



Universidad de Oviedo

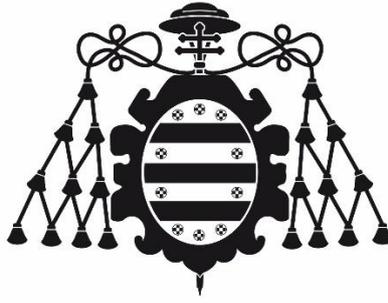
DEPARTAMENTO DE
EXPLOTACIÓN Y PROSPECCIÓN DE
MINAS

Programa de Doctorado en Minería, Obra
Civil y Medio Ambiente

TESIS DOCTORAL

*VALORIZACIÓN DE
RESIDUOS
SIDERÚRGICOS:
ESCORIAS DE ACERÍA LD,
LODOS DE HORNO ALTO
Y LODOS DE ACERÍA LD;
EN LA INDUSTRIA
CERÁMICA LADRILLERA*

Carlos Álvarez Pérez



Universidad de Oviedo

DEPARTAMENTO DE EXPLOTACIÓN Y PROSPECCIÓN DE
MINAS

Programa de Doctorado en Minería, Obra Civil y Medio Ambiente

TESIS DOCTORAL

*VALORIZACIÓN DE RESIDUOS SIDERÚRGICOS: ESCORIAS DE
ACERÍA LD, LODOS DE HORNO ALTO Y LODOS DE ACERÍA
LD; EN LA INDUSTRIA CERÁMICA LADRILLERA*

Autor: Carlos Álvarez Pérez

Directores: Teresa Alonso Sánchez

Francisco Blanco Álvarez

Septiembre, 2015



RESUMEN DEL CONTENIDO DE TESIS DOCTORAL

1.- Título de la Tesis	
Español/Otro Idioma: VALORIZACIÓN DE RESIDUOS SIDERÚRGICOS: ESCORIAS DE ACERÍA LD, LODOS DE HORNO ALTO Y LODOS DE ACERÍA LD; EN LA INDUSTRIA CERÁMICA LADRILLERA	Inglés: VALORIZATION OF STEEL INDUSTRY WASTE: BOF SLAG, BLAST FURNACE SLUDGE AND BOF SLUDGE; IN THE CERAMIC BRICK INDUSTRY

2.- Autor	
Nombre: CARLOS ALVAREZ PEREZ	DNI/Pasaporte/NIE:
Programa de Doctorado: Minería, obra civil y medio ambiente	
Órgano responsable: EXPLOTACION Y PROSPECCION DE MINAS	

RESUMEN (en español)

La industria siderúrgica que utiliza la ruta integral para la producción de acero, consume una gran cantidad de materias primas y energía, al mismo tiempo que genera en el proceso de fabricación de acero, un considerable volumen de residuos.

Por otro lado, la industria cerámica ladrillera, emplea como materia prima, principalmente arcillas y en menor medida otros materiales como desgrasantes.

Los niveles de calidad de las arcillas que habitualmente se consumen en la fabricación de cerámica estructural, son menores a los exigidos para otro tipo de productos cerámicos, ya que en las arcillas se tolera la presencia de impurezas, permiten que la asimilación de flujos de residuos provenientes de otras industrias sea menos problemático. Al mismo tiempo, la industria cerámica ladrillera posee la capacidad de admitir como materias primas a materiales o sustancias de diferente procedencia, como en este caso pueden ser los residuos siderúrgicos, sin tener que realizar modificaciones sustanciales en su proceso productivo. Además, la fabricación de cerámica estructural, al ser un proceso de transformación térmica, los residuos que se incorporen al proceso, quedarán fijados mediante mecanismos de ceramización o encapsulación, dependiendo de las granulometrías, aislando al residuo del medio.

Por todas estas razones, parece lógico pensar en la posibilidad de establecer una sinergia industrial, mediante la valorización de los residuos siderúrgicos en la fabricación de cerámica estructural.

De este modo, los residuos siderúrgicos de estudio en esta investigación, adquirirán un valor añadido, abandonando su consideración como residuos y calificándose como sub-productos. Contribuyendo a la disminución del impacto medioambiental, tanto por parte



de la industria siderúrgica, al reducir el volumen de residuos generados, aprovechando en parte estos materiales para la fabricación de ladrillos, y ayudando a la liberación de los espacios antes ocupados por los depósitos y verederos de las escorias de acería LD, los lodos de horno alto y los lodos de acería LD; así como de la reducción de la potencial afectación del suelo por contaminantes. Como por parte de la industria cerámica ladrillera, ya que se consumirá un menor volumen de materias primas en el proceso de fabricación, con el aprovechamiento potencial como recursos de estos residuos.

Con la valorización de estos residuos siderúrgicos, se pretende abrir una posibilidad más, sumar en definitiva, al resto de medidas adoptadas o que se puedan adoptar en el futuro, para reducir el impacto medioambiental producido, minimizando, reutilizando y valorizando estos residuos.

RESUMEN (en Inglés)

The steel industry that employs the integrated route for steel production consumes a great quantity of raw materials and energy, simultaneously generating a notable volume of residues in this process.

Besides, the ceramic brick industry primarily uses clays and, to a lesser extent, other materials (e.g. degreasing agents) as raw materials.

Given that the quality levels of the clays that are generally consumed in structural ceramic manufacturing are lower than those required for other types of ceramic products (as impurities are tolerated in clays), the assimilation of flows of residues from other industries is less problematic in this process than in others. At the same time, the ceramic brick industry is capable of admitting materials and substances coming from different sources as raw materials (e.g., in our case, steel residues) without the need to make any substantial modification in its production process. Moreover, given that manufacturing of structural ceramics is a thermic transformation process, residues incorporated into it will stay fixed through ceramization or encapsulation mechanisms –depending on granulometries–, isolating the residue from the environment.

For all the aforementioned reasons, it seems logical to consider the possibility of establishing an industrial synergy through the valorization of steel residues in the manufacturing of structural ceramics.



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Vicerrectorado
de Internacionalización y Postgrado



This way, value will be added to steel residues studied in this research, so they will no longer be considered a residue, but a by-product. This will contribute to a reduction in their environmental impact, both in the steel and ceramic brick industries. On the one hand, in the steel industry the volume of residues will diminish –because these materials may be partly used for brick manufacturing–, spaces previously occupied by deposits and dumps of BOF slag, blast furnace sludge and BOF sludge will be freed, and the potential contamination of soil will be reduced. On the other hand, the production process in the ceramic brick industry will consume a lower volume of raw materials, as those residues might potentially be used as inputs in the process.

By minimizing, reusing and putting those steel residues in value we intend to open up a new alternative, adding to measures that have already been or may be adopted in the future in order to reduce their environmental impact.

“Donde hay un sueño, hay un camino”

Proverbio africano.

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis dos directores de tesis, D. Francisco Blanco Álvarez y D^a. Teresa Alonso Sánchez, la confianza depositada en mí, sus consejos y su saber, que a todas luces, me han ayudado a concluir con éxito este viaje. Gracias Teresa, gracias Paco.

También, quiero darle las gracias a mi compañero de trabajo en el laboratorio durante dos años, D. José Luis Antuña Albuerne. Gracias Jose por tu ayuda y el buen ambiente de trabajo que se creó, lo que nos reíamos con aquellas interminables tablas Excel.

Quiero agradecer a Arcelor Mittal el haber lanzado en su día, el Proyecto ZeroRes, dándome la oportunidad de trabajar en un macroproyecto de I+D de gran interés, así como el proporcionar todos los materiales residuales necesarios para llevar a cabo las líneas de investigación asignadas. Muchas gracias a todas las personas del Centro de I+D de Avilés con las que tuve el placer de trabajar.

Muchas gracias a la empresa CEMESA, por abrirnos sus puertas y suministrar la arcilla necesaria para la fabricación de todas las piezas cerámicas. Agradecer también a la empresa Cerámica La Espina, su total colaboración para poder llevar a cabo la realización de la prueba industrial.

Asimismo, me gustaría dar las gracias al Laboratorio de Cementos y al Laboratorio de Metalogenia e Investigación de Yacimientos, de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Oviedo, ya que han sido fundamentales para poder llevar a cabo las tareas de investigación.

Por último, quiero agradecer a mi familia y mis amigos, el apoyo incondicional que me habéis dado en todo momento. Muchas gracias a todos.

Resumen

La industria siderúrgica que utiliza la ruta integral para la producción de acero, consume una gran cantidad de materias primas y energía, al mismo tiempo que genera en el proceso de fabricación de acero, un considerable volumen de residuos.

Por otro lado, la industria cerámica ladrillera, emplea como materia prima, principalmente arcillas y en menor medida otros materiales como desgrasantes.

Los niveles de calidad de las arcillas que habitualmente se consumen en la fabricación de cerámica estructural, son menores a los exigidos para otro tipo de productos cerámicos, ya que en las arcillas se tolera la presencia de impurezas, permiten que la asimilación de flujos de residuos provenientes de otras industrias sea menos problemático. Al mismo tiempo, la industria cerámica ladrillera posee la capacidad de admitir como materias primas a materiales o sustancias de diferente procedencia, como en este caso pueden ser los residuos siderúrgicos, sin tener que realizar modificaciones sustanciales en su proceso productivo. Además, la fabricación de cerámica estructural, al ser un proceso de transformación térmica, los residuos que se incorporen al proceso, quedarán fijados mediante mecanismos de ceramización o encapsulación, dependiendo de las granulometrías, aislando al residuo del medio.

Por todas estas razones, parece lógico pensar en la posibilidad de establecer una sinergia industrial, mediante la valorización de los residuos siderúrgicos en la fabricación de cerámica estructural.

De este modo, los residuos siderúrgicos de estudio en esta investigación, adquirirán un valor añadido, abandonando su consideración como residuos y calificándose como sub-productos. Contribuyendo a la disminución del impacto medioambiental, tanto por parte de la industria siderúrgica, al reducir el volumen de residuos generados, aprovechando en parte estos materiales para la fabricación de ladrillos, y ayudando a la liberación de los espacios antes ocupados por los depósitos y verederos de las escorias de acería LD, los lodos de horno alto y los lodos de acería LD; así como de la reducción de la potencial afectación del suelo por contaminantes. Como por parte de la industria cerámica ladrillera,

ya que se consumirá un menor volumen de materias primas en el proceso de fabricación, con el aprovechamiento potencial como recursos de estos residuos.

Con la valorización de estos residuos siderúrgicos, se pretende abrir una posibilidad más, sumar en definitiva, al resto de medidas adoptadas o que se puedan adoptar en el futuro, para reducir el impacto medioambiental producido, minimizando, reutilizando y valorizando estos residuos.

Abstract

The steel industry that employs the integrated route for steel production consumes a great quantity of raw materials and energy, simultaneously generating a notable volume of residues in this process.

Besides, the ceramic brick industry primarily uses clays and, to a lesser extent, other materials (e.g. degreasing agents) as raw materials.

Given that the quality levels of the clays that are generally consumed in structural ceramic manufacturing are lower than those required for other types of ceramic products (as impurities are tolerated in clays), the assimilation of flows of residues from other industries is less problematic in this process than in others. At the same time, the ceramic brick industry is capable of admitting materials and substances coming from different sources as raw materials (e.g., in our case, steel residues) without the need to make any substantial modification in its production process. Moreover, given that manufacturing of structural ceramics is a thermic transformation process, residues incorporated into it will stay fixed through ceramization or encapsulation mechanisms – depending on granulometries–, isolating the residue from the environment.

For all the aforementioned reasons, it seems logical to consider the possibility of establishing an industrial synergy through the valorization of steel residues in the manufacturing of structural ceramics.

This way, value will be added to steel residues studied in this research, so they will no longer be considered a residue, but a by-product. This will contribute to a reduction in their environmental impact, both in the steel and ceramic brick industries. On the one hand, in the steel industry the volume of residues will diminish –because these materials may be partly used for brick manufacturing–, spaces previously occupied by deposits and dumps of BOF¹ slag, blast furnace sludge and BOF sludge will be freed, and the potential contamination of soil will be reduced. On the other hand, the production

¹ Siglas en inglés de Horno Básico de Oxígeno.

process in the ceramic brick industry will consume a lower volume of raw materials, as those residues might potentially be used as inputs in the process.

By minimizing, reusing and putting those steel residues in value we intend to open up a new alternative, adding to measures that have already been or may be adopted in the future in order to reduce their environmental impact.

Índice

Índice General

Agradecimientos	V
Resumen	VII
Abstract	IX
Índice	XI
I. Introducción	25
<i>Introducción</i>	27
1.1. Objetivo	27
1.2. Fundamentos	27
1.2.1. La valorización	39
1.3. Estructura de la tesis	43
II. Plan de Trabajo. Metodología	45
<i>Plan de Trabajo. Metodología</i>	47
III. Parte Experimental	51
<i>Las Materias Primas</i>	53
3.1. Las arcillas	57
3.2. Los residuos/sub-productos	62
3.2.1 Las escorias de acería LD	67
3.2.2. Los lodos de horno alto	71
3.2.3. Los lodos de acería LD	76
<i>El Estudio de la Plasticidad</i>	81
4.1. Arcilla y escorias de acería LD	86
4.2. Arcilla y lodos de horno alto	92

XIV

4.3. Arcilla y lodos de acería LD _____	96
<i>La Preparación de Materiales y Fabricación de Piezas</i> _____	103
5.1. La preparación y fabricación en el laboratorio _____	111
5.1.1. Piezas con defectos. Corazón negro _____	120
<i>Los Ensayos de Caracterización</i> _____	125
6.1. Inspección visual y variaciones del peso y volumen de las piezas _____	126
6.1.1. Piezas con porcentajes de ELD y arcillas _____	126
6.1.2. Piezas con porcentajes de LHA y arcillas _____	128
6.1.3. Piezas con porcentajes de LLD y arcillas _____	130
6.1.4. Resumen: Inspección visual y variaciones de peso y volumen de las piezas _____	132
6.2. Heladicidad _____	134
6.2.1. Piezas con porcentajes de ELD y arcillas _____	135
6.2.2. Piezas con porcentajes de LHA y arcillas _____	139
6.2.3. Piezas con porcentajes de LLD y arcillas _____	142
6.2.4. Resumen: Heladicidad _____	146
6.3. Capilaridad o succión _____	148
6.3.1. Piezas con porcentajes de ELD y arcillas _____	149
6.3.2. Piezas con porcentajes de LHA y arcillas _____	151
6.3.3. Piezas con porcentajes de LLD y arcillas _____	153
6.3.4. Resumen: Capilaridad o succión _____	155
6.4. Eflorescencias _____	156
6.4.1. Piezas con porcentajes de ELD y arcillas _____	158
6.4.2. Piezas con porcentajes de LHA y arcillas _____	163
6.4.3. Piezas con porcentajes de LLD y arcillas _____	165
6.4.4. Resumen: Eflorescencias _____	169
6.5. Densidades, porosidades y absorción de agua _____	172

6.5.1. Densidades	172
6.5.1.1. Piezas con porcentajes de ELD y arcillas	175
6.5.1.2. Piezas con porcentajes de LHA y arcillas	177
6.5.1.3. Piezas con porcentajes de LLD y arcillas	179
6.5.1.4. Resumen: Densidades	182
6.5.2. Porosidades	183
6.5.2.1. Piezas con porcentajes de ELD y arcillas	183
6.5.2.2. Piezas con porcentajes de LHA y arcillas	186
6.5.2.3. Piezas con porcentajes de LLD y arcillas	188
6.5.2.4. Resumen: Porosidades	191
6.5.3. Absorción de agua	192
6.5.3.1. Piezas con porcentajes de ELD y arcillas	192
6.5.3.2. Piezas con porcentajes de LHA y arcillas	194
6.5.3.3. Piezas con porcentajes de LLD y arcillas	197
6.5.3.4. Resumen: Absorción de agua	199
6.6. Caliches	200
6.7. Expansión por humedad	202
6.7.1. Piezas con porcentajes de ELD y arcillas	203
6.7.2. Piezas con porcentajes de LHA y arcillas	204
6.7.3. Piezas con porcentajes de LLD y arcillas	206
6.7.4. Resumen: Expansión por humedad	207
6.8. Resistencia mecánica	208
6.8.1. Piezas con porcentajes de ELD y arcillas	210
6.8.2. Piezas con porcentajes de LHA y arcillas	214
6.8.3. Piezas con porcentajes de LLD y arcillas	216
6.8.4. Resumen: Resistencia mecánica	219

IV. La Prueba Industrial	221
<i>La Prueba Industrial</i>	223
V. Conclusiones	225
<i>Conclusiones</i>	227
8.1. Futuros trabajos	231
VI. Bibliografía	233
<i>Bibliografía</i>	235

Figuras y Gráficos

<i>Pirámide de la gestión de residuos.</i>	37
<i>Diagrama de flujo del plan de trabajo.</i>	49
<i>Fotografía aérea de fábrica y cantera de CEMESA. Google Maps.</i>	58
<i>Vista de los hornos altos de Arcelor-Mittal en Veriña (Gijón). (CITOUOLA, 2013).</i>	64
<i>Tren con vagones torpedo perteneciente a Arcelor-Mittal. (Trigos, 2014).</i>	64
<i>Vertido de arrabio en el convertidor LD en la factoría de Arcelor-Mittal en Taboada. (López M., 2014).</i>	65
<i>Agujas de óxido de zinc en la muestra calcinada de lodos de horno alto.</i>	73
<i>Ensayo para determinar el límite plástico de la arcilla o mezcla arcillosa (Das, 2001).</i>	84
<i>Ensayo con la cuchara de Casagrande para determinar en límite líquido (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2004).</i>	85
<i>Gráfico límite líquido 100% arcilla.</i>	87
<i>Gráfico límite líquido 10% escoria de acería LD, 90% arcilla.</i>	88
<i>Gráfico límite líquido 20% escoria de acería LD, 80% arcilla.</i>	89
<i>Gráfico límite líquido 30% escoria de acería LD, 70% arcilla.</i>	90
<i>Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de la arcilla y de sus mezclas con escoria de acería LD.</i>	91
<i>Gráfico límite líquido 10% lodos de horno alto, 90% arcilla.</i>	93
<i>Gráfico límite líquido 20% lodos de horno alto, 80% arcilla.</i>	94
<i>Gráfico límite líquido 30% lodos de horno alto, 70% arcilla.</i>	95
<i>Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de la arcilla y de sus mezclas con lodos de horno alto.</i>	96
<i>Gráfico límite líquido 10% lodos de acería LD, 90% arcilla.</i>	98
<i>Gráfico límite líquido 20% lodos de acería LD, 80% arcilla.</i>	99
<i>Gráfico límite líquido 30% lodos de acería LD, 70% arcilla.</i>	100
<i>Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de la arcilla y de sus mezclas con lodos de acería LD.</i>	101
<i>Etapas del proceso cerámico (Galán & Aparicio, 2006).</i>	103

XVIII

<i>Esquema de las diferentes fases en la producción de cerámica estructural (Hellerstein, Bender, Hadley, & Hobman, 1998).</i>	104
<i>Cantera de arcilla. Santa Cruz de Mudela (Ciudad Real). Cerámica Mateo S.L.</i>	104
<i>Extrusora GFK para la producción de ladrillos/bloques.</i>	106
<i>Esquema extrusora o galletera de tornillo de Arquímedes (Blanco(I), 2007).</i>	107
<i>Horno de túnel para la fabricación de ladrillos.</i>	110
<i>Molino de anillos RESTCH RS 100, utilizado en la molienda.</i>	113
<i>Detalle muelas de disco y cámara de molienda.</i>	113
<i>Prensa hidráulica utilizada en laboratorio para el conformado de las piezas.</i>	115
<i>Molde base cuadrada empleado en el proceso de conformado en laboratorio.</i>	116
<i>Molde cilíndrico empleado en el proceso de conformado en laboratorio.</i>	116
<i>Estufa marca Selecta, utilizada para la etapa de secado.</i>	117
<i>Horno de mufla de la marca Astursinter, utilizado para la cocción de las piezas cerámicas.</i>	118
<i>Aspecto de algunas piezas cerámicas después de cocción.</i>	119
<i>Pieza paralelepípeda manchada por corazón negro.</i>	121
<i>Pieza cilíndrica manchada por corazón negro.</i>	121
<i>Pieza paralelepípeda rota por corazón negro.</i>	122
<i>Piezas cilíndricas rotas por corazón negro.</i>	122
<i>Detalle corazón negro en una pieza cilíndrica LHA.</i>	123
<i>Piezas con el 10% ELD y cocidas a 900 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de beladicidad.</i>	135
<i>Piezas con el 10% ELD y cocidas a 1000 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de beladicidad.</i>	135
<i>Piezas con el 10% ELD y cocidas a 1100 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de beladicidad.</i>	136
<i>Piezas con el 20% ELD y cocidas a 900 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de beladicidad.</i>	136
<i>Piezas con el 20% ELD y cocidas a 1000 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de beladicidad.</i>	136
<i>Piezas con el 20% ELD y cocidas a 1100 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de beladicidad.</i>	137

<i>Piezas con el 30% ELD y cocidas a 900 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de beladicidad.</i>	137
<i>Piezas con el 30% ELD y cocidas a 1000 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de beladicidad.</i>	137
<i>Piezas con el 30% ELD y cocidas a 1100 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de beladicidad.</i>	138
<i>Piezas con el 10% LHA y cocidas a 900 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de beladicidad.</i>	139
<i>Piezas con el 10% LHA y cocidas a 1000 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de beladicidad.</i>	140
<i>Piezas con el 20% LHA y cocidas a 900 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de beladicidad.</i>	140
<i>Detalle de la rotura. Grieta en la parte superior. Pieza LHA2090015.</i>	140
<i>Piezas con el 30% LHA y cocidas a 900 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de beladicidad.</i>	141
<i>Piezas con el 10% LLD y cocidas a 900 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de beladicidad.</i>	142
<i>Piezas con el 10% LLD y cocidas a 1000 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de beladicidad.</i>	142
<i>Piezas con el 10% LLD y cocidas a 1100 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de beladicidad.</i>	143
<i>Piezas con el 20% LLD y cocidas a 900 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de beladicidad.</i>	143
<i>Piezas con el 20% LLD y cocidas a 1000 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de beladicidad.</i>	143
<i>Piezas con el 20% LLD y cocidas a 1100 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de beladicidad.</i>	144
<i>Piezas con el 30% LLD y cocidas a 900 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de beladicidad.</i>	144
<i>Piezas con el 30% LLD y cocidas a 1000 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de beladicidad.</i>	144

<i>Piezas con el 30% LLD y cocidas a 1100 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de heladicidad.</i>	145
<i>Pieza cerámica en el ensayo de capilaridad.</i>	149
<i>Detalle de ladrillo con eflorescencias en obra (Blanco(I), 2007).</i>	157
<i>Piezas cerámicas durante el ensayo de eflorescencias en el laboratorio.</i>	158
<i>Piezas con el 10% ELD y cocidas a 900 °C en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.</i>	159
<i>Piezas con el 10% ELD y cocidas a 1000 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.</i>	159
<i>Piezas con el 10% ELD y cocidas a 1100 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.</i>	159
<i>Piezas con el 20% ELD y cocidas a 900 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.</i>	160
<i>Piezas con el 20% ELD y cocidas a 1000 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.</i>	160
<i>Piezas con el 20% ELD y cocidas a 1100 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.</i>	160
<i>Piezas con el 30% ELD y cocidas a 900 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.</i>	161
<i>Piezas con el 30% ELD y cocidas a 1000 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.</i>	161
<i>Piezas con el 30% ELD y cocidas a 1100 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.</i>	161
<i>Piezas con el 10% LHA y cocidas a 900 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.</i>	163
<i>Piezas con el 10% LHA y cocidas a 1000 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.</i>	163
<i>Piezas con el 20% LHA y cocidas a 900 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.</i>	164
<i>Piezas con el 30% LHA y cocidas a 900 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.</i>	164

<i>Piezas con el 10% LLD y cocidas a 900 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.</i>	165
<i>Piezas con el 10% LLD y cocidas a 1000 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.</i>	166
<i>Piezas con el 10% LLD y cocidas a 1100 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.</i>	166
<i>Piezas con el 20% LLD y cocidas a 900 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.</i>	166
<i>Piezas con el 20% LLD y cocidas a 1000 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.</i>	167
<i>Piezas con el 20% LLD y cocidas a 1100 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.</i>	167
<i>Piezas con el 30% LLD y cocidas a 900 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.</i>	167
<i>Piezas con el 30% LLD y cocidas a 1000 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.</i>	168
<i>Piezas con el 30% LLD y cocidas a 1100 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.</i>	168
<i>Volumenómetro utilizado en el ensayo.</i>	173
<i>Balanza hidrostática empleada en los ensayos.</i>	174
<i>Gráfico comparativo densidades. Piezas ELD.</i>	176
<i>Gráfico comparativo densidades. Piezas LHA.</i>	178
<i>Gráfico comparativo densidades. Piezas LLD.</i>	181
<i>Gráfico comparativo porosidades. Piezas ELD.</i>	185
<i>Gráfico comparativo porosidades. Piezas LHA.</i>	187
<i>Gráfico comparativo porosidades. Piezas LLD.</i>	190
<i>Gráfico resultados absorción de agua. Piezas ELD.</i>	194
<i>Gráfico resultados absorción de agua. Piezas LHA.</i>	196
<i>Gráfico resultados absorción de agua. Piezas LLD.</i>	198
<i>Máquina universal de ensayos mecánicos.</i>	209
<i>Dispositivo ensayos compresión con pieza cerámica cilíndrica.</i>	210
<i>Gráfico resultados resistencia mecánica. Piezas ELD.</i>	213

<i>Gráfico resultados resistencia mecánica. Piezas LHA.</i>	216
<i>Gráfico resultados resistencia mecánica. Piezas LLD.</i>	218
<i>Ladrillos obtenidos en la prueba a nivel industrial.</i>	224

Tablas

<i>Evolución producción minera de arcilla roja en toneladas (2008-2012). IGME.</i>	56
<i>Producción de tejas, ladrillos y similares en toneladas (2008-2012). HISPALYT.</i>	57
<i>Composición química (%) de las arcillas.</i>	59
<i>Composición mineralógica de las arcillas.</i>	61
<i>Producción de escoria de acería LD en toneladas en España. (del Olmo, 2008), (CEDEX, 2014).</i>	67
<i>Composición química (%) de las escorias de acería LD.</i>	68
<i>Composición mineralógica de las escorias de acería LD.</i>	70
<i>Composición química (%) de los lodos de horno alto.</i>	73
<i>Composición mineralógica de los lodos de horno alto.</i>	76
<i>Composición química (%) de los lodos de acería LD.</i>	77
<i>Composición mineralógica de los lodos de acería LD.</i>	78
<i>Plasticidad de la arcilla y las mezclas con los distintos porcentajes de escoria de acería LD.</i>	86
<i>Plasticidad de la arcilla y las mezclas con los distintos porcentajes de lodos de horno alto.</i>	92
<i>Plasticidad de la arcilla y las mezclas con los distintos porcentajes de lodos de acería LD.</i>	97
<i>Códigos de identificación de las piezas respecto a los parámetros operacionales.</i>	120
<i>Códigos piezas LHA desechadas por la aparición de corazón negro.</i>	124
<i>Resultados ensayo beladicidad. Piezas ELD.</i>	138
<i>Resultados ensayo beladicidad. Piezas LHA.</i>	141
<i>Resultados ensayo beladicidad. Piezas LLD.</i>	145
<i>Relación piezas clasificadas como no beladizas después del ensayo de beladicidad.</i>	147
<i>Resultados ensayo capilaridad o succión. Piezas ELD.</i>	150
<i>Piezas ELD por debajo del umbral permitido de succión.</i>	151
<i>Resultados ensayo capilaridad o succión. Piezas LHA.</i>	152
<i>Piezas LHA por debajo del umbral permitido de succión.</i>	152
<i>Resultados ensayo capilaridad o succión. Piezas LLD.</i>	153
<i>Piezas LLD por encima del umbral permitido de succión.</i>	154
<i>Resultados ensayo eflorescencias. Piezas ELD.</i>	162
<i>Resultados ensayo eflorescencias. Piezas LHA.</i>	164
<i>Resultados ensayo eflorescencias. Piezas LLD.</i>	168

<i>Piezas cerámicas clasificadas como no eflorescidas.</i>	171
<i>Resultado ensayo densidades. Piezas ELD.</i>	175
<i>Resultado ensayo densidades. Piezas LHA.</i>	177
<i>Resultado ensayo densidades. Piezas LLD.</i>	179
<i>Valores mínimos y máximos de densidades de los diferentes residuos siderúrgicos.</i>	182
<i>Resultado ensayo porosidades. Piezas ELD.</i>	183
<i>Resultado ensayo porosidades. Piezas LHA.</i>	186
<i>Resultado ensayo porosidades. Piezas LLD.</i>	188
<i>Valores mínimos y máximos de porosidades de los diferentes residuos siderúrgicos.</i>	191
<i>Resultado ensayo absorción de agua. Piezas ELD.</i>	192
<i>Resultado ensayo absorción de agua. Piezas LHA.</i>	195
<i>Resultado ensayo absorción de agua. Piezas LLD.</i>	197
<i>Valores mínimos y máximos de absorción de agua de los diferentes residuos siderúrgicos.</i>	199
<i>Resultado ensayo expansión por humedad. Piezas ELD.</i>	203
<i>Resultado ensayo expansión por humedad. Piezas LHA.</i>	205
<i>Resultado ensayo expansión por humedad. Piezas LLD.</i>	206
<i>Valores mínimos y máximos de expansión por humedad y expansión potencial de los diferentes residuos siderúrgicos.</i>	208
<i>Resultado ensayo resistencia mecánica. Piezas ELD.</i>	211
<i>Resultado ensayo resistencia mecánica. Piezas LHA.</i>	214
<i>Resultado ensayo resistencia mecánica. Piezas LLD.</i>	217
<i>Valores mínimos y máximos de resistencia mecánica de los diferentes residuos siderúrgicos.</i>	220

I. Introducción

Introducción

1.1. Objetivo

El objetivo de esta tesis es probar la viabilidad de la valorización tanto de las escorias de acería LD¹, como de los lodos de horno alto y lodos de acería LD; como sustitutos en parte, de las materias primas generalmente utilizadas en la fabricación de ladrillos cerámicos para la construcción. Principalmente arcillas y en menor medida, arenas y otras sustancias.

De este modo, los residuos siderúrgicos de estudio en este trabajo, adquirirán un valor añadido, abandonando su consideración como residuos y transformándose en lo que se denomina sub-productos. Trayendo consigo además, la disminución del impacto medioambiental, tanto por parte de la industria siderúrgica, al reducir el volumen de residuos generados, aprovechando en parte estos materiales para la fabricación de ladrillos y contribuyendo a la liberación de los espacios antes ocupados por los depósitos y verederos de las escorias de acería LD, los lodos de horno alto y los lodos de acería LD; así como de la reducción de la posible afectación del suelo por contaminantes. Como por parte de la industria cerámica ladrillera, ya que se consumirá un menor volumen de materias primas en el proceso de fabricación, con el aprovechamiento potencial como recursos de estos residuos.

1.2. Fundamentos

El ser humano moderno² es la única especie de las que habitan el planeta Tierra, que ha tenido la capacidad para modificar de manera profunda el medio que le rodea, adaptándolo y transformándolo para satisfacer sus necesidades. Desde su aparición, hace unos 40.000 años, ha ido progresivamente cambiando la faz de la Tierra, no obstante es desde la

¹ LD son las dos letras iniciales de los nombres de dos ciudades austríacas Linz y Donawitz (un distrito de Leoben), donde se situaban las acerías en las que se empezó a utilizar este sistema de producción.

² Se refiere al Homo Sapiens Sapiens (40.000 años-Actualidad).

Revolución Industrial a finales del siglo XVIII y hasta la actualidad, donde el impacto de las actividades del hombre sobre el medio ambiente, se ha incrementado de forma exponencial. El uso de los combustibles fósiles y la explotación intensa de los recursos minerales para satisfacer nuestras necesidades, recursos finitos y no renovables, al menos desde el punto de vista temporal del ser humano, conjuntamente a la explosión demográfica gracias a los avances científicos y tecnológicos, de los últimos 150 años, han producido un incremento en el consumo de recursos naturales que resulta insostenible y provocando una acusada disminución de la calidad del medio ambiente. Esta tendencia en el uso de recursos minerales, y a modo de ejemplo, puede plasmarse según datos de Eurostat del año 2002 respecto a la UE de los 15³, donde el consumo de materiales en el año 2000, ascendió a 5.900.000.000 de toneladas. Siendo de esos materiales, el 50% minerales, el 26% biomasa y el 24% combustibles fósiles (Doménech, 2007).

Dicho de otra manera, el deterioro del medio ambiente es un problema causado por el crecimiento de la población, por el modelo de sociedad, por los hábitos de consumo, y por los procesos de producción y transformación (Fransson & Gärling, 1999).

