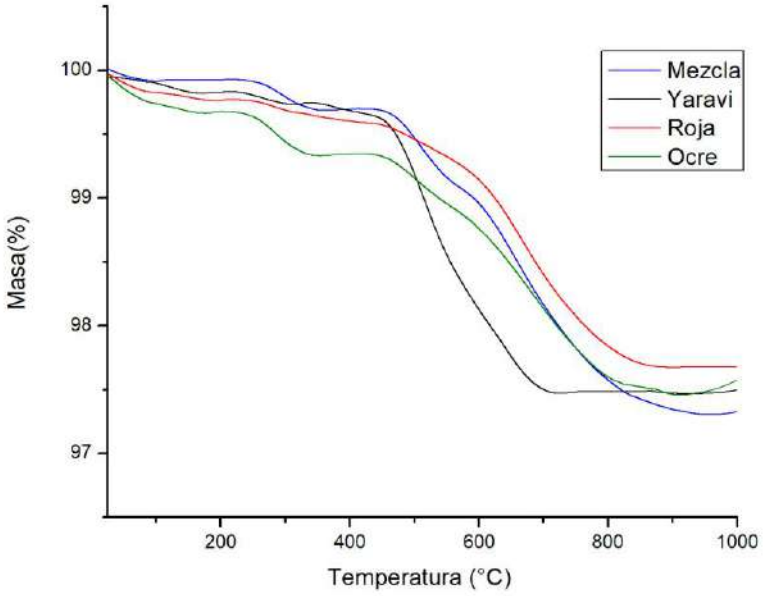


Figura 3.3. Curvas termogravimétricas en aire de las arcillas estudiadas.

Las curvas termogravimétricas (ATG) de las cuatro arcillas presentan un comportamiento cualitativamente similar, con pérdidas de masa relativamente bajas (< 2,7 %), atribuibles principalmente a las transformaciones fisicoquímicas que experimentan los minerales arcillosos constituyentes (illita y caolinita) durante el proceso de cocción.

El primer evento térmico, observado por debajo de los 100-200 °C, corresponde a la remoción del agua libre y del agua adsorbida físicamente sobre la superficie de las partículas. En la arcilla Ocre, que presenta la granulometría más fina del conjunto analizado, según el análisis textural, esta pérdida alcanzó aproximadamente el 0,3 %, mientras que en las demás arcillas la pérdida de masa en este rango de temperatura resultó menor, lo cual es consistente con la mayor superficie específica disponible para la adsorción de agua en materiales de textura más fina.

En el rango comprendido entre 200 y 700 °C, la pérdida de masa podría asociarse, en parte, a la descomposición de materia orgánica. Sin embargo, dado que el contenido de este componente resultó inferior a ≈ 0,1 % m/m en todos los casos, su contribución a la pérdida de masa total se considera poco significativa.

En lo que respecta a los eventos asociados específicamente a los minerales arcillosos, la illita pierde el agua zeolítica (adsorbida en los espacios interplanares) hasta aproximadamente 250 °C. Dado su carácter no expandible, esta pérdida es inferior al 0,35 % incluso en la muestra con mayor proporción de este mineral (arcilla Ocre). A partir de los 450 °C y hasta

aproximadamente 850 °C, tanto la caolinita como la illita experimentan la pérdida de agua estructural (deshidroxilación), fenómeno que se manifiesta como la caída característica observada en los termogramas de las cuatro arcillas en ese intervalo.

Tabla 3.6. Porcentaje de pérdida de masa en los termogramas.

Muestra	Pérdida de masa entre 25 °C a 250°C [%]	Pérdida de masa entre 250 °C a 450 °C [%]	Pérdida de masa entre 450 °C a 1000 °C [%]	Pérdida de masa total [%]
Arcilla Mezcla	0,08	0,23	2,39	2,69
Arcilla Ocre	0,33	0,33	1,82	2,47
Arcilla Roja	0,23	0,17	1,92	2,32
Arcilla Yaraví	0,17	0,17	2,18	2,52

En la Tabla 3.6 se muestran las pérdidas de masa registradas en cada rango térmico para las cuatro arcillas. Se observó una correlación entre la pérdida de masa por deshidroxilación (a partir de los 450 °C) y el contenido de mineral arcilloso de cada muestra. La arcilla Mezcla presentó la mayor pérdida de masa en este rango (2,39 %), en concordancia con su mayor contenido total de mineral arcilloso (44 % m/m), seguida por las arcillas Roja (1,92 %) Ocre (1,82 %), con contenidos de 34 % m/m y 40 % m/m, respectivamente. La Arcilla Yaraví, sin embargo, no sigue esta tendencia: a pesar de presentar un contenido de mineral arcilloso intermedio, exhibe una pérdida de masa comparable a la de la arcilla Ocre (2,18 %). La marcada pérdida de masa en esta región para la arcilla Yaraví puede atribuirse a su mayor proporción de caolinita, dado que este mineral posee un porcentaje de agua estructural notablemente superior al de la illita (aproximadamente 12 % m/m frente a 4 % m/m, respectivamente). Además, la deshidroxilación de la caolinita ocurre a menor temperatura que la de la illita, lo que explica que la arcilla Yaraví pierda el agua estructural a temperaturas más bajas que las demás.

3.1.6. Determinación de los índices de Atterberg

En la Tabla 3.7 se presentan los valores de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad determinados para cada arcilla.

Tabla 3.7. Valores de límite líquido (LL), limite plástico (LP) e índice de plasticidad (IP).

Muestra	LL	LP	IP
Arcilla Mezcla	26,51	23,61	2,90
Arcilla Ocre	35,96	22,79	13,17
Arcilla Roja	29,49	25,47	4,02
Arcilla Yaraví	20,47	17,04	3,43

En términos generales, tres de las cuatro arcillas analizadas presentaron índices de plasticidad bajos, mientras que la arcilla Ocre se destacó con un índice de plasticidad medio, marcadamente superior al del resto de las muestras (Wang, 2022).

En particular, la arcilla Ocre presenta el índice de plasticidad más alto (13,17). Este comportamiento resulta coherente con los resultados del análisis textural y mineralógico, ya que es la muestra con mayor contenido de finos entre las analizadas (95,2 % m/m entre las fracciones arcilla y limo) y presenta el segundo mayor contenido de mineral arcilloso total (40 %), constituido por un 37 % de illita y un 3 % de caolinita. Un elevado contenido de partículas finas implica una mayor área superficial específica, favoreciendo la retención de agua y la formación de una película líquida que incrementa la cohesión de la pasta y mejora su capacidad de conformado y extrusión.

La arcilla Yaraví, por su parte, presentó el índice de plasticidad más bajo entre las muestras junto a la arcilla Mezcla, resultado que resulta coherente con su composición mineralógica y textural. Esta muestra posee el menor contenido de mineral arcilloso total (23% m/m) y la mayor proporción de cuarzo (76% m/m), mineral no arcilloso que no contribuye a la plasticidad de la pasta, además de presentar una composición inversa a la de las restantes muestras, con mayor proporción de caolinita (15% m/m) que de illita (8% m/m). Dado el bajo contenido de fracción arcillosa disponible para la retención de agua, el reducido índice de plasticidad obtenido resulta consistente con la composición textural y mineralógica de la muestra.

Resulta llamativo, en cambio, que la arcilla Roja presente un índice de plasticidad superior al de la arcilla Mezcla (4,02 frente a 2,90), ya que esta última posee una mayor proporción de

finos (87,92% m/m frente a 80,42% m/m) y un mayor contenido de mineral arcilloso (44% m/m frente a 34% m/m), incluyendo mayor contenido de illita (40% frente a 33%). Esta diferencia no puede explicarse únicamente a partir de los análisis realizados, lo que sugiere la influencia de otros factores no evaluados en este trabajo, tales como la capacidad de intercambio catiónico, la superficie específica de la fracción arcillosa, o la presencia de fases minoritarias no cuantificadas por DRX. Finalmente, es importante destacar que la materia orgánica puede contribuir significativamente a la plasticidad de una pasta cerámica. Sin embargo, a partir del análisis de Walkley-Black se determinó que su contenido es bajo en todas las muestras, por lo que no tendría una influencia significativa sobre los índices de plasticidad obtenidos.

A partir de los valores de índice de plasticidad (IP) y límite líquido (LL), se determinó la ubicación de las cuatro arcillas en el diagrama de Casagrande (Figura 3.4). Todas las muestras se sitúan a la izquierda de la vertical en LL = 50, lo que indica que corresponden a materiales de baja a media plasticidad.

Las arcillas Roja, Mezcla y Yaraví se ubican en la región correspondiente a limos inorgánicos de baja compresibilidad. Por su parte, la arcilla Ocre se posiciona en el campo de limos inorgánicos de media compresibilidad.

En la Figura 3.5 se observa el comportamiento frente a la extrusión de las cuatro muestras, en función de su índice de plasticidad y límite plástico. Únicamente la arcilla Ocre se encuentra en la región de extrusión aceptable, dado su índice de plasticidad medio. En los casos de arcillas Roja, Mezcla y Yaraví, las composiciones quedan fuera de la zona de extrusión aceptable, lo cual se asocia directamente a los bajos valores de índice de plasticidad obtenidos. Esto indica una limitada capacidad de deformación sin fisuración, dificultando su procesamiento por extrusión.

No obstante, la arcilla no constituye la única materia prima empleada en la producción de ladrillos, ya que la pasta cerámica presenta una fracción mayoritaria de tierra. En este sentido, resulta necesario determinar una proporción óptima de esta fracción que permita incrementar la plasticidad global de la mezcla. Un aumento del índice de plasticidad favorecería el desplazamiento del material hacia regiones más adecuadas para la extrusión, mejorando así la trabajabilidad y reduciendo la probabilidad de defectos durante el conformado.

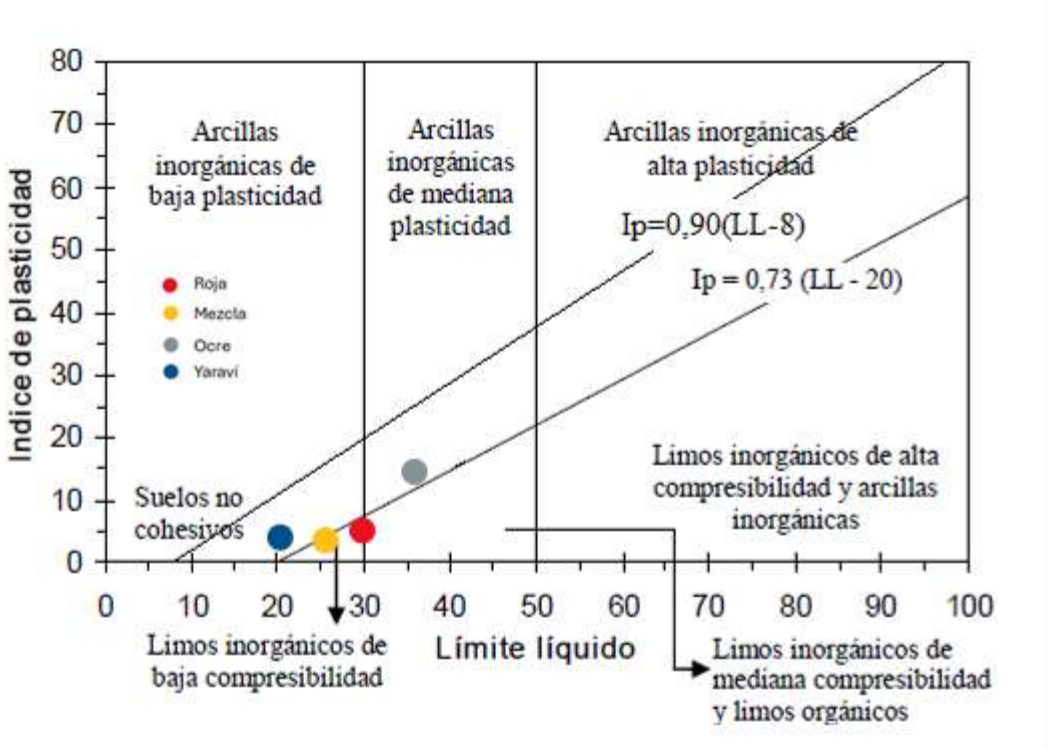


Figura 3.4. Clasificación de las muestras en el diagrama de plasticidad de Casagrande en función del índice de plasticidad (IP) y el límite líquido (LL).

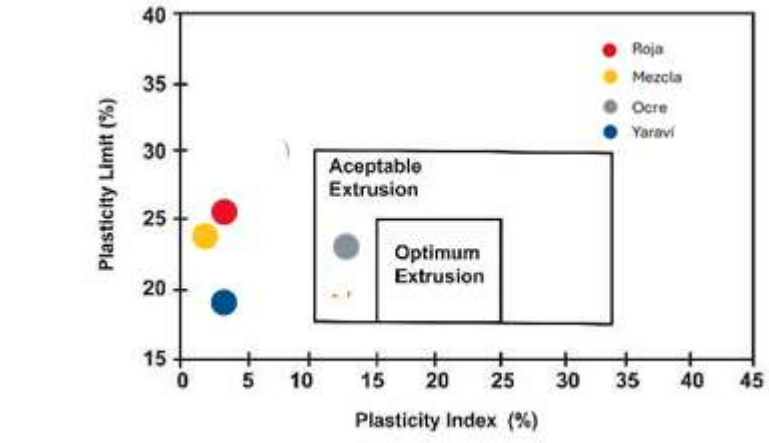


Figura 3.5. Evaluación de la aptitud a la extrusión de las arcillas en función del índice de plasticidad y el límite plástico.

3.2. Caracterización de los ladrillos

3.2.1. Ladrillos secos

3.2.1.1. Análisis mineralógico cualitativo y cuantitativo

A continuación, en la Figura 3.6 se presenta los difractogramas de ambos ladrillos secos (LMS y LCS).