En este escenario y paralelamente, a partir de los años 70, la preocupación por este deterioro del medio ambiente, producido por la actividad humana ha ido en un incesante crecimiento, creando una conciencia ambiental en la sociedad, sobre todo en los países desarrollados occidentales, gracias al desarrollo tecnológico, y al avance y divulgación científicos. Sin duda esta concienciación ambiental va unida a los cambios trascendentes que han afectado al modo de vida y a los valores de las sociedades post-industriales, (Inglehart, 1977), (Inglehart, 1997). Del mismo modo, se ido creando esta conciencia respecto al impacto sobre el medio ambiente a consecuencia de la actividad del ser humano, siendo el principal factor contribuidor de este hecho, el creciente pesimismo en cuanto al papel del hombre en la naturaleza, la conciencia de que nuestro modo de vida y nuestro sistema de producción industrial, asentados sobre los pilares de la ciencia y la tecnología, han tenido unos efectos negativos en el ecosistema global (Marx & Mazlish, 1996).

³ Bélgica, Alemania, Francia, Italia, Luxemburgo, Países Bajos, Reino Unido, Irlanda, Dinamarca, Grecia, España, Portugal, Austria, Finlandia y Suecia.

Esta preocupación creciente sobre el estado del medio ambiente, precisamente y sobre todo, en estos países es así, ya que en ellos, el grueso de la sociedad tiene sus necesidades básicas cubiertas, ya que una vez que estén garantizadas hasta un cierto punto, las denominadas necesidades de déficit (necesidades fisiológicas, de seguridad, de pertenencia y de estima), alcanzan importancia y pueden ser desarrolladas las necesidades del ser (autorrealización) (Maslow, 1943), como la calidad de vida y del medio ambiente.

El tener las necesidades de déficit cubiertas, es sin duda el factor clave para que las sociedades generen esta preocupación y desarrollen una conciencia ambiental. De hecho, la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA⁴), en uno de sus comunicados de prensa a principios del mes de Marzo de 2015, alertaba de que la crisis financiera del año 2008 y las subsiguientes dificultades económicas, también habían contribuido a reducir algunas presiones ambientales en el ámbito de la UE⁵, y cuestionaban si las mejoras alcanzadas respecto al medio ambiente se mantendrían.

Esta concienciación y preocupación medioambiental por parte de la sociedad, se ha traducido en presión social sobre los gobiernos, generando un profundo debate político y científico sobre el medio ambiente, y de la gravedad de los riesgos a los que se le somete. Y como consecuencia, ha significado la creación por parte de los gobiernos de una legislación medioambiental, progresivamente más exigente con el paso de los años, con el objetivo de ser garante del desarrollo económico y social respetuoso con el medio ambiente, del desarrollo sostenible.

En gran parte por estos motivos, una creciente presión social y una legislación más rigurosa respecto a la protección del medio ambiente, la industria ha ido asumiendo una responsabilidad cada vez mayor por el impacto ambiental que originan sus procesos productivos. Por otro lado, hay que reseñar que también la propia industria ha desarrollado una progresiva predisposición a favorecer voluntariamente acciones encaminadas a alcanzar una mayor protección del medio ambiente. Todo ello ha ayudado a que la industria haya ido implementando mejores y más rigurosas prácticas de gestión, que conjuntamente a estrategias medioambientales, han facultado determinar y controlar de

⁴ Siglas en inglés. European Environment Agency.

⁵ Unión Europea.

mejor forma los impactos ambientales, favoreciendo la mejoría en su actuación sobre el medio ambiente (Maxwell, Sheate, & Van der Vorst, 2006).

Para ayudar a la industria a implementar sistemas de gestión medioambiental, se han diseñado una serie de herramientas para alcanzar la integración del medio ambiente en la gestión general de la organización. Las herramientas más extendidas para lograr este fin, son la norma ISO 14001:2004⁶ y la verificación EMAS⁷, como normas que son, ambas tienen carácter de mecanismos voluntarios para las industrias dispuestas a comprometerse con una mejor gestión de su impacto en el medio ambiente.

La norma ISO 14001, facilita una guía de mínimos para gestionar los aspectos que afectan al medio ambiente, generados por el normal funcionamiento de la organización, al mismo tiempo que fomenta la protección del medio ambiente y la prevención de la contaminación, sin perder de vista la realidad socio-económica (AENOR, 2012). Mientras que la verificación EMAS, incluye todos los aspectos y requisitos que se especifican en la norma ISO 14001, y además supone la aceptación de otros, como es la figura de la Declaración Ambiental. Este documento tiene carácter público y ha de presentarse de manera periódica, en él, ha de reflejarse clara y sucintamente, información real del comportamiento de la organización respecto al medio ambiente. La ventaja que aporta la verificación EMAS, es que cualquier organización adherida a este sistema de gestión medioambiental, aparece publicada en un Registro Público que está gestionado en el seno de la Comisión Europea, lo que supone una serie de beneficios ambientales, de liderazgo e imagen corporativa, y de negocio y sociales (AENOR, 2012). Tanto la norma ISO 14001, como la verificación EMAS, se utilizan para implementar y certificar la eco-eficiencia en el seno de las organizaciones.

El concepto de eco-eficiencia, se creó en el seno de la WBCSD⁸ en el año 1992 y según la Fundación Fórum Ambiental perteneciente a la EEA, consiste en proporcionar bienes y servicios a un precio competitivo, que satisfagan las necesidades humanas y aporten calidad de vida, mientras reducen progresivamente el impacto ecológico y la intensidad de recursos a lo largo del ciclo de vida, hasta un nivel acorde con la capacidad de carga

⁶ UNE-EN ISO 14001: Sistemas de Gestión Ambiental.

⁷ Siglas en inglés. Sistema de Eco-gestión y Auditoría de la UE.

⁸ Siglas en inglés. Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible.

estimada del Planeta (Ambiental, 1999), concepto que podría resumirse en la frase “producir más con menos”. Esta estrategia ambiental, se sustenta en alcanzar un uso más sostenible de los recursos, minimizar la emisión de contaminantes generados en los procesos productivos y reducir el impacto ambiental de los productos a lo largo de todo el ciclo de vida (Leal, 2005).

La eco-eficiencia no es la única vía, es más, no todas las organizaciones industriales siguen esta estrategia, existen otras tácticas medioambientales como la de producción más limpia, donde el principio preventivo de la contaminación es el pilar básico, y cuyo objetivo es la minimización de residuos, reduciendo los riesgos para la salud y el medio ambiente, y aumentando la competitividad de las organizaciones. Para alcanzar con éxito la producción más limpia, se recomiendan como objetivos, la minimización y el consumo eficiente de flujos de entrada al sistema, materiales, agua y energía; la minimización del empleo de flujos de entrada tóxicos; la minimización de la cantidad y peligrosidad de los flujos de salida de emisiones generados; el incremento del reciclaje de residuos producidos; y la reducción del impacto ambiental de los productos en su ciclo de vida (Productivo, 1998).

Por otro lado, la eco-eficiencia es una iniciativa privada, parte del interés de la organización para implementar una estrategia ambiental, aunque cada vez cuenta con mayor apoyo de las Instituciones. Mientras que la estrategia de producción más limpia, es una iniciativa pública, parte desde las Instituciones para implicar a los sectores productivos a alcanzar unos objetivos medioambientales (Leal, 2005).

Ambas estrategias medioambientales, tanto la eco-eficiencia como la producción más limpia, se las puede considerar como planteamientos complementarios (Leal, 2005). En el mismo sentido, se puede apreciar que ambas hacen uso de una potente herramienta medioambiental, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV)⁹, para evaluar el impacto ambiental asociado a los productos a lo largo de todo su ciclo de vida. A este análisis se le suele denominar, de la cuna a la tumba, y surge como respuesta a la necesidad de evaluar y tomar decisiones, para dar soluciones a los impactos ambientales que se producen a lo largo de la vida de un producto o servicio, desde la extracción de las materias primas, pasando por el transporte, el procesado y la transformación de las mismas, hasta un producto final, incluyendo el transporte de este producto hasta el consumidor, su uso, y como último

⁹ También conocido por sus siglas en inglés, LCA (Live Cycle Assessment).

estadio, su reciclaje y/o disposición final (UNEP & SETAC, 2001). Como puede imaginarse, el Análisis de Ciclo de Vida conlleva una elevada complejidad asociada, por lo que a modo de guía y ayuda para poder desarrollar estudios de este tipo, existe documentación de apoyo en forma de normativa de carácter internacional, son las normas ISO 14040¹⁰ (ISO, 2006) y ISO 14044¹¹ (ISO(I), 2006). Además en nuestro país nos encontramos con otra norma más, la UNE 150041:1998 EX, que se emplea en el caso de análisis de ciclo de vida simplificado (AENOR, 1998).

El sector industrial en su afán de mejorar su responsabilidad social y medioambiental, a la par de conseguir unas mayores cotas de rentabilidad y competitividad, ha seguido avanzando con respecto a la metodología del Análisis de Ciclo de Vida, integrando el reciclaje y/o la recuperación, de una forma más amplia, intentando comprometer a toda la industria en este concepto respecto a sus productos y residuos, disminuyendo así los impactos ambientales asociados a los procesos productivos y a los productos. A esta visión se la ha denominado, sistema de producción en circuito o ciclo cerrado, pasando de la concepción lineal que aportaba el Análisis de Ciclo de Vida, de la cuna a la tumba, al más completo de la cuna a la cuna (McDonough & Braungart, 2005).

El sistema de producción en circuito cerrado, conlleva un gran esfuerzo a la hora de diseñar los productos, ya que estos deben de concebirse pensando en que estos puedan ser reciclados y/o valorizados en algún instante a lo largo de su ciclo de vida, pudiendo ser introducidos nuevamente en los procesos industriales. Al mismo tiempo, es de vital importancia la correcta gestión de los residuos por medio de la reutilización, el reciclado y la valorización. De esta forma se pueden aprovechar materiales que de otra manera terminarían en vertederos, como materiales de interés y así minimizar el impacto ambiental que ello supone, y además reducir el consumo de materias primas y combustibles fósiles. Así, se puede disminuir la generación de residuos, además de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y favorecer al ahorro energético (Zaragoza, 2010).

Dando un paso más y a partir sobre todo de la década de los 90 (aunque ya comenzó a aparecer esporádicamente en la literatura de los años 70 (Green & Randles, 2006)), empiezan a desarrollarse con cierta intensidad propuestas y acciones, que abarcan el

¹⁰ En España, UNE-EN ISO 14040:2006.

¹¹ En España, UNE-EN ISO 14044:2006.

problema ambiental desde una mayor perspectiva, abandonando el concepto de organización industrial como un ente individual y contemplando vínculos entre distintas organizaciones industriales y su relación con el entorno de una manera más completa. En este escenario, se concretan relaciones entre diferentes organizaciones industriales, con el fin de alcanzar cerrar el ciclo de materia y energía, emulando a los ecosistemas naturales, y así lograr un nivel cero de residuos. A esta línea de pensamiento y acción, es a lo que se le ha denominado Ecología Industrial, siendo su objetivo último, asegurar el desarrollo sostenible (Ehrenfeld, 1997).

Debido a la dificultad de encuadrar un concepto tan complejo y en constante cambio, resulta complicado encontrar una definición completa de lo que se entiende por Ecología Industrial, no obstante podemos entender a la Ecología Industrial como: Una red donde interactúan entre sí los procesos industriales viviendo uno a expensas de otro, no sólo en el sentido económico, sino también en el sentido del uso directo de residuos materiales y de energía (Ausubel, 1992). Desde otro punto de vista, la Ecología Industrial puede describirse como el campo científico que relaciona el funcionamiento de las organizaciones industriales con el de los ecosistemas naturales, modificando a los sistemas productivos de lineales a cíclicos, promocionando los nexos entre ambiente, sociedad y economía, aumentando al mismo tiempo, la eficiencia de los procesos industriales (Erkman & Ramaswamy, 2003). Queda patente que la Ecología Industrial, es una disciplina en la que confluyen diversas teorías, que se aborda y ha de abordarse desde diferentes prismas, teniendo en cuenta a diferentes ramas del conocimiento ecológico, ambiental, económico, social, tecnológico....

Los orígenes del ideario de la Ecología Industrial se fundamentan en conceptos como simbiosis industrial, sinergia industrial o metabolismo industrial, que aparecen por primera vez en los años 70. Se corresponden con los métodos antes mencionados como de cierre de ciclo, donde el flujo de residuos de una industria se integra transformándose en materia prima de otra industria, al igual que ocurre en los ecosistemas naturales (Ayres & Ayres, 2002). Por otro lado y debido a su complejidad, la Ecología Industrial, también emplea otros métodos ya mencionados anteriormente, como la eco-eficiencia, la producción más limpia o el Análisis de Ciclo de Vida, que suman para minimizar el impacto ambiental. Además de tener en cuenta la relación de las industrias con su entorno natural, social y económico, de hecho actualmente también se incluyen aspectos como la responsabilidad

social corporativa o el consumo responsable. Todo ello genera beneficios medioambientales y económicos, ya que se reduce el uso de las materias primas naturales, se disminuyen las cargas contaminantes y la generación de residuos, se mejora la imagen corporativa de las industrias y organismos públicos y se fomenta mejores relaciones entre la industria y su entorno social y natural (Lowe, Warren, & Moran, 1997), para alcanzar el objetivo de desarrollo sostenible.

Un ejemplo de Ecología Industrial en Europa, es el parque eco-industrial de Kalundborg, una ciudad portuaria con alrededor de 18.000 habitantes situada al norte de Dinamarca, que gracias al desarrollo del parque, hoy en día es un centro industrial de gran importancia en el país, hecho que le ha reportado el reconocimiento como modelo urbano de eficiencia (Côté, 1999).

Para contribuir al desarrollo de una Ecología Industrial eficiente y lograr el máximo aprovechamiento de los recursos, minimizando el consumo de materias primas naturales y de las cargas contaminantes, ayudando a la creación y vertebración de nuevos eco-parques o clústeres industriales, donde se empleen los residuos de otras industrias como materias primas, surge la eco-innovación. Este último paso, resulta esencial para el desarrollo de las prácticas y el desempeño ambiental de la industria hoy en día.

La eco-innovación, habitualmente es entendida como la innovación que se traduce en una minimización del impacto ambiental, sin importar si ese efecto era el que se pretendía. Muchas organizaciones industriales y cada vez mayor número de gobiernos, han comenzado a emplear el término eco-innovación para describir los aportes de la industria al desarrollo sostenible, sin descuidar, mejorando, su competitividad. En estos últimos años, se ha empezado a utilizar el término eco-innovación, a fin de mostrar las contribuciones positivas de las organizaciones industriales al desarrollo sostenible por medio de la innovación, y así como los avances en los procesos de producción y en los productos y servicios (OECD, 2009).

La eco-innovación es, por lo tanto, un instrumento potente que combina un reducido impacto negativo sobre el medio ambiente con un impacto positivo sobre la economía y la sociedad (Europea, 2011).

En el seno de la UE, siempre a la vanguardia en temas medioambientales y debido a la preocupación por la exigencia de abastecimiento de materias primas y la relativa carencia de las mismas en su territorio (importa 6 veces más que lo que exporta), para satisfacer sus necesidades y la potencial competencia futura para obtenerlas, lo que con alta probabilidad, de suceder, afectará a su economía, ha puesto recientemente en marcha el Programa Marco Horizonte 2020. En este nuevo programa de investigación e innovación, sobresale el papel que la eco-innovación tiene como medio para lograr los objetivos medioambientales, al mismo tiempo que da soporte financiero para la aplicación del EcoAP¹², un complejo cúmulo de iniciativas dispuestas para aumentar la aceptación de la eco-innovación en el mercado (Europea, 2011).

No es de extrañar que las políticas medioambientales desarrolladas por la UE, han obtenido como fruto, numerosos éxitos en la promoción de una producción industrial más limpia y una mayor eficiencia en los procesos, además de alcanzar importantes reducciones en contaminación y generación de residuos, así como unos niveles mayores de reciclaje. Al mismo tiempo, la mejora en la eficiencia del uso de los recursos tiene como recompensa disminuir nuestra dependencia de las materias primas, fomentar el uso y reciclado óptimos de los recursos, y además se puede alcanzar una reducción considerable de los costes de explotación en las organizaciones industriales (Europea, 2010).

Estas políticas impulsan entre otras metas, para la consecución del desarrollo sostenible, a alcanzar una gestión eficiente de los residuos industriales que se generen en el proceso, como última oportunidad para minimizar el impacto ambiental asociado a los mismos. Se antoja básico pues, el potencial aprovechamiento de los residuos que se generen en los procesos industriales, ya que contribuye al ahorro y a una menor dependencia de las materias primas naturales necesarias en los procesos productivos. Por estos motivos, resulta tan interesante como medio de gestión, la idea de introducir flujos de residuos como materia prima, sustituyendo en parte a los flujos de recursos naturales necesarios en la industria (Costa, Massard, & Agarwal, 2010). Es lo que se conoce y ya anteriormente mencionado como simbiosis industrial, cuyo objetivo es la vinculación de industrias habitualmente separadas en un escenario de colaboración, y de ese modo alcanzar ventajas competitivas, implicando el intercambio físico de materiales, energía, agua y/o sub-

¹² Plan de Acción sobre Eco-innovación.

productos (Chertow, 2000). De esta forma, se ayuda a reducir al mismo tiempo, la cantidad de residuos producidos y el consumo de las materias primas naturales necesarias, por parte de la industria.

Debido a la gran complejidad que supone la gestión de residuos, teniendo en cuenta las diferentes ópticas existentes en los diferentes países que conforman la UE respecto a su clasificación y tratamiento, esta ha desarrollado un marco legal para consensuar las diferentes particularidades, en la Directiva 2008/98/CE, para así, unificar criterios para proteger al medio ambiente y a la salud humana, gracias a una mejor gestión de residuos, y una menor dependencia y una mayor eficacia en el uso de los recursos naturales (Europeo & Europea, 2008). Esta Directiva ha sido modificada posteriormente con la publicación del Reglamento (UE) N° 1357/2014, en el cual se reforma la clasificación de residuos peligrosos (Comisión, 2014).

Una vez que ya se ha establecido este marco legislativo común, de obligado cumplimiento por todos los estados miembros de la UE, cada país ha trasladado a su legislación la Directiva 2008/98/CE. En España se ha traspuesto a nuestro ordenamiento jurídico mediante la Ley 22/2011, de 28 de Julio de 2011, de residuos y suelos contaminados.

Con esta ley, se ordena todo lo referente a la política y planificación de la gestión de residuos, además se presenta una nueva jerarquía de residuos que sirve para dotar de un orden de preferencia en las actuaciones en la política de residuos.

Este orden de preferencia puede observarse en la figura 1, donde se establece una prioridad a la hora de gestionar los residuos, situando en la parte superior la opción más favorable y descendiendo hacia los niveles inferiores hasta la menos favorable (España, 2011).

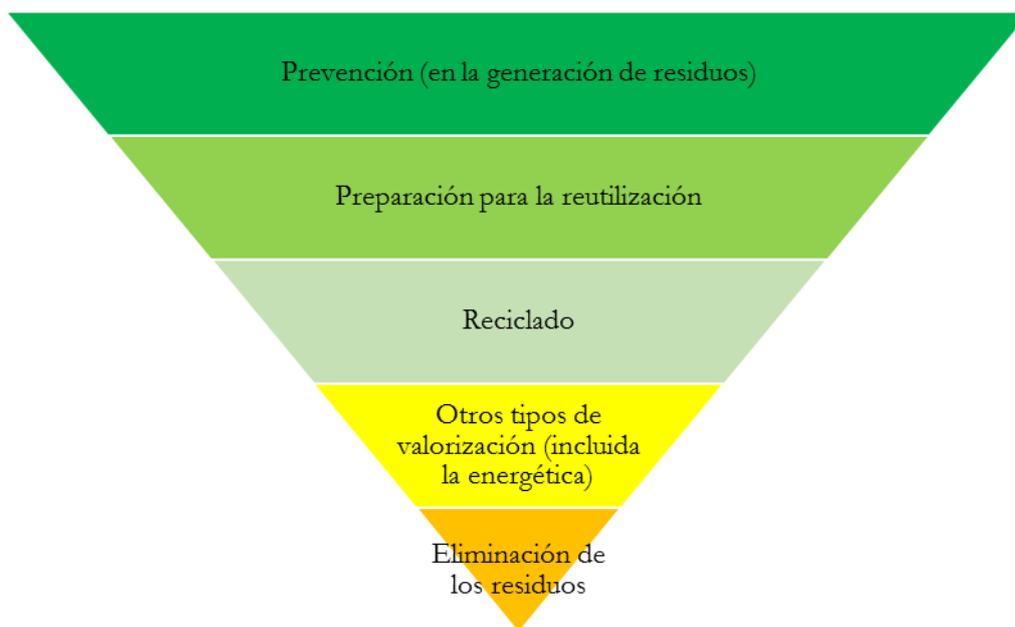


Figura 1. Pirámide de la gestión de residuos.

La opción medioambiental más favorable, la denominada prevención, se fundamenta en evitar en la mayor manera posible, la generación del residuo por medio del diseño y la innovación, y de esta forma minimizar el volumen de residuo, los impactos negativos en el entorno y la salud humana, y la cantidad de sustancias peligrosas en materiales y productos. En el siguiente nivel de gestión, para los productos o sus componentes que se hayan desechado y convertido en residuos, estaría la preparación para la reutilización, que consiste en reutilizar a estos residuos generados sin realizar ninguna operación de transformación, a no ser trabajos de comprobación, limpieza o reparación. La preparación para la reutilización, está considerada como una operación de valorización (España, 2011).

Bajando un escalón más en el orden de actuación en la política de residuos, se encuentra el reciclado, también considerado una operación de valorización, en la cual los residuos generados pueden transformarse en productos, materiales o sustancias otra vez y que persigue que el residuo pueda ser utilizado, cumpliendo la misma finalidad o función, que los materiales necesarios a los que sustituye. No se considera reciclado, si el residuo es utilizado como relleno, o si el producto, material o sustancia obtenido en la transformación resulta un producto, material o sustancia combustible, además queda fuera de esta consideración la valorización energética, que aparece incluida en el siguiente nivel (España,

2011). Se puede decir que este penúltimo nivel, supone la última oportunidad para que el residuo pueda ser valorizado.

La eliminación supone la opción menos favorable medioambientalmente, y aglutina cualquier operación que no sea la valorización del residuo. Por ejemplo el depósito, la inyección en profundidad, el embalse superficial, el vertido en ríos o en el mar, la biodegradación, la incineración, el almacenamiento permanente, etcétera (España, 2011).

Es evidente la importancia que tienen las operaciones de valorización dentro de la política de gestión de residuos en el seno de la UE, ya que suponen, una vez generado el residuo, las mejores vías para ayudar a alcanzar el perseguido objetivo de una mejor dependencia y ahorro de materias primas, sobre todo de recursos no renovables, y a la minimización del volumen de residuos que se producen. Aun así, aunque cada vez surgen más investigaciones y experiencias que avalan el potencial de la valorización, la puesta en práctica de estas políticas es de poco calado en muchos sectores, siendo el depósito en vertedero de forma controlada la opción de mayor uso por parte de los mismos, la opción menos favorable.

Por otro lado, la valorización de residuos puede aportar además un beneficio económico, ya que al aprovechar el residuo para utilizarlo en otro proceso como materia prima, se puede ahorrar el coste económico que supone su eliminación y al mismo tiempo crear una posible ganancia con su venta. Al residuo generado se le da un valor añadido y conjuntamente si ha sido sometido a un proceso de valorización completo y puede ser tratado como una materia prima de forma segura, pasa de la consideración inicial de residuo a la de sub-producto. Hay que añadir que desde su publicación por parte de la UE en la Directiva 2008/98/CE¹³, y por ende en España en la Ley 22/2011¹⁴, no resultan totalmente claros los límites de lo que está considerado como residuo y como sub-producto, lo que ha provocado algunas sentencias intentando aclarar estos límites en el seno del TJUE¹⁵ (Vázquez, 2011). No obstante, se pueden considerar sub-producto, aquellos materiales o sustancias que se puedan emplear reemplazando de forma segura a

¹³ Directiva Marco de Residuos.

¹⁴ Ley de Residuos y Suelos Contaminados.

¹⁵ Tribunal de Justicia de la Unión Europea.

las materias primas que son necesarias en el mismo o en otros procesos productivos, después de su valorización.

La valorización puede ser considerada según el fin al que esté destinado el residuo, de dos tipos, las denominadas valorización material y valorización energética. Si el residuo se transforma en un sub-producto que va a ser empleado como materia prima en el mismo u otro proceso industrial, estaremos en el primer caso, mientras que si lo que se persigue es el aprovechamiento de su poder calorífico sustituyendo al material combustible, nos encontraremos dentro del ámbito de la valorización energética. Por lo tanto, se puede postular sin lugar a dudas que la valorización material es preferible frente a la valorización energética según la jerarquía en la gestión de residuos, ya que la valorización energética estaría claramente dentro de las operaciones de valorización del penúltimo nivel, mientras que en gran medida (ya que sólo queda fuera de esta consideración, si el residuo se va a destinar a material de relleno o como combustible), la valorización material sería una opción más favorable, estaría un nivel por encima, englobada en lo que se denomina reciclado. De hecho, un residuo que se ha sometido a una valorización material, puede ser sometido posteriormente a una valorización energética.

1.2.1. La valorización

La valorización de residuos es una herramienta fundamental a la hora de acometer una eficiente gestión de los materiales de desecho que se generan en los procesos productivos, no sólo por el hecho de que encontrar para estos materiales, sustancias o productos, un uso posterior a su generación, con lo que conlleva a contribuir a la minimización de la cantidad de residuos generados. Sino también por el beneficio que supone el reducir el consumo y la dependencia de materias primas necesarias, colaborando a evitar el agotamiento de los recursos naturales no renovables.

Además, la valorización es un elemento clave para poner en la práctica el concepto de simbiosis industrial, donde los residuos de un proceso industrial son aprovechados como materia prima en otra industria, estableciéndose así relaciones de colaboración entre organizaciones industriales, a semejanza de lo que acontece con la simbiosis entre organismos vivos en la naturaleza, con el fin de contribuir a alcanzar el paradigma de desarrollo sostenible.

En nuestro caso, la industria siderúrgica en el proceso de producción de acero, genera significativas cantidades de residuos, y en concreto escorias de acería LD, lodos de horno alto y lodos de acería LD, susceptibles de ser valorizados. Mientras que la industria cerámica, por su parte, tiene la capacidad de admitir como materias primas a materiales o sustancias de diferente procedencia, como pueden ser los anteriormente citados residuos, sin tener que realizar importantes cambios en su proceso productivo. Parece factible pues, el establecimiento de una simbiosis industrial.

Recientes estudios e investigaciones, apoyan esta idea, la capacidad de la industria cerámica para la valorización de diversos tipos de residuos, resultado además destacable, el hecho de que la mayoría de las propuestas de valorización de residuos se realizan en el ámbito de la cerámica estructural (ladrillos, tejas, bovedillas). La justificación de esta tendencia es doble, por un lado, debido a que en este tipo de productos cerámicos, las exigencias de calidad son menores que para otros productos, y por otro lado, es debido al elevado consumo de materias primas en la industria cerámica ladrillera, que garantiza el uso diario de una gran volumen de residuos, aunque se incorporen en la mezcla con las materias primas en pequeños porcentajes (Ribeiro, Labrincha, & Ferreira, 2002).

En esta simbiosis industrial, tanto la escoria de acería LD, los lodos de horno alto, como los lodos de acería LD, pueden ser valorizados mediante un proceso térmico, como es el proceso de fabricación de materiales cerámicos, quedando así los residuos, fijados en la matriz cerámica o encapsulados y consiguiendo un producto seguro desde el punto de vista medio ambiental.

Siendo un proceso térmico, en la valorización de los residuos, la cocción en el horno representa la fase crítica, donde el tiempo de permanencia de las piezas cerámicas en el interior del horno suele estar comprendido entre las 10 y las 20 horas, y la temperatura de cocción existente en el mismo, entre los 980°C y los 1060°C. Circunstancias en las cuales, los componentes de naturaleza orgánica del residuo desaparecen por la acción de las altas temperaturas, y al mismo tiempo, la parte inorgánica del residuo quedará incluida en la matriz cerámica. De esta forma, se puede crear un límite entre los residuos aislados en el interior de la pieza cerámica y su comportamiento futuro respecto al medio ambiente, logrando la inertización del residuo (Elías, 2000).

El proceso de inertización, por el cual los residuos quedan incorporados en la matriz cerámica, se produce cuando por efecto del calentamiento en el horno de cocción, se forma una fase líquida que al solidificar a una determinada temperatura, forma una matriz arcilla/residuo, donde el residuo queda químicamente incluido, a este proceso se denomina ceramización. Un factor decisivo para que se produzca la ceramización es el tamaño de grano, ya que cuanto menor sea este, se alcanzará una mayor superficie específica y se facilitará las reacciones químicas de ceramización. Por el contrario, cuanto mayor sea el tamaño de grano se producirá lo que se conoce como encapsulación, ya que la superficie específica va a ser menor, no dándose las condiciones para que el residuo quede incluido químicamente en la matriz, y sólo quedando retenido de manera física, en este caso, si la pieza cerámica sufre una rotura o ataque químico, cabe la posibilidad de que el residuo quede expuesto al entorno y genere un impacto negativo sobre el medio ambiente. Mientras que en el primer caso, cuando se produce la ceramización, el residuo pasa a formar parte de la matriz cerámica, donde no tiene ninguna posibilidad de lixiviar y por lo tanto de afectar al medio (Elías(I), 2000).

En la etapa de cocción de las piezas cerámicas en el horno, también se produce otro proceso, el de sinterización, por el cual, se aumenta la densidad de las piezas cerámicas, con el fin de alcanzar un estado de máxima compactación y resistencia. Esto es debido a que con el incremento de temperatura en el horno, se provoca la unión de unas partículas con otras por medio de flujos de materia, que hacen que un material poroso se transforme a denso. La sinterización puede suceder indistintamente en presencia o no de fase líquida (Blanco, 2009).

El proceso productivo en la industria cerámica ladrillera, ofrece otra interesante posibilidad, ya que en el caso de que el residuo tenga en su composición materia orgánica, además de producirse la valorización material, al sustituir materias primas necesarias por residuo para la fabricación de las piezas cerámicas, también se producirá la valorización energética del residuo en la fase de cocción en el horno, al poder aprovecharse el poder calorífico que aporta dicha materia orgánica. Dándose el caso de una valorización material del residuo y posteriormente una valorización energética.

Todos estos argumentos hacen que la valorización de residuos en la industria cerámica resulte tan atractiva.

Concretamente en esta tesis, se desarrolla el estudio de la posible valorización de tres tipos de residuos, de los muchos que se generan en la producción de acero, mediante el proceso de siderurgia integral¹⁶. De esta forma, se persigue reducir su impacto sobre el medio ambiente y a la vez, contribuir a que el proceso industrial de fabricación de acero sea más sostenible. Los tres tipos de residuos generados en el proceso de fabricación de acero mediante el proceso de acería integral, objeto de estudio para su valorización son las escorias de acería LD, los lodos de horno alto y los lodos de acería LD.

Al mismo tiempo, con la valorización de estos tres residuos siderúrgicos en la industria cerámica ladrillera, se obtiene el beneficio medioambiental que supone la reducción del volumen de materias primas que se consumen en el proceso de fabricación de ladrillos, principalmente arcillas y en menor medida, arenas y otras sustancias como chamota, óxidos de hierro, carbón, serrín, cal, humus, etc.

Para alcanzar este objetivo, se ha diseñado una línea de investigación, en la cual, se estudia el uso potencial de las escorias de acería LD, los lodos de horno alto y los lodos de acería LD, como sustancias que reemplazan en parte a las materias primas tradicionales utilizadas en la fabricación de productos cerámicos clásicos, basados en materiales arcillosos, fundamentalmente ladrillos y bloques, empleados en la construcción.

La base de esta línea de investigación, consiste en la fabricación de piezas cerámicas en laboratorio, utilizando los distintos tipos de residuos junto a materias primas tradicionales, simulando el proceso industrial de fabricación, y sometiendo estos pequeños ladrillos a un amplio abanico de ensayos, empleados de forma habitual por la propia industria cerámica ladrillera para caracterizar la calidad del producto obtenido.

Estos ensayos y las especificaciones de calidad, vienen recogidos por una serie de normas UNE de aplicación en la industria cerámica ladrillera, que regulan los diferentes procedimientos a seguir.

Dichas normas UNE, serán las que nos indiquen si las piezas cerámicas fabricadas en laboratorio con los residuos siderúrgicos, cumplen con las especificaciones de calidad y son adecuados para uno u otro fin en la obra de fábrica, y por lo tanto, verifican la

¹⁶ En este caso se sigue la ruta integral, horno alto más acería LD, para la fabricación de acero.

valorización de las escorias de acería LD, los lodos de horno alto y los lodos de acería LD, dentro de la industria cerámica ladrillera.

1.3. Estructura de la tesis

La presente tesis de estructura en seis secciones.

La primera sección, está constituida por el capítulo primero, la introducción, en la cual se describen el objeto y los fundamentos de este trabajo.

En la segunda sección, se especifica el plan de trabajo que se ha seguido para alcanzar el objetivo que persigue la tesis.

La tercera sección, que compila la parte experimental de la tesis, empieza en el capítulo tercero, bajo el título de “Las Materias Primas”. En este capítulo, se presentan los materiales que se van a utilizar en la fabricación de las piezas cerámicas en laboratorio, arcillas y residuos siderúrgicos, detallando su origen y características.

El capítulo cuarto, detalla el estudio de la plasticidad de la arcilla y de las diferentes mezclas de arcilla con los diversos contenidos de los distintos residuos siderúrgicos.

En el capítulo quinto, se describe como se fabrican las piezas cerámicas en la industria de la cerámica estructural, y como se ha simulado este proceso industrial a nivel de laboratorio. Además, se especifican las piezas cerámicas que después del proceso de fabricación en laboratorio, han presentado defectos, causados por la aparición de corazón negro.

El capítulo sexto, pone fin a la tercera sección de la tesis, denominada “Parte Experimental”, y en el mismo, se detallan todos los ensayos de caracterización a los que se ha sometido a las piezas cerámicas fabricadas en laboratorio, tomando como guía a la normativa correspondiente, así como los resultados obtenidos y comentarios al respecto.

La cuarta sección contiene al capítulo séptimo, en donde queda constancia de la prueba industrial que se ha llevado a cabo.

Las conclusiones están recopiladas en el capítulo octavo, perteneciente a la quinta sección.

Por último, la bibliografía consultada para la realización de este trabajo, se detalla en la sexta sección de esta tesis.

II. Plan de Trabajo. Metodología

Plan de Trabajo. Metodología

En esta tesis se recoge un trabajo netamente experimental, desarrollado para el estudio de la posible valorización de tres tipos de residuos, de los muchos que se generan en la producción de acero, mediante el denominado proceso de acería integral.

Para alcanzar el objetivo propuesto en esta tesis, se ha diseñado una línea de investigación, en la cual, se estudia el uso potencial de los residuos siderúrgicos (escorias de acería LD, los lodos de horno alto y los lodos de acería LD), como materiales que sustituyen en parte a las materias primas tradicionales utilizadas en la fabricación de productos de cerámica estructural (arena, chamota, óxidos de hierro, carbón, serrín, cal, humus, e incluso arcilla), fundamentalmente ladrillos y bloques.

Como primera tarea y previamente al proceso de fabricación de las piezas cerámicas en el laboratorio, se va a estudiar cómo afecta la adición de los diferentes residuos en las distintas proporciones, a la plasticidad de la arcilla. Ya que resulta la propiedad fundamental de las arcillas de cara a la fabricación de los productos cerámicos, y la adición de estos materiales residuales puede suponer la alteración de esta propiedad.

Posteriormente, el plan de trabajo que se va a seguir, consiste en la fabricación de piezas cerámicas en laboratorio, utilizando los distintos tipos de residuos (ELD, LHA y LLD) en diferentes porcentajes (10%, 15% y 20%) junto a la materia prima esencial, la arcilla, simulando el proceso industrial de fabricación de la cerámica estructural. Para ello, se fijarán dos parámetros operacionales básicos para simular el proceso industrial, en la fabricación de las piezas cerámicas en el laboratorio. La presión de conformado (5 MPa, 10 MPa y 15 MPa) y la temperatura máxima de cocción en el horno (900 °C, 1000 °C y 1100 °C).

Finalmente, las piezas cerámicas fabricadas en el laboratorio con diferentes porcentajes de los diferentes residuos y arcilla, serán sometidas a un amplio abanico de ensayos, empleados de forma habitual por la propia industria de cerámica estructural para caracterizar la calidad del producto obtenido.

Estos ensayos y las especificaciones de calidad, vienen recogidos por una serie de normas UNE de aplicación en la industria cerámica, que regulan los diferentes procedimientos a seguir.

Las normas UNE que sirven de base para nuestro estudio son las siguientes:

- UNE 67028 EX 1997: Ladrillos cerámicos de arcilla cocida. Ensayo de heladicidad (AENOR, 1997).
- UNE EN 772-11 2001: Determinación de la absorción de agua por capilaridad de piezas para fábrica de albañilería, en hormigón, piedra natural y artificial, y de la tasa de absorción de agua inicial de las piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería (AENOR, 2001).
- UNE 67029 EX 1995: Ladrillos cerámicos de arcilla cocida. Ensayo de eflorescencias (AENOR, 1995).
- UNE EN 993-1(-2) 1996: Determinación de la densidad aparente y absoluta, de la porosidad abierta y de la porosidad total (AENOR, 1996) (AENOR(II), 1996).
- UNE 67039 1993: Productos cerámicos de arcilla cocida. Determinación de inclusiones calcáreas (AENOR, 1993).
- UNE 67036 1999: Productos cerámicos de arcilla cocida. Ensayo de expansión por humedad (AENOR, 1999).
- UNE EN 772-1 2002: Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Determinación de la resistencia a compresión (AENOR, 2002).
- UNE 67019 1996: Ladrillos cerámicos de arcilla cocida. Definiciones, clasificaciones y especificaciones (AENOR(I), 1996).

De esta manera, se podrá comprobar si las piezas cerámicas fabricadas utilizando porcentajes de escorias de acería LD, o de lodos de horno alto, o de lodos de acería LD, cumplen con las especificaciones de calidad establecidas, y por consiguiente, se podrá verificar la posibilidad de valorización de estos residuos siderúrgicos en la industria cerámica ladrillera.

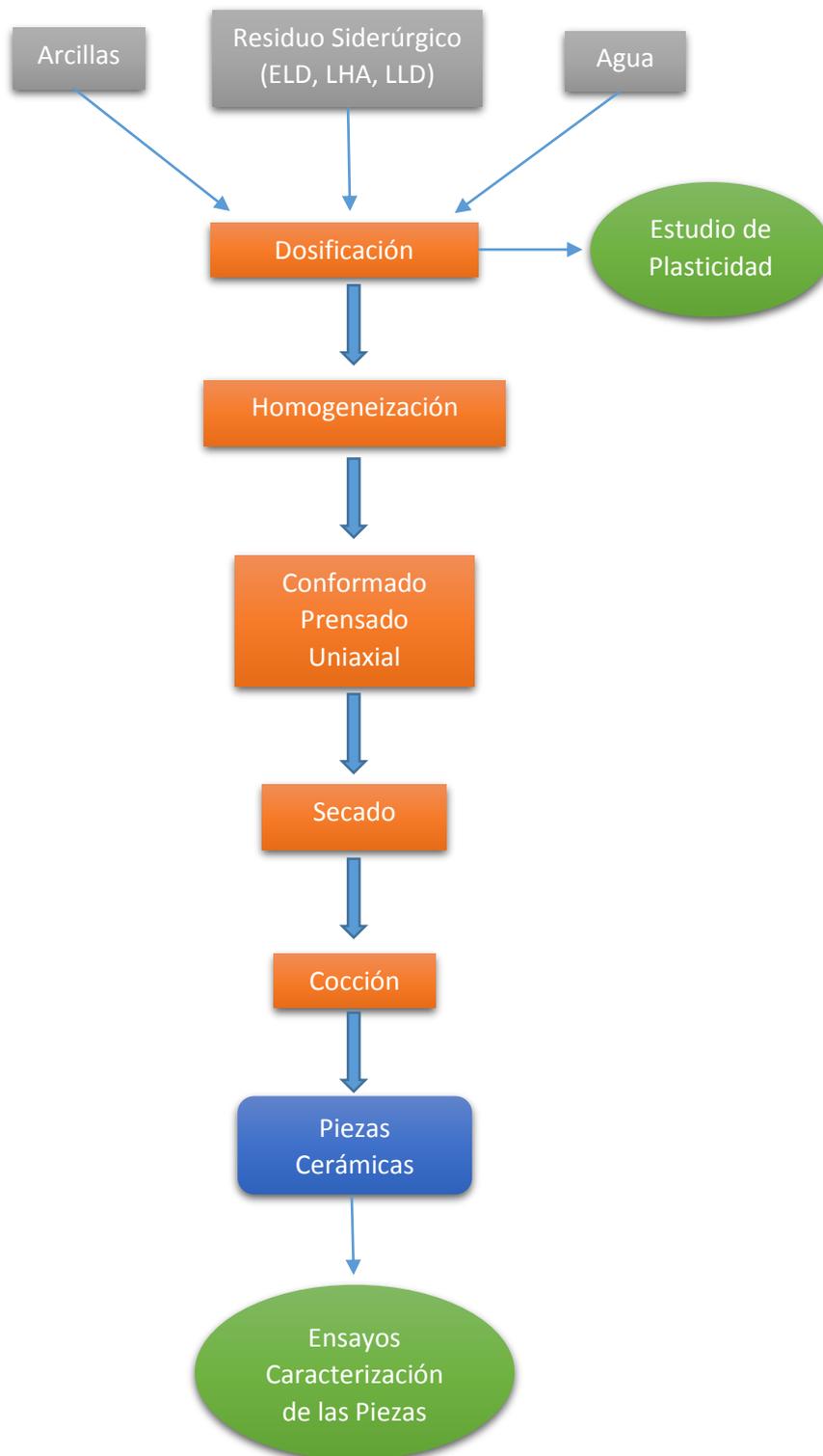


Figura 2. Diagrama de flujo del plan de trabajo.

III. Parte Experimental

Las Materias Primas

La industria cerámica es uno de los sectores que posee niveles elevados de consumo de recursos naturales, debido a la gran variedad y cantidad de materiales que necesita, por lo que no es indiferente al problema que supone el asegurar el abastecimiento de materias primas de calidad, y que este sea a un coste adecuado.

Una clasificación clásica de las materias primas que se consumen en el sector cerámico, es la que distingue entre dos grandes grupos, las materias primas que se denominan plásticas y las no plásticas. Las primeras son las que con más facilidad se asocian con la fabricación de productos cerámicos, las arcillas naturales, y que tienen la propiedad de ser moldeadas en presencia de agua. Mientras que en el segundo grupo, las materias no plásticas, incluyen un gran número de materiales con diferentes características que pueden actuar de diversos modos en el proceso de fabricación de los cerámicos (Sánchez, García-Ten, & Regueiro, 2006).

Dentro del grupo de las materias no plásticas, es posible distinguir distintos tipos de materias primas. Según su función y características, se pueden agrupar en desgrasantes, fundentes y quemantes.

Los materiales desgrasantes son utilizados para corregir una excesiva plasticidad que pueden presentar algunas arcillas, también para reducir el riesgo de aparición de grietas y/o fisuras en el proceso de secado, y además, ejercen la función de soporte de la forma cerámica. Estos materiales han de ser molidos finamente, ya que la mezcla con el material plástico ha de resultar homogénea. Dentro de este grupo de materiales se encuentran el cuarzo, el feldespato potásico, la escoria granulada, o la chamota, estando considerada esta última como el material desgrasante idóneo.

Los materiales fundentes se emplean para disminuir la temperatura de cocción en el horno, ayudando a reducir el punto de fusión del cerámico, lo que supone un ahorro energético. Los óxidos de hierro, el feldespato potásico o el carbonato cálcico, ya presente como impureza en las arcillas, son los materiales fundentes más empleados por la industria cerámica.

Finalmente, los materiales quemantes se utilizan con el objetivo de elevar la porosidad de las piezas cerámicas y reducir su peso, y facilitar una sinterización homogénea. Generalmente para alcanzar este fin, se emplean materiales orgánicos como lignitos o serrín (Blanco(I), 2007).

En cuanto a las materias plásticas, el concepto de arcillas naturales engloba a una gran variedad de materiales que presentan unas determinadas propiedades de plasticidad. La primera definición de arcilla, aparece en el año 1546 de la mano del padre de la mineralogía Georgius Agricola, en su obra *De Natura Fossilium* (Díaz & Torrecillas, 2002). Esta definición, y como es lógico pensar, ha sufrido revisiones a lo largo de la historia, llegando a crearse una cierta controversia, ya que se ha llegado a que en el término arcilla se tenga en cuenta, por un lado los aspectos mineralógicos y por otro lado el tamaño de partícula. Lo que ha finalmente llevado a que los comités de nomenclatura de la AIPEA¹ y la CMS² a proponer nuevas definiciones para lo que el término arcillas comprende.

Estos comités han acuñado el término arcilla, como un material de origen natural, compuesto por minerales de grano fino, que es capaz de comportarse plásticamente con ciertos contenidos de agua y que se endurece al secarse o cocerse. Por lo general, contiene filosilicatos y que también puede incluir otros materiales que contribuyen a la plasticidad, e igualmente al secarse o cocerse se endurecen. Al mismo tiempo, puede existir la presencia de otros materiales que no se comportan de manera plástica, así como de materia orgánica. Por otro lado, también han definido el concepto de mineral de arcilla como exclusivamente a los minerales del grupo de los filosilicatos y a aquellos otros que aportan plasticidad, y que después de secarse o cocerse se endurecen. Con esta definición se deja fuera a minerales que están presentes en las arcillas y que no presentan propiedades plásticas (Guggenheim & Martin, 1995).

Las arcillas de mayor demanda en la industria cerámica se pueden clasificar en tres grandes categorías, los caolines, las arcillas de cocción blanca y las arcillas rojas.

Los caolines son materiales que suelen tener color blanco, gris o amarillento, poseen un aspecto untuoso al tacto y un brillo terroso mate, o nacarado cuando es cristalino. En su composición poseen porcentajes variables de caolinita y/o haloisita, que en muchas

¹ Siglas en francés de la Asociación Internacional para el Estudio de las Arcillas.

² Siglas en inglés de la Sociedad de los Minerales de Arcilla.

ocasiones no alcanza el 20% tal como se obtiene en la cantera, por lo que para obtener aplicaciones industriales, es preciso someter el mineral extraído a procesos mineralúrgicos para concentrar el material y así obtener porcentajes de filosilicatos por encima del 80%. El caolín concentrado, o caolín lavado, suele aplicarse en la industria cerámica para mejorar el blanqueo del producto final, añadido en pequeños porcentajes. También suele utilizarse en la producción de cerámica sanitaria, de mesa, loza, fritas y esmaltes cerámicos (Bartolomé, 1997).

Las arcillas de cocción blanca, como su nombre apunta, suelen tener tonalidades del blanco al gris, en su composición presentan porcentajes de hierro inferiores al 3% y elevados contenidos de caolinita, y generalmente de illitas y montmorillonitas. Además de impurezas como el cuarzo, piritas, micas, yeso, etcétera (Marchán & Regueiro, 2014). En la industria cerámica suelen ser utilizadas para la fabricación de pastas para baldosas de pasta blanca, para loza, porcelana y cerámica sanitaria, así como en esmaltes y engobes. Las arcillas de cocción blanca, también son conocidas como arcillas refractarias o ball-clays (Criado, Regueiro, & Sánchez, 2001).

En cuanto a las arcillas rojas o arcillas comunes, así denominadas ya que poseen tonalidades rojizas, su composición es illítica con diversos porcentajes de caolinita, esmectita, clorita, cuarzo, piritas, materia orgánica y otros componentes. Pueden a su vez clasificarse según su capacidad fundente, en arcillas refractarias y arcillas fundentes.

Las arcillas refractarias presentan unas características y comportamiento similares a las anteriormente descritas arcillas refractarias de cocción blanca, con la salvedad de que al contener porcentajes superiores de óxidos de hierro, el producto cerámico final adquiere tonalidades rojizas y generalmente suelen emplearse en la fabricación de pavimentos de extrusión esmaltados. Por otro lado, dentro de las arcillas fundentes, se pueden diferenciar tres tipos según su contenido en carbonatos, desde nulo a elevado, pasando por medio. Las de bajo contenido en carbonatos se utilizan para pavimentos, gres; mientras que las arcillas que poseen medios o elevados porcentajes de carbonatos, son usadas en revestimientos cerámicos porosos (Marchán & Regueiro, 2014).

Las arcillas rojas son la materia prima básica del sector cerámico industrial, para la fabricación de pavimentos, revestimientos y cerámica estructural, y de la alfarería, además, también son material de consumo en las cementeras. La cerámica estructural se ocupa de

la producción de materiales de construcción, fundamentalmente los ladrillos y las tejas, para cuya fabricación se consumen una extensa variedad de arcillas rojas, con y sin carbonatos (Criado, Regueiro, & Sánchez, 2001).

Los niveles de calidad de las arcillas rojas que se utilizan en la cerámica estructural para la fabricación de ladrillos y tejas, son menores que los que se exigen para otro tipo de productos, ya que se admite la presencia de impurezas como el yeso, la materia carbonosa o los carbonatos. Este hecho, como ya se apuntó con anterioridad, hace que la inclusión de residuos sea menos traumática que para la fabricación de otros productos cerámicos, lo que hace de la cerámica estructural un sector industrial muy interesante para llevar a cabo operaciones de valorización de residuos.

La producción minera de arcilla roja en España se ha ido reduciendo en los últimos años, debido en gran medida a la crisis económica del año 2008 y la caída acusada de actividad del sector de la construcción, desde la cota más alta de explotación, las casi 23.270.000 de toneladas en el año 2008, hasta las aproximadamente 8.340.000 toneladas en año 2012, lo que ha supuesto una reducción en la producción del 64,16% en este período. De las algo menos de 8.340.000 toneladas de arcilla roja explotadas en el año 2012, el 55% se destinó a la industria de la cerámica estructural (Marchán & Regueiro, 2014).

	2008	2009	2010	2011	2012
Arcilla Común	23.269.056	13.294.900	12.185.240	9.940.234	8.339.049

Tabla 1. Evolución producción minera de arcilla roja en toneladas (2008-2012). IGME³.

A la par, si se contabiliza la producción de ladrillos y tejas ha ido mermando de los 20 millones de toneladas del año 2008, hasta los 5.200.000 de toneladas correspondientes al año 2012, lo que ha supuesto una reducción del 74% en la producción de este tipo de cerámicos (Marchán & Regueiro, 2014).

³ Siglas del Instituto Geológico Minero de España.

	2008	2009	2010	2011	2012
Productos de arcilla cocida	20.000.000	9.400.000	7.700.000	6.900.000	5.200.000

Tabla 2. Producción de tejas, ladrillos y similares en toneladas (2008-2012). HISPALYT⁴.

Las explotaciones mineras de arcilla roja para la fabricación de ladrillos o loza, se encuentran por toda España, circunstancia que se produce la presencia en casi cualquier lugar de este material, y por el hecho de que las explotaciones generalmente pertenezcan a empresas de pequeña entidad y muy diseminadas. Aunque es cierto que existen dentro del país, zonas con más concentración de explotaciones, como ocurre en el arco Mediterráneo, donde se concentra un tercio de la producción nacional. Estas explotaciones suelen encontrarse a su vez cercanas a las fábricas, debido a que la materia prima tiene un bajo precio y sólo posibilita económicamente su transporte en un radio cercano (Marchán & Regueiro, 2014).

3.1. Las arcillas

La arcilla que se ha utilizado para realizar este trabajo de investigación, ha sido suministrada por la empresa Cerámica Menéndez S.A. (CEMESA). Dicha empresa se encuentra en el término municipal de Oviedo, en la parroquia de Fitoria, a escasos tres kilómetros del mismo centro de la ciudad, al noreste. Como la mayoría de las empresas que operan en este sector, y como ya se ha apuntado anteriormente, la fábrica de cerámica se sitúa al pie de la explotación de arcillas.

⁴ Asociación Española de Fabricantes de Ladrillos y Tejas de Arcilla Cocida.

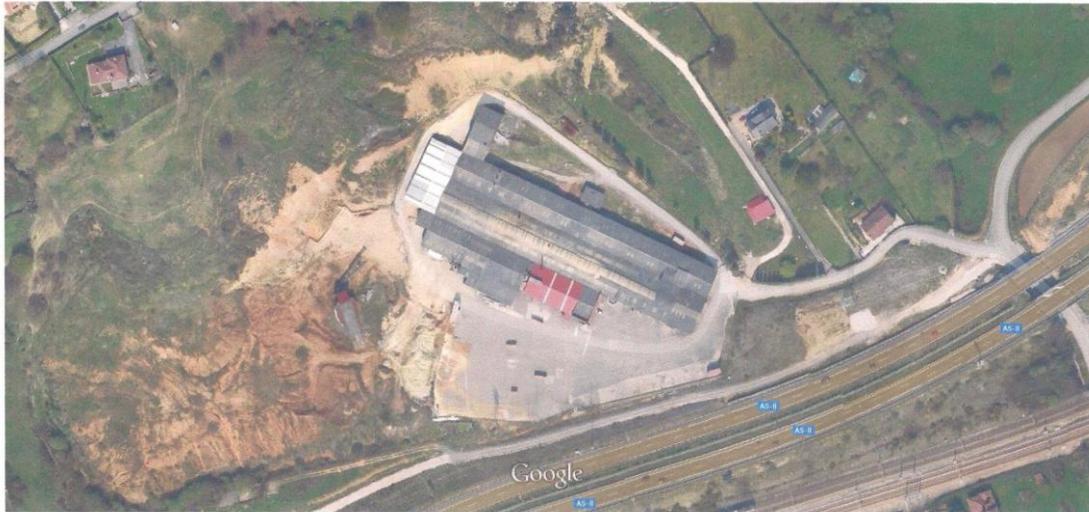


Figura 3. Fotografía aérea de fábrica y cantera de CEMESA. Google Maps.

Dicha explotación se encuentra inscrita en el catastro minero con el número de registro 1369 (Asturias), bajo el nombre de La Estrecha, estando catalogado el recurso como de la sección A), ocupando una superficie de 1 hectárea y con la autorización de explotación vigente hasta el mes de Septiembre del año 2019 (MINETUR, 2014).

En la cantera, se explotan arcillas terciarias, litológicamente pertenecientes al conjunto intermedio de los tres que se diferencian en la serie terciaria en los alrededores de Oviedo, y que conforma la zona inferior de la ladera sur del monte Naranco. Este conjunto de potencia estimada de 50 metros, está formado mayoritariamente por margas y arcillas con arenas en menor porcentaje, además es posible encontrar cantos silíceos de pequeño diámetro de forma puntual, así como varios paleocanales con la disposición norte-sur rellenos de arenas (Truyols, García Ramos, Casanovas-Cladellas, & Santafe-Llopis, 1991). Dentro del conjunto, la potencia de la capa de arcillas que está en explotación en la cantera, es de aproximadamente 25 metros.

El material suministrado por CEMESA procedente de su cantera, es el resultado de la mezcla de dos clases de arcillas, en la cual, la composición de la misma, posee un 60% de arcilla roja y un 40% de arcilla gris. La mezcla de distintos tipos de arcillas y otras sustancias, suele ser una práctica habitual en la industria cerámica ladrillera para obtener los diferentes productos, según la función a la que estén destinados. Al mismo tiempo que la tecnología utilizada, condiciona a su vez las especificaciones de las materias primas empleadas.

Debido al nivel tecnológico que la empresa CEMESA posee en su planta de fabricación, en ella se tiene la capacidad para poder elaborar hasta siete tipos de productos cerámicos diferentes. Los denominados bloque, ladrillo perforado 10, ladrillo perforado 7 y perforado 3 agujeros. Estos cuatro son ladrillos de arcilla cocida no destinados a ser expuestos al ambiente, de categoría I⁵, pieza HD⁶, para ser utilizados en construcción de muros resistentes, con exigencias acústicas, térmicas y frente al fuego. Además otras tres clases, rasilla, tabicón y tabique, también con exigencias acústicas, térmicas y frente al fuego, e igualmente no destinados a ser expuestos al exterior, pero de categoría II⁷, pieza HD, para uso en muros no resistentes (AENOR, 2003), (CEMESA, 2013).

A las arcillas suministradas para realizar esta investigación, se las ha sometido a una caracterización tanto química como mineralógica, para establecer su composición. El estudio de su estructura química es fundamental para poder clasificar el material ya que sirve para realizar su clasificación y determinar su carácter químico. Además, los datos que aporta el análisis químico son útiles como ayuda para determinar su composición mineralógica, la cual, nos proporciona los compuestos que verdaderamente están presentes en la arcilla.

	Arcilla Roja	Arcilla Gris	Mezcla Arcillas
SiO ₂	56,54	71,48	65,74
Al ₂ O ₃	14,62	15,98	13,86
Fe ₂ O ₃	5,23	2,87	4,99
CaO	7,65	0,01	3,46
MgO	1,64	0,45	1,24
Na ₂ O	0,12	0,13	0,12
K ₂ O	3,01	2,68	2,89
TiO ₂	0,70	0,75	0,74
MnO	0,06	0,04	0,08
P ₂ O ₅	0,17	0,11	0,14

⁵ Piezas con una resistencia a compresión declarada, con probabilidad de no alcanzarse, inferior al 5%. Se puede determinar con el valor medio o con el valor característico.

⁶ Pieza de arcilla cocida para fábrica de albañilería sin revestir, así como piezas de arcilla cocida con una densidad aparente alta para uso en fábrica revestida.

⁷ Piezas que no cumplan el nivel de confianza especificado para las piezas de Categoría I.

L.O.I.⁸	10,16	5,30	6,59
TOTAL	99,90	99,79	99,84

Tabla 3. Composición química (%) de las arcillas.

Como es natural, el porcentaje conjunto de óxidos de silicio y aluminio, tanto para la arcilla roja con un 71,16%, la arcilla gris con un 87,46% y la mezcla de arcillas con un 79,60% resultantes, es alto, como corresponde a los minerales de arcilla, ya que estos, están compuestos por aluminosilicatos hidratados. Es destacable el alto contenido en óxido de silicio (71,48%), en contraste con el pobre porcentaje de óxido de calcio (0,01%) que presenta la arcilla gris.

El contenido en óxido de aluminio es un parámetro que se emplea para medir la calidad y de esta forma, definir el fin al que se van a destinar las arcillas. Considerando únicamente estas arcillas como materias primas para la elaboración de productos cerámicos sin la adición de otros materiales, la relación existente entre los óxidos de aluminio y los de hierro que presentan en su composición química, por un lado, clasificaría a las arcillas rojas y a la mezcla de arcillas, como pobres en alúmina y ricas en hierro ya que presentan una relación aproximada de 3:1, y que son destinadas para la fabricación de cerámica estructural (bloques, ladrillos, tejas), exhibiendo colores que abarcan las tonalidades rojizas.

En cambio, la arcilla gris, tiene una relación entre óxidos de aluminio y óxidos de hierro superior a 5:1, por lo que se pueden englobar dentro del grupo de arcillas puras de alúmina, que son empleadas en la elaboración de productos refractarios o de porcelana de color blanco.

⁸ Pérdida por calcinación. Mediante este método, se determina el contenido en componentes volátiles de la muestra (agua, carbonatos, sulfatos, sulfuros).

	Arcilla Roja	Arcilla Gris	Mezcla de Arcillas
Cuarzo (SiO_2)	✓	✓	✓
Caolinita ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	✓	✓	✓
Illita	✓	✓	✓
Moscovita	✓	✓	✓
Calcita (CaCO_3)	✓		

Tabla 4. Composición mineralógica de las arcillas.

El análisis mineralógico pone de manifiesto la presencia como minerales arcillosos de caolinita, illita y moscovita en las tres arcillas.

La caolinita, que pertenece al grupo mineral de arcilla caolinita, conjuntamente con la dickita y la nacrita, se crea principalmente por la meteorización y alteración hidrotermal de feldespatos alcalinos en condiciones de acidez.

La illita pertenece al grupo mineral illita, como todas las hidrómicas, resulta de la meteorización de las micas o feldespatos alcalinos en un ambiente también alcalino. Las illitas son los minerales de arcilla más comunes en la corteza terrestre.

La moscovita es una mica bastante corriente, que tiene presencia en esquistos y gneises⁹, como mineral detrítico en sedimentos, así como en rocas plutónicas ácidas como los granitos pegmatíticos.

Del mismo modo, el cuarzo está presente en las tres arcillas, pertenece al grupo de minerales silíceos y se puede encontrar en gran variedad de rocas metamórficas, también en rocas sedimentarias, en rocas ígneas básicas y en filones.

Mientras que la calcita sólo aparece como componente mineralógico de la arcilla roja, es un carbonato hexagonal como la magnesita, la dolomita o la siderita, y se la puede encontrar en rocas ígneas básicas alteradas, en filones y en sedimentos (Whitten & Brooks, 1980).

⁹ Rocas bandeadas que se generan durante un metamorfismo regional de alto grado. Los gneises se caracterizan dependiendo del tipo de roca de la que proceden o de su tipo de formación (Whitten & Brooks, 1980).

A la vista de los resultados del análisis mineralógico, se puede deducir que el contenido de calcita presente en la arcilla roja es muy bajo, ya que en la mezcla de arcillas desaparece, debido a que esta queda diluida al mezclar la arcilla roja con la arcilla gris, que como se puede apreciar no contiene calcita, y como resultado ya no es detectable en el análisis. Este hecho, va a provocar que la mezcla de arcillas, material principal de las materias primas que se van a emplear para la fabricación de las piezas cerámicas, no contribuye a la aparición de lo que se denomina caliches, que producen fisuras y desperfectos en las piezas.

Los caliches se pueden generar por la descomposición de la calcita en el proceso de cocción en el horno, generando cal viva (CaO), y esta al hidratarse cuando las piezas se ponen en contacto con el agua, experimenta una fuerte dilatación, provocando fisuras en las piezas. Un método preventivo para evitar la formación de caliches, consiste en efectuar una molienda muy fina de las materias primas.

Por lo tanto, la mezcla de arcillas, material que se va a emplear como una de las materias primas para la elaboración de las piezas cerámicas, contiene en su composición mineralógica, cuarzo, caolinita, illita y moscovita.

3.2. Los residuos/sub-productos

Los residuos siderúrgicos que se van a utilizar en parte como materia prima para la elaboración de cerámica estructural, son generados en lo que se conoce como ruta integral para la fabricación del acero. Este proceso siderúrgico comprende desde la disposición y preparación de las materias primas necesarias como mineral de hierro, carbón, caliza o dolomía, su transformación en el horno alto para la producción de arrabio, el transporte de este arrabio hasta la acería LD donde se va a convertir en acero; hasta los procesos de obtención de los productos finales.

Uno de los dos factores clave en el sistema integral de producción de acero es el horno alto, en su interior se van a combinar mineral de hierro y carbono para producir el arrabio o hierro fundido. Previamente, el mineral de hierro necesita ser preparado, por medio de un proceso de molienda para obtener tamaños de grano adecuados, que son sometidos a separación magnética con el fin de obtener un concentrado de mineral de hierro con una pureza y granulometría adecuada para su carga en el horno alto. Los finos del mineral que

resultan rechazados, se recuperan aglomerándolos junto con fundentes (finos de carbón o coque) para introducirlos igualmente en el horno, por medio de un proceso de sinterización, cuyo resultado es a lo que se denomina *sínter*.

A su vez, el carbón, otra de las materias primas necesarias en este sistema integral de producción de acero, ha de ser transformado en los hornos de coque para eliminar la humedad e impurezas que pueda contener, y alcanzar porcentajes elevados de carbono. Para ello, el carbón junto con otras sustancias como alquitrán, hidrógeno y/o metano, con el fin de obtener un coque más rico en carbono, se calienta en los hornos de coque hasta temperaturas de 1100°C en atmósfera reductora, con déficit de oxígeno, obteniendo el coque siderúrgico, un material duro y poroso con porcentajes de carbono del 90%.

El mineral de hierro, *sínter* y coque se cargan por la parte superior del horno alto, conjuntamente a la caliza o dolomía, que actúan como fundentes responsables de retener las impurezas del mineral en la escoria de horno alto, evitando el escape de gas. Mientras que por la parte inferior del horno se inyecta aire caliente a presión elevada, enriquecido con sustancias como oxígeno, gas natural, carbón pulverizado, lo que sirve para sostener la carga y favorecer la combustión. De esta forma, al entrar en contacto a contracorriente coque y aire caliente, se produce una reacción térmica que provoca el desprendimiento de monóxido de carbono (CO). A su vez, el mineral de hierro reacciona con el monóxido de carbono, que hace que el mineral se reduzca, produciendo dióxido de carbono (CO₂) y hierro líquido o *arrabio*, que se recupera en la parte inferior del horno alto. El flujo de gases calientes también provocan que la caliza o dolomía, se descomponga en dióxido de carbono y óxido de calcio (CaO), y que reaccione con las impurezas del mineral de hierro formando la escoria de horno alto.



Figura 4. Vista de los hornos altos de Arcelor-Mittal en Veriña (Gijón). (CITOUOLA, 2013).

Obtenido el arrabio o hierro fundido se transporta a la acería por medio de vagones torpedero. Este material presenta porcentajes en hierro que pueden rondar el 95% y del 3,5% en carbono en su composición, mientras que el 1,5% restante, lo constituyen sustancias como el azufre, el fósforo, el manganeso o el silicio.



Figura 5. Tren con vagones torpedero perteneciente a Arcelor-Mittal. (Trigos, 2014).

Una vez que el vagón torpedo llega a la acería cargado con arrabio, aparece el segundo factor clave de este sistema de producción integral del acero, el convertidor de oxígeno. El arrabio se carga en el convertidor de oxígeno o BOF¹⁰ junto con chatarra de acero que actúa como medio refrigerante y fundentes, generalmente compuestos de cal. Una vez cargado, mediante una lanza se inyecta oxígeno a través de la carga, produciendo la descarburación exotérmica del arrabio en forma de monóxido y dióxido de carbono, y además favorecer la eliminación de impurezas (fósforo, silicio, manganeso) por oxidación, pasando a la escoria. En la fase final se añaden algunos aditivos del tipo ferroaleaciones (cromo, titanio, vanadio, níquel, molibdeno...) para dotar al acero de propiedades especiales, y ferrosilicio para eliminar el oxígeno en exceso. Una vez que se da por concluido el proceso, se bascula el convertidor y se extraen el acero fundido y las escorias de convertidor o escorias de acería LD.