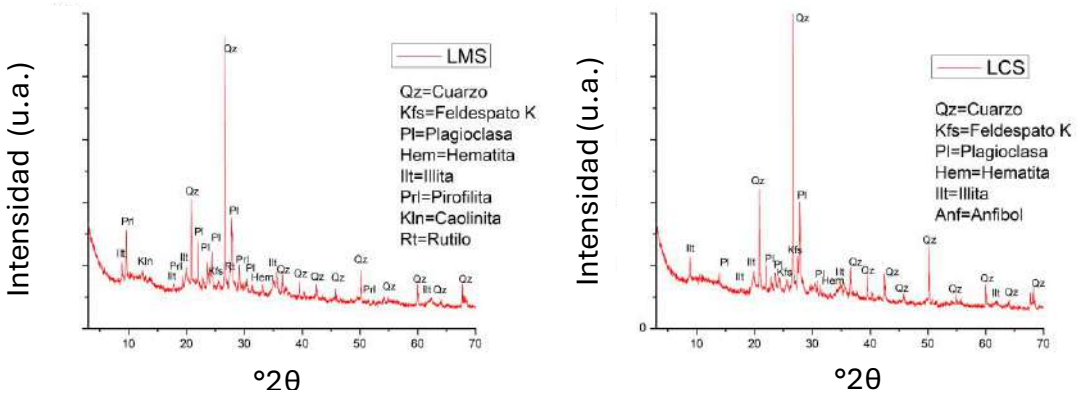


Figura 3.6. Difractogramas (a) LMS y (b) LCS.

En la Figura 3.6 se presentan los difractogramas de rayos X correspondientes a ambos ladrillos. A partir de estos resultados es posible realizar la identificación de las fases cristalinas presentes. Los difractogramas muestran picos bien definidos, lo cual indica un adecuado grado de cristalinidad en las muestras analizadas.

Como componentes mayoritarios no plásticos, ambos materiales presentan cuarzo (Qz) (ICDD 01-079-1910), plagioclasas (Pl) (ICDD 01-076-1819) y feldespatos potásicos (Kfs) (ICDD 01-083-1604). La illita (Illt) (ICDD 00-026-0911) se identifica como la fase arcillosa principal en ambos ladrillos.

Por otro lado, se detectan picos correspondientes a pirofilita (Prl) (ICDD 00-024-0011) y caolinita (Kln) (ICDD 00-005-0143) únicamente en la muestra LMS.

En cuanto a los componentes minoritarios, se identifican picos de hematita (Hem) (ICDD 01-073-0603) en ambos ladrillos, rutilo (Rt) (ICDD 01-072-1148) en la muestra LMS y un anfíbol (Anf) (ICDD 00-021-0149) en la muestra LCS.

En la Tabla 3.8 se presenta la composición mineralógica de los ladrillos secos de Mar del Plata y Córdoba, determinada experimentalmente por DRX mediante refinamiento de Rietveld, junto con la composición estimada para el ladrillo marplatense a partir de la formulación de la pasta utilizada en su elaboración.

A partir de la mineralogía de las tierras M1 y M2 y de sus proporciones en la formulación de la pasta (Tabla 3.2), se estimó, mediante la regla de las mezclas, un contenido de

aproximadamente 0,2 % m/m de pirita y calcita. Dada su baja proporción, es esperable que estas fases no hayan sido detectadas por DRX.

Tabla 3.8. Composiciones mineralógicas y composición estimada.

Fase	LMS [%]	LMS estimado [%]	LCS [%]
Cuarzo	20	24,41	31
Plagioclasa	35	37,10	38
Feldespato potásico	7	6,48	7
Hematita	4	1,78	Trazas
Anfíbol	-	-	Trazas
Rutilo	2	0,30	-
Pirofilita	11	12,08	-
Caolinita	7	3,07	-
Illita	14	11,50	23
Magnetita	-	1,23	-
Mineral arcilloso*	-	1,05	-

*Mineral arcilloso no identificado

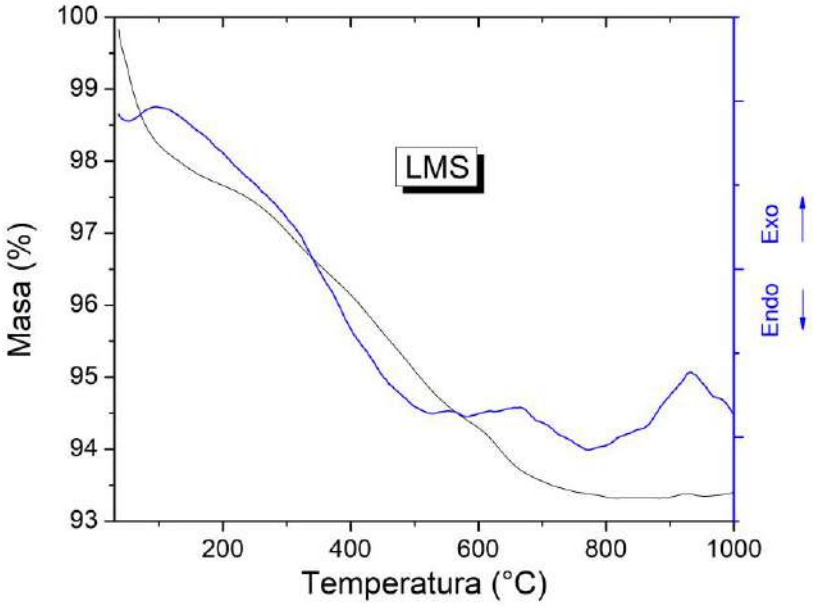
Al comparar las composiciones mineralógicas experimentales de ambos ladrillos, LMS y LCS (Tabla 3.8), se observan diferencias significativas que reflejan distintos orígenes y formulaciones de las materias primas utilizadas. El ladrillo Córdoba presenta un mayor contenido de cuarzo (31 % frente a 20 % en el LMS), lo que permite predecir una menor contracción durante el ciclo de cocción. En cuanto a la fracción fundente, ambos materiales presentan contenidos similares de feldespato potásico (7 %), mientras que la plagioclasa se encuentra en proporciones comparables, siendo levemente superior en el ladrillo cordobés (38 % m/m) respecto al local (35 % m/m). Por otro lado, en el ladrillo Mar del Plata se detecta la presencia de minerales minoritarios como hematita (Fe_2O_3), rutilo (TiO_2) y pirofilita, fases

ausentes en el ladrillo cordobés. La presencia de pirofilita es consistente con la composición mineralógica de la arcilla Roja analizada en el presente trabajo, la cual forma parte de la formulación de la pasta del LMS. En conjunto, estas diferencias evidencian que, si bien ambos ladrillos comparten las fases mineralógicas principales (cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico e illita), las proporciones relativas y la presencia de fases minoritarias dependen fuertemente del origen geológico y la formulación particular de cada pasta.

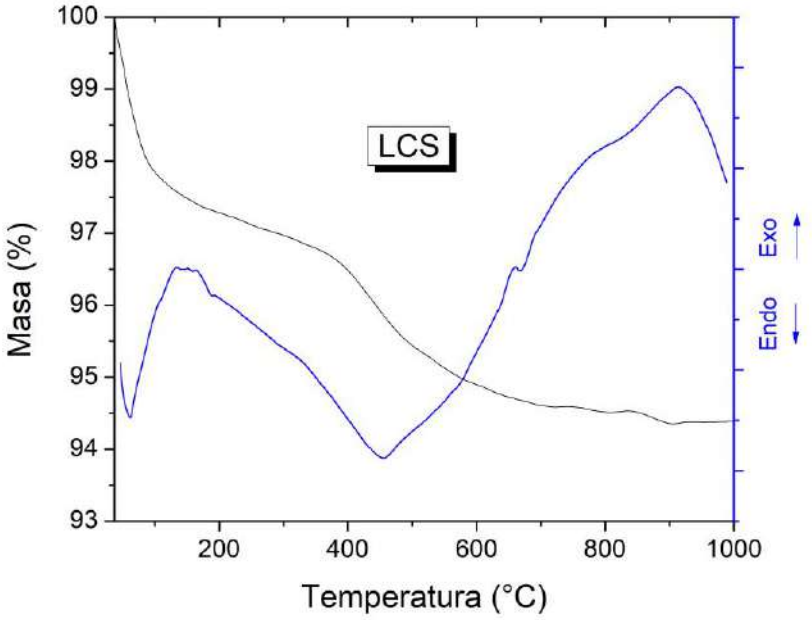
En cuanto a la comparación entre la composición estimada y la determinada experimentalmente para el Ladrillo Mar del Plata, las diferencias registradas en todos los casos son inferiores al 4 %, valor que se encuentra dentro del error típico del método (≈ 5 %), lo que indica una muy buena concordancia entre ambas aproximaciones. Las discrepancias observadas pueden atribuirse a heterogeneidades propias del material, tanto a nivel del ladrillo como de los acopios de materia prima, así como a limitaciones inherentes a la técnica. En este sentido, debe considerarse que ciertas fases minoritarias (como magnetita, pirita, calcita o minerales arcillosos no identificados) pueden no ser detectadas o cuantificadas con precisión mediante DRX, contribuyendo a las diferencias observadas.

3.2.1.2. Análisis térmico diferencial y termogravimétrico

En la Figura 3.7 se presentan las curvas obtenidas del análisis térmico diferencial (ATD) y el termogravimétrico (ATG).



(a)



(b)

Figura 3.7. Curvas de análisis térmico diferencial y termogravimétrico para (a)LMS y (b) LCS.

En los termogramas de ATD y ATG de los ladrillos secos de ambas empresas se observan eventos y pérdidas de masa, respectivamente, relacionados a los diferentes procesos fisicoquímicos que ocurren en las materias primas que componen las muestras analizadas, que en su mayoría implican la evolución de gases (agua y especies varias de la descomposición de la materia orgánica, principalmente). El comportamiento del ladrillo LMS se asemeja particularmente al de las capas de tierra, en concordancia con la mayor proporción de esta materia prima en la mezcla de partida (70 % m/m).

A temperaturas inferiores a 250 °C, el pequeño pico endotérmico observado en los termogramas (ATD) de ambos ladrillos alrededor de 50 °C se asocia a la remoción del agua libre y adsorbida físicamente, que produce una pérdida de masa de aproximadamente 2.6 y 2,9 % en las dos muestras (Claudel et al., 2025).

Entre 200 y 700°C se produce la descomposición de la materia orgánica, presente principalmente en la tierra usada para fabricar el ladrillo y otros procesos asociados a los minerales arcillosos, que también contribuyen a la pérdida de masa. El cambio de pendiente alrededor de 315°C en las curvas de ATD de ambas muestras se relaciona con la descomposición de la materia orgánica presente principalmente en las tierras utilizadas en la formulación de ambos ladrillos, proceso que se manifiesta como un tenue efecto exotérmico

en las curvas de ATD (Mahmoudi et al., 2014). Simultáneamente, hasta ~250 °C se produce la pérdida del agua adsorbida en la illita (agua zeolítica), mineral arcilloso predominante en las materias primas constituyentes de los ladrillos LMS y LCS (Tabla 3.8).

A partir de ~ 450°C, se produce la pérdida de agua estructural de la caolinita y la illita, proceso al cual se atribuye el pico endotérmico a 527 y 462°C identificado en las muestras de los LMS y LCS respectivamente. La pérdida de masa asociada, que es la más elevada en el rango térmico evaluado, resulta algo mayor para el LMS (3,1 %) en comparación con LCS (2,1 %). Si bien la cantidad total de mineral arcilloso es algo superior en la materia prima de LCS, la mayor pérdida de masa registrada en este rango térmico para el ladrillo seco LMS puede atribuirse a la contribución significativa de la caolinita, cuyo contenido de agua estructural (12 % m/m) es considerablemente mayor que el de la illita (4 % m/m). En este sentido, los aportes estimados a la pérdida de masa por deshidroxilación de los minerales arcillosos son del orden de 1,4 % para la materia prima de LMS y 0,92 % para el caso de LCS. Adicionalmente, la mayor proporción de materia orgánica presente en la tierra que emplea la empresa marplatense también contribuye al incremento de la pérdida de masa en este intervalo de temperatura.

En este mismo rango térmico, la pirofilita aportada por la arcilla Roja se deshidroxila entre 580 y 920 °C, manifestándose como un pico endotérmico ancho con máximo a 770 °C, observable únicamente en la curva de ATD del LMS, dado que esta fase está ausente en las materias primas del LCS. Esta diferencia se refleja también en la pérdida de masa registrada en ese intervalo: 1,0 % para el LMS frente a 0,2 % para el LCS. En consecuencia, la pérdida de masa total resulta algo mayor para el LMS (6,7 %) que para el LCS (5,6 %).

Por otra parte, el pequeño pico endotérmico observado alrededor de 577 °C en las curvas de ATD de ambas muestras se atribuye a la transformación alotrópica $\alpha \rightarrow \beta$ del cuarzo. Finalmente, el pico exotérmico registrado experimentalmente entre 930 y 935 °C se asigna a la formación y cristalización de fases tipo espinela a partir de los minerales arcillosos, en concordancia con lo reportado en la literatura para la caolinita y la illita (Sonuparlak et al., 1987; Irassar et al., 2019).

Tabla 3.9. Porcentaje de pérdida de masa en los termogramas.

LMS		LCS	
Rango térmico [°C]	Pérdida de masa [%]	Rango térmico [°C]	Pérdida de masa [%]
25-37	1,8	25-90	2,3
74-260	0,8	90-375	1,0
260-560	2,9	375-530	1,5
560-607	0,2	530-665	0,6
607-795	1,0	665-1000	0,2
Total	6,7	Total	5,6

3.2.1.3. Determinación de densidad y porosidad

En la Tabla 3.10 se presentan, para ambos ladrillos secos, la densidad picnométrica (ρ_{pic}) determinada experimentalmente, su valor estimado mediante la regla de fases a partir de la composición mineralógica cuantificada por DRX, la densidad aparente obtenida por el método de Arquímedes en mercurio, y la porosidad total.