Figura 6. Vertido de arrabio en el convertidor LD en la factoría de Arcelor-Mittal en Tabaza. (López M. , 2014).

Mediante las reacciones que se provocan en el convertidor de oxígeno, se consigue reducir el contenido de carbono del arrabio hasta valores por debajo del 1,7%, obteniendo acero, un material de gran dureza pero al mismo tiempo elástico, propiedad de la que carecía el

¹⁰ Siglas en inglés, horno de oxígeno básico.

arrabio, e indispensable para su posterior procesamiento, ya que puede ser extendido en planchas o hilos, además de poder absorber impactos.

El acero producido en el convertidor de oxígeno, pasa por la metalurgia secundaria con el objetivo de finalizar los procedimientos de afino y ajustar su composición, de manera que se alcancen las exigencias técnicas de los productos a fabricar. El afino se realiza en el horno de cuchara o cuchara de afino, inyectando en el acero fundido un gas inerte, como por ejemplo argón, con aditivos para minorar aún más, su composición de azufre, fosforo u oxígeno.

El acero líquido que sale del horno de cuchara, pasa a través de máquinas de colada continua donde solidifica en productos de sección uniforme dependientes de la forma del molde. Obteniendo desbastes planos, para la fabricación de productos planos como chapas, bobinas, hojalata, galvanizados; o bien desbastes de sección cuadrada que son destinados para la producción de perfiles, carriles, palanquilla.

Estos productos intermedios a través de procesos, tanto de laminación en frío como de laminación en caliente, se transforman en una amplia gama de productos terminados de acero, destinados a los sectores de la automoción, los electrodomésticos, los envases y embalajes o la construcción (ArcelorMittal, 2013), (Platts, 2013).

La única instalación que produce acero mediante la ruta integral en España, pertenece al Grupo Arcelor Mittal, está localizada en Asturias y consta de dos factorías interconectadas mediante una línea de ferrocarril. Una de las factorías se encuentra en Veriña, cerca de Gijón, en cuyas instalaciones se encuentran dos hornos altos y una acería, la otra se sitúa en Tabaza, muy próxima a la ciudad de Avilés y que consta con una gran acería.

Como se puede constatar, el sistema de producción de acero mediante esta ruta resulta altamente complejo y requiere el consumo de gran cantidad de materiales y energía, generando a su vez, una gran variedad y cantidad de residuos. De los cuales, los que se van a emplear para su valorización, escorias de acería LD, lodos de horno alto y lodos de acería LD, han sido proporcionados por las factorías de Veriña y Tabaza del Grupo Arcelor Mittal.

3.2.1. Las escorias de acería LD

Como ya se ha comentado, en el convertidor de oxígeno (BOF) se produce el proceso de oxidación del arrabio, con el que se reduce el contenido en carbono y se eliminan las impurezas, generando una vez finalizado, acero fundido y escoria. Aprovechando la diferencia de densidades entre el acero y la escoria, se lleva a cabo la separación de los dos materiales, ya que mediante el giro hacia un lado del convertidor se vierte primero el acero líquido, de mayor densidad, en una cuchara de afino e impidiendo la salida de la escoria. Una vez que esta operación ha concluido, se gira el convertidor hacia el otro lado, dejando salir entonces a la escoria sobre el cono de escorias.

El cono con la escoria es llevado a un foso donde la vierte, y a continuación se riega con agua, generando una reacción muy violenta que produce el enfriamiento súbito de la escoria y su fragmentación en diferentes tamaños. La escoria una vez enfriada, se transporta a un área anexa de tratamiento, donde se tritura, criba y se somete a clasificación magnética, para posibilitar la recuperación de trozos de acero que hayan quedado atrapados en la escoria. En ocasiones la escoria de acería LD resultante, es sometida a riego para su maduración. El material obtenido tiene un color grisáceo, es rugoso y árido al tacto, con cierta porosidad y densidad elevada, y de gran dureza (CEDEX, 2013).

La escoria de acería LD es un residuo que se genera en grandes cantidades, como muestra señalar que las escorias de acería LD constituyeron el 24,3% de los residuos generados en las plantas de Arcelor Mittal en Asturias en el año 2007, en cifras, unas 573.000 toneladas. Hecho que supone un problema, más teniendo en cuenta la difícil valorización de este material, lo que conlleva que su destino final en la mayor parte de las ocasiones, sea su almacenamiento o depósito en vertedero, con el consiguiente impacto sobre el medio ambiente. En el año 2007, de las 573.000 toneladas generadas, el 74% fueron almacenadas. Aproximadamente se producen alrededor de 118 kilos de escoria por cada tonelada de acero (del Olmo, 2008).

	2005	2007	2008	2009
Producción de escoria LD	585.000	573.000	500.000	440.000

Tabla 5. Producción de escoria de acería LD en toneladas en España. (del Olmo, 2008), (CEDEX, 2014).

La escoria de acería LD proporcionada por Arcelor Mittal se puede clasificar en cinco categorías dependiendo de su origen, bien si proceden de la acería de la factoría situada en Veriña o de la que se encuentra en las inmediaciones de Avilés (Tabaza), y de su granulometría. A estos cinco grupos de escorias se les ha sometido a análisis químicos y mineralógicos, al igual que se ha hecho con las arcillas, para su caracterización.

	Escoria Veriña (0/10 mm)	Escoria Avilés (Todo uno)	Escoria Avilés (0/10 mm)	Escoria Avilés (10/19 mm)	Escoria Avilés (19/50 mm)
SiO ₂	14,41	12,79	14,03	13,22	11,36
Al ₂ O ₃	3,12	1,57	3,50	4,36	8,05
Fe ₂ O ₃	31,52	27,17	26,30	27,15	22,16
CaO	39,25	48,30	44,31	44,31	48,60
MgO	5,46	3,33	3,89	3,88	3,34
Na ₂ O	0,05	0,06	0,03	0,04	0,04
K ₂ O	0,10	0,01	0,10	0,03	0,02
TiO ₂	0,50	0,59	0,57	0,62	0,62
MnO	3,56	4,24	4,04	4,62	3,90
P ₂ O ₅	1,11	1,50	1,25	1,26	1,30
L.O.I.	0,89	-	1,78	-	-
TOTAL	99,99	99,55	99,85	99,52	99,40

Tabla 6. Composición química (%) de las escorias de acería LD.

El análisis químico de la escoria LD obtenido mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X, pone de manifiesto que su composición está integrada por óxidos, como consecuencia del proceso de afino que sufre el arrabio.

El contenido en óxido de cal (CaO), como cabría esperar es uno de los componentes mayoritarios, siendo su presencia mayor en las escorias LD de Avilés que en la escoria de Veriña. Se puede apreciar además, como dentro de las distintas granulometrías de la escoria de Avilés, el contenido en cal es superior conforme mayor es el tamaño de la escoria, hecho que se traslada a la escoria todo uno, con toda seguridad el mayor porcentaje que presenta respecto a la de los tamaños (0/10) y (10/19), es a causa de la contribución de los tamaños grandes (19/50) en el total. Cabe resaltar que parte de esta cal con seguridad se encuentra

en forma libre, lo que le confiere en presencia de humedad una gran capacidad de expansión al convertirse en hidróxido de calcio, en un plazo de tiempo relativamente corto. Lo mismo ocurre con la magnesia (MgO), pero en menor medida y en un plazo de tiempo mayor. El óxido de magnesio al contrario que sucedía en el caso de la cal, presenta en la escoria de Veriña valores más altos que los que se han obtenido de las escorias de Avilés. Y comparativamente entre estas últimas, los valores más altos corresponden a los tamaños (0/10) y (10/19), al contrario que sucedía con los contenidos en cal, siendo muy parejos de nuevo en el caso de las escorias todo uno y las de tamaño (19/50), este efecto pone de nuevo de manifiesto la influencia de la escoria (19/50) en la todo uno.

Generalmente es usual efectuar riegos con agua sobre pequeñas pilas de escoria LD para hacerla madurar, hidratando los elementos inestables y así prevenir los potenciales efectos expansivos que pueden producirse a posteriori.

Los contenidos en óxido de hierro (Fe_2O_3), el otro componente mayoritario, son más elevados en la escoria de Veriña que en el resto de escorias. Mientras que de entre las escorias de Avilés, son las granulometrías más pequeña e intermedia, las que presentan los mayores porcentajes, y en este caso, las que influyen en que la escoria todo uno presente valores similares a las mismas. El mayor contenido en hierro proporciona mayor densidad.

En cuanto al óxido de silicio (SiO_2), los valores que se han obtenido de todas las escorias son bastante análogos, mencionar no obstante que da la impresión que el contenido de óxido de silicio está más ligado a la granulometría que a la procedencia de la escoria como puede observarse. La escoria de Veriña y la escoria de Avilés con tamaños (0/10), presentan casi los mismos valores, mientras que por otro lado, se puede comprobar como al ir aumentando el tamaño de grano, el porcentaje de óxido de silicio en la escoria de Avilés disminuye. La escoria todo uno presenta valores menores, influenciada esta vez por los contenidos de óxido de silicio del grupo de escorias de Avilés con tamaños mayores.

Los mayores contenidos en óxidos de calcio y de magnesio, frente a los menores porcentajes de óxidos de silicio y de fósforo, hacen que la escoria de acería LD tenga un carácter alcalino.

En todas las muestras de escoria LD, el contenido en alúmina (Al_2O_3) es bajo, no obstante, de entre las escorias de Avilés, el análisis de la del grupo de tamaños (19/50) ha dado un resultado más alto que el resto.

Del resto de componentes (MnO , P_2O_5) se puede concluir que todas las escorias presentan valores muy similares para cada uno de ellos respectivamente, obteniéndose además valores no significativos de los componentes minoritarios (Na_2O , K_2O , TiO_2).

	Escoria Veriña (0/10)	Escoria Avilés (Todo uno)	Escoria Avilés (0/10)	Escoria Avilés (10/19)	Escoria Avilés (19/50)
Silicato Dicálcico (Ca_2SiO_4)	✓	✓	✓	✓	✓
Silicato Tricálcico (Ca_2SiO_5)					
Ferrita Dicálcica ($\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$)	✓	✓		✓	✓
Compuesto ($\text{Ca}_2\text{Fe}_7\text{O}_{11}$)		✓			
Cal (CaO)					✓
Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)	✓		✓		
Calcita (CaCO_3)	✓		✓	✓	✓
Cuarzo (SiO_2)	✓		✓	✓	

Tabla 7. Composición mineralógica de las escorias de acería LD.

También se ha sometido a todas las escorias de acería LD suministradas al ensayo de difracción de rayos X, para poder averiguar su composición mineralógica. El dato más significativo es la presencia del silicato dicálcico en todas escorias y a su vez, en ninguna muestra se ha podido detectar la presencia de alita (silicato tricálcico). Por otro lado, la ferrita dicálcica se encuentra en todas las escorias menos en la escoria de Avilés (0/10), lo cual no parece lógico. Además, dentro de la familia de los ferritos cálcicos, aparece el compuesto $\text{Ca}_2\text{Fe}_7\text{O}_{11}$ en la escoria de Avilés todo uno.

La cal libre (CaO) sólo está presente en la composición mineralógica de la escoria de Avilés (19/50). Mientras que la cal hidratada o portlandita, aparece en el grupo de escorias de granulometría (0/10) tanto en la procedente de la factoría de Veriña como la de Avilés.

A la vista de los datos arrojados por el ensayo, no resulta congruente que la presencia de calcita (CaCO₃), se manifieste en las distintas escorias LD de Avilés clasificadas por su granulometría y que este compuesto no haya aparecido en la catalogada como todo uno, ya que si se ha constatado su presencia en todas las granulometrías, lo normal sería que también lo hiciera en la escoria todo uno.

La presencia tanto de calcita, como de cal o de portlandita en las escorias de acería LD, puede contribuir a la formación de caliches en las piezas cerámicas, hecho que habrá que tener en cuenta a la hora de la fabricación de los ladrillos. Una solución preventiva para evitar la formación de caliches, consistirá en ejecutar una molienda a tamaños muy finos de estos materiales.

3.2.2. Los lodos de horno alto

En el proceso industrial para la fabricación de acero mediante la ruta integral, la primera fase consiste en la reducción de los óxidos de hierro en el horno alto. Durante esta operación, se van a generar elevadas cantidades de gases dentro del horno, que arrastran consigo volúmenes de partículas sólidas en suspensión.

Con el fin de depurar estos gases para minimizar su impacto sobre el medio ambiente y/o para poder ser aprovechados energéticamente, se les hace pasar por lo que se denomina botellón, una cámara de sedimentación donde las partículas de mayor tamaño son retenidas y recuperadas para con posterioridad ser recicladas en el sinter. Posteriormente, con el fin de recuperar las partículas más finas que aún contienen los gases, se les conduce a torres de lavado, donde por acción del agua se consigue separar las partículas finas, generando los lodos de horno alto.

Con el objetivo de recuperar el agua para poder utilizarla de nuevo en el proceso de lavado, los lodos de horno alto a la salida de las torres, se someten a operaciones de separación, aprovechando la diferencia de densidad existente entre las partículas sólidas y el agua en decantadores, también conocidos como espesadores o sedimentadores según la finalidad

que se pretende, del tipo Dorr¹¹. En ellos, el concentrado de lodos se recoge en el fondo por sedimentación y el agua más limpia por rebose en la superficie del tanque. El lodo recogido por el fondo tiene un elevado contenido en humedad, por lo que es procesado finalmente en un filtro prensa de membranas, con el objetivo de recuperar más agua y restarle contenido en humedad, de esta forma además, se consigue un lodo más manejable. Gracias al filtro prensa de membranas se ha logrado reducir el contenido de humedad que presentan los lodos de horno alto, por debajo del 27%.

Los lodos de horno alto supusieron el 0,9% de los residuos generados en las plantas de Arcelor Mittal en Asturias en el año 2007, evidentemente este residuo sólo se produce en la factoría de Veriña, que es en la que están situados los hornos altos. Lo que se traduce en una cantidad en ese año, de algo más de 20.000 toneladas húmedas. Por lo que según estos datos, por tonelada de arrabio producida, se generaron 5,2 kilogramos de lodos de horno alto (del Olmo, 2008).

Los lodos de horno alto suministrados por Arcelor Mittal, debido a su contenido en humedad, antes de ser sometidos a los diferentes ensayos para determinar su composición química y mineralógica, se han secado en estufa, y así eliminar su contenido de agua. Obteniéndose un material de carácter pulverulento de color negro y granulometría muy fina.

Posteriormente y debido al potencial contenido en material carbonoso de los lodos de horno alto, se procedió a calcinar una muestra en un horno de mufla a una temperatura de 975 °C, durante una hora.

El resultado de la calcinación resultó ser una pérdida en peso del 40,63%, sin duda vinculado en gran medida a la combustión de la materia carbonosa presente en los lodos. Además, la calcinación provocó la aparición en la superficie de la muestra de una sustancia de color blanco y en forma de pequeñas agujas. Analizando una muestra de estas agujas blancas mediante difracción de rayos X, se determinó que se trataba de óxido de zinc.

¹¹ Recipiente cilíndrico de gran diámetro, con un fondo plano, que consta de un eje en el centro que con su giro hace mover unos rascadores muy próximos al fondo del tanque, que sirven para recoger la parte de mayor densidad y al mismo tiempo generar cierto movimiento en el líquido, favoreciendo la sedimentación (Costa, y otros, 1991).

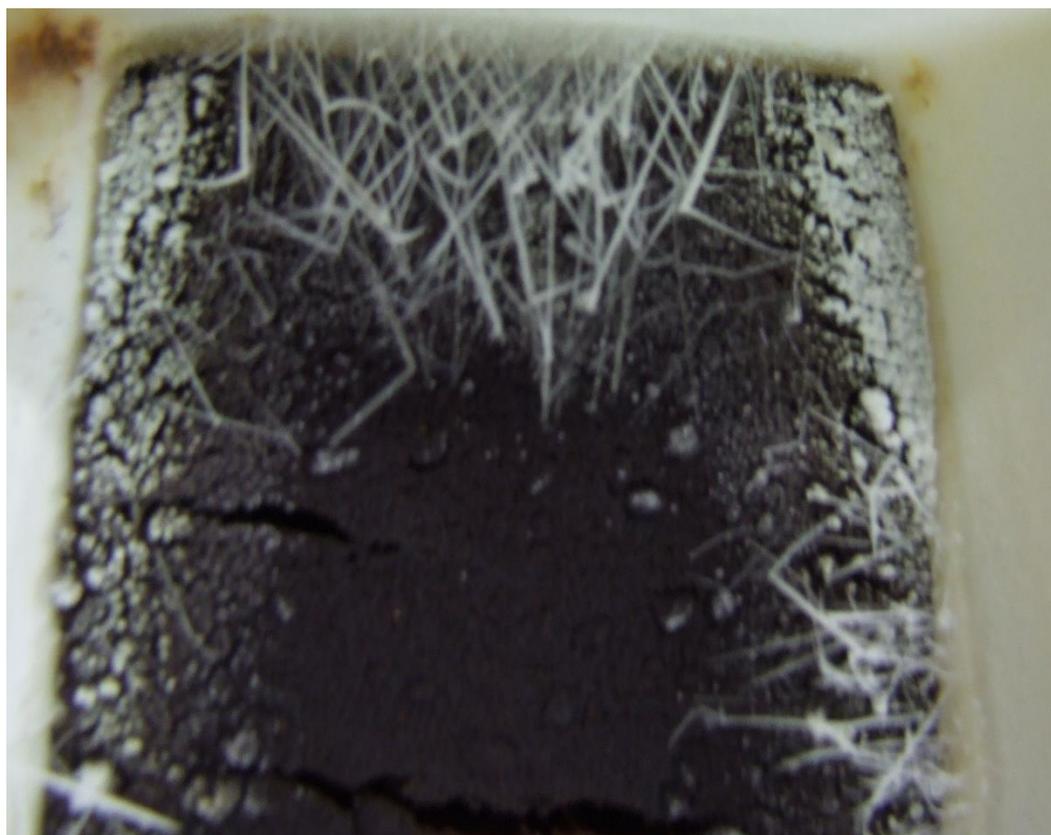


Figura 7. Agujas de óxido de zinc en la muestra calcinada de lodos de horno alto.

Además de estos datos, el análisis químico ha confirmado el alto porcentaje de hierro, en forma de óxido de hierro III, (30,03%).

Lodos de Horno Alto	
SiO ₂	9,91
Al ₂ O ₃	5,03
Fe ₂ O ₃	30,03
CaO	3,98
MgO	1,33
Na ₂ O	1,80
K ₂ O	1,65
TiO ₂	0,14
MnO	0,17
P ₂ O ₅	0,31

Zn	6,30
L.O.I.	40,63
TOTAL	101,28

Tabla 8. Composición química (%) de los lodos de horno alto.

Todos estos resultados, sirven para verificar que los lodos de horno alto tienen altos contenidos en materia carbonosa y hierro, según los valores de la pérdida por calcinación y del análisis químico, lo que hacen de este residuo un material de interés para su potencial reutilización en el horno alto. No obstante, el hecho de que presenten zinc en una cantidad significativa (6,30%), y como se constata en la aparición de las agujas blancas en la calcinación de la muestra de lodos, hace que su reciclado en el horno alto no sea factible. Esto es debido a que si se introduce este material de nuevo en el horno, se puedan llegar a formar pegotes dentro del mismo, que dificulten la circulación de los materiales en su interior. Además, estas cantidades de zinc pueden atacar al refractario del horno, disminuyendo su espesor.

Por lo tanto, los lodos de horno alto que tengan en su composición cantidades significativas de zinc, conviene que su potencial valorización, se produzca fuera del proceso integral de fabricación de acero.

El elevado contenido en materia carbonosa de los lodos de horno alto (40,63%), hace pensar en la posibilidad de aprovechamiento de su potencial energético en el proceso de fabricación de ladrillos, al introducir este residuo como sustituto en parte, de las materias primas necesarias. Por este motivo, se ha procedido a determinar el poder calorífico de los lodos de horno alto.

El poder calorífico de una sustancia combustible, es una propiedad física que cuantifica el calor que en un proceso de combustión puede llegar a desprender dicho material o sustancia. Se puede definir como el número de calorías que puede producir un kilogramo de sustancia combustible durante una combustión completa, es decir, cuando todo el carbono presente en su composición se transforma en dióxido de carbono (CO₂). Esta magnitud se puede expresar con diferentes unidades, como megacalorías por kilogramo

(Mcal/kg) o por metro cúbico (Mcal/m³), kilojulios por kilogramo (KJ/kg), BTU¹² por libra (BTU/lb) o por pie cúbico (BTU/pie³).

Según se mida el poder calorífico, se puede distinguir entre dos tipos de valores, el poder calorífico superior (PCS) y el poder calorífico inferior (PCI).

Si medimos el poder calorífico superior, el material o la sustancia combustible y el aire que lo rodea, deben de hallarse a la temperatura de 0 °C en el inicio de la combustión, una vez concluida y después de la misma, han de llevarse de nuevo a dicha temperatura. De esta forma, el vapor de agua que se genera se va a encontrar enteramente condensado, por lo que habrá una aportación de calor extra, que no procede de la combustión propiamente. Mientras que si se determina el poder calorífico inferior, las condiciones de partida serán las mismas (0 °C), pero en este caso, una vez finalizada la combustión, no se vuelve a las condiciones iniciales de temperatura. Por este motivo, el vapor de agua no llega a condensar, lo que implica que no se tenga aportación de calor extra por la condensación del vapor de agua (López, F., & G., 2010).

En este estudio se ha optado por la primera técnica, para de esta forma, determinar el poder calorífico superior (PCS). Con este objetivo, se ha seguido la norma UNE 32105:1995, mediante calorímetro adiabático, empleando bomba calorimétrica, donde se ha introducido una pastilla de 1 gramo de lodos de horno alto, con unas condiciones de combustión de volumen constante y presión de oxígeno de aproximadamente 23 atmósferas (AENOR(I), 1995).

El poder calorífico superior de los lodos de horno alto que se ha obtenido mediante este ensayo ha resultado ser de 2998 kcal/kg o 12.532 KJ/kg, un valor del potencial energético del residuo nada despreciable de cara a su valorización. Este hecho se traduce, en que este residuo resulta de gran interés de cara a su utilización, ya que se trata de un caso en el que primero se da la valorización material y posteriormente la valorización energética.

Al igual que en los casos anteriores, se ha utilizado la técnica de difracción de rayos X para determinar la composición mineralógica de los lodos de horno alto. Con este ensayo se ha

¹² BTU son las siglas de British thermal unit. (Unidad térmica británica).

podido identificar que la muestra analizada contiene como fases minerales hematites, magnetita, anhidrita y franklinita.

Lodos de Horno Alto	
Hematites (Fe_2O_3)	✓
Óxido de hierro (Fe_3O_4)	✓
Anhidrita (CaSO_4)	✓
Franklinita (ZnFe_2O_4)	✓
Sulfato Óxido de Zinc ($\text{Zn}_3\text{O}(\text{SO}_4)_2$)	Fase probable

Tabla 9. Composición mineralógica de los lodos de horno alto.

3.2.3. Los lodos de acería LD

En el proceso de producción del acero líquido en el convertidor de oxígeno (BOF), al igual que sucedía en el caso del horno alto al ser procesos reactivos a alta temperatura, se van a generar gases en su interior que arrastran cantidades de partículas sólidas en suspensión en su salida, generalmente, polvos metálicos, óxidos, partículas finas de fundentes (cal, dolomía), otros elementos residuales no deseados en el acero, etcétera. Este material pulverulento se produce debido a la vaporización del hierro y de otros metales que pueden estar presentes en el convertidor de oxígeno, como el zinc, la eyección de gotas de arrabio líquido de muy pequeño diámetro y la generación y movimiento de finos de material fundente (Madías, 2012).

En este caso y al igual que sucedía con los gases de horno alto, los gases de convertidor de oxígeno han de ser depurados, con el objetivo de minimizar su potencial impacto sobre el medio ambiente y/o para poder ser aprovechados energéticamente.

El gas de acería LD es sometido a una separación por vía húmeda de forma similar al procedimiento que se emplea para depurar los gases de horno alto, se hace pasar por torres de lavado, donde el agua que se inyecta arrastra a las partículas sólidas del gas, separando de esta forma los sólidos en suspensión de la corriente gaseosa. Acto seguido, el agua con los sólidos en suspensión, se conduce por medio de canales hasta tanques de sedimentación, con la finalidad de poder recuperar el agua y que así pueda ser utilizada de

nuevo en el procedimiento de lavado. Por la parte superior del tanque y por rebose, se recupera el agua limpia y por la parte inferior del mismo, el concentrado de lodos gruesos. Finalmente, se trata a este concentrado de lodos en un filtro prensa de membranas, alcanzando los lodos de acería LD un contenido en humedad adecuado para facilitar su manejo y recuperar más volumen de agua.

La generación de lodos de acería LD significaron un porcentaje del 3,4% de los residuos producidos en el año 2007 en las factorías asturianas de Arcelor Mittal, lo que en masa supusieron algo más de 75.000 toneladas.

Por cada tonelada de acero se produjeron 23,4 kilogramos de lodos de acería LD en el año 2007 (del Olmo, 2008).

Los lodos de acería LD suministrados por Arcelor Mittal han sido sometidos a análisis químico y mineralógico al igual que los demás materiales empleados como materias primas para la fabricación de las piezas cerámicas.

Lodos de Acería LD	
SiO ₂	0,96
Al ₂ O ₃	0,01
Fe ₂ O ₃	86,85
CaO	9,52
MgO	1,43
Na ₂ O	0,15
K ₂ O	0,05
TiO ₂	0,05
MnO	0,55
Zn	0,095
P ₂ O ₅	0,12
L.O.I.	0,21
TOTAL	99,90

Tabla 10. Composición química (%) de los lodos de acería LD.

A la vista del análisis químico, se puede observar el muy alto contenido en hierro que presentan los lodos de acería LD (86,85% de Fe_2O_3), así como un porcentaje de óxido de cal del 9,52% como cifra más significativa del resto.

El elevado contenido en hierro hace que este residuo sea de gran interés para la compañía, ya que puede ser reciclado dentro de sus instalaciones en el proceso de elaboración del sinter, y ser reutilizado como carga en el horno alto. No obstante, el contenido en zinc de los lodos de acería LD, va a resultar el factor decisivo para poder optar por esta solución. Si los lodos contienen porcentajes significativos de zinc, al reintroducirlos en el horno alto, podrían provocar la formación de pegotes, que obstaculizarían la circulación de los materiales en el interior del horno y además, atacarían al refractario reduciendo su espesor. En este caso, los lodos suministrados por Arcelor Mittal no presentan una cantidad significativa en zinc (0,095%), por lo que lo lógico sería reutilizarlos en el propio proceso de fabricación de acero. Esto no siempre es así, ya que depende del tipo de materiales que se cargan en el convertidor de oxígeno, como por ejemplo, del tipo de chatarra, si está galvanizada o no.

Aunque los lodos de acería LD no contengan cantidades significativas en zinc, en esta tesis se va a estudiar su potencial valorización de igual forma que si las tuvieran, fuera de la industria siderúrgica, en la industria ladrillera.

Lodos de Acería LD	
Wustita (FeO)	✓
Hierro (metálico)	✓
Hematites (Fe_2O_3)	✓
Magnetita (Fe_3O_4)	✓
Cuarzo (SiO_2)	✓
Calcita (CaCO_3)	✓

Tabla 11. Composición mineralógica de los lodos de acería LD.

Mediante la difracción de rayos X se han podido identificar los distintos componentes mineralógicos de los lodos de acería LD. Destaca el hecho de que casi todas las fases minerales son óxidos de hierro, wustita, hematites y magnetita, así como hierro metálico,

fiel reflejo del origen de los lodos. Completando la composición mineralógica, cuarzo y calcita.

La presencia de calcita en la composición de los lodos de acería LD, y como estos van a ser sustitutos en parte de las materias primas necesarias para la fabricación de ladrillos, puede contribuir a la formación de caliches en las piezas cerámicas, un hecho a tener en cuenta de cara a la fabricación de los mismos. Como ya se ha mencionado anteriormente, para prevenir la aparición de caliches, conviene reducir a tamaños de grano muy finos mediante la molienda del residuo, aunque en este caso, debido a la naturaleza pulverulenta de los lodos, no hará falta una reducción a granulometrías muy finas.

El Estudio de la Plasticidad

La plasticidad es la característica física más importante que poseen las arcillas, ya que en ella se ha basado el aprovechamiento de este mineral, para la fabricación de todo tipo de objetos de cerámica desde la antigüedad. Esta característica puede definirse como la capacidad que tiene un material para ser deformado sin romperse, a causa de un esfuerzo mecánico y que posteriormente al retirar la fuerza aplicada, conservar la deformación adquirida.

El comportamiento plástico que presentan las arcillas, depende esencialmente, del porcentaje de agua que pueden presentar, no obstante, en algunos casos y con independencia del contenido de agua, se puede encontrar arcillas que presentan una plasticidad más elevada. Este hecho es achacable directamente a las propiedades fisicoquímicas de cada arcilla, como su morfología laminar, el tamaño de partícula y su capacidad de hinchamiento (Ginés, Feliu, García-Ten, & Sanz, 1997).

Una arcilla se puede considerar más plástica que otra, cuando tolera mayores deformaciones sin que se produzca agrietamiento. Hecho que ocurre generalmente cuando la arcilla presenta unas granulometrías muy finas, o lo que es lo mismo, una elevada superficie específica, y mayores imperfecciones en su estructura.

La superficie específica de una arcilla representa la suma de las áreas de la superficie externa y la superficie interna en metros cuadrados, dependiendo de si esta existiera, de las partículas que la constituyan, por unidad de masa en gramos (Blanco(II), 2004).

La mezcla de arcillas con las que se ha trabajado posee en su composición mineralógica caolinita e illita, que respecto a otras fases minerales de arcilla, presentan valores en cuanto a su superficie específica, algo menores. La caolinita, dependiendo su cristalinidad, puede alcanzar valores de hasta $15 \text{ m}^2/\text{gr}$, si es de elevada cristalinidad, o bien hasta $50 \text{ m}^2/\text{gr}$ si se trata de caolinita de baja cristalinidad. En cuanto a la illita, esta puede alcanzar valores de hasta $50 \text{ m}^2/\text{gr}$ de superficie específica. Por lo tanto, tener una superficie específica menor respecto a otros minerales de arcilla, como la montmorillonita ($80\text{-}300 \text{ m}^2/\text{gr}$), la

sepiolita (100-240 m²/gr) o la bentonita (150-800 m²/gr), hace que su plasticidad sea menor.

Las arcillas según su comportamiento plástico, se pueden dividir en arcillas grasas y arcillas magras. Las primeras, son la que poseen un grado de plasticidad elevado incluso con contenidos mínimos de agua, se pueden moldear fácilmente pero presentan un elevado grado de adherencia, lo que supone un problema en momento de desmoldeo de las piezas. Mientras que las arcillas magras son las que presentan una baja plasticidad. Las arcillas magras suelen tener en su composición, pequeños porcentajes de minerales arcillosos y una elevada concentración en arenas silíceas.

Con la finalidad de aumentar la plasticidad de las arcillas magras, se pueden añadir materiales plastificantes, como otras arcillas de alta plasticidad, o materiales como hidróxido, carbonato o silicato sódico, cal, oxalato o humus. En el caso opuesto, cuando se tiene arcillas grasas, de alta plasticidad, para evitar problemas de adherencia en el desmoldeo de las piezas, es posible reducir el grado de plasticidad añadiendo materiales desgrasantes, como chamota, escoria granulada, arena de cuarzo o feldespatos potásico. Todos estos materiales se tendrán que añadir finamente molidos, para preservar la homogeneidad de la mezcla arcillosa.

En este trabajo de investigación, se ha estudiado el comportamiento plástico de la arcilla al añadirle como sustitutos de materiales desgrasantes y en parte de la propia arcilla, las escorias de acería LD, los lodos de horno alto o los lodos de acería LD. Ya que esta adición de los diferentes residuos, puede alterar la plasticidad de la arcilla y generar un problema en el proceso de fabricación de las piezas cerámicas en la fase de extrusión, en la cual es indispensable que la plasticidad se mantenga.

Para determinar la plasticidad de estas mezclas, se ha empleado un método indirecto, el método de Atterberg, por el cual no se evalúa exactamente la plasticidad, sino propiedades más o menos relacionadas con la misma.

El método de Atterberg se utiliza para calcular el intervalo de humedades en el que una arcilla o una mezcla arcillosa, es moldeable. Si se deja al aire una mezcla de arcilla y agua, esta irá deshidratándose con el transcurso del tiempo, pasando de un estado líquido a un estado plástico, para finalmente alcanzar un estado sólido. Es lógico concluir que a lo largo

de ese proceso, en algún instante se van a encontrar los límites en el paso de un estado a otro diferente.

La determinación de estos límites se fundamenta en los trabajos de Atterberg y posteriormente Casagrande, utilizados para evaluar el comportamiento plástico de mezclas de agua y materiales con un tamaño de grano fino. Atterberg los denominó, límite líquido (LL) y límite plástico (LP), siendo además el índice de plasticidad (IP), la diferencia de humedad existente entre el límite líquido y el límite plástico.