Tabla 3.10. Densidades picnométricas y densidades del sólido estimadas, densidades aparentes y porosidades totales de ladrillos secos.

	ρ_{pic} $[\frac{g}{cm^3}]$	$\rho_{estimada}$ $[\frac{g}{cm^3}]$	$\rho_{aparente}$ $[\frac{g}{cm^3}]$	P_{total} [%]
LMS	2,71 ± 0,02	2,79	2,19 ± 0,02	19,2 ± 0,7
LCS	2,63 ± 0,01	2,67	2,18 ± 0,02	17,3 ± 0,8

Se observa una estrecha concordancia entre los valores de densidad picnométrica experimental y estimada para ambos ladrillos: en el caso del LMS se obtuvieron 2,71 g/cm³ y 2,79 g/cm³, respectivamente, mientras que para LCS los valores fueron 2,63 g/cm³ y 2,67 g/cm³. Se observa una diferencia relativa del 2,86 % para el ladrillo de Mar del Plata y del

1,49 % para el ladrillo de Córdoba, lo que indica una buena concordancia entre ambos métodos.

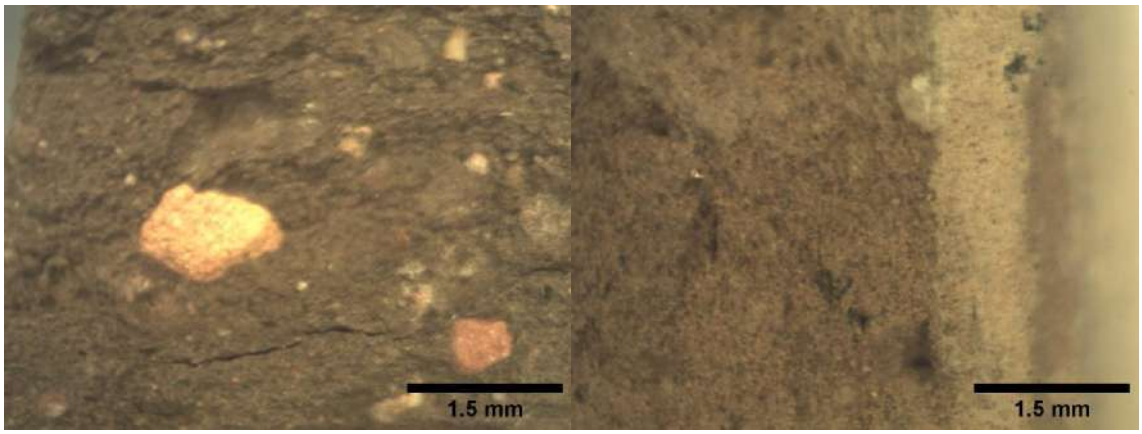
El LMS presenta una densidad picnométrica ligeramente superior a la del LCS (< 10 %), lo cual puede atribuirse a una mayor proporción de fases minoritarias de alta densidad, como la hematita y el rutilo, identificadas en su composición mineralógica.

En cuanto a la densidad aparente, ambos ladrillos presentan valores similares (2,19 ± 0,02 g/cm³ para el LMS y 2,18 ± 0,02 g/cm³ para el LCS), mientras que la porosidad total es levemente superior en el ladrillo marplatense (19,2 ± 0,7 % frente a 17,3 ± 0,8 %)

En este sentido, la mayor porosidad del ladrillo de Mar del Plata podría asociarse a un menor grado de compactación o a diferencias en la distribución granulométrica, mientras que el ladrillo de Córdoba presentaría un empaquetamiento más eficiente de las partículas en estado seco.

3.2.1.4. Análisis Microestructural

En la Figura 3.8 se muestran imágenes obtenidas con lupa de la superficie de fractura de las muestras de los ladrillos secos.



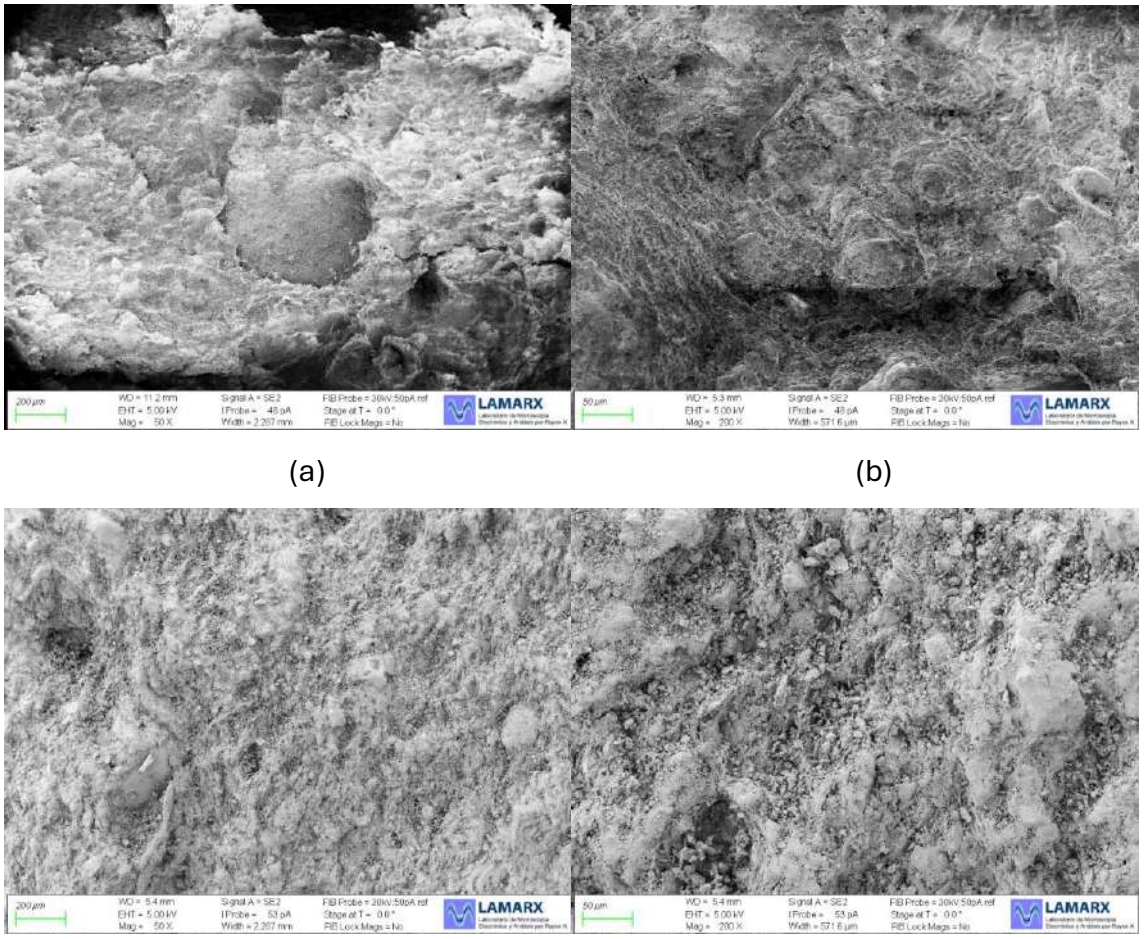
(a) (b)

Figura 3.8. Imágenes de la superficie de fractura de muestras de los ladrillos secos obtenidas con lupa binocular LMS (a) y LCS (b). Barra: 1,5 mm.

La elevada rugosidad de este tipo de superficie no permite enfocarla adecuadamente en toda su extensión, lo cual dificulta el análisis. Sin embargo, pueden observarse algunas diferencias entre las muestras de los ladrillos de las dos empresas. En LMS se observan varias partículas que destacan por sobre la matriz de color gris, de diferentes tamaños (hasta ≈ 1,5 mm), y

huecos de tamaño similar, donde posiblemente había partículas similares que quedaron expuestas en la otra superficie al producirse la fractura. Esto es menos evidente en LCS, en el que se observa una superficie más homogénea de color rojizo.

La Figura 3.9 muestra imágenes obtenidas por MEB/EED, a diferentes magnificaciones, de la superficie de fractura de los ladrillos secos de las dos empresas. Las mismas muestran la rugosidad característica de este tipo de superficie, sin que pueda distinguirse ningún aspecto diferencial entre ambas muestras, a excepción de la presencia de una mayor proporción de partículas finas en el ladrillo de LCS (de 10-20 µm, aproximadamente) que parecen estar sueltas sobre la superficie. Esta observación está en acuerdo con la mayor proporción de limo presente en la materia prima de LCS, de acuerdo con los datos reportados en la Tabla 3.13



(a) (b)

(c) (d)

Figura 3.9. Imágenes obtenidas por MEB de la superficie de fractura de muestras de los ladrillos secos, con diferente magnificación: LMS (a y b) y LCS (c y d).

La Figura 3.10 y presenta los mapeos obtenidos por MEB/EED sobre las superficies de fractura de los ladrillos secos, correspondientes a las imágenes de la Figura 3.9.b (LMS) y

3.9.d (LCS), respectivamente. No se observan diferencias significativas en cuanto a la proporción de los principales elementos identificados (Si, Al y K) entre los ladrillos de las dos empresas. Tampoco se observan diferencias marcadas en las proporciones de Fe, Ti, Ca y Mg, que se encuentran en cantidades menores en ambas muestras (una vez excluidos C y Au, provenientes de la preparación de la muestra, y normalizando respecto de Si). Las diferencias se aprecian principalmente en la distribución espacial: en el ladrillo LMS, Ca, Mg, Fe y Ti se concentran en agregados de mayor tamaño, mientras que en LCS se distribuyen de manera más uniforme y en agregados más pequeños. Esta distribución en agregados es consistente con la detección de mayores cantidades de rutilo (TiO_2) y hematita (Fe_2O_3) en LMS por DRX (Tabla 3.8), fases que se presentarían como partículas discretas. No obstante, el análisis por EDS corresponde a una única región de superficie no pulida, por lo que es semicuantitativo y su composición promedio depende de la presencia de agregados en el campo analizado

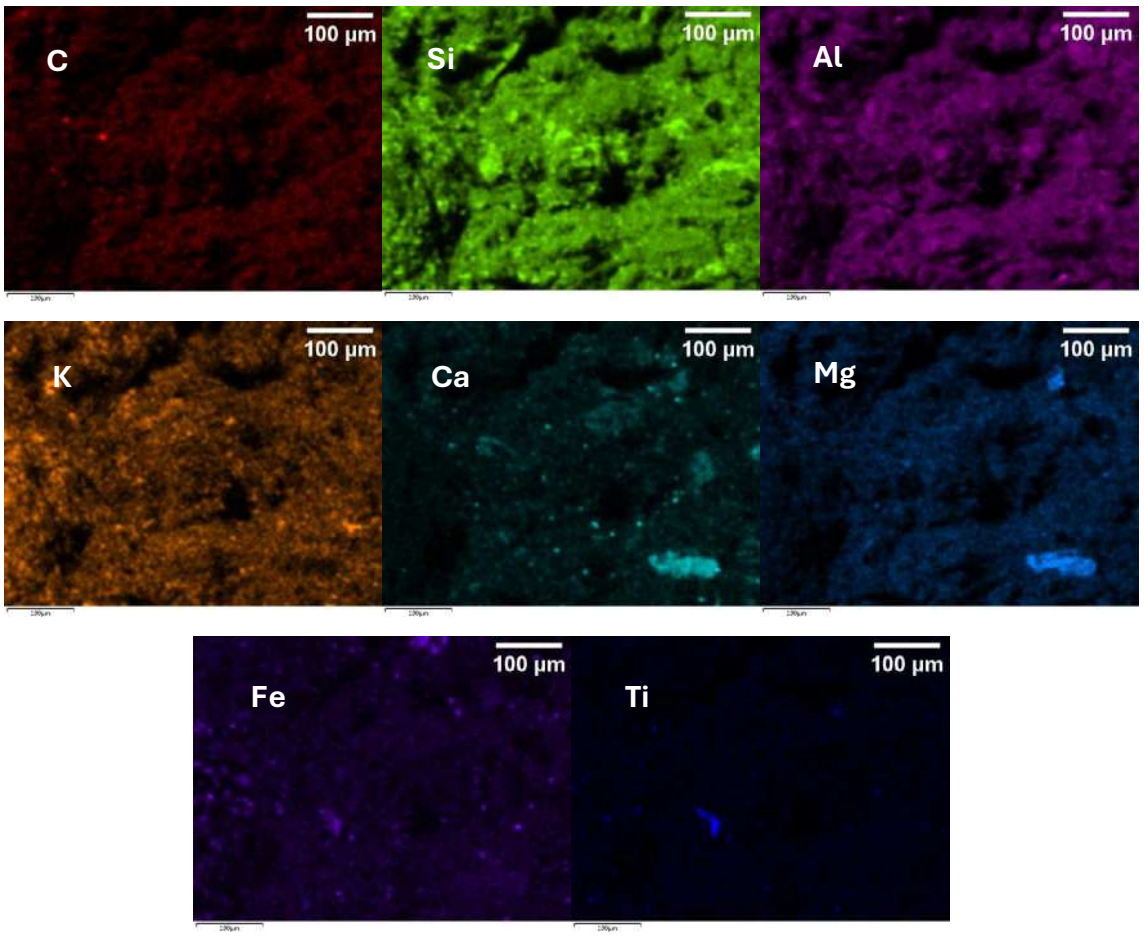


Figura 3.10. Mapeos obtenidos por MEB/EED de la superficie de fractura de la muestra LMS (Figura 3.9.b). Barra: 100 µm

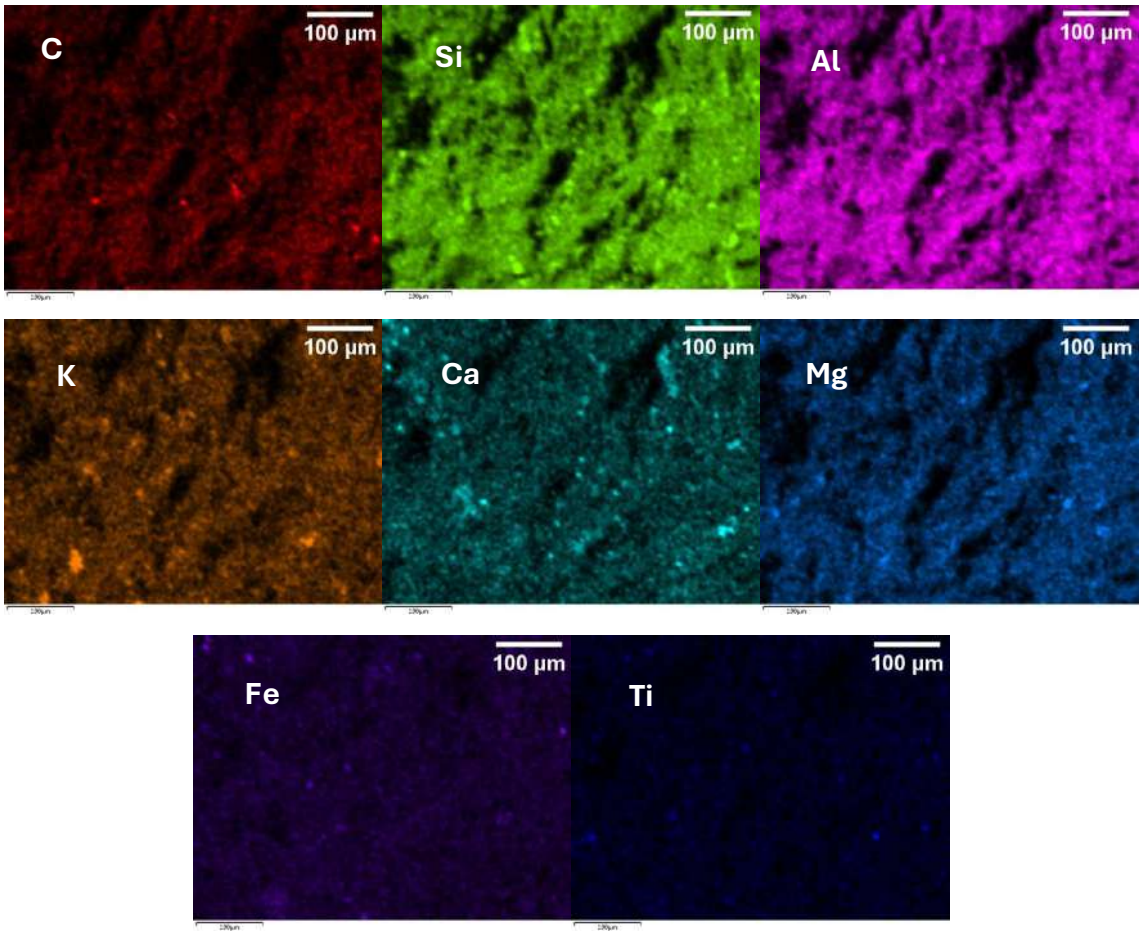


Figura 3.11. Mapeos obtenidos por MEB/EED de la superficie de fractura de la muestra LCS (Figura 3.9.d). Barra: 100 µm

Tabla 3.11. Elementos obtenidos por EDS.

Elemento	LMS		LCS	
	% peso	% atómico	% peso	% peso
O	62.62	75.89	51.90	66.96
Si	20.29	14.00	25.19	18.52
Al	8.24	5.93	10.39	7.95
Fe	4.20	1.46	5.46	2.02
K	1.58	0.79	2.52	1.33
Ca	1.13	0.54	1.27	0.65
Mg	0.77	0.61	1.63	1.38
Na	0.72	0.61	1.05	0.94
Ti	0.39	0.15	0.48	0.21
Mn	0.06	0.03	0.10	0.04
Total	100.00	100.01	99.99	100.00

3.2.2. Ladrillos cocidos

3.2.2.1. Análisis mineralógico cualitativo y cuantitativo

En la Figura 3.12 se presentan los difractogramas de las muestras provenientes de los ladrillos cocidos (LMC y LCC).

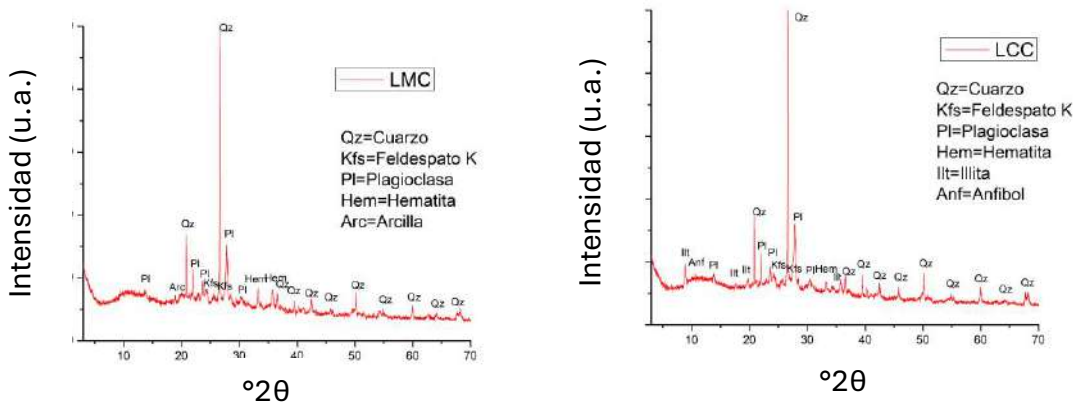


Figura 3.12. Difractogramas (a) LMC y (b) LCC.

A partir de los difractogramas de rayos X correspondientes a las muestras LMC y LCC, se identificaron las fases cristalinas presentes en ambos ladrillos de manera cualitativa. Como componentes no plásticos mayoritarios, se observan picos de alta intensidad asociados al cuarzo (Qz) (ICDD 01-079-1910) y a plagioclasa (Pl) (ICDD 01-076-1819) en ambas muestras.

Adicionalmente, se detectan como fases minoritarias la hematita (Hem) (ICDD 01-073-0603) y el feldespato potásico (Kfs) (ICDD 01-083-1604).

En la muestra LCC se identifican, además, picos correspondientes a illita (Illt) (ICDD 00-026-0911) y a un anfíbol (Anf) (ICDD 00-021-0149), los cuales no se encuentran presentes en el difractograma de la muestra LMC. Se detectan la presencia de picos atribuibles a un mineral arcilloso no identificado en LMC.

Se determinaron las composiciones mineralógicas de las muestras de los ladrillos cocidos LMC y LCC a partir de los resultados obtenidos por DRX empleando el método de Rietveld. A continuación, se presentan los resultados en la Tabla 3.10

Tabla 3.12. Composición mineralógica de ladrillos cocidos.

Fase	LMC	LCC
Cuarzo	37	35
Plagioclasa	39	42
Feldespato potásico	10	6
Hematita	13	7
Anfíbol	–	Trazas
Rutilo	-	–
Pirofilita	-	–
Caolinita	-	–
Illita	-	9

La composición del ladrillo cocido LMC resulta consistente con la proporción y naturaleza de las fases presentes en el ladrillo seco, a excepción de la ausencia de pirofilita. A la máxima temperatura de cocción usada, la deshidroxilación (también referida como 'pérdida de agua estructural') de la illita, la caolinita y la pirofilita, que ocurre entre 350-600°C, 500-600°C y

600-800°C, respectivamente, podrían producir un cambio significativo en la composición mineralógica de las fases principales, respecto a la del ladrillo seco. En el caso de la illita, el mineral mantiene su estructura durante la deshidroxilación, y se puede detectar como tal hasta 900-950°C por DRX, si bien se establece que en este rango térmico hay transformaciones, que incluyen la formación de fase líquida. Sin embargo, la estructura cristalina de la caolinita se pierde completamente cuando se elimina el agua estructural y, en consecuencia, dejan de registrarse los picos característicos de este mineral. Por su parte, el difractograma de la pirofilita no parece cambiar significativamente al producirse la deshidroxilación. Por estas razones, aún se detecta illita por DRX en el ladrillo cocido, mientras que no se identifican picos asignables a caolinita, siendo llamativa la ausencia de picos de pirofilita; es posible que, pese a los recaudos que se tuvieron en la obtención de muestras representativas, haya habido algún efecto de la heterogeneidad composicional del ladrillo sobre las fases detectadas por la técnica.

El resto de los componentes cristalinos identificados en el ladrillo seco, cuarzo, feldespato potásico y hematita, no sufren transformaciones químicas por debajo de 950°C, por lo cual se esperaría que fueran detectados por DRX en el ladrillo cocido. Las diferencias en las proporciones de cuarzo, el feldespato y la hematita entre los ladrillos seco y cocido pueden explicarse considerando que la técnica empleada sólo cuantifica la fase cristalina (pudiendo haberse formado fase vítrea no cuantificada por el método de Rietveld), el error inherente al método y la heterogeneidad propia de este tipo de productos, fabricados a partir de materias primas naturales. En particular, la determinación cuantitativa del cuarzo puede haber sido especialmente afectada por la presencia de la fase vítrea de silicato, ya que los picos de difracción más intensos característicos del primero se ubican en el rango de °2θ donde se registra la banda ancha asociada a la sílice amorfa. El significativo aumento en el contenido de hematita se debe a un mayor desarrollo de los cristales de este sólido con el incremento de la temperatura, que se produce en simultáneo con los procesos que tienen lugar en los minerales arcillosos, principalmente illita, en este rango térmico.

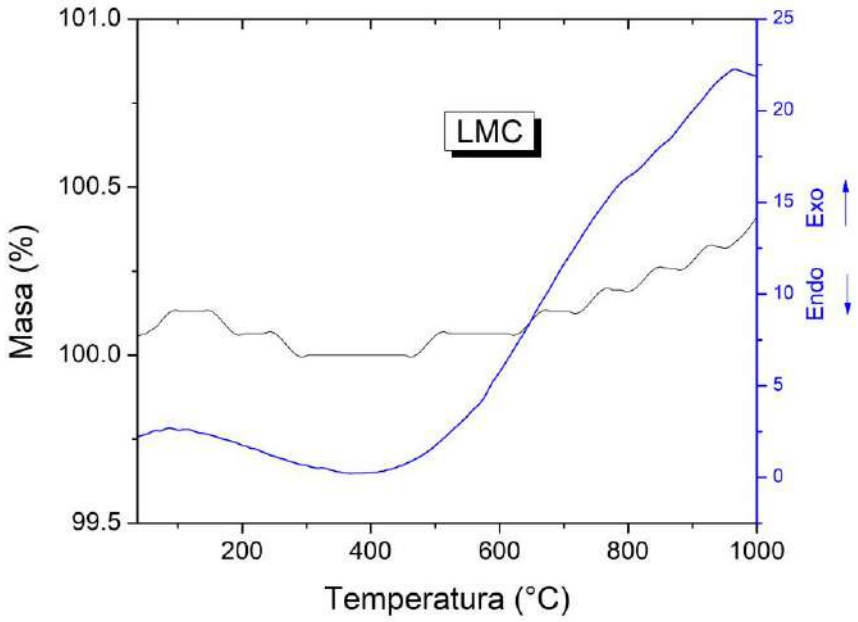
3.2.2.2. Análisis de la composición química

Se realizó la determinación de la composición química mediante fluorescencia de rayos X (FRX). En ambas muestras, LCM y LCC, se identificaron como elementos mayoritarios el silicio (Si) y el aluminio (Al), en concordancia con la naturaleza silicoaluminosa a de las materias primas empleadas (Alonso et al., 2011). Además, se detectó la presencia de hierro (Fe) perteneciente a la hematita. En menor proporción, se registraron elementos alcalinos y alcalinotérreos como potasio (K) y calcio (Ca), también se identificó titanio (Ti) vinculado al

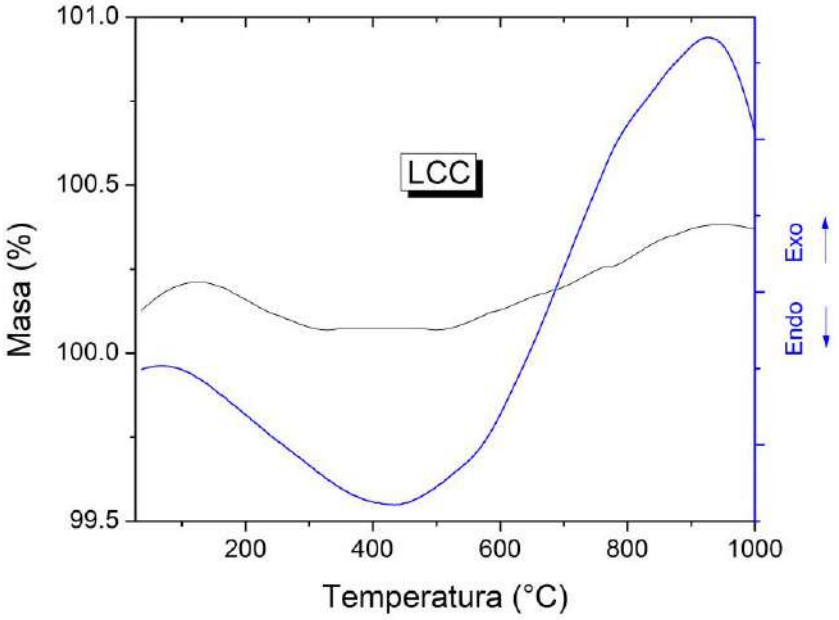
rutilo. Por otro lado, se observó la presencia de azufre (S) y cloro (Cl). Finalmente, se destaca que se detectó presencia de manganeso (Mn) únicamente en la muestra LCC.