Según Atterberg, una arcilla se comportará más plásticamente cuanto mayor sea la separación existente entre el límite líquido y el límite plástico. El índice de plasticidad delimita los contenidos de humedad en los cuales una arcilla es trabajable, este hecho hace que, una arcilla o una mezcla, será más plástica respecto a otra, cuanto mayor sea su índice plástico.

El límite líquido es el estadio en el que el estado líquido pasa al estado plástico, y representa la cantidad de agua por encima de la cual, una mezcla no posee la consistencia necesaria para poder ser moldeada. Mientras que el límite plástico representa la cantidad mínima de agua con la cual es posible moldear una mezcla arcillosa mediante técnica de conformado (extrusión, prensado, colado), y que corresponde al contenido en humedad más bajo, necesario para conformar una pieza sin que esta se rompa, en este punto el material pierde la plasticidad y ya no es moldeable (Grimshaw & Searle, 1971).

Existe un tercer límite definido por Atterberg, el límite de retracción (LR), también conocido como límite de contracción o consistencia, que expresa el punto de separación entre el estado sólido seco y el estado semisólido. Sirve para determinar la cantidad de humedad por debajo de la cual no se origina una merma de volumen o contracción, en la arcilla o mezcla, asociada a la desecación.

Los límites de Atterberg de una arcilla o mezcla arcillosa, no permiten conocer con exactitud la cantidad de agua óptima de amasado, pero posibilitan acotar, pudiendo determinar los límites entre los cuales se debe buscar esta cantidad. Consecuentemente el estudio del límite plástico y del límite líquido, resulta de mayor interés en cuanto al comportamiento plástico de las arcillas o mezclas, mientras que el límite de retracción es más útil para el estudio del secado.

Para la determinación del límite plástico se ha seguido el procedimiento que se especifica en la norma UNE 103-104-93 (AENOR(I), 1993), en el cual se toma una muestra de mezcla con un contenido en humedad bajo y se moldea formando elipsoides. Acto seguido se hace rodar dichos elipsoides sobre una superficie plana con la palma de la mano formando un cilindro, hasta que estos alcancen diámetros de aproximadamente 3 milímetros y una longitud de 25 a 30 milímetros. En este punto si los cilindros se rompen en trozos de unos 6 milímetros de longitud, su humedad corresponde a la del límite plástico, en caso contrario, se vuelven a formar elipsoides para que pierdan humedad y se empieza de nuevo el proceso (Gonzalez de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2004).



Figura 8. Ensayo para determinar el límite plástico de la arcilla o mezcla arcillosa (Das, 2001).

Por otro lado, para definir el límite líquido de las mezclas, se ha seguido el procedimiento que se describe en la norma UNE 103-103-94 (AENOR, 1994). Por el cual, en primer lugar se toma una muestra de la arcilla o la mezcla arcillosa y se amasa con agua, una vez que se tiene esta masa, se extiende con una espátula dentro de un dispositivo con forma de taza, denominado cuchara de Casagrande. Después de haber extendido la masa en la cuchara, se le practica un surco con un acanalador normalizado en su centro, de aproximadamente 2 milímetros de anchura en su parte inferior. A continuación, con una manivela se acciona la cuchara con la masa, haciendo que con un movimiento de subida y bajada, golpee controladamente sobre una base.



Figura 9. Ensayo con la cuchara de Casagrande para determinar en límite líquido (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2004).

El límite líquido resulta ser el contenido en agua de la arcilla o mezcla arcillosa, cuando exactamente al dar 25 golpes con la cuchara de Casagrande, se produce un cierre del canal practicado de aproximadamente 13 milímetros. Este hecho es improbable que suceda, por lo cual, el contenido en agua se determina por interpolación, a partir de dos muestras de material, en las que mediante este procedimiento debe de obtenerse el cierre del canal practicado, unos 13 milímetros con más (25-35 golpes) o menos que 25 golpes (15-25) (Gonzalez de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2004). En el caso de que siempre se produzcan menos de 25 golpes, no se puede determinar el límite líquido y la arcilla o mezcla arcillosa se debe de catalogar como no plástica.

Los datos obtenidos, número de golpes y cantidad de agua, de las dos muestras de arcilla o mezcla arcillosa, se llevan a un gráfico en escala logarítmica donde se traza una recta paralela a una línea predefinida en el gráfico, determinada por ellos. Siendo el límite líquido resultante, el correspondiente de humedad en el gráfico, del punto intersección de esta recta con la ordenada número de golpes 25 (AENOR, 1994).

El índice de plasticidad se ha calculado por diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

Previamente a la realización del estudio de plasticidad de las diferentes mezclas arcilla residuo, se ha tenido que realizar una molienda de los materiales hasta alcanzar granulometrías por debajo de las 400 micras, con el fin de lograr mayor homogeneidad en las distintas mezclas y cumplir con los requisitos que se describen en la normativa.

En cuanto a la composición de las mezclas arcilla/residuo, al haberse decidido que los porcentajes que se van a emplear de los diferentes residuos siderúrgicos en la mezcla con la arcilla para la fabricación de las piezas cerámicas, van a ser del 10%, 20% y 30%, con el objetivo de comprobar cómo afecta al comportamiento plástico de la arcilla la adición bien de escorias de acería LD, de lodos de horno alto o de lodos de acería LD, es lógico que se utilicen estas diferentes composiciones para determinar los límites líquido y plástico, así como el índice de plasticidad.

Con los porcentajes de residuo en la mezcla del 20% y 30%, se sustituye totalmente a los materiales desgrasantes que habitualmente se utilizan en la industria cerámica ladrillera, ya que estos suelen rondar el 15% en la mezcla, y parcialmente también se supe a la arcilla.

4.1. Arcilla y escorias de acería LD

Para el estudio de cómo afecta a la plasticidad de la arcilla, la adición de escorias de acería LD desde un porcentaje nulo al máximo del 30% en la mezcla, se han seguido los procedimientos recogidos en las normas UNE 103-104-93 y UNE 103-103-94, como ya se ha explicado anteriormente.

Muestra	Arcilla		Escoria LD		Gol pes	Humedad (%)	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
	(g)	(%)	(g)	(%)					
1	75	100	0	0	19	24	23,1	15,2	7,9
	75	100	0	0	34	22,3			
2	67,5	90	7,5	10	19	26,3	25,8	21,4	4,4
	67,5	90	7,5	10	30	25,4			
3	60	80	15	20	19	24,9	24,3	22,3	2,0
	60	80	15	20	36	23,6			
4	52,5	70	22,5	30	18	23,9	23,1	20,9	2,2
	52,5	70	22,5	30	32	22,5			

Tabla 12. Plasticidad de la arcilla y las mezclas con los distintos porcentajes de escoria de acería LD.

La muestra 1 está constituida únicamente por arcilla, la muestra 2 tiene un 10% de residuo y el resto es arcilla, la muestra 3 contiene un 20% de escoria de acería LD y un 80% de arcilla, y por último la muestra 4 tiene el máximo porcentaje de residuo en la mezcla, del 30%.

Si trasladamos estos datos a las correspondientes gráficas, se obtienen los valores de los respectivos límites líquidos para la arcilla y para cada una de las diferentes composiciones.

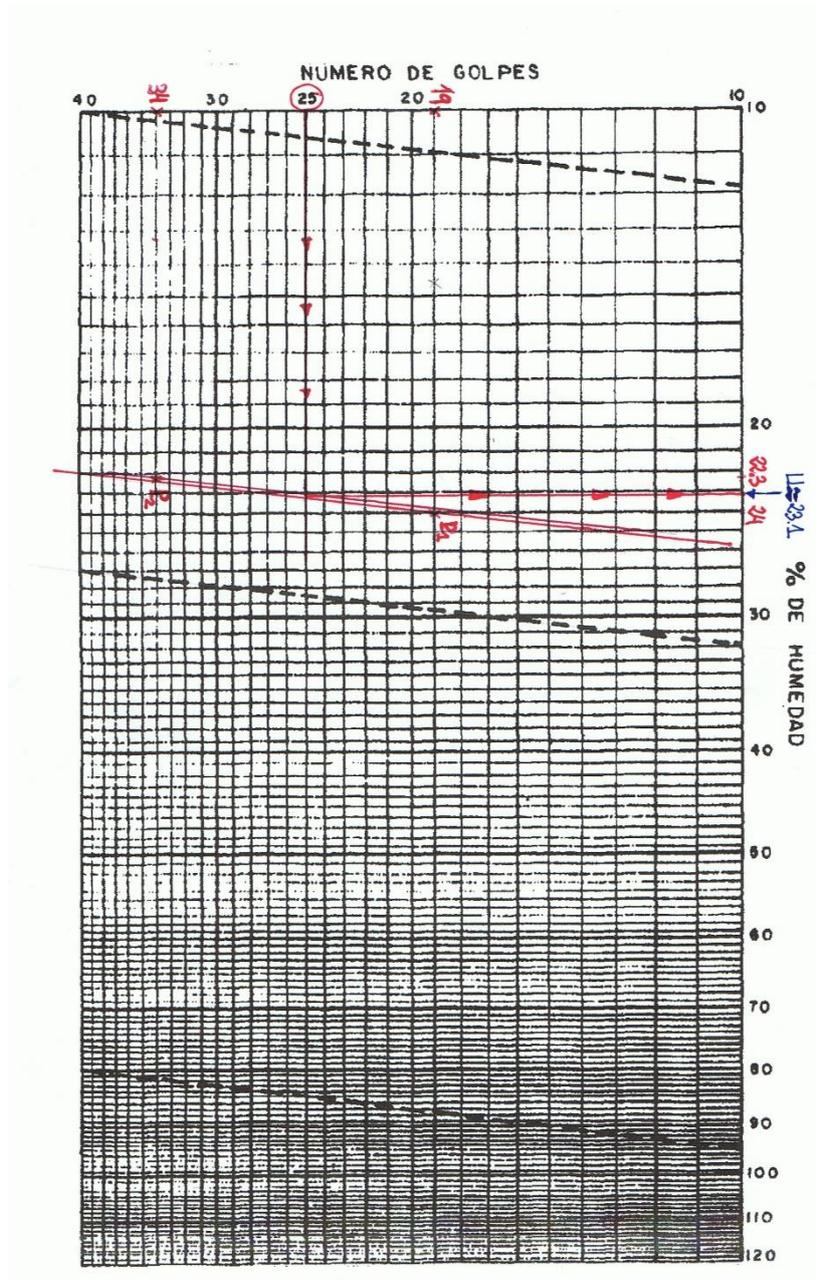


Figura 10. Gráfico límite líquido 100% arcilla.

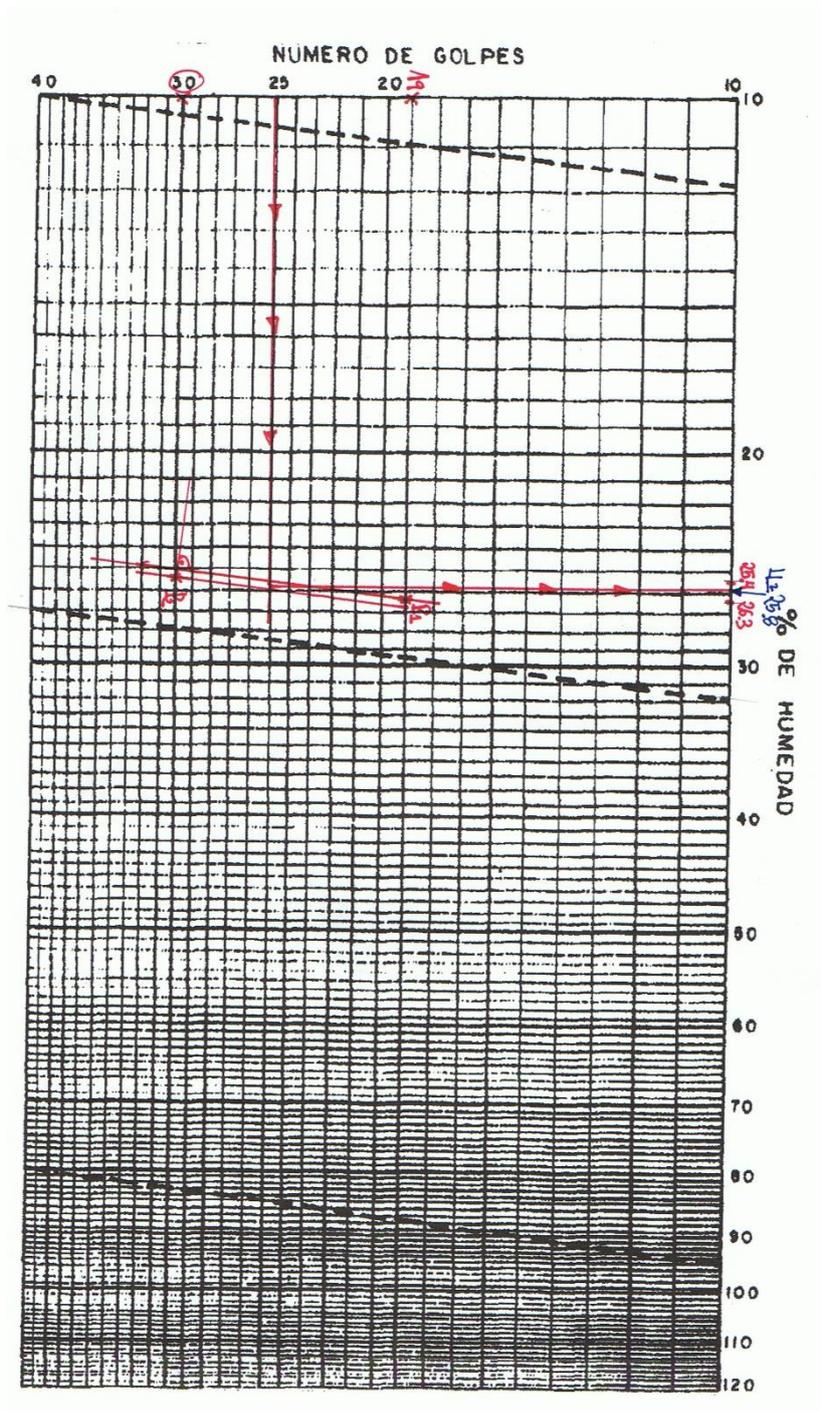


Figura 11. Gráfico limite líquido 10% escoria de acería LD, 90% arcilla.

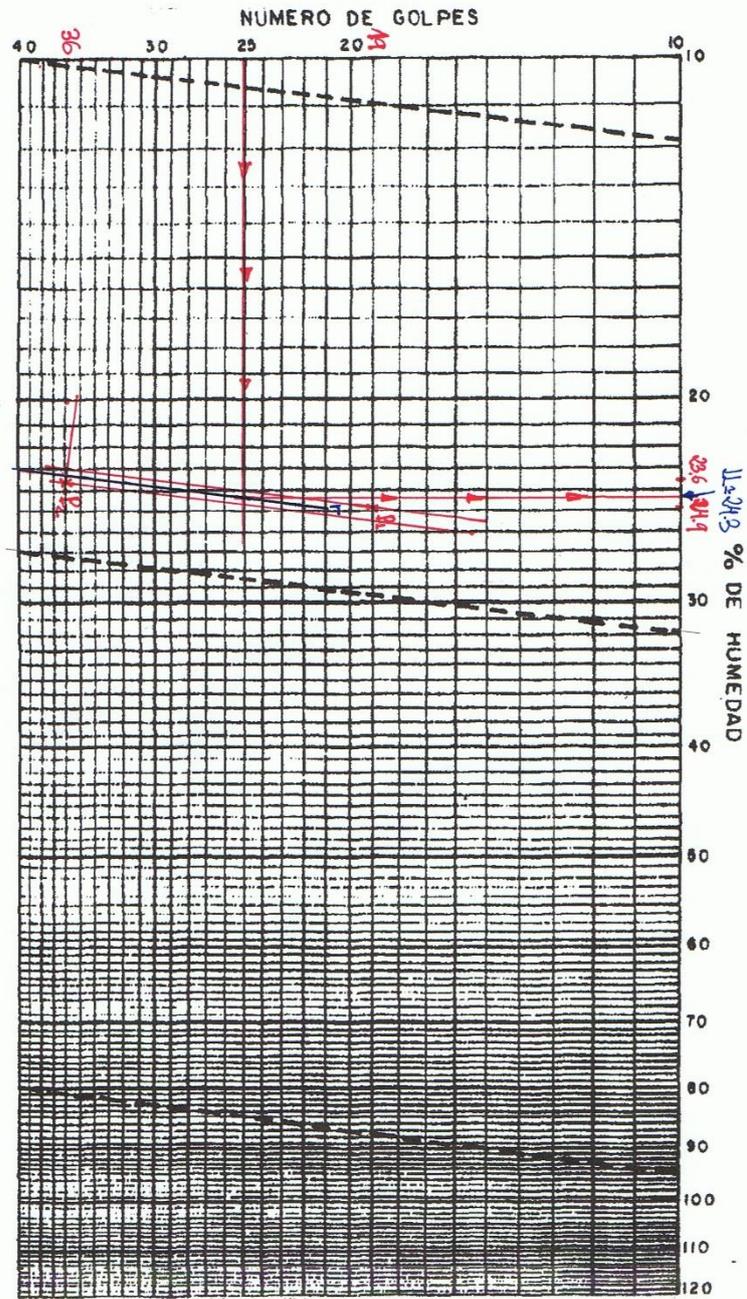


Figura 12. Gráfico límite líquido 20% escoria de acería LD, 80% arcilla.

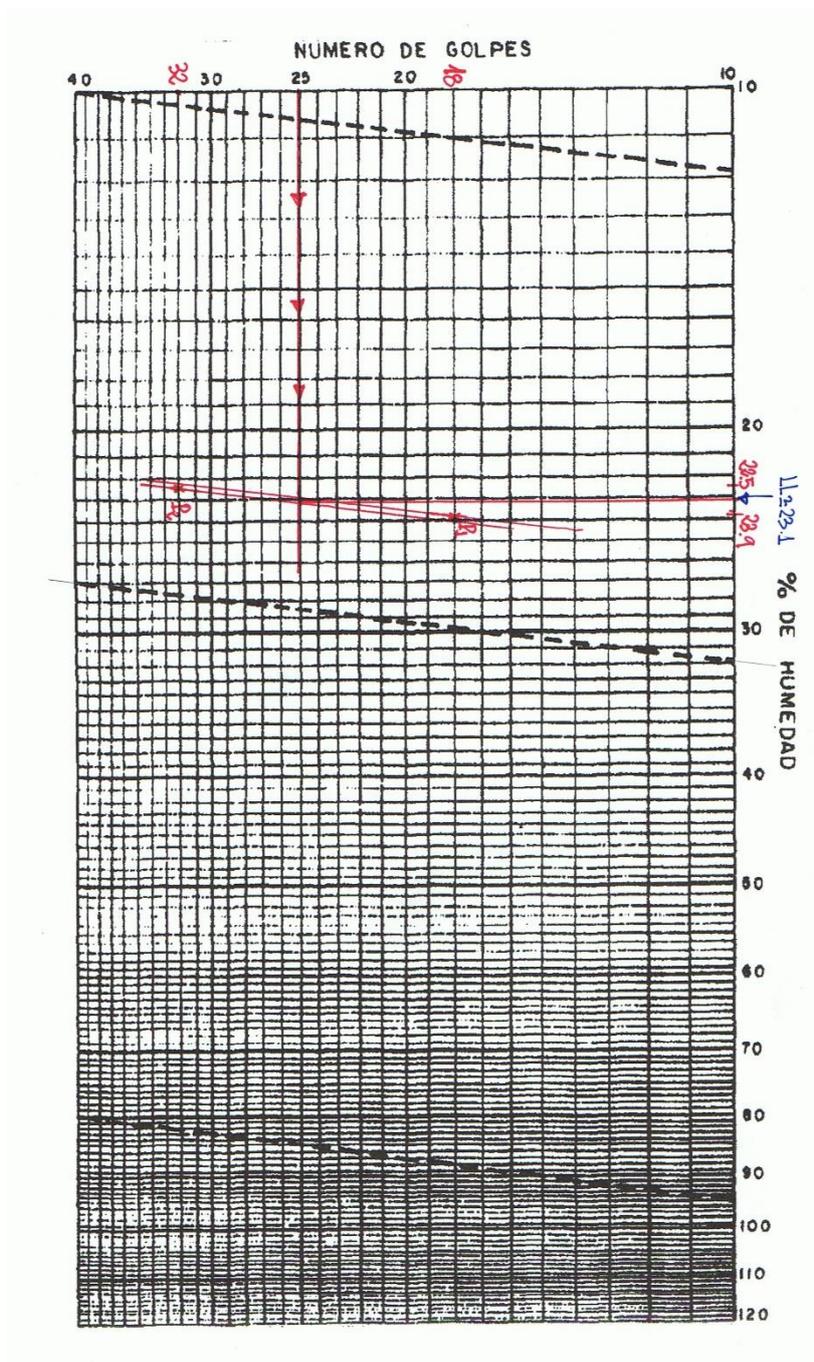


Figura 13. Gráfico límite líquido 30% escoria de acería LD, 70% arcilla.

El índice de plasticidad se ha determinado por diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

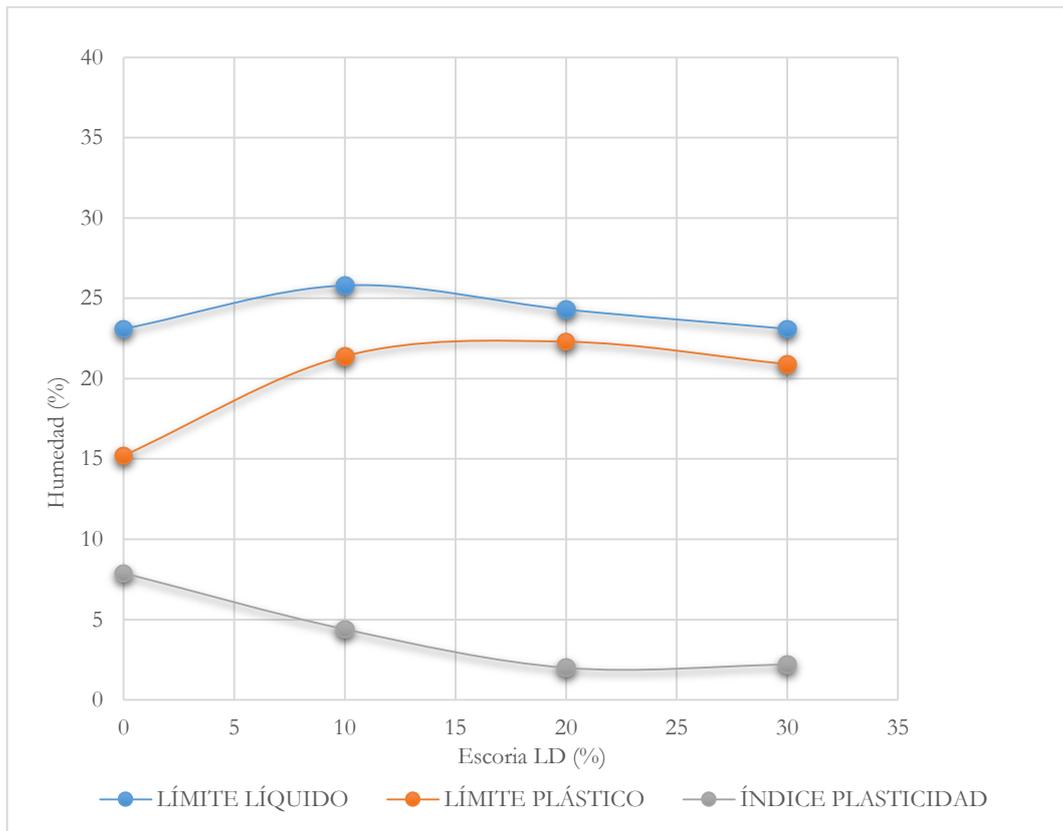


Figura 14. Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de la arcilla y de sus mezclas con escoria de acería LD.

En la figura 14 donde se ha recogido en un gráfico todos los datos que se han obtenido en los ensayos de plasticidad, se puede observar la evolución de esta propiedad en la arcilla, al aumentar el contenido de escoria de acería LD en la mezcla. La influencia al ir añadiendo mayor cantidad de escoria en la mezcla respecto el límite líquido es pequeña, al mismo tiempo se puede comprobar que sí afecta al límite plástico, haciendo que este se desplace hacia contenidos en humedad más elevados. En cuanto al índice de plasticidad, al ir aumentando el porcentaje de residuo, este disminuye significativamente, desde un valor de 7,9 a 2,2.

La adición de escoria de acería LD en la mezcla hasta valores del 30%, no perjudica sustancialmente la plasticidad de la arcilla, necesaria en la técnica de conformado por extrusión, habitualmente empleada en la fabricación de cerámica estructural. No obstante, debido a la reducción del índice de plasticidad, se tendrá que ser más diligente en el instante de la dosificación de agua.

4.2. Arcilla y lodos de horno alto

Siguiendo el mismo procedimiento y tomando como referencia a las normas UNE 103-104-93 y UNE 103-103-94, también se ha realizado el estudio de como la adición de los porcentajes correspondientes del 10%, 20% y 30% de lodos de horno alto, afectan al comportamiento plástico de la arcilla utilizada para la fabricación de las piezas cerámicas.

Muestra	Arcilla		Lodos HA		Golpes	Humedad (%)	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
	(g)	(%)	(g)	(%)					
1	75	100	0	0	19	24	23,1	15,2	7,9
	75	100	0	0	34	22,3			
2	67,5	90	7,5	10	14	24,5	23,1	15,7	7,4
	67,5	90	7,5	10	29	23			
3	60	80	15	20	24	23,7	23,5	16,6	6,9
	60	80	15	20	31	22,7			
4	52,5	70	22,5	30	20	24,4	24,1	17,6	6,5
	52,5	70	22,5	30	37	23,3			

Tabla 13. Plasticidad de la arcilla y las mezclas con los distintos porcentajes de lodos de horno alto.

La muestra 1 se corresponde con el 100% de arcilla, la muestra 2 tiene un porcentaje del 10% de lodos de horno alto en la mezcla, la muestra 3 es la que presenta en su composición un 80% de arcilla y un 20% de lodos, y la que se ha nombrado como muestra 4 es la que tiene el mayor porcentaje de residuo en la mezcla, el 30%.

Para determinar el límite líquido, se han trasladado los valores del número, correspondiente a cada una de las muestras, de golpes del ensayo con la cuchara de Casagrande al gráfico.

En el caso de la muestra 1, 100% de arcilla, no se ha repetido la elaboración del gráfico para el cálculo del límite líquido, ya que el ensayo y los datos obtenidos, son los mismos que los ya reflejados en el apartado anterior.

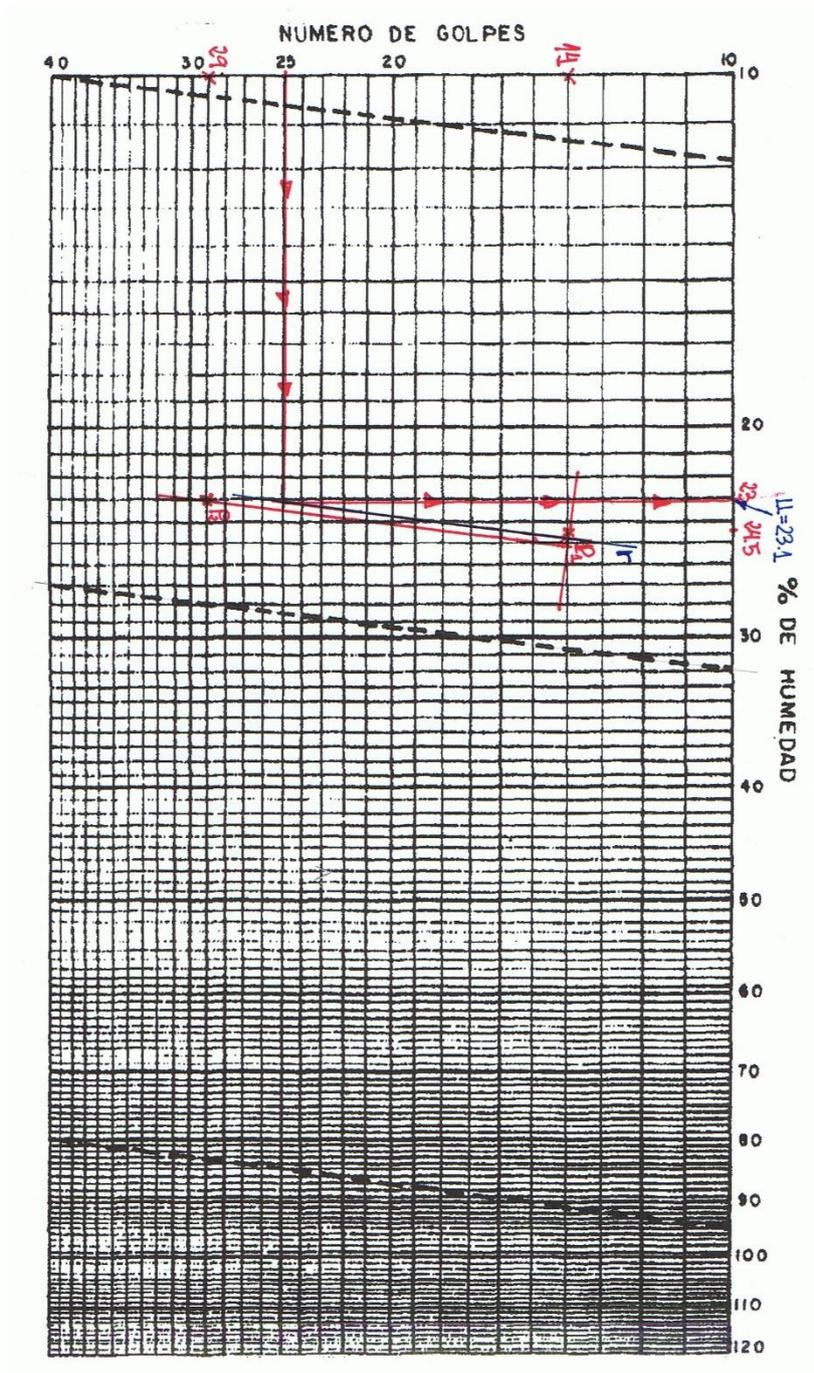


Figura 15. Gráfico límite líquido 10% lodos de borno alto, 90% arcilla.

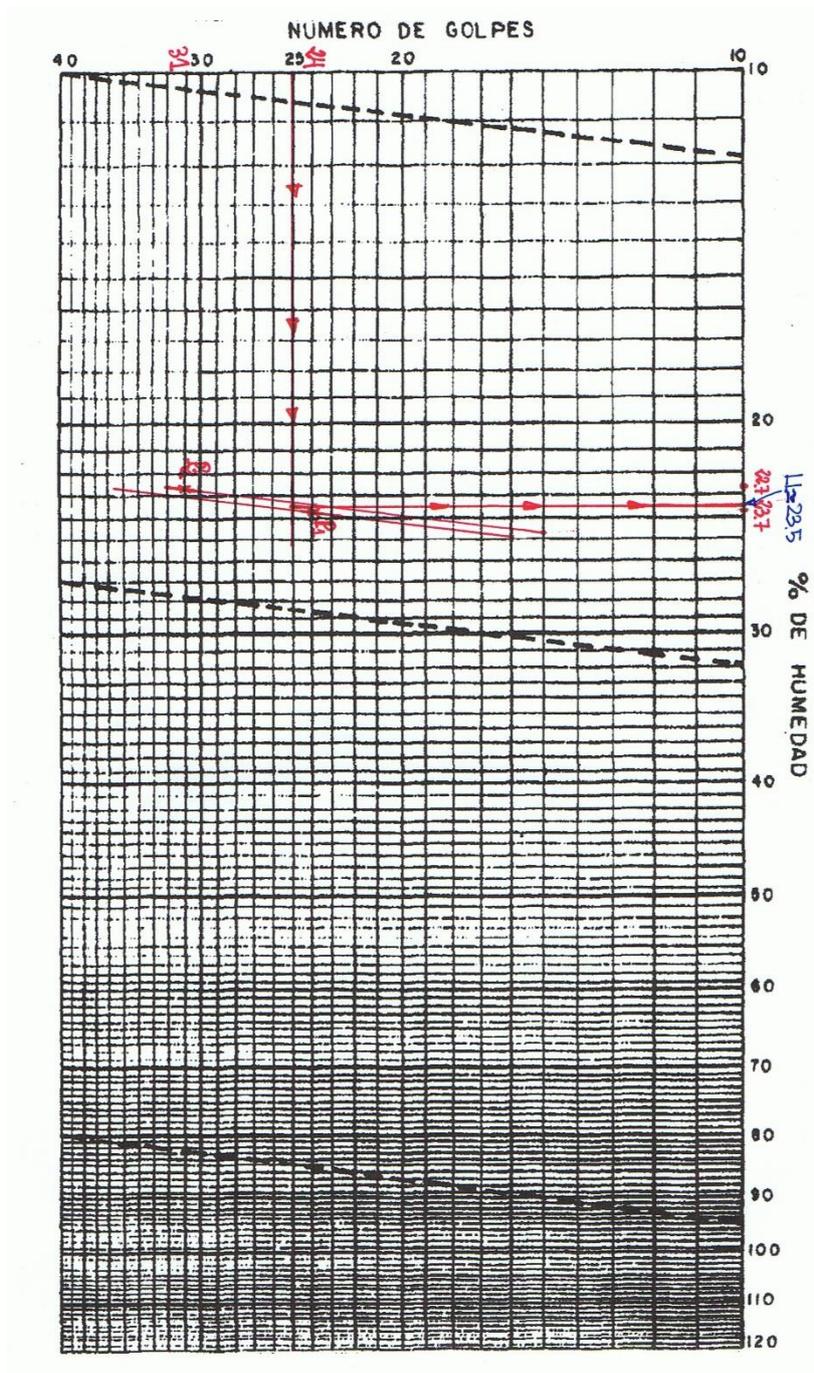


Figura 16. Gráfico limite líquido 20% lodos de horno alto, 80% arcilla.