3.2.2.3. Análisis térmico diferencial y termogravimétrico

En la Figura 3.13 Se presentan las curvas correspondientes al análisis termogravimétrico (ATG) y análisis térmico diferencial (ATD) de ambas muestras de ladrillo.



(a)



(b)

Figura 3.13. Curvas de ATG y ATD (a) LMC, (b) LCC.

Dado que la mayor parte de los procesos que ocurren durante la cocción de los ladrillos (secos) son irreversibles, no se registraron pérdidas de masa significativas en las curvas de ATG en ninguno de las muestras de los ladrillos cocidos.

Aun así, en los termogramas de ATD se observa: a) un pico endotérmico correspondiente a la transformación α→β del cuarzo (proceso reversible durante el enfriamiento), alrededor de los 577 °C, y un pico exotérmico atribuido a la formación y cristalización de la espinela en la illita y la caolinita a temperaturas por encima de 900 °C. Este último se desplaza hacia mayores temperaturas en el caso del ladrillo LMC respecto a la posición en la que aparece en el ladrillo seco LMS (974 °C respecto a 936 °C), lo cual no ocurre en el caso de LCC. Dicho desplazamiento podría atribuirse a un mayor avance previo de la formación de espinela durante la cocción del producto LMC, llevada a cabo a una temperatura ligeramente mayor, aunque también a modificaciones en la cinética de reorganización estructural inducidas por la menor proporción de minerales arcillosos. La cocción a una temperatura algo mayor podría haber favorecido una transformación más extensa de las fases de aluminosilicatos, reduciendo la cantidad de núcleos reactivos remanentes y dificultando los procesos difusivos durante el ensayo de ATD. En este caso, se esperaría una señal residual más débil, tal como se observa en el termograma obtenido. En cambio, en el ladrillo de LCC, el mayor contenido de illita y la menor temperatura de cocción habrían permitido conservar una mayor proporción

de material arcilloso parcialmente transformado, manteniéndose así la temperatura característica del efecto exotérmico asociado a la cristalización de dichas fases.

3.2.2.4. Determinación de densidad y porosidades

En la siguiente tabla se presentan los resultados de densidad aparente ($\rho_{aparente}$), porosidad abierta ($P_{abierta}$), porosidad total (P_{total}) y porosidad cerrada ($P_{cerrada}$), determinados mediante el método de Arquímedes en agua. Además, se incluye en la primera columna la densidad picnométrica (ρ_{pic}).

Tabla 3.13. Densidad picnométricas y aparentes, y porosidades aparentes, verdadera y cerradas de ladrillos cocidos.

Ladrillos	ρ_{pic} $[\frac{g}{cm^3}]$	$\rho_{aparente}$ $[\frac{g}{cm^3}]$	$P_{abierta}$ [%]	P_{total} [%]	$P_{cerrada}$ [%]
LMC	2,76 ± 0,03	1,89 ± 0,09	29 ± 3	32 ± 3	3,1 ± 0,2
LCC	2,77 ± 0,03	1,90 ± 0,01	27,6 ± 0,4	31 ± 1	3,6 ± 0,3

Los valores de densidad picnométrica medidas para ambos materiales resultó similar.

En cuanto a los parámetros determinados mediante el método de Arquímedes, no se observan diferencias significativas entre los ladrillos de ambas procedencias. La densidad aparente resulta levemente mayor en el ladrillo cordobés (1,90 g/cm³ frente a 1,89 g/cm³). En concordancia con esto, las porosidades del ladrillo local son ligeramente superiores: la porosidad aparente es de 29 % frente a 27,6 %, la porosidad verdadera de 32 % frente a 31 % y la porosidad cerrada de 3,6 % frente a 3,1 %.

Estas diferencias no resultan suficientes para justificar la marcada variación en la resistencia mecánica entre ambos materiales, siendo el ladrillo cordobés aproximadamente el doble de resistente que el local (70 u.a. frente a 120 u.a. respectivamente). En consecuencia, la diferencia en el comportamiento mecánico no puede atribuirse únicamente al porcentaje de porosidad, sino que podría estar relacionada con características microestructurales tales como el tamaño de poro, su distribución y su grado de interconexión.

Es interesante notar que, del análisis de los datos reportados en la Tabla 3.10 para los productos de ambas empresas, surge que la porosidad total de los ladrillos no se reduce durante la cocción, sino que, por el contrario, aumenta. Esto indica que los procesos que

dominan la evolución de este parámetro son aquéllos que implican una pérdida de masa, es decir, la descomposición de la materia orgánica y la pérdida de agua de los minerales arcillosos y la pirofilita, por sobre la eliminación de porosidad por sinterización. Además, es muy probable que ocurra microfisuración debido a la evolución de especies gaseosas (CO_2 y agua, principalmente) y a la contracción diferencial de las diferentes fases que componen los ladrillos, en especial durante el enfriamiento.

3.2.2.5. Análisis de la absorción de agua

LMS presentó una absorción de agua ligeramente mayor que el LCS (14,2 ± 0,3 % frente a 13,5 ± 0,2 %), comportamiento que resulta coherente con la mayor porosidad abierta determinada mediante el método de Arquímedes para el ladrillo marplatense (29 ± 3 % frente a 27,6 ± 0,4 %, Tabla 3.13), dado que la porosidad abierta e interconectada es la que determina la capacidad de absorción de agua del material. En general, una menor absorción de agua se asocia a materiales menos permeables, con mejor comportamiento mecánico y mayor durabilidad (Stępień et al., 2022). Sin embargo, la diferencia observada entre ambos ladrillos es pequeña y los intervalos de incertidumbre se solapan, por lo que no resulta suficiente para justificar por sí sola una diferencia significativa en la resistencia mecánica entre ambos productos.

3.2.2.6. Análisis Microestructural

En la Figura 3.14 se presentan las imágenes obtenidas con lupa binocular sobre las superficies de fractura de los ladrillos cocidos LMC y LCC. Además de la coloración, no se detectan cambios significativos en el aspecto de las superficies en comparación con los respectivos ladrillos secos, ni entre ambas muestras.

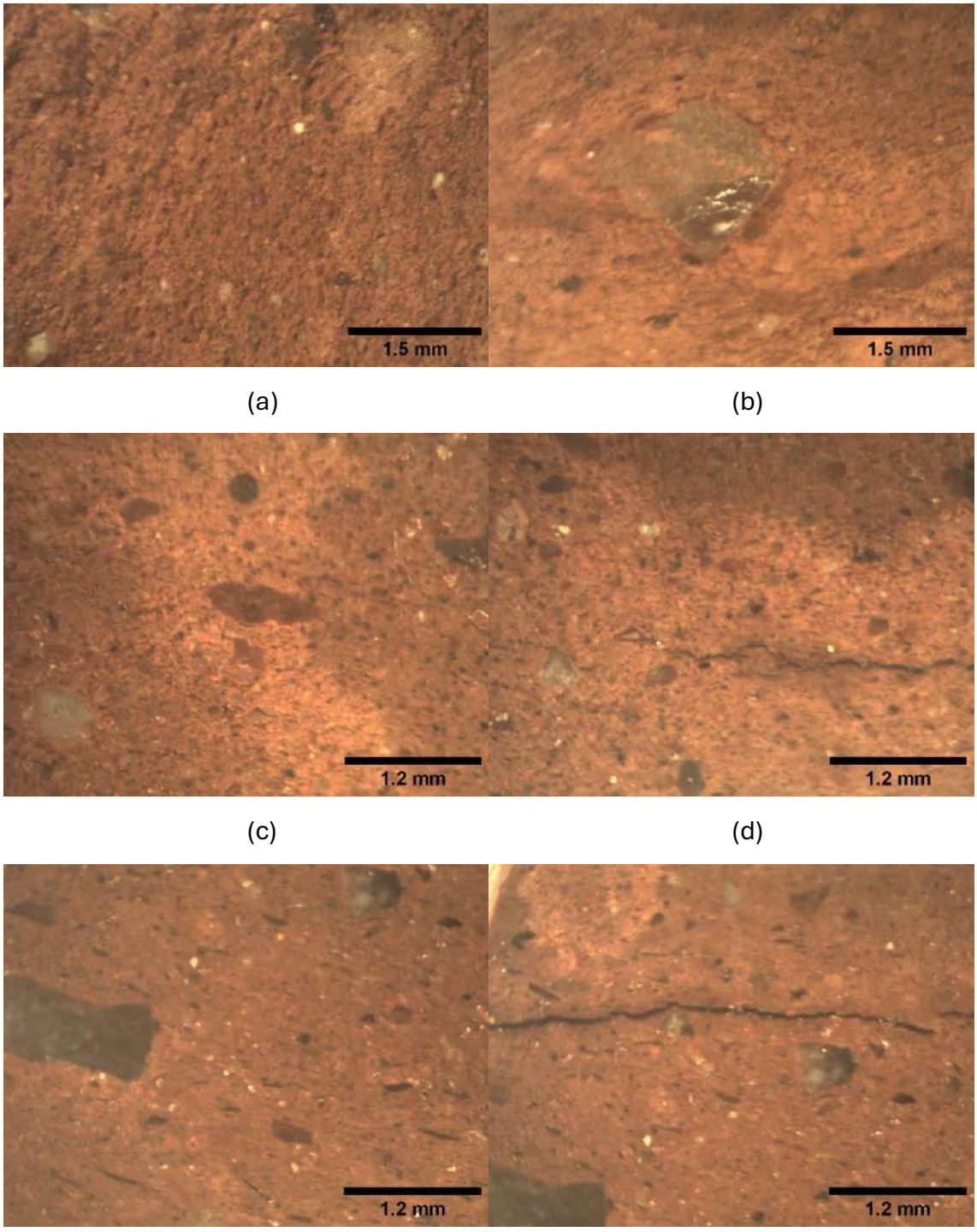


Figura 3.14. Imágenes de superficies pulidas de muestras de los ladrillos cocidos obtenidas con lupa binocular: LMC (a, b y c) y LCC (d, e y f). Barra: 1,2 mm.

En la superficie de LMC se distinguen partículas de distintos tamaños y se observa una mayor heterogeneidad superficial respecto al LCC. Si bien en ambos ladrillos se identifican partículas de tamaño similar en el rango más grueso (≈ 1,5 mm), la granulometría de las partículas de tamaño intermedio (< 0,1 mm) parece ser más fina en el LCC.

Para corroborar esta observación, se estimó la textura de la materia prima utilizada en la formulación del LMC a partir de la composición de la mezcla y el análisis textural de las tierras (M1 a M4), la arcilla Roja y la arcilla Roja San Manuel, asumiendo proporciones iguales de las cuatro tierras. En la Tabla 3.13 se comparan estos valores estimados con los datos experimentales de la materia prima del LCC. Se observa que las principales diferencias granulométricas se encuentran en las fracciones de limo y arena: la materia prima del LCC presenta una mayor proporción de limo (61,1 % frente a 40,5 %), mientras que la del LMC exhibe una contribución más elevada de la fracción arena (43,1 % frente a 23,1 %), siendo la fracción arcillosa similar en ambos casos (16,4 % y 15,8 %, respectivamente). Estos resultados son consistentes con la mayor heterogeneidad superficial observada en el LMC.

Tabla 3.14 Estimación de la textura de la materia prima de LMC, y datos experimentales de la materia prima de LCC.

		LMC	LCC
Fracción [% m/m]	Arcilla [< 2μm]	16,4	15,8
	Limo [2 - 50 μm]	40,5	61,1
	Arena [> 50 μm]	43,1	23,1

Por otra parte, en la Figura 3.15 se reportan imágenes de las superficies pulidas de las muestras de los ladrillos cocidos, obtenidas por microscopía óptica de luz reflejada (MOLR).

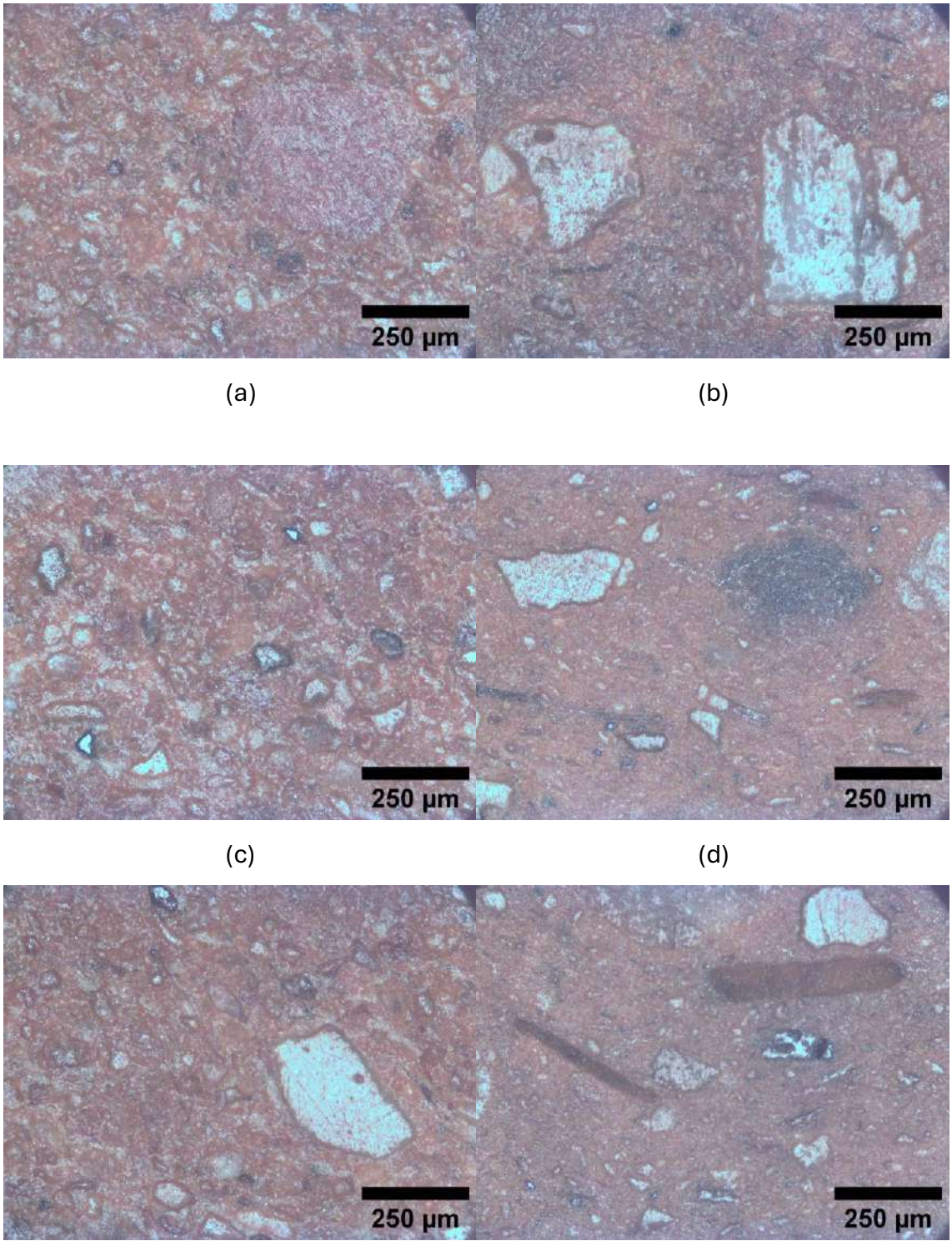
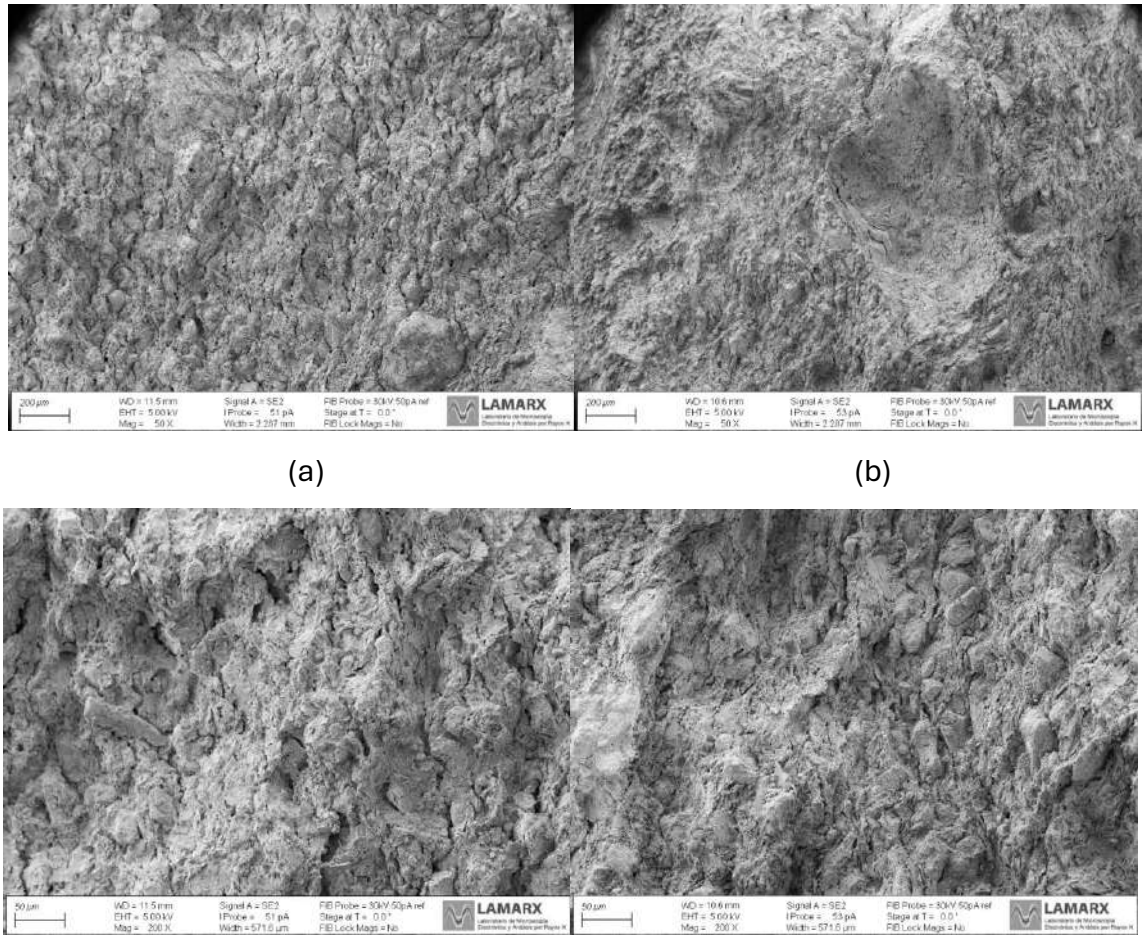


Figura 3.15. Imágenes de la superficie pulida de muestras de los ladrillos cocidos (10X) obtenidas por MOLR: LMC (a, c y e) y LCC (b, d y f). Barra: 250 µm.

En estas imágenes se ven más claramente las características particulares registradas en la

observación por lupa: la microestructura del ladrillo LCC se caracteriza por la presencia de partículas distinguibles de tamaño intermedio (< 0,1 mm, aproximadamente), y una menor proporción de partículas bastante más grandes, que alcanzan los 1,5 a 2 mm. Por otra parte, la principal diferencia con el ladrillo LCC se relaciona con el menor tamaño de la fracción de partículas de granulometría intermedia presentes en este producto.

En la Figura 3.16 se presentan las imágenes obtenidas por MEB de las superficies de fractura de las muestras de los ladrillos cocidos LMC y LCC. Respecto a los ladrillos secos de ambas empresas, se observa una matriz menos continua, más rugosa y con fisuras, aunque no se identifican las pequeñas partículas 'sueltas' presentes en los primeros. Las fisuras de la superficie de fractura de la muestra del ladrillo cocido LCC parecen más visibles y abiertas.



(a) (b)

(c) (d)

Figura 3.16. Imágenes obtenidas por MEB de la superficie de fractura de muestras de los ladrillos cocidos, con diferente magnificación: LMC. (a y b) y LCC (c y d).

En las Figuras 3.17 y 3.18 se presentan imágenes de MEB de las superficies pulidas de las

muestras de los ladrillos cocidos de las dos ladrilleras, obtenidas con diferentes magnificaciones y modos (SE2: electrones secundarios; BSD1: electrones retrodispersados). Las imágenes de la Figura 3.17 obtenidas con menor magnificación (a y b), confirman lo inferido de la observación óptica: una granulometría más gruesa de las partículas de tamaño intermedio en el ladrillo cocido de LMC, respecto a LCC. Por otra parte, la observación a mayor magnificación, y usando electrones retrodispersados (c y d), revela que la matriz del ladrillo LMC tiene más resina de embutido (del color gris más oscuro) entre las partículas que la que constituye el ladrillo cocido de LCC. Este hecho indicaría que en el primer caso se ha perdido más material durante las etapas previas al embutido de las muestras, muy posiblemente durante el corte, y el espacio que ha dejado se llenó con la resina. Además, el ladrillo cocido de LMC posee una porosidad aparente algo más elevada en comparación al ladrillo de LCC.

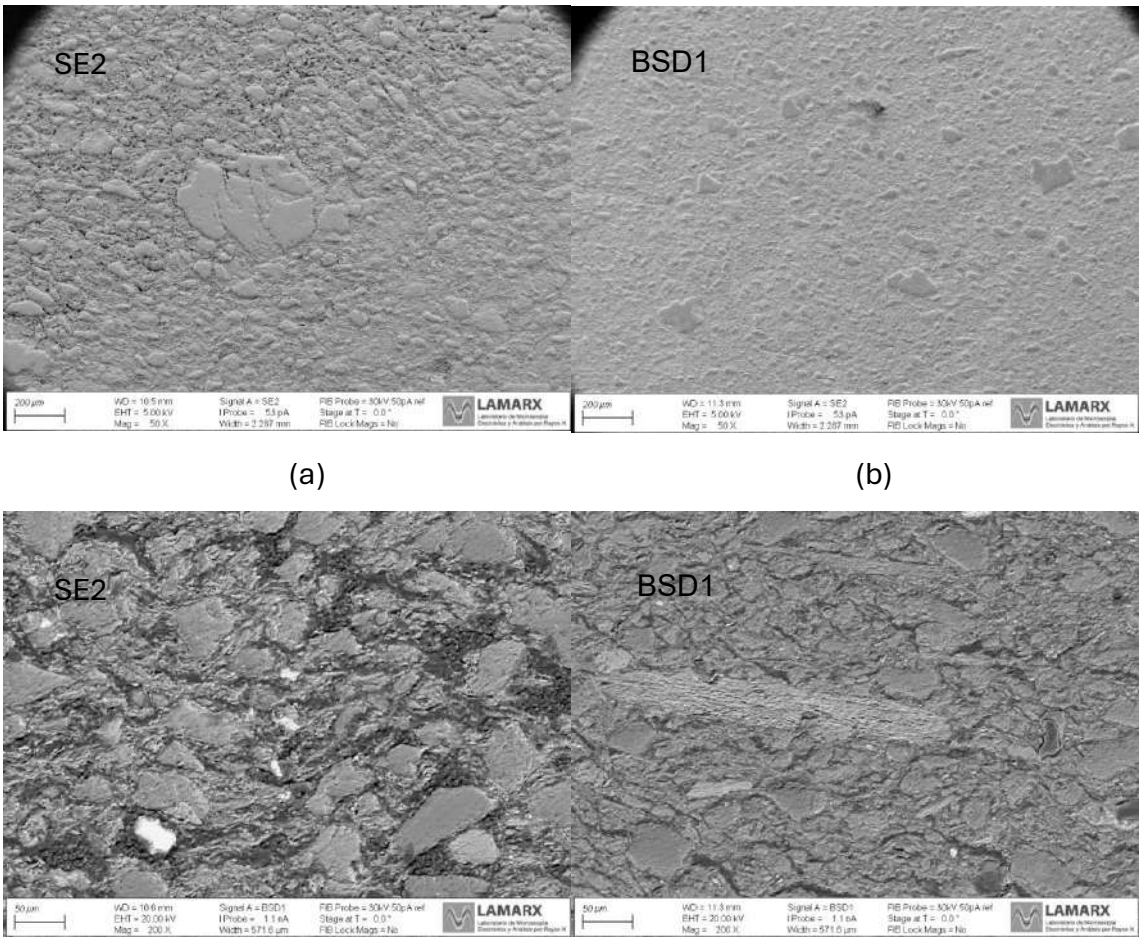
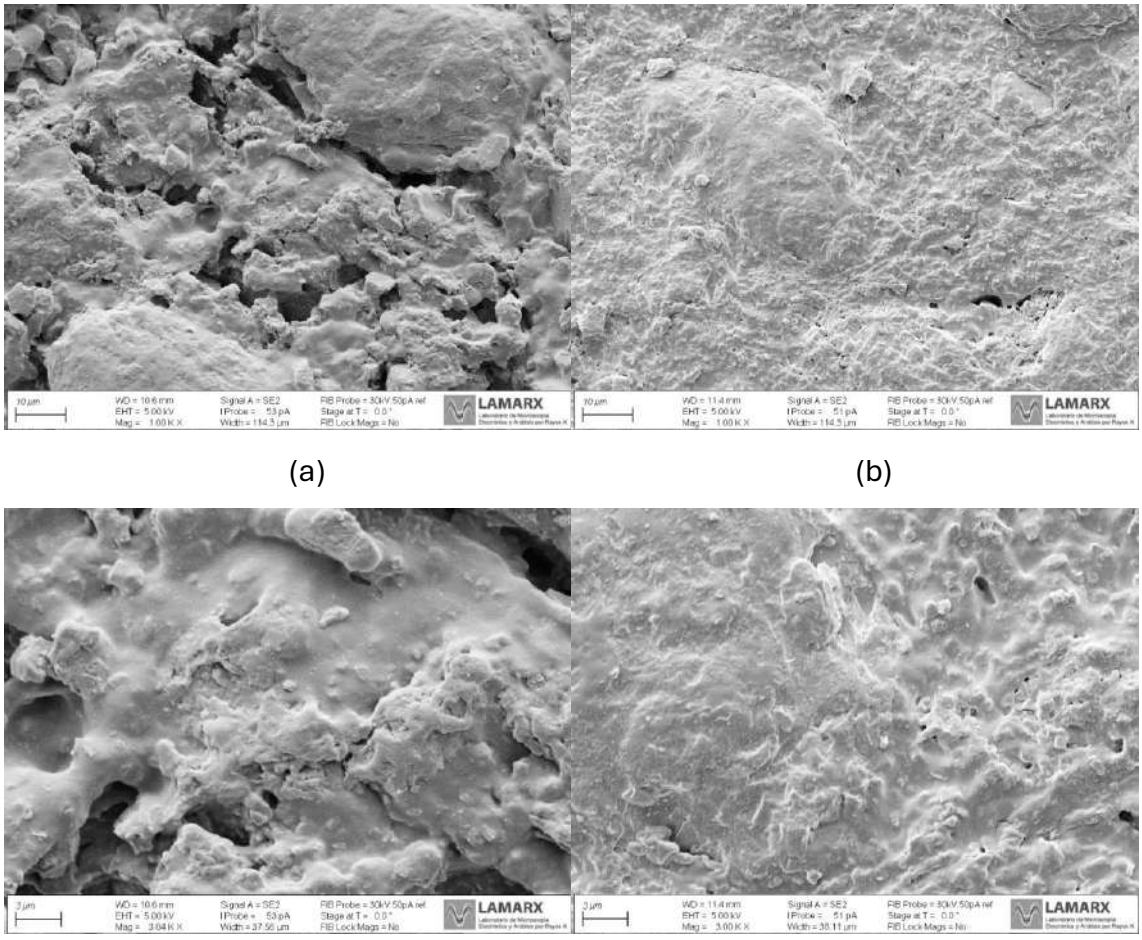


Figura 3.17. Imágenes obtenidas por MEB de la superficie pulida de muestras de los ladrillos cocidos, con diferente magnificación y modo de observación (SE2: electrones secundarios; BSD1: electrones retrodispersados): LMC (a y c) y LCC (b y d).