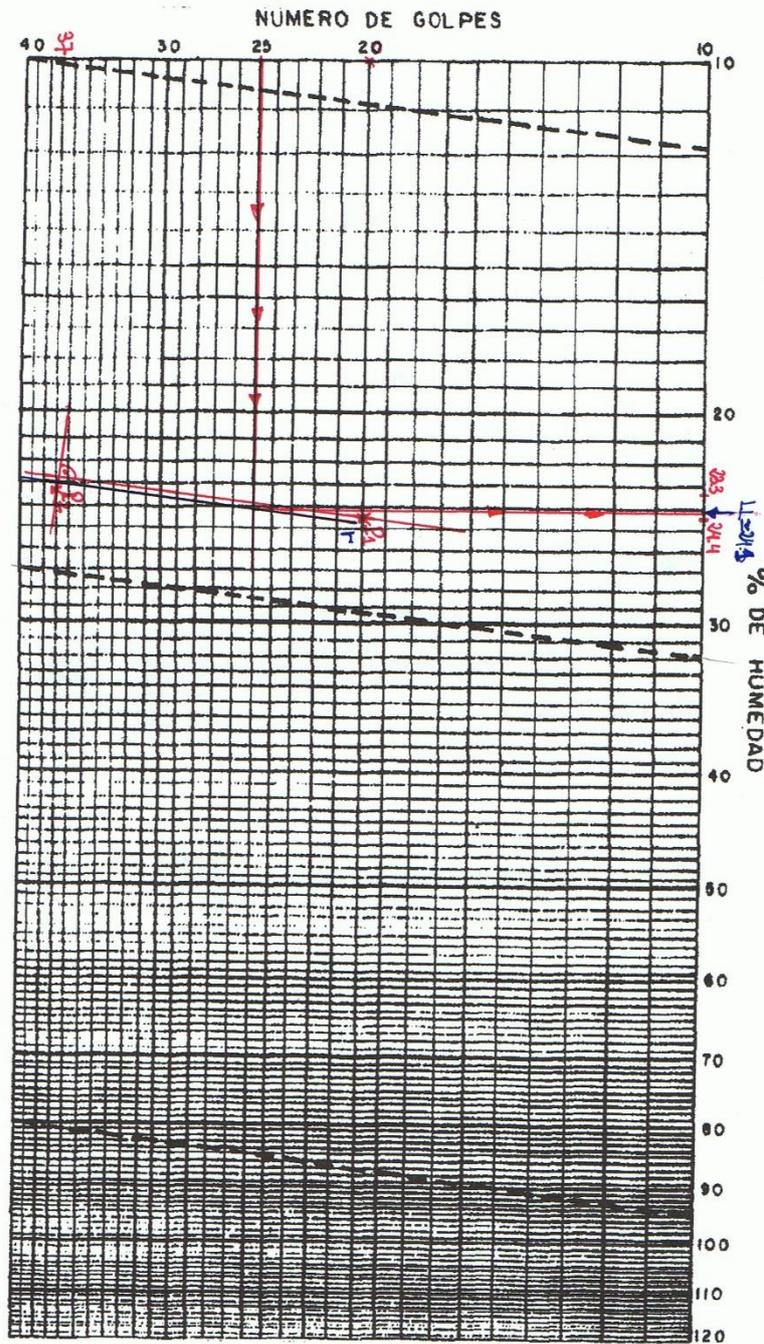


Figura 17. Gráfico límite líquido 30% lodos de horno alto, 70% arcilla.

Análogamente, se han recogido los datos obtenidos de los ensayos de plasticidad con las mezclas de arcilla y los diferentes porcentajes de lodos de horno alto, en un gráfico.

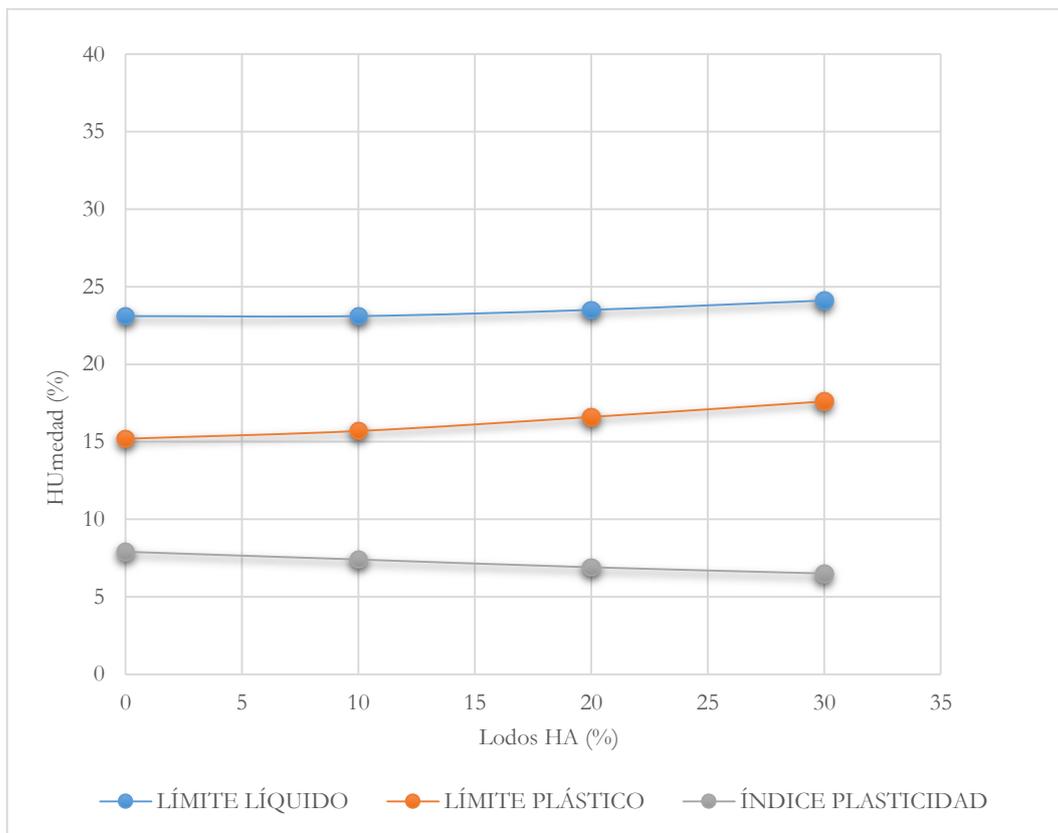


Figura 18. Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de la arcilla y de sus mezclas con lodos de horno alto.

A la vista de los resultados, la influencia de la adición de diferentes porcentajes de lodos de horno alto en el comportamiento plástico de la arcilla es baja. El límite líquido y el límite plástico, se desplazan hacia contenidos de humedad levemente superiores, resultando algo mayor en el caso del límite plástico. Mientras que el índice de plasticidad decrece ligeramente al aumentar el porcentaje de lodos de horno alto en la mezcla, de 7,9 a 6,5. Todo ello apunta a que la adición hasta porcentajes del 30% de lodos de horno alto, no resulta perjudicial para la plasticidad de la arcilla, de cara a su conformado.

4.3. Arcilla y lodos de acería LD

Por último, se ha repetido el proceso con porcentajes del 10%, 20% y 30% de lodos de acería LD en la mezcla, con el objetivo de analizar la influencia de este residuo sobre el comportamiento plástico de la arcilla, ajustándose a lo especificado en las normas UNE 103-104-93 y UNE 103-103-94.

Muestra	Arcilla		Lodos LD		Gol pes	Humedad (%)	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
	(g)	(%)	(g)	(%)					
1	75	100	0	0	19	24	23,1	15,2	7,9
	75	100	0	0	34	22,3			
2	67,5	90	7,5	10	23	23,2	23,2	16,6	6,6
	67,5	90	7,5	10	34	22,3			
3	60	80	15	20	14	24,5	23,1	17,3	5,8
	60	80	15	20	29	23,1			
4	52,5	70	22,5	30	16	23,6	23,2	17,3	5,9
	52,5	70	22,5	30	27	22,8			

Tabla 14. Plasticidad de la arcilla y las mezclas con los distintos porcentajes de lodos de acería LD.

La muestra 1 está formada por el 100% de arcilla, al igual que en los anteriores ensayos, por lo que de nuevo y para evitar su repetición, se ha obviado el gráfico para determinar el límite líquido correspondiente. La muestra 2 es la que está compuesta por un 10% de lodos de acería LD y un 90% de arcilla, la muestra 3 presenta porcentajes del 20% de residuo y el 80% de arcilla en la mezcla, y la muestra 4 se corresponde a la que tiene el contenido más elevado de lodos de acería LD, el 30%.

Del mismo modo, se ha determinado el índice de plasticidad por diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

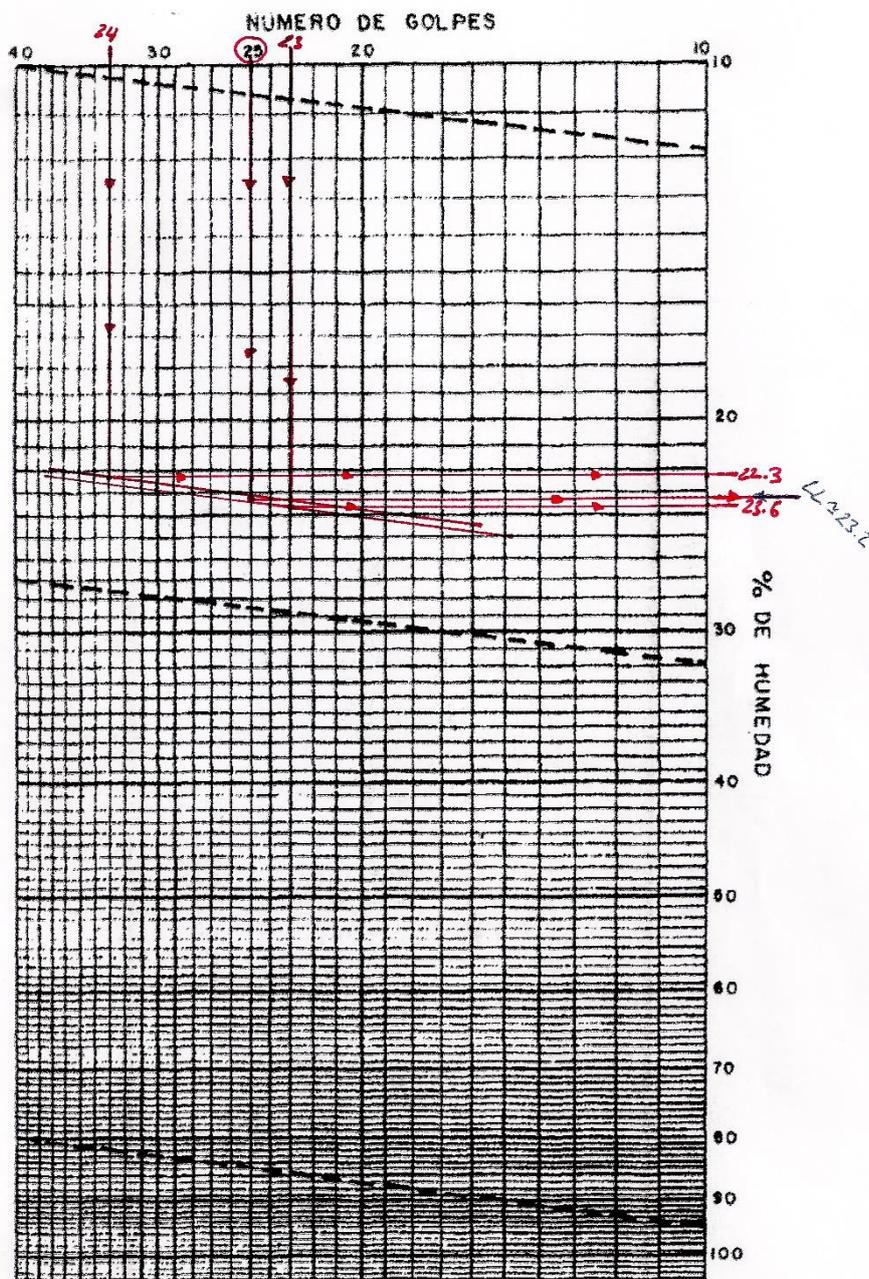


Figura 19. Gráfico limite líquido 10% lodos de acería LD, 90% arcilla.

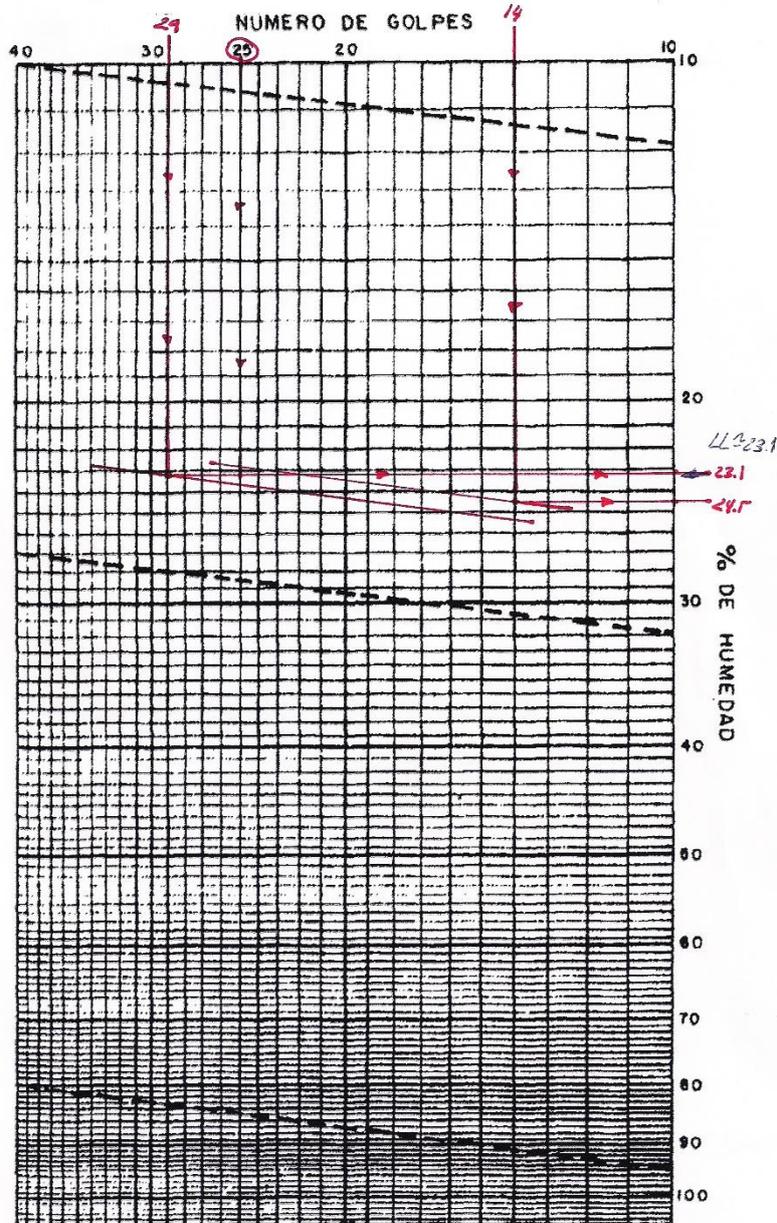


Figura 20. Gráfico limite líquido 20% lodos de acería LD, 80% arcilla.

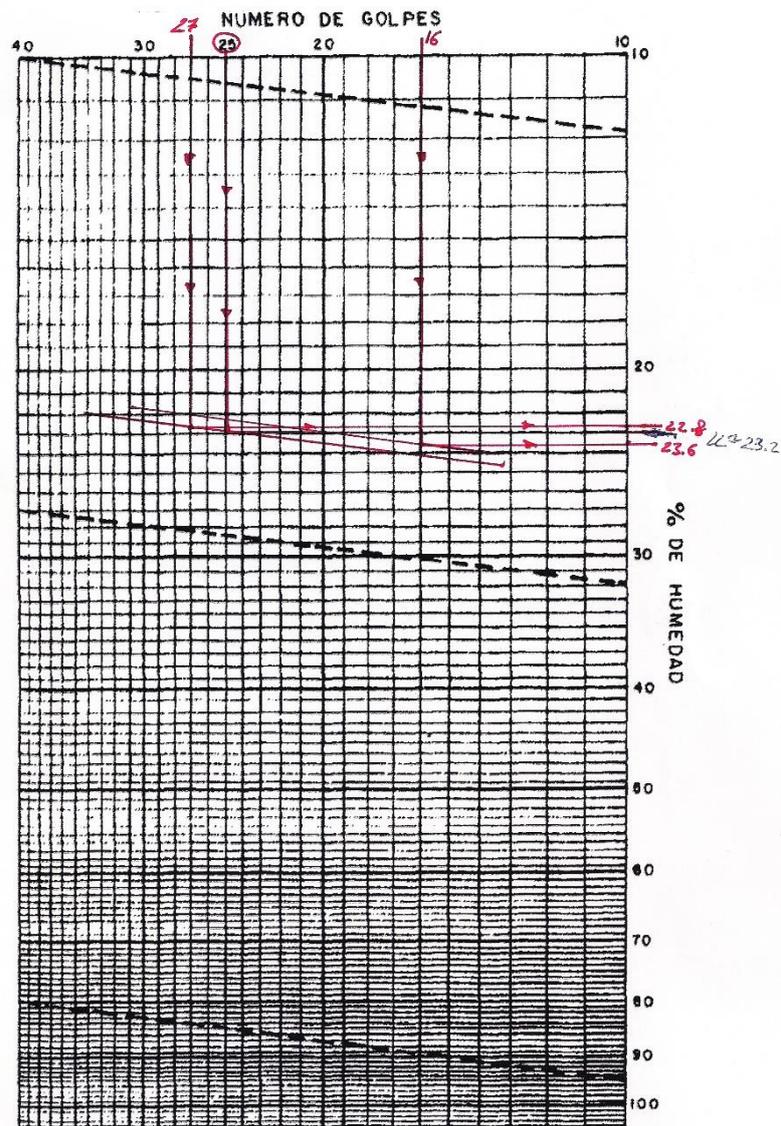


Figura 21. Gráfico límite líquido 30% lodos de acería LD, 70% arcilla.

Finalmente para poder analizar cómo afecta la adición de diferentes cantidades de lodos de acería LD, al comportamiento plástico de la arcilla, se ha elaborado un gráfico donde se puede contemplar la evolución de los límites de Atterberg, así como del índice de plasticidad.

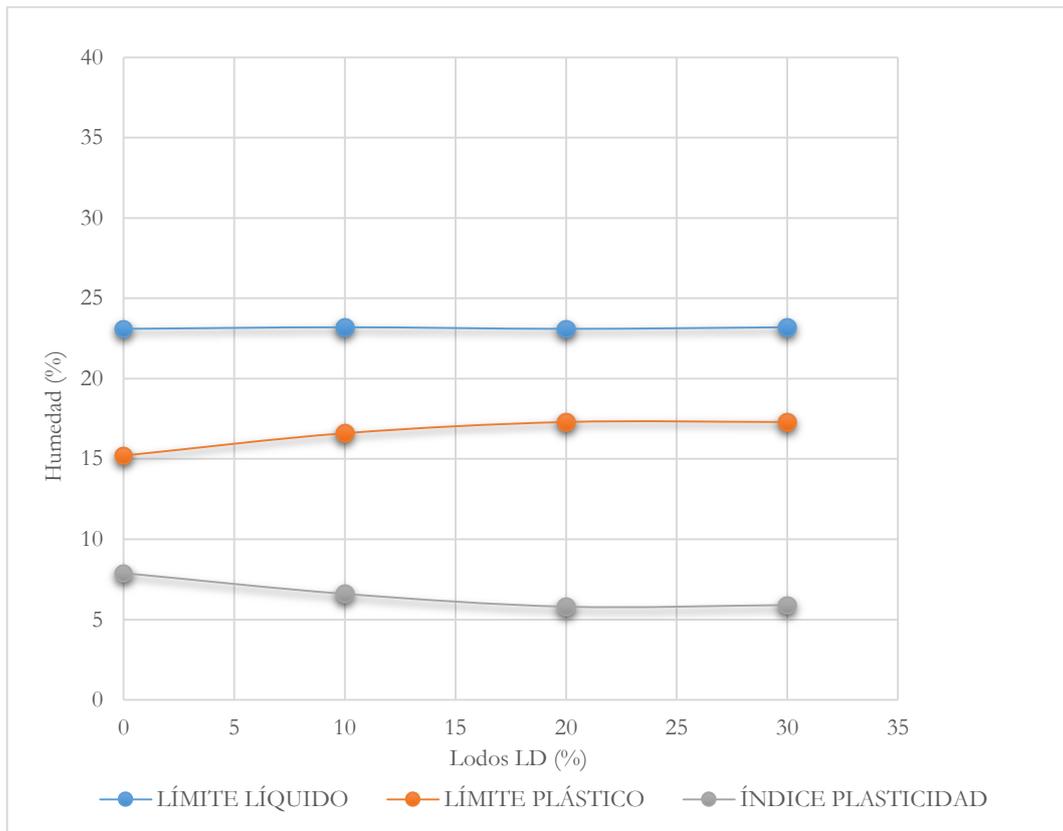


Figura 22. Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de la arcilla y de sus mezclas con lodos de acería LD.

Se puede apreciar como la influencia de la adición de distintos porcentajes de lodos de acería LD sobre el comportamiento plástico de la arcilla es leve, apenas hay variación en el límite líquido, mientras que el límite plástico sufre un ligero aumento hacia contenidos de humedad más altos. En cuanto al índice de plasticidad, este disminuye muy poco al ir añadiendo de forma progresiva mayores cantidades de residuo en la mezcla, no resultando significativa esta desviación.

Por lo tanto, se puede concluir que la adición de lodos de acería LD a la arcilla, hasta porcentajes del 30% en la mezcla, no afectan significativamente a su plasticidad.

La Preparación de Materiales y Fabricación de Piezas

Los productos cerámicos tradicionales son aquellos que posteriormente al conformado de las pastas arcillosas, se producen gracias a las modificaciones de carácter físico-químico de la arcilla, por medio de procesos térmicos. Son piezas de cerámica porosa que abarcan una gran variedad de artículos, que van desde ladrillos y tejas empleados en las obras de construcción, hasta los materiales refractarios utilizados en hornos que operan a alta temperatura. Para la fabricación de esta amplia variedad de productos, en la industria cerámica se emplean procesos bastante semejantes en líneas generales, no obstante dependiendo del tipo de producto, cada proceso tiene singularidades propias. Por lo tanto, desde esta perspectiva, en la fabricación de cerámica tradicional se pueden distinguir cinco fases o etapas. Siendo el resultado final de este proceso del producto cerámico.

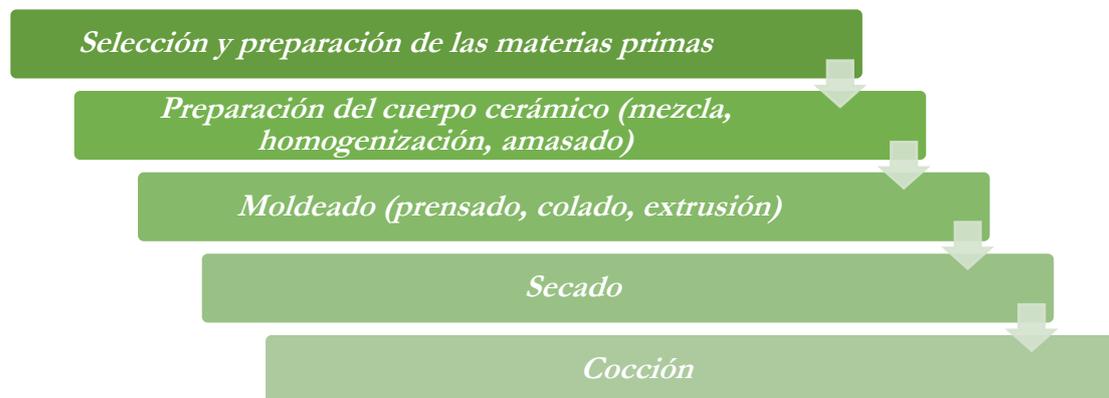


Figura 23. Etapas del proceso cerámico (Galán & Aparicio, 2006).

Más concretamente y en lo que atañe a esta investigación, en el caso de la fabricación de cerámica estructural, el procedimiento que se sigue en la industria, no difiere al esquema de producción anteriormente descrito, presentando sus pequeñas particularidades. Un diagrama conceptual válido de cómo se fabrican productos de cerámica estructural, puede ser el siguiente.

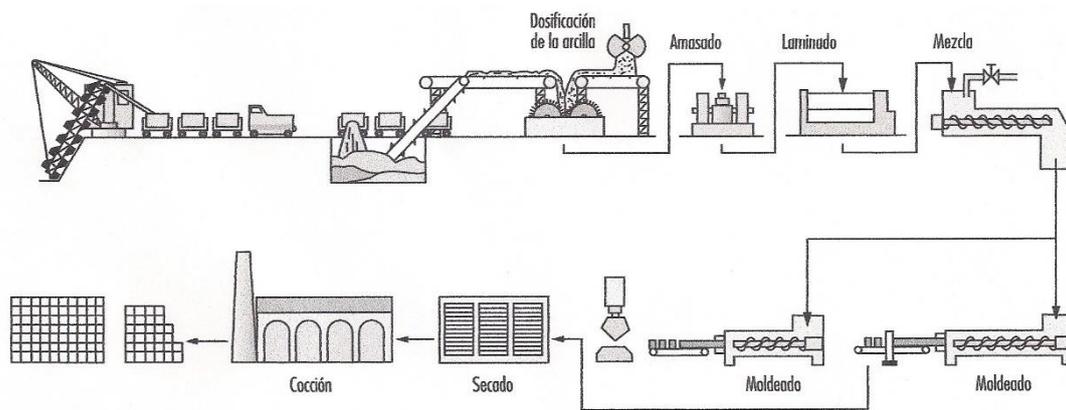


Figura 24. Esquema de las diferentes fases en la producción de cerámica estructural (Hellerstein, Bender, Hadley, & Hobman, 1998).

El paso inicial del proceso industrial de fabricación de cerámica estructural, está en la minería, para la obtención de la materia prima en canteras de arcilla. En la actualidad, las explotaciones de arcilla suelen contar con maquinaria para el arranque del mineral.



Figura 25. Cantera de arcilla. Santa Cruz de Mudela (Ciudad Real). Cerámica Mateo S.L.

El material extraído es transportado a la planta de fabricación de cerámica estructural, que habitualmente se encuentra en las proximidades de la explotación, esto se debe al incremento en el coste de producción que supone el transporte, encareciendo el producto final y haciendo que su precio no sea competitivo en el mercado, por lo que la mayoría de las empresas del sector tienen su planta de fabricación en las inmediaciones de la canteras de arcilla.

Una vez en la planta de fabricación, las arcillas son almacenadas en la zona de acopios, donde se las somete a una serie de tratamientos para que mejoren sus características y se homogenicen en los denominados pudrideros, lugar en el que las arcillas maduran durante un período de tiempo que puede ir desde unos días a incluso meses, gracias a las condiciones ambientales, perdiendo humedad e incrementando las propiedades de textura, desmenuzándose y purificándose gracias al contacto con el aire, y aumentando su plasticidad al entrar en contacto con las bacterias del suelo (Morales, 2005). Los pudrideros pueden estar situados al aire libre o bajo cubierta, dependiendo de las condiciones meteorológicas de la zona.

Cuando la arcilla alcanza el estado de madurez adecuado, es cargada con palas en mezcladoras, en cantidades adecuadas junto con otros materiales como desgrasantes u otras arcillas, con el objetivo de obtener una mezcla adecuada para la fabricación de productos cerámicos de calidad. La mezcla preparada, a continuación es sometida a procesos de trituración y molienda hasta alcanzar la granulometría adecuada y mejorar la homogeneidad de la misma, en molinos de martillos, de disco, de barras, etcétera. En estos procesos de molturación, lo habitual es que se realicen en húmedo, añadiendo agua.

La mezcla, en estas condiciones, pasa por un proceso de laminado que contribuye a unificar del material mediante una molienda de refino, realizando una trituración por presión, al hacer pasar a la mezcla entre los dos grandes cilindros horizontales y paralelos de los que constan las laminadoras.

Posteriormente a la fase de laminado, la mezcla se introduce en amasadoras, donde el material se pone en contacto con la cantidad de agua necesaria, para alcanzar la plasticidad requerida en el proceso de conformado. En la fabricación de cerámica se experimenta con diferentes cantidades de agua, hasta que se logra realizar el conformado de las piezas con una energía determinada, que resulta un valor constante de la máquina de conformado que se está empleando. En el caso de la cerámica estructural, las máquinas de conformado utilizadas trabajan por extrusión.

Una vez que se tiene la mezcla amasada con la cantidad adecuada de agua, pasa a alimentar a la extrusora, donde se realiza la fase de conformado de las piezas cerámicas. El objetivo de esta etapa del proceso cerámico, es modificar la masa de alimentación hasta una forma definida, con una geometría y textura concretas. El resultado ha de ser un producto en

verde, que debe de tener la adecuada resistencia para poder ser manipulado y permitir efectuar, si fuera necesario, trabajos de acabado. Esta fase adquiere cierta relevancia, ya que los defectos que pueda adquirir un producto cerámico en el proceso de extrusión, generalmente no van a poder ser suprimidos en la posterior cocción en el horno.



Figura 26. Extrusora GFK para la producción de ladrillos/bloques.

La técnica de conformado por extrusión se utiliza para la producción de productos cerámicos que tengan una sección constante como es el caso de los ladrillos o los bloques, mediante el uso de una presión, haciendo pasar la pasta cerámica a través de una matriz. Así se consigue un producto seguido, con una sección determinada, que a continuación puede trocearse para obtener las dimensiones requeridas del producto cerámico.

Las presiones que se emplean habitualmente en las fábricas de cerámicos oscilan entre los 4 MPa y los 15 MPa, dependiendo del producto a elaborar y del tipo de materiales de contenido en la pasta cerámica. Las pastas para poder ser conformadas mediante la técnica de extrusión, han de presentar porcentajes del 15% al 20% de humedad.

Dependiendo de la forma en que la pasta es obligada a desplazarse dentro de la extrusora, es posible distinguir tres metodologías diferentes, mediante el giro de unos rodillos, por empuje de un pistón y gracias a la rotación de una hélice o tornillo de Arquímedes. De las

tres, la que generalmente se utiliza en la industria para la fabricación de cerámica estructural, es la última, ya que este sistema es bastante adecuado cuando se trabaja con masas plásticas. Por lo tanto, las máquinas extrusoras o también conocidas como galleteras, de mayor implantación en la industria de la cerámica ladrillera, son las de tornillo de Arquímedes. Estas pueden tener en su configuración un solo tornillo, máquinas simples, o dos tornillos gemelos.

Las extrusoras o galleteras pueden trabajar a presiones de conformado de entre 8 y 16 MPa.

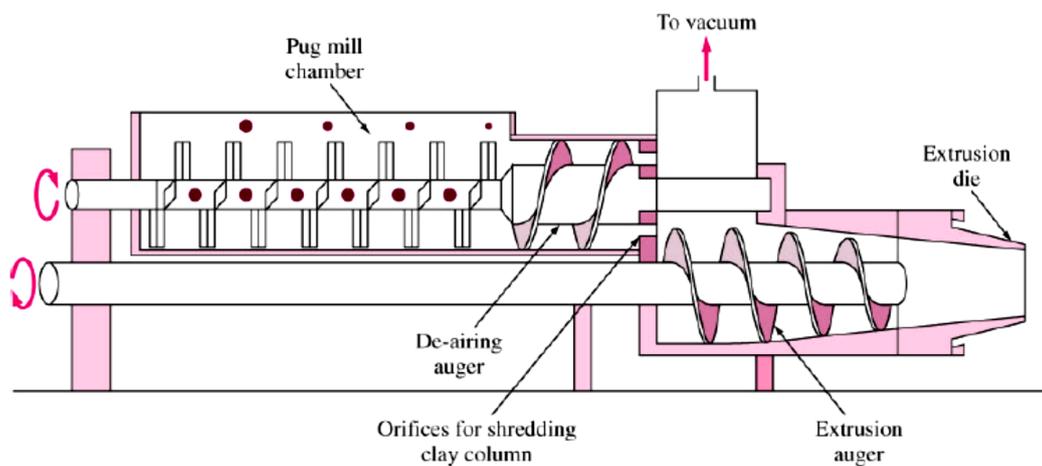


Figura 27. Esquema extrusora o galletera de tornillo de Arquímedes (Blanco(1), 2007).