Las imágenes de la Figura 3.18, obtenidas con alta magnificación (1000X y 3000X) muestran diferencias entre la matriz de los ladrillos de las dos empresas. En ambos casos se observa una fase extendiéndose entre las partículas, que corresponde posiblemente a un líquido (viscoso) formado durante la cocción. La diferencia entre los ladrillos está en el grado de continuidad que alcanza la misma: mientras que en ladrillo de LMC sólo se observa en ciertas regiones, distinguiéndose aún partículas sin unir y, en consecuencia, bastante porosidad. En cambio, en el ladrillo de LCC esta fase es continua, las partículas son menos visibles, y se identifica una cantidad significativamente menor de poros.



(a) (b)

(c) (d)

Figura 3.18. Imágenes obtenidas por MEB de la superficie pulida de muestras de los ladrillos cocidos, con diferente magnificación (SE2: electrones secundarios) LMC (a y c) y LCC (b y d) (alta magnificación).

En las Figuras 3.19 y 3.20 se reportan los mapeos obtenidos por MEB/EED sobre las superficies pulidas de los ladrillos LMC (Figura 3.18.c) y LCC (Figura 3.18.d). La comparación de la distribución de los elementos en la superficie pulida de los ladrillos cocidos revela una mayor cantidad de C en el caso de la muestra de LMC, lo cual confirma que hay más resina de embutido entre las partículas. Otro aspecto diferencial entre los ladrillos fabricados en las

distintas empresas es la distribución de algunos elementos como Al y K, principalmente: en el ladrillo de LCC se encuentran en mayor proporción y más dispersos en la matriz, en comparación al ladrillo de LMC. Algo similar parece ocurrir para Na y Ca. Este hecho resulta consistente con la observación de la fase que habría sido un líquido (viscoso) durante la cocción, que resulta más continua en el ladrillo cocido de LCC, y en la que podrían estar disueltos los iones alcalinos (K y Na) y alcalinotérreos (Ca y Mg), junto con la sílice, que es el componente principal.

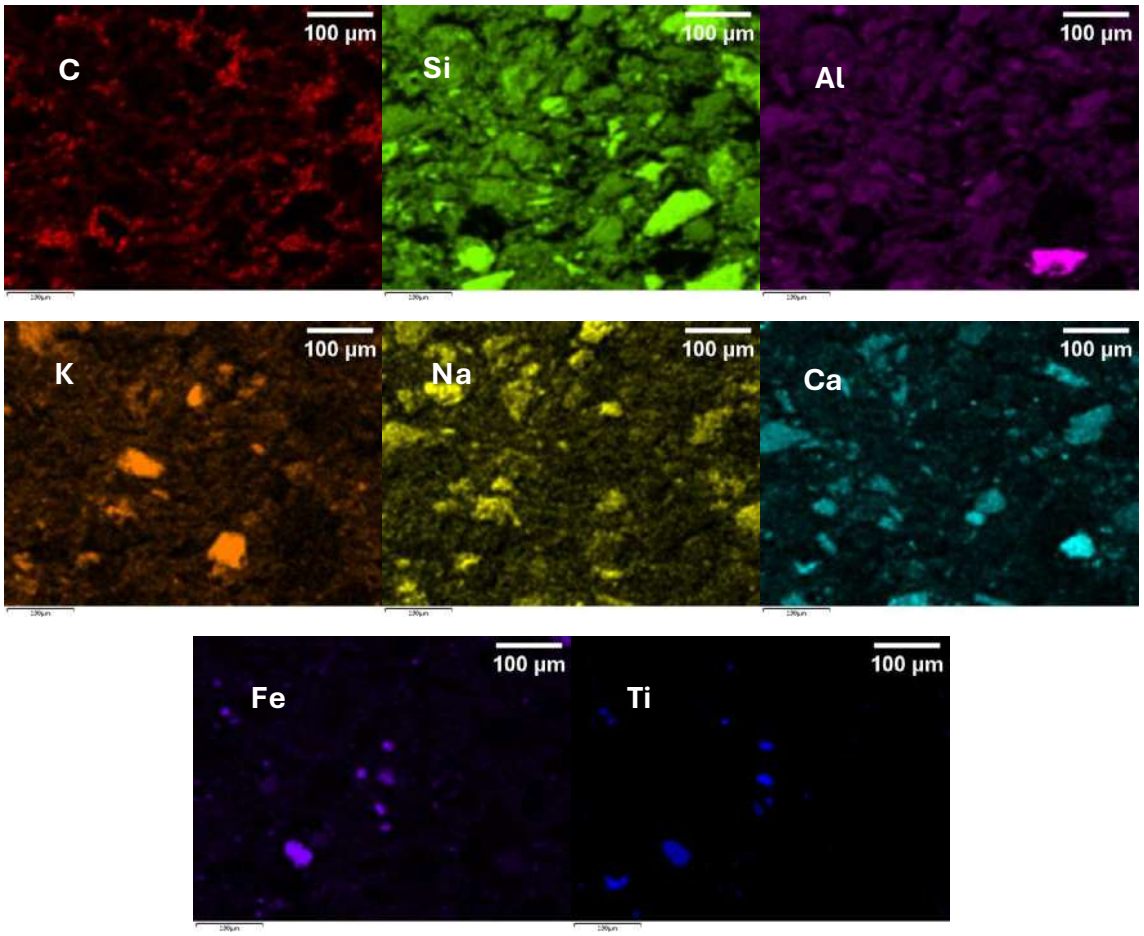


Figura 3.19. Mapeos obtenidos por MEB/EED de la superficie pulida de la muestra LMC. (Figura 3.18.c). Barra: 100 µm

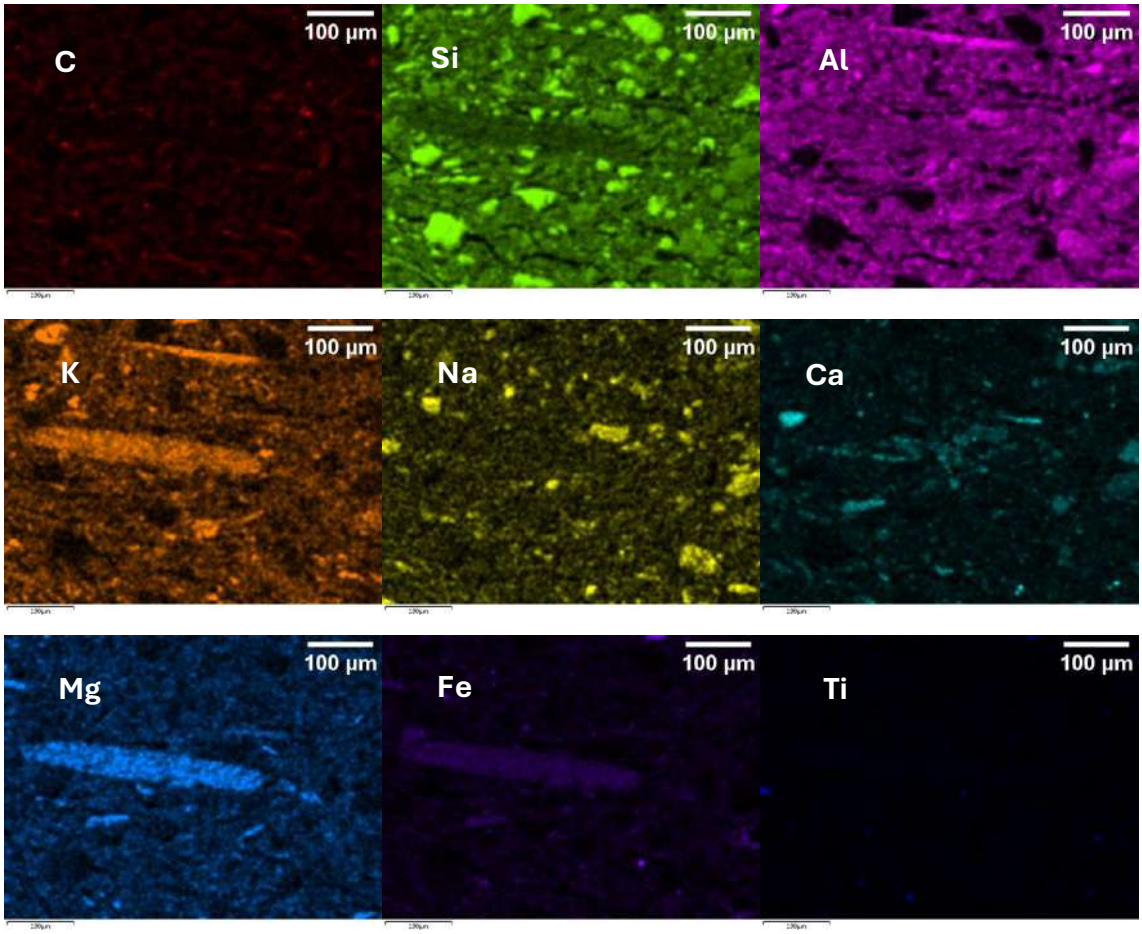


Figura 3.20. Mapeos obtenidos por MEB/EED de la superficie pulida de la muestra LCC. (Figura 3.18.d). Barra: 100 µm

La diferencia en la resistencia mecánica evaluada mediante un ensayo comparativo interno de planta y expresada en unidades arbitrarias (u.a.), entre ambos ladrillos secos fue un 7 % mayor en LCS respecto a LMS. Esta variación puede explicarse principalmente por la menor porosidad observada en LCS (Tabla 3.9), En este sentido, si bien existen diferencias en la composición mineralógica, así como en las condiciones operativas de conformado y secado, estos factores no tendrían una incidencia significativa en el comportamiento mecánico en estado seco frente al efecto dominante de la porosidad.

Sin embargo, en los ladrillos cocidos, la leve diferencia de porosidad (aparente, cerrada y total) resulta insuficiente para justificar el marcado incremento en este índice de resistencia mecánica, el cual alcanza 70 u.a. para LMC frente a 120 u.a. para LCC. El hecho de que la resistencia mecánica aumente notablemente a pesar del incremento simultáneo de la porosidad respecto al estado seco evidencia el rol determinante de la fase líquida generada durante la cocción. Las observaciones por microscopía electrónica de barrido confirman que

en LCC esta fase presenta una mayor continuidad, mejor distribución y un menor volumen de poros intergranulares, consolidando una matriz significativamente más cohesionada.

Durante la etapa de cocción a máxima temperatura, las principales contribuciones a la formación de la fase líquida de silicatos provienen de los fundentes presentes en el sistema. No obstante, los minerales arcillosos, particularmente la illita y en menor medida la caolinita, también participan en pequeña proporción en este proceso. La illita, debido a su contenido de potasio, favorece la formación incipiente de fase líquida a partir de aproximadamente 700 °C (McConville y Lee, 2005). Esto podría justificar una mayor proporción de fase líquida durante la cocción en el ladrillo de Córdoba. A su vez, la granulometría más fina de LCS incrementa la superficie de reactividad, facilitando la difusión de los iones alcalinos y alcalinotérreos en la fase líquida. Esto reduce la viscosidad del fundido a la temperatura de proceso, promoviendo su flujo por capilaridad, la humectación de las partículas no fundidas y la posterior cohesión de la matriz durante el enfriamiento.

Habiendo analizado las diferencias microestructurales entre ambos ladrillos, se evalúa el potencial aporte de las arcillas estudiadas en la fabricación de materiales de mayor resistencia. En este sentido, resulta destacable que las arcillas Mezcla, Roja y Ocre presentan contenidos de minerales arcillosos entre 34 % y 44 % m/m, (compuestos en aproximadamente un 90 % por illita) y una granulometría más fina en comparación con la arcilla Córdoba. Estas características favorecerían una mayor generación y fluidez de la fase líquida durante la cocción. Además, la baja presencia de materia orgánica en todas las arcillas constituye un aspecto positivo, ya que limita la generación de porosidad asociada a la evolución de volátiles.

Con el propósito de optimizar el comportamiento mecánico y la procesabilidad del material local, se propone la siguiente formulación de sólidos: 20 % de arcilla Mezcla, 20 % de arcilla Ocre y 60 % de tierras en igual proporción (M1, M2, M3 y M4). La selección de estas proporciones responde a un criterio de optimización granulométrica y mineralógica sin comprometer la procesabilidad industrial del cuerpo cerámico. La adición de un 40 % total de las arcillas seleccionadas permite elevar el contenido de illita de la pasta local del 14 % al 21,1 % (aproximándolo al 23 % del LCS de referencia), al tiempo que reduce la fracción arenosa del 43,1 % al 26,9 %. Esta proporción incorporada garantiza un aporte suficiente de finos e iones fundentes (K^+) para promover la formación de una fase vítrea continua durante la cocción, evitando simultáneamente los problemas de contracción excesiva en el secado que derivarían de un contenido superior de arcillas plásticas. A partir de esta formulación se estimó la composición mineralógica y la textura mostradas en las Tablas 3.15 y 3.16, respectivamente.

Tabla 3.15. Composición mineralógica de LCS, LMS y formulación propuesta.