La extrusora de tornillo simple, es una máquina compleja que consta de varias partes diferenciadas. En la zona de alimentación de la pasta cerámica a la máquina, se encuentra el molino amasador o mezclador, compuesto por dos ejes con dos filas de palas que poseen movimientos de giro contrarios, provocando que la pasta se mezcle de manera eficiente y además, hace que esta circule por su interior, comprimiéndose. Como consecuencia se elimina aire de la pasta, al mismo tiempo que se mejora su plasticidad y la hace más homogénea. Al final de estos ejes, en esta parte de la máquina, se encuentra un tornillo de Arquímedes, cuya misión es empujar a la pasta para que entre en la cámara de desaireado, por unos orificios en una placa perforada.

Al hacer pasar la pasta comprimiéndola por unos orificios, se consigue que adquiera forma de tiras con una sección menor, facilitando el desaireado. Además, en la cámara de desaireado se genera vacío, para eliminar el mayor volumen de aire como sea posible. Con

esto, se intenta evitar que burbujas de aire queden retenidas en la pasta, ya que en la fase de cocción pueden provocar roturas en los productos cerámicos al elevarse la temperatura en el horno. Otro efecto de la aplicación de vacío es que la pasta pierde humedad, por lo que sale de la cámara de desaireado con menor plasticidad que con la entró. Alcanzado este objetivo, las tiras se conducen hacia la cámara de compactación.

La cámara de compactación consta de otro tornillo de Arquímedes, el cual con su movimiento hace circular la pasta, compactándola con la finalidad de eliminar toda la porosidad como sea factible, antes de su salida por la boquilla, al ejercer sobre la misma una elevada presión.

La boquilla es la última parte de la máquina de extrusión, siendo el elemento moldeador propiamente dicho. Existen diferentes tipos de boquillas, que pueden ser recambiables para generar distintos modelos de sección, dependiendo del producto cerámico a producir.

El siguiente paso en el proceso cerámico, consiste en cortar el material salido de la extrusora de sección constante y longitud continua, para obtener las dimensiones que deben de tener los diferentes productos. El corte se hace paralelo a la sección cada cierta longitud por máquinas cortadoras, gracias a movimientos de alambres arriba-abajo temporizados. Esto pone fin a la fase de conformado propiamente dicha.

Una vez que se tienen las piezas en verde se pasa a la fase de secado, la cual consiste en suprimir el agua contenida en el producto cerámico, previamente a la fase de cocción en el horno, ya que del secado depende que la cocción de las piezas se realice de manera satisfactoria. En el caso de la cerámica estructural donde se emplean pastas cerámicas de comportamiento plástico, el proceso de secado es de suma importancia.

La velocidad de secado a la que se somete a las piezas en verde, dependerá del origen de las materias primas con las que se ha fabricado el producto cerámico y puede ser muy diferente de unas piezas a otras.

Durante la fase de secado, la eliminación del agua va a provocar una serie de modificaciones en las piezas en verde, descritas ya en el año 1897 por Emile Bourry en su Tratado de las Industrias Cerámicas. En un primer momento, se va a producir una merma del volumen de las piezas, proporcional al agua que se evapora, esta agua es denominada agua de contracción. Se trata de una etapa crítica por el peligro que supone el potencial

agrietamiento de las piezas, de ahí que deba de realizarse lentamente. Finalizando esta etapa de pérdida de agua, empiezan a formarse huecos y las piezas se contraen un poco más, hasta alcanzar el punto crítico, a partir del cual ya no se tiene contracción y por lo tanto, también desaparece el peligro de aparición de grietas y defectos. Al agua perdida en esta etapa se la conoce como agua de poros. Por último, en la etapa final se puede acelerar el proceso de secado, ya que el volumen de las piezas deja de disminuir, y el volumen de agua eliminada resulta ser proporcional al de los huecos que se crean (Estrada & Espinosa de los Monteros, 1982).

El secado de las piezas en verde se realiza en los denominados secaderos, existiendo diferentes tipos: secaderos de infrarrojos, electromagnéticos de alta frecuencia y de aire caliente. Además, dentro de estos últimos se puede distinguir entre secaderos de cámaras o períodos y secaderos continuos (Estrada & Espinosa de los Monteros, 1982). Hoy en día los tipos de secadero más usuales para la fabricación de cerámica estructural resultan ser estos últimos, los secaderos de cámaras o períodos, o bien los secaderos continuos o de túnel, en los cuales, las piezas en verde circulan sobre raíles en vagonetas a contracorriente del aire caliente que viene del horno.

La última etapa del proceso de fabricación cerámico es la cocción de las piezas en el horno, y sin duda es la fase de mayor relevancia en el proceso cerámico. Esto es así, ya que en la cocción se evidencia si alguna de las fases previas de fabricación no se han llevado a cabo correctamente, por otro lado, se pone en evidencia si el producto final, después de la cocción, posee las características y propiedades pretendidas, además de cumplir con la normativa correspondiente.

Con la cocción en el horno, se produce una transformación en las propiedades de las piezas conformadas, adquiriendo estas, dureza, aumentando considerablemente su resistencia mecánica, así como su resistencia al agua, y además una forma permanente.

Factores determinantes del proceso de cocción resultan ser la composición química de las piezas, así como sus dimensiones, pero sobre todo el espesor que pueda ser requerido para algunos productos cerámicos, por lo cual, no alcanza con simplemente aumentar la temperatura en el horno en el proceso, se debe de controlar otros factores como el tiempo. En el proceso de cocción, se facilita la movilidad de los átomos con el aumento de temperatura, lo que provoca la fusión de partículas y consecuentemente la disminución de

la porosidad, generando variaciones de volumen en las piezas. Estas variaciones tienen que realizarse de forma regular, ya que una contracción rápida puede producir tensiones indeseables en las piezas y generar roturas en las mismas. Para evitar que este peligroso efecto, se debe de controlar la velocidad de cocción en el horno.

Un factor más a tener en cuenta en el proceso de cocción, es el tiempo de permanencia de las piezas cerámicas a máxima temperatura. Este factor va a depender del volumen de las piezas a cocer, ya que piezas con unas mayores dimensiones, necesitarán mayor tiempo de permanencia a alta temperatura que otras de menor volumen. Esto es debido a que para alcanzar una cocción óptima, una pieza de gran volumen, necesita más tiempo de permanencia a alta temperatura en el horno, para que las zonas interiores más alejadas de las caras en contacto con el aire, también puedan alcanzar la temperatura necesaria. En las piezas gruesas, la superficie exterior se calienta mucho más rápido que la zona interior, generando un gradiente térmico, que puede producir que la superficie exterior se contraiga más rápidamente que la zona interior, generando grietas y defectos en las piezas.

Las condiciones para una cocción óptima se pueden resumir en tres: control sobre la atmósfera del horno, homogeneidad de la temperatura evitando el contacto de la llama con las piezas en el horno, y observación de las temperaturas del horno en todo momento, incluyendo las rampas de calentamiento y enfriamiento (Blanco(I), 2007).



Figura 28. Horno de túnel para la fabricación de ladrillos.

Los hornos que se emplean habitualmente por la industria en la fabricación de cerámica estructural son los hornos continuos, los cuales se pueden clasificar entre hornos de galería o tipo túnel, y los hornos de cámaras.

Los hornos de galería o túnel, actualmente de uso más extendido, se caracterizan porque en su interior la carga de piezas cerámicas, se desplaza sobre vagonetas construidas con materiales refractarios a lo largo de todo el túnel, atravesando las distintas zonas de temperatura. Mientras que el fuego aplicado, por el contrario, permanece fijo. Dentro de este tipo de hornos se incluyen los hornos circulares de solera rotativa, no muy habituales en Europa pero si en la industria americana.

Las últimas innovaciones han incorporado a la industria cerámica, los hornos túnel monoestrato o monocapa, con la ventaja de la reducción del tiempo de permanencia de las piezas cerámicas en el interior del horno desde unas 48 horas a aproximadamente 1 hora, para obtener los mismos resultados de cocción.

Por otro lado, dentro de los hornos de cámaras, el más utilizado en la industria de la cerámica estructural es el horno Hoffmann, desde mediados del siglo XIX, aunque actualmente bastante en desuso, al menos en los países desarrollados. Este tipo de horno consta de una cámara de cocción de forma elíptica, en los primeros hornos de este tipo, circular, dividida en un número de cámaras. En ellas se introduce la carga que permanece inmóvil, mientras que se va desplazando la aplicación del fuego (Morales, 2005).

Una vez que ya se tiene el producto cerámico terminado, se procede a su empacado en palets, su almacenaje y finalmente su expedición para consumo.

5.1. La preparación y fabricación en el laboratorio

Las piezas cerámicas necesarias para la realización de los ensayos y pruebas necesarias, van a ser fabricadas en laboratorio, simulando el proceso industrial para la producción de ladrillos cerámicos, siguiendo las etapas del proceso cerámico. Esto es debido evidentemente a que no se dispone de una planta piloto a nivel de laboratorio para producir las probetas cerámicas necesarias, y se ha diseñado y seguido, un proceso

discontinuo con un equipamiento de laboratorio, para conseguir un resultado lo más similar posible al que obtendríamos en la industria.

Para ello, se han tomado como pautas y referencia, los pasos más importantes que se tienen que dar a nivel industrial para la fabricación de ladrillos cerámicos, respetando y emulando esta secuencia en el laboratorio.

De manera equivalente y en laboratorio, se han obtenido los materiales que posteriormente se van a emplear como materias primas en la fabricación de las piezas cerámicas, en las cantidades necesarias. Como ya se ha comentado anteriormente, los materiales empleados son: por un lado, una mezcla de arcillas roja y gris (60% de arcilla roja y 40% de arcilla gris), suministrada por la empresa CEMESA; y por otro, escorias de acería LD, lodos de horno alto y lodos de acería LD, suministrados por las factorías de Arcelor Mittal en Asturias.

Una vez que ya se han obtenido todas las materias primas necesarias, lógicamente y debido las apreciables diferencias que presentan en cuanto a tamaños y formas, debidas a la naturaleza de su origen, se ha procedido a su transformación para la posterior dosificación y homogeneización de las distintas sustancias, y del mismo modo, aumentar la superficie específica de estos materiales para obtener una adecuada reactividad en el proceso de cocción al que se verán sometidas las piezas fabricadas.

Para ello se ha procedido a la molienda tanto de la mezcla de arcillas como de las escorias de acería LD en un molino de anillos, hasta alcanzar tamaños de grano de 200 μm . Por otro lado, los lodos de horno alto y los lodos de acería LD, sólo necesitan ser deshidratados en una estufa. El resultado de este proceso de secado, proporciona ya un polvo fino, con tamaños de grano por debajo de las 200 μm , por lo que en estos casos para asegurar esta granulometría, se ha sometido a los lodos a una leve molienda. El molino que se ha utilizado para reducir el tamaño de grano ha sido un molino de anillos.



Figura 29. Molino de anillos RESTCH RS 100, utilizado en la molienda.



Figura 30. Detalle muelas de disco y cámara de molienda.

Una vez alcanzada la granulometría deseada, se ha procedido a la dosificación de las sustancias para la fabricación de las probetas cerámicas. Para este trabajo de investigación, se ha tomado la decisión que los porcentajes sean del 10%, 20% y 30% de residuo siderúrgico, en casa caso, escorias de acería LD, lodos de horno alto o lodos de acería LD, y el correspondiente porcentaje de arcilla, 90%, 80% y 70%. Todos ellos porcentajes en seco. Los porcentajes de residuo en la mezcla se han establecido así, ya que como se ha

explicado con anterioridad, el porcentaje de desgrasante que suele utilizarse en las mezclas cerámicas para la fabricación de ladrillos es del 15%, así de esta forma se cubre el abanico de posibilidades alrededor de esa cifra, siendo además ambicioso respecto a las cantidades de los respectivos residuos, que se puedan valorizar mediante esta vía.

A nivel de laboratorio, todos los materiales que van a intervenir como materias primas en el proceso de fabricación de las piezas cerámicas están en estado seco. Se ha querido que esto fuera así, para realizar una primera homogeneización en seco del porcentaje de cada residuo y su correspondiente de arcilla, obteniéndose una mejor y mayor distribución de la cantidad, bien de escoria de acería LD, bien de lodos de horno alto o bien de lodos de acería LD, dentro de la arcilla. Una vez alcanzado este objetivo, se ha realizado la dosificación final con agua y homogeneización, que constituirá la mezcla de alimentación para el posterior proceso de conformado.

La cantidad de agua en la mezcla se ha establecido en el 8 % de la masa total, es decir 8,7 gramos de agua por cada 100 gramos de mezcla seca de arcilla/residuo siderúrgico. La finalidad de añadir agua es la de que actúe de ligante y proporcionar a las piezas cerámicas una adecuada resistencia mecánica para su manejo y manipulación.

Los equipos que se han utilizado a nivel de laboratorio para homogeneizar la mezcla tanto en seco, como después al añadir agua, en húmedo, han sido dos robots de cocina de uso habitual en cualquier casa, uno para la mezcla en seco y el otro destinado a la fabricación de la mezcla en húmedo.

Una vez que se tiene la mezcla de alimentación, el siguiente paso es el conformado de la misma. La técnica habitualmente empleada por la industria para la fabricación de cerámica estructural, es la de extrusión, como ya se ha descrito, mediante unas máquinas denominadas extrusoras o galleteras. Las extrusoras más empleadas son las de tornillo de Arquímedes, en las cuales el conformado se realiza de manera continua, pasando posteriormente por una cortadora de alambres, donde se configura definitivamente el ladrillo en verde, antes de la etapa de secado. Estas extrusoras trabajan a presiones de compactación que van desde los 8 a los 16 MPa. Debido a que en el laboratorio no se dispone de una máquina de extrusión, se ha simulado el proceso de conformado por esta técnica, mediante un proceso de prensado uniaxial para la fabricación de las piezas cerámicas. Y a causa de la naturaleza de los ensayos planificados siguiendo la normativa

de aplicación en la industria cerámica, se han fabricado mediante esta técnica, piezas cerámicas en dos geometrías diferentes, paralelepípedas y cilíndricas. Al mismo tiempo, se han seleccionado diferentes presiones de conformado, para cubrir el intervalo antes mencionado de presiones a las que suelen trabajar las máquinas galleteras (8-16 MPa). Lo que ha llevado, a que las piezas hayan sido conformadas mediante prensado uniaxial a las diferentes presiones de 5, 10 y 15 MPa en laboratorio.

Las piezas cerámicas conformadas presentan unas, forma de paralelepípedo de base cuadrada de 50 milímetros de lado y una altura aproximada de 20 milímetros, y otras, forma cilíndrica con una base de diámetro 40 milímetros y una altura aproximada de 40 milímetros. El conformado de las piezas se ha realizado mediante una prensa hidráulica uniaxial de 10 toneladas, conjuntamente con los moldes adecuados.



Figura 31. Prensa hidráulica utilizada en laboratorio para el conformado de las piezas.



Figura 32. Molde base cuadrada empleado en el proceso de conformado en laboratorio.



Figura 33. Molde cilíndrico empleado en el proceso de conformado en laboratorio.

Una vez que ya se tienen las piezas en verde, estas tienen que pasar por un proceso de secado para eliminar el agua y así poder asegurar una adecuada cocción del ladrillo cerámico. Este proceso de secado se realiza en la industria ladrillera en los denominados secaderos, generalmente se emplean secaderos de cámaras o secaderos de túnel, ya mencionados. A nivel de laboratorio, se ha imitado el proceso de secado de las piezas en verde, en una estufa de la marca Selecta, sometiendo a las mismas a una temperatura de 105-110°C durante un período de 24 horas.



Figura 34. Estufa marca Selecta, utilizada para la etapa de secado.

Después de la etapa de secado, las piezas cerámicas pasan a la última fase del proceso cerámico, la cocción. En la fabricación de cerámica estructural, la cocción de las piezas se realiza en hornos túnel, como ya se ha visto, que suelen trabajar en el punto de mayor temperatura en torno a los 1000°C para la producción de elementos para ladrillería y tejería.

Para simular este último proceso en el laboratorio, se ha utilizado un horno de mufla de media temperatura de la marca Astursinter, y se han seleccionado las temperaturas de 900°C, 1000°C y 1100°C como valores máximos de cocción, abarcando así, las temperaturas más usuales máximas de trabajo de los hornos túnel en la industria cerámica ladrillera. Al mismo tiempo, se han diseñado rampas tanto de calentamiento, como de enfriamiento, de 2°C/min, y se ha determinado el tiempo de permanencia en temperatura máxima de 60 minutos, imitando de esta forma, las curvas de cocción del proceso en el horno túnel.



Figura 35. Horno de mufla de la marca Astursinter, utilizado para la cocción de las piezas cerámicas.

Llegados a este punto y resumiendo, los valores operacionales clave en la fabricación de las piezas cerámicas en el laboratorio, según se ha descrito anteriormente y ha diseñado todo el proceso son:

- El porcentaje de residuo siderúrgico en la mezcla de alimentación: 10%, 20% y 30%.
- La presión de conformado: 5MPa, 10MPa y 15MPa.
- La temperatura máxima de cocción: 900°C, 1000°C y 1100°C.

La combinación entre estos parámetros operacionales clave, teniendo en cuenta las tres distintas mezclas correspondientes a los tres diferentes residuos siderúrgicos con la arcilla, y la planificación de los ensayos siguiendo las normas, ya mencionadas anteriormente, de referencia dentro de la industria cerámica ladrillera, hace que se hayan fabricado un total

de 486 piezas cerámicas siguiendo el proceso descrito. Por lo tanto, un tercio de las mismas, concretamente 162 piezas cerámicas, corresponderán a la mezcla de escoria de acería LD y arcilla. Otro tercio, a la mezcla de lodos de horno alto y arcilla, y las 162 piezas cerámicas restantes corresponderán a la mezcla de lodos de acería LD y arcilla.



Figura 36. Aspecto de algunas piezas cerámicas después de cocción.

En todo el proceso productivo que se ha descrito para fabricar las piezas cerámicas a nivel de laboratorio, se han seguido meticulosamente, los mismos procedimientos y pautas establecidos en un principio para la elaboración de estas piezas, para que no existiera ninguna diferencia entre las piezas cerámicas que pudiera estar generada por el propio proceso de fabricación.

Con la finalidad de identificar a las diferentes piezas cerámicas de cara a los posteriores ensayos normalizados, se ha creado una correspondencia entre las piezas y los pertinentes parámetros operacionales clave en su fabricación, los cuales se plasman en la siguiente tabla. Quedando sólo por añadir, para reconocer la pieza de que se trate, y escrito al principio de los códigos recogidos en la tabla, el tipo de residuo que se ha utilizado en la mezcla. En el caso de ser escorias de acería LD se ha identificado con las letras ELD; si se trata de lodos de horno alto, LHA; mientras que si el residuo utilizado, como sustituto en parte de las materias primas en la fabricación de las piezas, ha sido lodos de acería LD, LLD.

% Residuo Muestra seca (Muestra húmeda)	% Arcillas Muestra seca (Muestra húmeda)	% Agua (Muestra húmeda)	Presión de conformado (MPa)	Temperatura de cocción (°C)	Código
10 (9.20)	90 (82.80)	(8)	5	900	10090005
				1000	10100005
				1100	10110005
			10	900	10090010
				1000	10100010
				1100	10110010
			15	900	10090015
				1000	10100015
				1100	10110015
20 (18.40)	80 (73.60)		5	900	20090005
				1000	20100005
				1100	20110005
			10	900	20090010
				1000	20100010
				1100	20110010
			15	900	20090015
				1000	20100015
				1100	20110015
30 (27.60)	70 (64.40)		5	900	30090005
				1000	30100005
				1100	30110005
			10	900	30090010
				1000	30100010
				1100	30110010
			15	900	30090015
				1000	30100015
				1100	30110015

Tabla 15. Códigos de identificación de las piezas respecto a los parámetros operacionales.

5.1.1. Piezas con defectos. Corazón negro

Del total de las 486 piezas cerámicas fabricadas en el laboratorio, 90 de ellas han resultado dañadas o defectuosas después de la etapa de cocción en el horno. Todas ellas se corresponden a piezas cocidas, en las cuales, porcentajes de lodos de horno alto se han empleado en la elaboración de la pasta cerámica.

Las 90 piezas dañadas se han descartado para ser sometidas a los posteriores ensayos normalizados.

El motivo por el cual se han descartado y que ha producido el daño o defecto en las piezas, es la aparición después de la etapa de cocción en el horno, de lo que se denomina corazón negro, y que ha causado algunas piezas manchadas y en una reacción más virulenta, piezas fisuradas o directamente rotas.



Figura 37. Pieza paralelepípeda manchada por corazón negro.



Figura 38. Pieza cilíndrica manchada por corazón negro.



Figura 39. Pieza paralelepípeda rota por corazón negro.

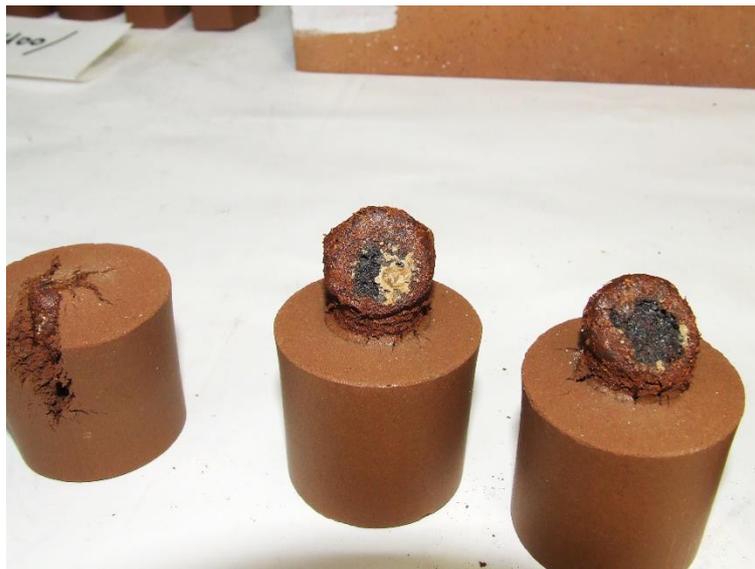


Figura 40. Piezas cilíndricas rotas por corazón negro.

La aparición de corazón negro o núcleo de reducción, en algunas piezas cerámicas fabricadas con lodos de horno alto, se debe a una cocción heterogénea de la pieza en el horno. La causa principal, es el hecho de la presencia de materia carbonosa y sulfuros asociados en las materias primas, los cuales, no han podido salir del interior de la pieza en forma gaseosa, a causa del proceso de vitrificación de la misma en su parte exterior. De

ahí que las piezas defectuosas corresponden a las que se han cocido a mayores temperaturas y con un mayor contenido de lodos de horno alto (LHA) en la mezcla.

El corazón negro es un indicador de la degradación de la materia orgánica en el interior del ladrillo donde se produce una combustión en atmósfera reductora, en ausencia de aire. Esta cocción en medio reductor produce la reducción de Fe^{3+} a Fe^{2+} (hematitas a magnetita) generando el corazón negro en las piezas (Velasco, 2005).

Sólo en el caso de piezas fabricadas con contenidos de lodos de horno alto (LHA) en la mezcla, tiene la aparición de corazón negro. Al ser los lodos de horno alto (LHA) el único hecho diferencial respecto al resto de piezas fabricadas en el trabajo de investigación, puede decirse que el origen del mismo está directamente relacionado con el uso de los lodos de horno alto como materia prima en la fabricación, y se debe a su elevado contenido en materia carbonosa (40,63%).



Figura 41. Detalle corazón negro en una pieza cilíndrica LHA.

Las piezas cerámicas desechadas, y por lo tanto no sometidas a ningún ensayo normalizado posterior, por causa de los daños provocados por la aparición de corazón negro son las que se corresponden con los códigos detallados en la tabla 16.

Código	Residuo (%)	Presión Conformado (Mpa)	Temperatura Cocción (°C)
LHA10110005	10	5	1100
LHA10110010	10	10	1100
LHA10110015	10	15	1100
LHA20100005	20	5	1000
LHA20100010	20	10	1000
LHA20100015	20	15	1000
LHA20110005	20	5	1100
LHA20110010	20	10	1100
LHA20110015	20	15	1100
LHA30100005	30	5	1000
LHA30100010	30	10	1000
LHA30100015	30	15	1000
LHA30110005	30	5	1100
LHA30110010	30	10	1100
LHA30110015	30	15	1100

Tabla 16. Códigos piezas LHA desechadas por la aparición de corazón negro.

Como se puede verificar, las piezas en las que ha aparecido el corazón negro, son aquellas que se han cocido a mayor temperatura. En el caso de las piezas elaboradas con el porcentaje más bajo, un 10% de lodos de horno alto (LHA), corresponden con la temperatura más alta de cocción, 1100 °C. Mientras que si se eleva el contenido de residuo, en aquellas piezas elaboradas con porcentajes más altos (20% y 30%) de lodos, este espectro de temperaturas se amplía, produciéndose este efecto dañino a una temperatura más baja, de 1000 °C, y por supuesto, igualmente a la temperatura de 1100 °C.

Los Ensayos de Caracterización

La correcta utilización de un material puesto en obra, pasa por analizar si éste es adecuado para la misión que debe cumplir en ella, por lo tanto, debe poseer ciertas características que justifiquen su uso. En el transcurrir del tiempo, el problema se ha resuelto de forma experimental, es decir, en base al conocimiento alcanzado según se iba comprobando si el material cumplía o no, las exigencias que se le solicitaran en cada caso.

Actualmente se ha llegado, gracias a los avances científicos y técnicos, a comprender el comportamiento de los productos cerámicos, destinados para cumplir determinada función, pudiéndose medir y comprobar si presentan una característica en el nivel adecuado exigible en cada parte de la obra, lo que facilita la selección del material más idóneo para cada uso (Blanco(I), 2007).

El objetivo de este capítulo es recoger y analizar, los resultados correspondientes, generados a lo largo de todos los ensayos, destructivos y no destructivos, realizados para caracterizar las diferentes piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de los diferentes residuos siderúrgicos y arcilla, y de esta forma poder probar la posibilidad de valorización de los mismos.

Para la caracterización de los diferentes productos cerámicos obtenidos, se han realizado una serie de ensayos normalizados y de uso generalizado dentro de la industria cerámica ladrillera.

- Inspección visual y variaciones de peso y volumen de las piezas.
- Heladicidad (UNE 67028 EX 1997).
- Capilaridad o succión (UNE EN 772-11).
- Eflorescencias (UNE 67029 EX 1995).
- Densidades, porosidades y absorción de agua (UNE EN 993-1-1996) (UNE EN 993-2-1996).
- Caliches (UNE 67039 1993).
- Expansión por humedad (UNE 67036 1999).
- Resistencia mecánica (UNE EN 772-1 2002).

Para la realización de todos los ensayos programados, y como ya se ha comentado, se han fabricado un total de 486 piezas cerámicas. Resultado de preparar 6 piezas por cada lote de material preparado, y 3 dosificaciones (10%, 20% y 30%), por 3 presiones de conformado (5 MPa, 10 MPa y 15 MPa), y por 3 temperaturas de cocción (900 °C, 1000 °C y 1100 °C), dando un total de 162 piezas para cada tipo de residuo (ELD, LHA y LLD). Piezas necesarias para realizar todo el estudio de investigación, empleando, tanto como fundente, en el caso de los porcentajes del 30% de residuo, como desgrasante, en todos los porcentajes, los respectivos residuos siderúrgicos, escoria de acería LD (ELD), lodos de horno alto (LHA) y lodos de acería LD (LLD), en cada caso.

Por tanto, el número total de piezas cerámicas fabricadas ha sido de 486, de las cuales 90 han resultado dañadas o defectuosas después del proceso de cocción, las cuales se han desechado y no se serán sometidas a estudio. Como ya se ha plasmado en el capítulo anterior, todas las piezas defectuosas o dañadas después de la cocción, se corresponden con piezas cerámicas fabricadas con contenido de lodos de horno alto (LHA) en la mezcla de materias primas.

Para el desarrollo de todos los ensayos previstos y dada la distinta naturaleza de los mismos, se han fabricado piezas cerámicas con dos geometrías diferentes. Piezas cilíndricas con un diámetro de 40 milímetros y altura de aproximadamente 40 milímetros, en un total de 4, fabricadas a partir de 100 gramos de mezcla cada una, por código. Y piezas con forma de paralelepípedos de base cuadrada de lado 50 milímetros y aproximadamente 20 mm de altura, en un total de 2, fabricadas con 120 gramos de la mezcla correspondiente cada una, por código.

6.1. Inspección visual y variaciones del peso y volumen de las piezas

6.1.1. Piezas con porcentajes de ELD y arcillas

Al realizar la inspección visual de las piezas con contenidos de escoria de acería LD, se puede comprobar que estas presentan unas tonalidades marrón arenosas, que van desde un tono más claro a uno más oscuro, según aumentamos el porcentaje de residuo en la

mezcla y/o aumentamos la temperatura de cocción. El tono más claro corresponde a las piezas fabricadas con un porcentaje en la mezcla del 10% de escoria de acería LD y sometidas a una temperatura de cocción de 900°C. Mientras que el tono más oscuro, dentro de esta gama de tonos marrón arenosos, será el de las piezas fabricadas con porcentaje de escoria de acería LD en la mezcla del 30%, y cocidas a una temperatura de 1100°C. El parámetro presión de conformado no influye en el color que presentan las piezas cocidas.

Como ya se ha descrito, el proceso de fabricación que se ha seguido, simula la producción por extrusión que normalmente se emplea en la industria cerámica ladrillera, fabricándose las piezas por medio de conformado por prensado semiseco (8 % de agua). En cuanto a los defectos perceptibles a simple vista, que pueden presentar las piezas fabricadas con porcentajes de escoria de acería LD, debidos al proceso de conformado seguido en laboratorio, y a la manipulación posterior de las piezas cerámicas en la etapa de secado previa a la cocción, algunas de ellas pueden presentar mellas, grietas y/o fisuras. En este caso, alguna de las piezas cerámicas paralelepípedas fabricadas con escorias de acería LD ha presentado pequeñas mellas en la zona de las esquinas, producto sin duda de las operaciones de desmoldeo y manipulación. Por otro lado, no presentan fisuras o grietas perceptibles a la vista.

Respecto a la variación del peso de las piezas con porcentajes de escoria de acería LD antes y después de las etapas de secado y cocción, el peso de las piezas con forma de paralelepípedo va desde los 114,2 gramos a los 119,8 gramos después del conformado, con un valor medio de 118,6 gramos, y después de la cocción, desde los 102 gramos a los 104,4 gramos, con un valor medio de 103,2 gramos. Por su parte, el peso de las piezas con forma cilíndrica, toma valores antes de las etapas de secado y cocción, que van desde los 95,2 gramos a los 99,9 gramos, presentando un valor medio de 99,1 gramos. Posteriormente a estas etapas, los valores del peso van de los 84,9 a los 87,3 gramos, con un valor medio de 86,1 gramos de peso.

Se observa que las piezas con forma de paralelepípedo, pierden una media del 13% en peso antes y después de las etapas de secado y de cocción, mientras que la media de pérdida en peso de las piezas cilíndricas es del 13,1%. Por lo tanto, se puede deducir que la pérdida

de peso que experimentan las piezas fabricadas con porcentajes de escoria de acería LD en la mezcla es casi idéntica, con indiferencia de su forma geométrica.

En cuanto a la variación de volumen, las piezas paralelepédicas presentan valores que van desde los 51,56 cm³ hasta los 57,07 cm³ después del conformado, siendo el valor medio 54,37 cm³, y desde 48,76 cm³ a los 56,46 cm³, con un valor medio de 53,25 cm³ en las piezas después de la cocción. Mientras que en las piezas cilíndricas, los volúmenes antes de la cocción van desde 43,77 cm³ hasta 48,87 cm³, con un valor medio de 45,79 cm³, y valores desde 40,91 cm³ a 49,20 cm³ después de la etapa de cocción, presentando un valor medio de 44,71 cm³.

La pérdida media de volumen que experimentan las piezas con porcentajes de escoria de acería LD, es del 2,03% en el caso de las piezas con forma de paralelepípedo y del 2,35% cuando se trata de piezas de forma cilíndrica. Resulta pues, que la pérdida de volumen que sufren las piezas con contenidos de escoria de acería LD es muy similar, resultando algo mayor en el caso de las piezas cilíndricas, sin duda determinada por la forma geométrica.

Estas pérdidas de peso y volumen de las piezas, están originadas por las transformaciones físico-químicas que se producen en la etapa de secado en estufa y la posterior etapa de cocción en el horno, provocando en las piezas, la pérdida de agua, la fusión de las partículas y la disminución de la porosidad.

6.1.2. Piezas con porcentajes de LHA y arcillas

A simple vista, las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de lodos de horno alto (LHA) no desechadas y sometidas a ensayos, presentan unas tonalidades marrones claro o beige, que van desde un tono más claro a uno más oscuro, según se eleva el porcentaje de residuo en la mezcla y/o aumentamos la temperatura de cocción. El tono más claro corresponde a las piezas fabricadas con un porcentaje en la mezcla del 10% de lodos de horno alto, y sometidas a una temperatura de cocción de 900°C. Mientras que el más oscuro dentro de esta gama de tonos marrón claro, será el de las piezas fabricadas con porcentaje en la mezcla del 30% y cocidas a la misma temperatura. El parámetro presión de conformado no influye en el color que presentan las piezas cocidas.