	LCS	LMS	Propuesta
Cuarzo	31	20	36,55
Plagioclasas	38	35	31,8
Pirofilita	-	11	-
Feldespato potásico	7	7	5,55
Illita	23	14	21,1
Caolinita	-	7	1,4
Mineral arcilloso*	-	-	0,9
Pirita	-	-	0,15
Magnetita	-	-	1,05
Calcita	-	-	0,15
Rutilo	-	2	1,1
Hematita	-	4	0
Goethita	-	-	0,2
Esmectita	-	-	0
Anastasa	-		0
Total mineral arcilloso	23	21	23,4

*Nota: En la formulación propuesta el mineral arcilloso no identificado (proveniente de la muestra tierra M4)

Tabla 3.16. Estimación de textura de LCS, LMS y formulación propuesta

	LCS	LMS	Propuesta
Arcilla [<2 µm]	15,8	16,4	23,4
Limo [2-50 µm]	61,1	40,5	49,6
Arena [>50 µm]	23,1	43,1	26,91

En conjunto, la formulación propuesta permitiría obtener un material con un contenido de mineral arcilloso comparable al de referencia (LCS) y un nivel de plasticidad adecuado para el conformado. La notable reducción de la fracción de arena y el incremento de la fracción de limo (49,7 %) reducen la heterogeneidad granulométrica, aproximando la distribución textural de la mezcla local a la del LCS.

Si bien el contenido de cuarzo aumenta al 36,55 %, la ausencia de pirofilita y el aporte continuo de illita (21,1 %) aseguran la formación de la fase líquida necesaria para la sinterización. Por otro lado, la presencia minoritaria de pirita (0,15 %) y calcita (0,15 %) se encuentra en niveles lo suficientemente bajos como para no comprometer la integridad estructural del producto durante la cocción. En consecuencia, el balance entre la mayor finura granulométrica, la reducción de la fracción arenosa y el ajuste mineralógico valida a la formulación propuesta como una alternativa técnicamente viable para la producción de ladrillos de mayor desempeño mecánico

CONCLUSIONES

El análisis cuantitativo (DRX/Rietveld) determinó que el cuarzo es la fase mayoritaria en las cuatro arcillas estudiadas, observándose una ausencia total de feldespatos potásicos y plagioclasas. Por ello, su empleo industrial requiere necesariamente la combinación con las tierras locales (M1–M4) para incorporar los fundentes indispensables en la sinterización. Las arcillas Mezcla, Ocre y Roja presentan un elevado contenido de mineral arcilloso (34–44 % m/m), compuesto predominantemente por illita (~90 %), lo que favorece la formación de fase vítrea y la plasticidad. En contraste, la arcilla Yaraví resulta la menos apta para la conformación en verde (pre-cocción) debido a su menor contenido arcilloso (23 % m/m) y al predominio de caolinita. Cabe destacar la ausencia de fases perjudiciales como pirita o calcita en todas las muestras.

El análisis textural posiciona a las arcillas Ocre y Mezcla como las materias primas más favorables para la densificación durante la cocción, debido a su elevada fracción fina y bajo contenido de arena, presentando la arcilla Ocre la mayor similitud con la materia prima cordobesa de referencia. La baja presencia de materia orgánica (< 0,11% m/m) y las reducidas pérdidas de masa observadas durante el análisis térmico (2,32 a 2,69 %) aseguran un proceso de cocción estable, minimizando la generación de porosidad residual. Por su parte, la evaluación de plasticidad (Atterberg) clasificó a las muestras como materiales de baja a media plasticidad (con un valor máximo de IP = 13,1 para la arcilla Ocre). La incapacidad de las arcillas Roja, Mezcla y Yaraví puras para lograr una extrusión aceptable por sí solas confirma la necesidad de ajustar el sistema mediante la formulación mixta propuesta.

La comparación entre los ladrillos en estado seco reveló que, si bien ambos presentan niveles de fundentes similares, el ladrillo local (LMS) contiene pirofilita y una menor proporción de cuarzo en comparación con el cordobés (LCS). Esta diferencia mineralógica provoca que el LMS experimente una mayor pérdida de masa total durante el tratamiento térmico, asociada principalmente a la deshidroxilación de la pirofilita entre 580 °C y 960 °C. En términos microestructurales, el LCS exhibe una matriz significativamente más homogénea y fina, en concordancia con su mayor fracción de limo y arcilla. Por el contrario, el LMS muestra una estructura heterogénea caracterizada por la presencia de partículas gruesas (~1,5 mm) cuya interacción con la matriz es deficiente, favoreciendo su desprendimiento durante la fractura.

El análisis térmico diferencial (ATD) de las muestras cocidas evidenció la estabilidad alcanzada tras la sinterización, registrándose como únicos eventos significativos la transformación polimórfica reversible del cuarzo y la formación de espinela a partir de los productos de deshidroxilación de la illita y la caolinita, sin variaciones adicionales de masa en

el análisis termogravimétrico (ATG). Por DRX, la destrucción de las estructuras arcillosas se tradujo en un incremento relativo de las fases cristalinas estables (cuarzo, feldespatos, plagioclasas y hematita) y en la generación de una fase vítrea no cuantificable por Rietveld.

En cuanto a las propiedades físicas, ambos ladrillos experimentaron un aumento de la porosidad y la absorción de agua respecto de su estado seco, siendo la densidad picnométrica por Arquímedes ligeramente superior en LCC. No obstante, esta escasa diferencia en porosidad volumétrica resulta insuficiente para justificar la brecha en la resistencia mecánica entre ambos materiales.

El análisis microestructural integrado (lupa óptica, MOLR y MEB/EDS) permitió identificar la causa fundamental de este comportamiento: mientras que ambos materiales presentan inclusiones gruesas (~1,5 mm), el LCC posee una matriz intermedia significativamente más fina y continua gracias a su mayor aporte de limo. A altas magnificaciones (MEB), la fase vítrea en LCC muestra un desarrollo superior, extendiéndose de manera continua entre las partículas con una menor porosidad intergranular. Los mapeos por EDS confirmaron en LCC una mayor concentración y dispersión homogénea de metales alcalinos y alcalinotérreos en el fundido, lo que promovió una sinterización por fase líquida más efectiva y explica la mayor resistencia mecánica del producto cordobés.

En síntesis, la mayor calidad del ladrillo de referencia (LCS/LCC) radica en su textura más fina y su mayor contenido de illita. En este marco, las arcillas Mezcla y Ocre destacan como las alternativas tecnológicas más viables para optimizar el producto local, al superar a la arcilla utilizada actualmente (Roja Cantera Ross) en contenido de minerales arcillosos y presentar una granulometría más fina que la de la arcilla cordobesa, lo que favorece un empaquetamiento más denso. Además, el comportamiento térmico de estas arcillas resulta marcadamente más estable que el de la pasta local: la ausencia de pirofilita y el bajo contenido de materia orgánica eliminan los eventos de deshidroxilación severa a altas temperaturas y reducen las pérdidas de masa por volátiles, minimizando significativamente el riesgo de fisuración durante la cocción.

A partir de estos hallazgos, se valida técnicamente la propuesta de formulación compuesta por un 20 % de arcilla Mezcla, 20 % de arcilla Ocre y 60 % de tierras locales (M1–M4 en partes iguales). Esta mezcla permite igualar el contenido de illita del material de referencia (21,1 % frente al 23 % del LCS) y optimizar la granulometría de la pasta local, constituyendo una alternativa tecnológicamente viable para la producción de ladrillos de mayor desempeño mecánico

BIBLIOGRAFÍA:

Alonso-Santurde, R., Coz, A., Viguri, J. R., & Andrés, A. (2012). *Recycling of foundry by-products in the ceramic industry: Green and core sand in clay bricks.* Construction and Building Materials, 27(1), 97–106. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.022

Andrade, F. A., Al-Qureshi, H. A., & Hotza, D. (2010). *Measuring the plasticity of clays: A review.* Applied Clay Science, 51(1–2), 1–7, https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.10.028

Bain, J. A. (1971). *A plasticity chart as an aid to the identification and assessment of industrial clays.* Clay Minerals, 9(1). 1–17, https://doi.org/10.1180/claymin.1971.009.1.01

Bish, D. L., & Howard, S. A. (1988). Quantitative phase analysis using the Rietveld method. *Journal of Applied Crystallography*, *21*(2), 86–91[cite: 1]. https://doi.org/10.1107/S002188988800122X

Bouyoucos, G.J. (1962). *Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analysis of Soils.* Agronomy Journal, 54.http://dx.doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x

Brownell, W.E. (1958). *Efflorescence Resulting from Pyrite in Clay Raw Materials.* Journal of the American Ceramic Society, 41(7), 261-266 https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1958.tb13552.x

Casagrande, A. (1948). *Classification and Identification of Soils*. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 113, 901-930.

Claudel, H. H. A., Yves, O. R., Rolland, D., Salomon, N. E. P., Parfait, T. C., Florent, B., & Theodore, T. (2025). *Thermomechanical and physicochemical investigation of raw clay bricks derived from Nomayo clay and palm shell powder lignocellulosic material.* Scientific Reports, 15(1), Article 29540. https://doi.org/10.1038/s41598-025-13839-x

Grim, R. E. (1968). *Clay mineralogy* (2nd ed.). McGraw-Hill.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2007). *Suelos: Determinación del límite líquido (LL) y del límite plástico (LP) de una muestra de suelo. Índice de fluidez (IF) e índice de plasticidad (IP)* (Norma IRAM 10501:2007).

Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2024). *Ladrillos cerámicos para mampostería. Definiciones* (Norma IRAM 12502).

Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2005). *Ladrillos y bloques cerámicos para la construcción de tabiques y muros. Parte 2: Perforados y huecos* (Norma IRAM 12566-2).

Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2026). *Ladrillos y bloques cerámicos para la construcción de muros. Método de ensayo para la determinación de la capacidad de absorción de agua por inmersión en agua fría* (Norma IRAM 12588).

Irassar, E. F., Tironi, A., Bonavetti, V. L., Trezza, M. A., & Castellano, C. C. (2019). *Thermal treatment and pozzolanic activity of calcined clay and shale.* ACI Materials Journal, 116(4), 133–143. https://doi.org/10.14359/51716717

Laird, R. T., & Worcester, M. (1956). *The inhibiting of lime blowing.* Transactions of the British Ceramic Society, 55, 545–563.

Lewo Nkondi, B., Azama, N., Blaysat, B., de Baynast, H., & Moutou Pitti, R. (2025). *Fired clay bricks made by incorporating organic additives: A review.* Case Studies in Construction Materials, 23, Article e05037. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05037

Mahmoudi, S., Srasra, E., & Zargouni, F. (2014). *Composition and ceramic properties of carbonate-bearing: Illitic clays from north-eastern Tunisia. Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(6), 5729–5737. https://doi.org/10.1007/s13369-014-1145-0

E. A. Mari. *Los Materiales Cerámicos*. Ed. Alsina, Buenos Aires, Argentina (1998).

Feeney, C. J., Bentley, L., De Rosa, D., Panagos, P., Emmett, B. A., Thomas, A., & Robinson, D. A. (2024). Benchmarking soil organic carbon (SOC) concentration provides more robust soil health assessment than the SOC/clay ratio at European scale. *Science of the Total Environment*, *951*, Artículo 175642. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175642

McConville, C. J., & Lee, W. E. (2005). *Microstructural development on firing illite and smectite clays compared with that in kaolinite.* Journal of the American Ceramic Society, 88(8), 2267–2276. https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2005.00390.x

Moongon Obam, B. I., Mache, J. R., Balo Madi, A., Manjia, M. B., & Fagel, N. (2026). Assessment of the suitability of clay materials from the Sudano-Sahelian zone of Cameroon for brick production. *Discover Applied Sciences*, *8*(1), Article 790. https://doi.org/10.1007/s42452-026-08679-x

Rocha Rangel, E. (2005). *Introducción a materiales cerámicos.* Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Departamento de Materiales

Reed, J. S. (1995). *Principles of ceramics processing* (2.ª ed.). John Wiley & Sons

Reeves, G. M., Sims, I., & Cripps, J. C. (Eds.). (2006). Clay materials used in construction (Geological Society Engineering Geology Special Publication No. 21). The Geological Society.

Rivas González, M., & Conconi, S. (2024). *Propiedades térmicas de arcillas, discos experimentales y cerámicas arqueológicas. El caso de la Depresión del río Salado*

bonaerense (Argentina). Arqueología, 30(3), Article 13401. https://doi.org/10.34096/arqueologia.130.n3.13401

SACMI, & Asociación Española de Técnicos Cerámicos. (2001). *Tecnología cerámica aplicada* (A. van Gelder, trad.; Vol. 2). Faenza Editrice Ibérica.

Searle, A. B. (1911). *Modern brickmaking.* Scott, Greenwood & Son

Sonuparlak, B., Sarikaya, M. and Aksay, I.A. (1987), *Spinel Phase Formation During the 980°C Exothermic Reaction in the Kaolinite-to-Mullite Reaction Series.* Journal of the American Ceramic Society, 70: 837-842. https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1987.tb05637.x

Stępień, P., Spychał, E., & Skowera, K. (2022). *A comparative study on hygric properties and compressive strength of ceramic bricks.* Materials, 15(21), Artículo 7820. https://doi.org/10.3390/ma15217820

USDA Natural Resources Conservation Service (NRCS). (2017). *Soil Survey Manual. U.S. Department of Agriculture*, Handbook 18.

Wang, S., Gainey, L., Mackinnon, I. D. R., Allen, C., Gu, Y., & Xi, Y. (2022). *Thermal behaviors of clay minerals as key components and additives for fired brick properties: A review. Journal of Building Engineering*, 66, artículo 105802. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105802

Wentworth, C.K. (1922) *A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments.* Journal of Geology, 30, 377-392. https://doi.org/10.1086/622910

Winkler, G. F. (1955). *La calidad de las arcillas y su composición granulométrica.* Materiales de Construcción, 66, (5). https://doi.org/10.3989/mc.1955.v05.i066.2060