Al haber realizado el conformado de las piezas con porcentajes de lodos de horno alto (LHA) por prensado en el laboratorio, simulando la etapa de conformado por extrusión, de la fabricación industrial de cerámica estructural, conjuntamente con la manipulación posterior al conformado de las piezas cerámicas, puede generar que en alguna de ellas aparezcan mellas y grietas perceptibles a la vista. En este caso, alguna de las piezas cerámicas paralelepípedas, fabricadas con porcentajes de lodos de horno alto y arcilla, evidentemente, después de haber descartado las piezas que presentan corazón negro, ha presentado pequeñas mellas en la zona de las esquinas, producto sin duda de las operaciones de desmoldeo y manipulación. En el resto de las piezas no se han observado mellas, grietas y/o deformaciones evidentes.

En relación a la variación del peso, las piezas con contenidos de lodos de horno alto con forma de paralelepípedo, muestran valores que van desde los 117,4 gramos a los 119,2 gramos después del conformado por presión, con un valor medio de 118,5 gramos. Mientras que después de la etapa de cocción, pesos entre los 92,6 gramos a los 99,1 gramos, siendo el valor medio obtenido de 96,7 gramos. Por su parte, el peso de las piezas con forma cilíndrica, toma valores antes de la etapa de cocción que van desde los 98,4 gramos a los 99,7 gramos, presentando un valor medio de 99,2 gramos. Después de esta etapa, los valores del peso van de los 77,4 gramos a los 83 gramos, y un valor medio resultante de 80,7 gramos de peso.

Por lo tanto, las piezas fabricadas con porcentajes de lodos de horno alto y arcillas, sufren una variación en su peso antes y después de la cocción en el horno. Se observa que las piezas con forma de paralelepípedo, pierden una media del 18,44% en peso antes y después del proceso de cocción, mientras que la media de pérdida en peso de las piezas cilíndricas es del 18,66%. En este caso, se puede concluir que la pérdida de peso que experimentan las piezas fabricadas con porcentajes de lodos de horno alto (LHA) en la mezcla, es casi idéntica, con indiferencia de su forma geométrica.

Con relación al volumen de las piezas conformadas, antes y después de la etapa de cocción, las piezas cerámicas con forma de paralelepípedo, presentan valores que van desde 54,08 cm³ hasta los 62,69 cm³ después del conformado, siendo el valor medio 57,60 cm³ y desde 51,42 cm³ a los 59,34 cm³, con un valor medio de 55,08 cm³ en las piezas después de la etapa de cocción en el horno. Mientras que en las piezas cilíndricas, los valores antes de la

cocción van desde 45,72 cm³ a 53,90 cm³, con un valor medio de 48,26 cm³ y valores desde 43,33 cm³ a 51,39 cm³ después de la fase de cocción, presentando el conjunto un valor medio de 46,27 cm³.

Como sucedía con las piezas cerámicas con contenidos de escoria de acería LD, las piezas con porcentajes de lodos de horno alto (LHA) y arcilla no defectuosas, han sufrido variaciones en su volumen entre las etapas de conformado y de cocción. Siendo en este caso, la contracción sufrida respecto al volumen de las piezas después del conformado, de un 4,36% de media para las piezas en forma de paralelepípedo y de un 4,11% de media para las piezas cilíndricas, resultando bastante similar para ambas geometrías.

La pérdida en peso que presentan las piezas con porcentajes de lodos de horno alto (LHA), está muy influenciada sin duda por el elevado contenido en materia carbonosa de los mismos (40,63%), y su comportamiento al exponerse a las altas temperaturas del horno en la etapa de cocción.

6.1.3. Piezas con porcentajes de LLD y arcillas

Las piezas fabricadas con diferentes porcentajes de lodos de acería LD (LLD) en la mezcla, presentan unas tonalidades marrón rojizo, tonos que sin duda son debidos al muy alto contenido en hierro (86,85% Fe₂O₃), que van desde un matiz más claro a otro más oscuro, según aumentamos el contenido de residuo en la mezcla y/o aumentamos la temperatura de cocción. El tono más claro corresponde a las piezas fabricadas con un contenido en la mezcla del 10% de lodos de acería LD (LLD), y sometidas a una temperatura de cocción de 900°C. Mientras que el más oscuro dentro de esta gama de tonos marrón rojizo, será el de las piezas fabricadas con contenido de residuo en la mezcla del 30% y cocidas a la temperatura de 1100°C. El parámetro presión de conformado no influye en el color que presentan las piezas cerámicas cocidas.

Al igual que sucedía con algunas de las piezas cerámicas de forma paralelepípeda fabricadas con contenidos de los otros residuos siderúrgicos, a causa de las operaciones de desmoldeo y manipulación, pueden apreciarse pequeñas mellas en las esquinas de alguna de las piezas con esa forma, en cuya composición contienen porcentajes de lodos de acería LD. No

obstante la mayoría de las mismas, después de un estudio ocular, no presentan mellas, grietas y/o deformaciones apreciables.

En cuanto a la variación del peso de las piezas con porcentajes de lodos de acería LD (LLD) con forma de paralelepípedo, este varía desde los 113,1 gramos a los 119,2 gramos después del conformado, con un valor medio de 118,1 gramos, y después de la etapa de cocción, desde los 102,3 gramos a los 105,5 gramos, con un valor medio de 103,9 gramos. Por su parte, el peso de las piezas con forma cilíndrica, toma valores antes de la etapa de cocción que van desde los 93,7 gramos hasta los 99,8 gramos, generando el conjunto un valor medio de 98,5 gramos. Después de esta etapa, los valores del peso van de los 84,6 gramos a los 88,2 gramos, obteniéndose un valor medio de 86,7 gramos de peso.

Se observa que las piezas con forma de paralelepípedo, pierden una media del 11,98% en peso antes y después del proceso de cocción, mientras que la media de pérdida en peso de las piezas cilíndricas es del 11,88%. En este caso, se puede decir que la pérdida de peso que experimentan las piezas fabricadas con contenidos de lodos de acería LD (LLD) en la mezcla es casi idéntica, con indiferencia de su forma geométrica.

El volumen de las piezas fabricadas con porcentajes de lodos de acería LD (LLD) en forma de paralelepípedo, contempla valores que van desde 50,97 cm³ hasta los 56,39 cm³ después del conformado, siendo el valor medio 53,33 cm³ y desde 45,60 cm³ a los 56,98 cm³, con un valor medio de 50,51 cm³ en las piezas después de la cocción. Por otro lado, en las piezas cilíndricas, los valores antes de la etapa de cocción están comprendidos entre 42,72 cm³ y 48,15 cm³, con un valor medio del conjunto de 44,63 cm³, y valores desde 37,63 cm³ hasta 47,50 cm³ después de la etapa de cocción, presentando un valor medio de 42,19 cm³.

Las piezas fabricadas con lodos de acería LD (LLD), han sufrido variaciones en su volumen entre la etapa de conformado y la de cocción. Siendo en este caso, la contracción sufrida respecto al volumen de las piezas después del conformado, de un 5,28% de media para las piezas paralelepípedos y de un 5,48% de media para las cilíndricas. Datos que arrojan que la pérdida de volumen es bastante similar en ambos casos.

6.1.4. Resumen: Inspección visual y variaciones de peso y volumen de las piezas

La materia prima base para la fabricación de las piezas cerámicas, común a todas ellas y como componente mayoritario, la arcilla, define la base de coloración marrón que tienen las piezas. No obstante, la tonalidad final, es determinada en gran medida por el tipo de residuo empleado en la mezcla. Según el residuo que se esté utilizando, el color de las piezas cambia de forma ostensible desde un color marrón arenoso en las piezas fabricadas con contenidos de escoria de acería LD (ELD), un marrón claro para las piezas fabricadas con contenidos de lodos de horno alto (LHA), hasta un color marrón rojizo en las piezas fabricadas con contenidos de lodos de acería LD (LLD) en la mezcla. Estos tonos dependen de la naturaleza y composición química de los residuos que entran en juego en las diferentes mezclas. Por ejemplo, los altos contenidos en hierro (86,85% Fe_2O_3) originan tonalidades rojizas, como sucede en el caso de las piezas con porcentajes de lodos de acería LD. Por otro lado, el aumento en la temperatura de cocción hace que el color de las piezas cerámicas se vuelva más oscuro. Del mismo modo sucede con el incremento del contenido de residuo en la mezcla, haciendo que los tonos de las piezas sean más oscuros.

Combinando ambos factores, las piezas de color más oscuro, corresponden a las que tienen el contenido de residuo más alto en cada caso y han sido cocidas a la temperatura más elevada.

Las mellas, grietas y/o deformaciones que presentan algunas piezas cerámicas, son fruto del proceso operacional seguido en el conformado, ya que al no disponer de una máquina extrusora en el laboratorio, se ha tenido que simular la etapa de conformado por extrusión mediante conformado de las piezas en molde por presión, pudiendo producirse estos defectos en las piezas al tener que ejecutar el desmoldeo de las mismas, así como en su posterior manipulación.

Respecto a las variaciones de peso, todas las piezas cerámicas fabricadas sufren pérdida de peso en las etapas de secado y de cocción en el horno, siendo las piezas fabricadas con contenidos de lodos de horno alto (LHA), las que se han registrado la mayor pérdida media de peso. Seguidas por las piezas fabricadas con contenidos de escoria de acería LD (ELD) en la mezcla. Finalmente, se encuentran las piezas fabricadas con porcentajes de lodos de

acería LD (LLD) y arcilla, con una pérdida de peso menor. Sin duda, la pérdida de peso en las piezas cerámicas fabricadas, tiene que ver con las transformaciones físico-químicas de los componentes presentes en los residuos siderúrgicos, en la etapa de secado y en la de cocción en el horno. Por eso las piezas fabricadas con contenidos de residuo en la mezcla, que tienen en su composición altos contenidos en hierro, como los lodos de acería LD (LLD) o las escorias de acería LD (ELD), presentan pérdidas de peso más bajas. Mientras que las piezas cerámicas fabricadas con contenidos de lodos de horno alto (LHA) en la mezcla, tienen una mayor pérdida al pasar por la etapa de cocción, debido al alto contenido en materia carbonosa (40,63%) que presentan en su composición. Este material desaparece en la cocción por combustión, lo que presenta una ventaja respecto a los demás residuos, ya que en la combustión de la materia carbonosa, se produce calor extra en el horno (12.532 KJ/kg), lo que se traduce en un ahorro de combustible. Se puede concluir que los lodos de horno alto (LHA) pueden presentar primero una valorización material y después una valorización energética.

Las variaciones de volumen que experimentan las piezas cerámicas, dependen en mayor o menor medida del residuo siderúrgico utilizado en la fabricación de las mismas. En las piezas fabricadas con contenidos de escoria de acería LD (ELD), lodos de horno alto (LHA) y lodos de acería LD (LLD), después de la etapa de cocción, se produce una disminución del volumen de las piezas. Las piezas cerámicas con porcentajes de lodos de acería LD (LLD) han sido las que mayor disminución en su volumen han experimentado, seguidas por las piezas con contenidos en lodos de horno alto (LHA) en la mezcla, siendo las piezas que menor variación han sufrido, las que tienen porcentajes de escoria de acería LD (ELD) en su composición.

La variación del volumen está directamente relacionada con la finura de los materiales con los que se han fabricado las piezas cerámicas. Mayor finura equivale a una mejor formación de la matriz cerámica, y a un menor volumen después del proceso de cocción en el horno. Por lo que, las piezas que contienen materiales que parten con ventaja respecto a su granulometría, como los lodos en comparación a la escoria, adquieren un volumen menor después de la etapa de cocción, aunque todos los residuos hayan pasado por una etapa de molienda y clasificación.

6.2. Heladicidad

Mediante el ensayo de heladicidad se puede determinar el comportamiento de los ladrillos frente a la acción del hielo, lo que es un factor indicativo de su durabilidad. El agua penetra en los ladrillos por capilaridad al interior de los poros abiertos en su superficie, la cual, a una disminución de la temperatura por debajo de los 0 °C se transforma en hielo, aumentando su volumen aproximadamente en un 10%, y por lo tanto, practicando una presión intersticial, que puede dar lugar a que aparezcan grietas, fisuras y desconchamientos en los materiales que no tienen la capacidad de soportar los esfuerzos generados al helarse el agua contenida en los poros.

Con este ensayo, se detectan fallos de fabricación, especialmente de cocción, que pueden afectar a la durabilidad del ladrillo. Por ello, este ensayo se considera preceptivo para ladrillo visto, independientemente de las características climáticas del emplazamiento de la obra. Un ladrillo ha sido bien cocido cuando dentro de su masa se ha formado una estructura cerámica adecuada. Sin embargo no es posible determinar por el aspecto u otros ensayos sencillos si tal estructura ha tenido lugar.

Para los maestros ladrilleros muy familiarizados con determinados productos cerámicos, el color puede ser suficiente para conocer su grado de cocción, pero para la persona que lo vaya a utilizar puede ser completamente engañoso. El sonido metálico y campanil, claro y agudo, que se obtiene cuando se golpea con un cuerpo duro o con otro ladrillo, puede ser también una buena indicación para el experto, aunque obviamente, este criterio no puede aplicarse a todos los ladrillos (Blanco(I), 2007).

El ensayo de heladicidad consiste en someter a las piezas cerámicas a 25 ciclos consecutivos de hielo-deshielo, en cámara frigorífica a -15 °C (± 5 °C) y en tanque de deshielo con agua a 15 °C (± 5 °C), siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE 67028 EX 1997, de esta manera se pueden descubrir los posibles defectos de fabricación, que las piezas cerámicas puedan tener y que perjudican a su durabilidad (AENOR, 1997).

Estos defectos de fabricación se suelen producir especialmente en la etapa de cocción. Si la pieza cerámica ha sido bien cocida, la estructura cerámica que se forma en su masa es adecuada y la pieza tendrá mayor durabilidad. Por el contrario si esto no ocurre, después del ensayo, la pieza cerámica presentará fisuras, roturas, exfoliaciones o desconchados,

calificándose a la pieza como heladiza. No existe otro método fiable para poder comprobar la durabilidad de las piezas cerámicas.

6.2.1. Piezas con porcentajes de ELD y arcillas

Se ha sometido a todas las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de escoria de acería LD (ELD) y arcilla al ensayo de heladicidad según la norma UNE 67028 EX 1997, clasificando los resultados, como pieza heladiza si presenta grietas, fisuras o desconchamientos, y no heladiza si por el contrario no muestra ningún daño aparente después del ensayo.



Figura 42. Piezas con el 10% ELD y cocidas a 900 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de heladicidad.



Figura 43. Piezas con el 10% ELD y cocidas a 1000 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de heladicidad.



Figura 44. Piezas con el 10% ELD y cocidas a 1100 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de beladicidad.



Figura 45. Piezas con el 20% ELD y cocidas a 900 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de beladicidad.



Figura 46. Piezas con el 20% ELD y cocidas a 1000 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de beladicidad.



Figura 47. Piezas con el 20% ELD y cocidas a 1100 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de heladicidad.



Figura 48. Piezas con el 30% ELD y cocidas a 900 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de heladicidad.



Figura 49. Piezas con el 30% ELD y cocidas a 1000 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de heladicidad.



Figura 50. Piezas con el 30% ELD y cocidas a 1100 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de heladicidad.

Piezas	Norma UNE 67028 EX 1997
ELD10090005	Heladiza
ELD10090010	Heladiza
ELD10090015	Heladiza
ELD10100005	Heladiza
ELD10100010	Heladiza
ELD10100015	Heladiza
ELD10110005	Heladiza
ELD10110010	Heladiza
ELD10110015	Heladiza
ELD20090005	Heladiza
ELD20090010	Heladiza
ELD20090015	Heladiza
ELD20100005	Heladiza
ELD20100010	Heladiza
ELD20100015	Heladiza
ELD20110005	Heladiza
ELD20110010	Heladiza
ELD20110015	Heladiza
ELD30090005	No heladiza
ELD30090010	Heladiza
ELD30090015	Heladiza
ELD30100005	Heladiza
ELD30100010	Heladiza
ELD30100015	Heladiza
ELD30110005	Heladiza
ELD30110010	Heladiza
ELD30110015	Heladiza

Tabla 17. Resultados ensayo heladicidad. Piezas ELD.

A la vista de los resultados obtenidos en el ensayo de heladicidad, recogidos en la tabla 17 y se pueden visualizar en las diferentes fotografías, las únicas piezas cerámicas que en su composición presentan porcentajes de escorias de acería LD (ELD), que se han clasificado como no heladizas según la norma UNE 67028 EX 1997, corresponden a las que poseen un porcentaje del 30% de residuo en la mezcla, se han conformado a una presión de 5 MPa y cocido a una temperatura máxima de 900 °C (ELD30090005). El resto de las piezas han sido catalogadas como heladizas, ya que o bien han resultado rotas o presentan grietas después del ensayo.

6.2.2. Piezas con porcentajes de LHA y arcillas

Siguiendo la metodología descrita en la norma UNE 67028 EX 1997, al igual que en el caso de las piezas fabricadas con escoria de acería LD, se ha sometido a todas las piezas no dañadas por corazón negro, fabricadas con lodos de horno alto (LHA) en la mezcla, al ensayo de heladicidad. Se han obtenido los correspondientes resultados, clasificándolos según su comportamiento frente a la sucesión de ciclos hielo-deshielo, como heladizas si presentan alguna grieta, fisura o están rotas, y no heladizas si por el contrario no presentan ningún daño aparente.



Figura 51. Piezas con el 10% LHA y cocidas a 900 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de heladicidad.



Figura 52. Piezas con el 10% LHA y cocidas a 1000 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de heladicidad.

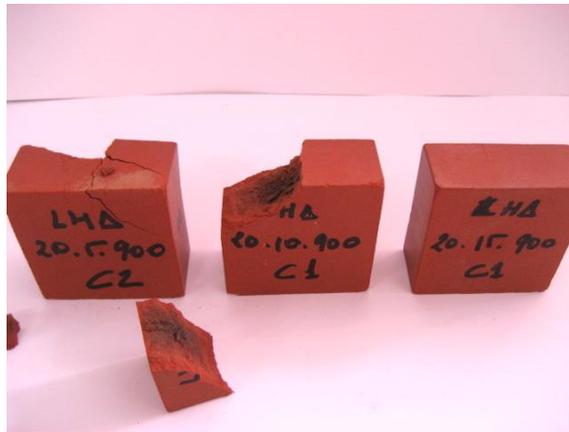


Figura 53. Piezas con el 20% LHA y cocidas a 900 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de heladicidad.



Figura 54. Detalle de la rotura. Grieta en la parte superior. Pieza LHA2090015.



Figura 55. Piezas con el 30% LHA y cocidas a 900 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de heladicidad.

Piezas	Norma UNE 67028 EX 1997
LHA10090005	No heladiza
LHA10090010	No heladiza
LHA10090015	No heladiza
LHA10100005	Heladiza
LHA10100010	Heladiza
LHA10100015	No heladiza
LHA20090005	Heladiza
LHA20090010	Heladiza
LHA20090015	Heladiza
LHA30090005	Heladiza
LHA30090010	No heladiza
LHA30090015	No heladiza

Tabla 18. Resultados ensayo heladicidad. Piezas LHA.

Las piezas cerámicas fabricadas con contenidos de lodos de horno alto (LHA) en la mezcla, que después del ensayo de heladicidad según la norma UNE 67028 EX 1997, han sido catalogadas como no heladizas, se corresponden con las que menor contenido de lodos de horno alto (LHA) tienen en la mezcla (10%) y han sido cocidas a la temperatura más baja (900°C), además de las piezas cocidas a 1000°C y conformadas a la presión más elevada (15 MPa).

También son piezas no heladizas las que tienen un 30% de lodos de horno alto (LHA) en su composición, se han cocido a la temperatura más baja (900°C), y se han conformado a 10 y 15 MPa respectivamente.

El resto de las piezas cerámicas sometidas al ensayo de heladicidad han presentado grietas, fisuras o directamente se han roto, por lo cual han sido clasificadas como heladizas.

6.2.3. Piezas con porcentajes de LLD y arcillas

Las piezas con contenidos de lodos de acería LD (LLD) en la mezcla con la arcilla, del mismo modo que en los casos anteriores y sujetas a lo dispuesto en la norma UNE 67028 EX 1997, se han clasificado en heladizas y no heladizas, dependiendo de su estabilidad estructural frente a los continuos ciclos de hielo-deshielo.



Figura 56. Piezas con el 10% LLD y cocidas a 900 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de heladicidad.



Figura 57. Piezas con el 10% LLD y cocidas a 1000 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de heladicidad.



Figura 58. Piezas con el 10% LLD y cocidas a 1100 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de heladicidad.



Figura 59. Piezas con el 20% LLD y cocidas a 900 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de heladicidad.

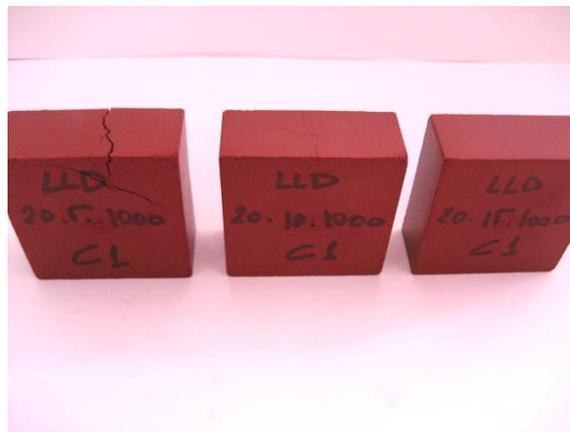


Figura 60. Piezas con el 20% LLD y cocidas a 1000 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de heladicidad.



Figura 61. Piezas con el 20% LLD y cocidas a 1100 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de beladicidad.



Figura 62. Piezas con el 30% LLD y cocidas a 900 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de beladicidad.



Figura 63. Piezas con el 30% LLD y cocidas a 1000 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de beladicidad.



Figura 64. Piezas con el 30% LLD y cocidas a 1100 °C, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de heladicidad.

Piezas	Norma UNE 67028 EX 1997
LLD10090005	No heladiza
LLD10090010	No heladiza
LLD10090015	No heladiza
LLD10100005	Heladiza
LLD10100010	Heladiza
LLD10100015	Heladiza
LLD10110005	Heladiza
LLD10110010	Heladiza
LLD10110015	No heladiza
LLD20090005	Heladiza
LLD20090010	Heladiza
LLD20090015	No heladiza
LLD20100005	Heladiza
LLD20100010	Heladiza
LLD20100015	Heladiza
LLD20110005	Heladiza
LLD20110010	Heladiza
LLD20110015	Heladiza
LLD30090005	Heladiza
LLD30090010	Heladiza
LLD30090015	Heladiza
LLD30100005	Heladiza
LLD30100010	Heladiza
LLD30100015	Heladiza
LLD30110005	Heladiza
LLD30110010	Heladiza
LLD30110015	Heladiza

Tabla 19. Resultados ensayo heladicidad. Piezas LLD.

Como puede observarse en las imágenes y está recogido en la tabla 19, después de la realización del ensayo de heladicidad según la norma UNE 67028 EX 1997, las piezas clasificadas como no heladizas, se corresponden con cinco piezas cerámicas fabricadas con contenidos de lodos de acería LD (LLD) en la mezcla. El resto de las piezas cerámicas muestran daños producidos por los sucesivos ciclos hielo-deshielo, por lo que se han clasificado como heladizas.

Las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de lodos de acería LD (LLD) en la mezcla con la arcilla que han sido clasificadas como no heladizas, son todas las piezas fabricadas con un 10% de lodos de acería LD (LLD) en la mezcla, y cocidas a la temperatura de 900°C (LLD100900XX), independientemente de la presión de conformado. Además de estas, las piezas LLD10110015, con un contenido del 10% de lodos de acería LD, conformadas a la presión de 15 MPa y que han sido sometidas a cocción en el horno a una temperatura máxima de 1100°C, y las piezas LLD20090015 (20% LLD, 15 MPa y 900°C), también han sido clasificadas como no heladizas.

6.2.4. Resumen: Heladicidad

El ensayo de heladicidad es empleado para detectar los posibles fallos no perceptibles a simple vista u ocultos en su interior, que las piezas cerámicas fabricadas puedan presentar, afectando a la durabilidad de las mismas. Estos fallos de fabricación, pueden tener su origen en cualquiera de las etapas del proceso cerámico, aunque especialmente en las etapas de secado y cocción en el horno. Si las piezas cerámicas han sido sometidas a unas etapas de secado y cocción adecuadas, a la salida del horno poseerán una estructura cerámica apropiada y de esta manera tendrán una mayor durabilidad. Estas piezas, después de ser sometidas al ensayo de heladicidad, serán clasificadas como no heladizas. Por el contrario, si las piezas cerámicas no han pasado por unas etapas de secado y de cocción en el horno adecuadas, después del ensayo de heladicidad, mostraran daños estructurales, siendo clasificadas como heladizas, y por lo tanto, no ofrecerán la durabilidad esperada.

Después de la realización de todos los ensayos de heladicidad, se ha comprobado que existe un mayor número de piezas clasificadas como no heladizas, dentro del grupo de piezas cerámicas fabricadas con lodos como materia prima, tanto lodos de horno alto (LHA) como lodos de acería LD (LLD). Por otro lado, dentro de las piezas fabricadas con

porcentajes de escoria de acería LD (ELD), sólo se ha clasificado una familia de piezas (ELD30090005), como no heladiza. Este hecho, está relacionado con las características de los residuos utilizados como materias primas en la fabricación de las piezas cerámicas. Los lodos, tanto los lodos de horno alto (LHA), como los lodos de acería LD (LLD), por su naturaleza, presentan una finura superior a la que pueda presentar la escoria de acería LD (ELD) después del proceso de molienda. En definitiva, los lodos se comportan como polvo después de deshidratarlos, mientras que la escoria de acería LD no deja de ser una roca artificial.

Los lodos al ser más finos, sinterizan en el proceso de cocción de manera más eficaz, formando una matriz cerámica más adecuada y con menos fallos, adquiriendo las piezas fabricadas una mayor durabilidad.

Piezas "No Heladizas"
ELD30090005
LHA10090005
LHA10090010
LHA10090015
LHA10100015
LHA30090010
LHA30090015
LLD10090005
LLD10090010
LLD10090015
LLD10110005
LLD20090015

Tabla 20. Relación piezas clasificadas como no heladizas después del ensayo de beladidad.

Hay que añadir que debido al proceso de fabricación seguido en el laboratorio y a las características de las piezas obtenidas, la durabilidad de las mismas puede haberse visto afectada. La presencia de mellas o fisuras, algunas perceptibles y otras no apreciables a simple vista, debidas a la manipulación a lo largo de todo el proceso de fabricación, puede haber afectado a la durabilidad de las piezas.

Del mismo modo, el espesor de las piezas cerámicas fabricadas puede haber influido en la aparición de fallos en el proceso de cocción en el horno, esto es debido, a que la superficie de las piezas cerámicas gruesas se calienta más rápidamente que su interior, y de este

gradiente térmico, resulta una contracción de las zonas exteriores más rápida, que puede generar el agrietamiento de las piezas. Por ello, es esencial que la diferencia de temperatura entre el núcleo y la superficie de la pieza, en el momento del paso por los puntos críticos de cocción resulte mínima, para que los cambios dimensionales que experimenten las piezas cerámicas en estos puntos críticos, sea lo más parecido posible. Por este motivo, y es posible que por una insuficiente temperatura de cocción, o permanencia en el horno de cocción, la parte interna de algunas piezas puede haberse cocido de manera insuficiente, no desarrollándose la estructura cerámica adecuada, apareciendo después del ensayo de heladicidad daños estructurales en las piezas.

Una posible solución que hace que los ladrillos sean más resistentes a los sucesivos ciclos hielo-deshielo consiste en someter a las piezas cerámicas después de la etapa de cocción a un tratamiento de hidrofugado.

6.3. Capilaridad o succión

El ensayo de capilaridad es empleado para determinar la cualidad que puede tener un determinado material para absolver un líquido, y en este trabajo de investigación, la cualidad que puedan presentar las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de residuos siderúrgicos y arcilla, para absorber agua.

El ensayo de capilaridad consiste en sumergir parcialmente las piezas cerámicas en un recipiente con agua, y medir la cantidad de agua que puede ascender por capilaridad en el transcurso de 1 minuto. El resultado de esta medición, se ha de expresar en gramos de agua absorbidos por centímetro cuadrado de superficie de la base de la pieza cerámica puesta en contacto con el agua, por minuto ($\text{gr}/\text{cm}^2 \times \text{min}$). Para ello, se ha tomado como referencia a la norma UNE EN 722-11, determinación de la absorción de agua por capilaridad de piezas para fábrica de albañilería, en hormigón, piedra natural y artificial, y de la tasa de absorción de agua inicial de las piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería (AENOR, 2001).

La capilaridad de las piezas cerámicas es un parámetro de gran interés respecto al comportamiento de las mismas en su colocación en obra, ya que se pueden generar problemas constructivos a la hora de poner en contacto la pasta de mortero con el ladrillo.

Si el ladrillo presenta una alta succión, podrá provocar la deshidratación de la pasta, haciendo que esta no fragüe correctamente y generando la disminución de la resistencia mecánica del conjunto como resultado.

El ensayo de capilaridad se ha llevado a cabo con las piezas fabricadas con porcentajes de residuo siderúrgico y arcilla, de forma de paralelepípedo. El ensayo no es destructivo respecto a las piezas.



Figura 65. Pieza cerámica en el ensayo de capilaridad.

6.3.1. Piezas con porcentajes de ELD y arcillas

Las piezas cerámicas con porcentajes de escoria de acería LD (ELD) y arcilla, han sido sometidas al ensayo de capilaridad, tomando como referencia lo que la norma UNE EN 722-11 especifica. Según esta guía, los resultados obtenidos del ensayo arrojan que los valores de succión de las piezas con contenidos de escoria de acería LD (ELD), están comprendidos entre $0,27 \text{ gr/cm}^2 \times \text{min}$, que corresponde, a las piezas con un 10% de escorias en su composición, que se han conformado a una presión de 15 MPa y cocido en el horno a una temperatura máxima de $900 \text{ }^\circ\text{C}$ (ELD10090015); y $0,69 \text{ gr/cm}^2 \times \text{min}$, de las piezas con el porcentaje del 30% de residuo y 70% de arcilla, conformadas a la presión de 5 MPa y cocidas a la temperatura máxima de $900 \text{ }^\circ\text{C}$ (ELD30090005).

El valor medio de succión que presentan las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de escoria de acería LD (ELD) ha resultado ser de $0,49 \text{ gr/cm}^2 \times \text{min}$.

Piezas	Succión [g/(cm ² xmin)]
ELD10090005	0,36
ELD10090010	0,36
ELD10090015	0,27
ELD10100005	0,55
ELD10100010	0,44
ELD10100015	0,37
ELD10110005	0,45
ELD10110010	0,40
ELD10110015	0,30
ELD20090005	0,57
ELD20090010	0,54
ELD20090015	0,44
ELD20100005	0,64
ELD20100010	0,54
ELD20100015	0,47
ELD20110005	0,64
ELD20110010	0,50
ELD20110015	0,40
ELD30090005	0,69
ELD30090010	0,55
ELD30090015	0,49
ELD30100005	0,64
ELD30100010	0,58
ELD30100015	0,48
ELD30110005	0,63
ELD30110010	0,50
ELD30110015	0,40

Tabla 21. Resultados ensayo capilaridad o succión. Piezas ELD.

Los valores obtenidos en el ensayo de succión para las piezas fabricadas con porcentajes de escoria de acería LD (ELD) y arcilla, han resultado bastante elevados. En obra, el pliego de condiciones técnicas particulares podrá fijar el límite de succión de agua de los ladrillos, que en ningún caso deberá ser superior a 0,45 gr/cm²×min. Siendo ya el valor medio que se ha obtenido para estas piezas cerámicas superior. Por lo tanto, de los resultados obtenidos sólo 11 grupos de piezas del total están por debajo de ese límite.

Piezas	Succión [g/(cm ² xmin)]
ELD10090005	0,36
ELD10090010	0,36
ELD10090015	0,27
ELD10100010	0,44
ELD10100015	0,37
ELD10110005	0,45
ELD10110010	0,40
ELD10110015	0,30
ELD20090015	0,44
ELD20110015	0,40
ELD30110015	0,40

Tabla 22. Piezas ELD por debajo del umbral permitido de succión.

De entre las piezas cerámicas que cumplen con el criterio de estar por debajo del límite de succión de 0,45 gr/cm²×min, destacan las que tienen menor porcentaje de residuo en su composición (10%), así como aquellas que han sido conformadas con la presión más elevada (15 MPa) y contenidos mayores de escorias de acería LD. Parece pues, que los parámetros que favorecen una menor succión de agua por parte de las piezas cerámicas con contenidos de escoria de acería LD (ELD), son un menor porcentaje de residuo en la mezcla y una mayor presión de conformado.

6.3.2. Piezas con porcentajes de LHA y arcillas

De la misma forma y tomando como guía la norma UNE EN 722-11, se ha aplicado la misma metodología que como anteriormente se ha seguido con las piezas fabricadas con escoria de acería LD, sometiendo a todas las piezas cerámicas cocidas, fabricadas con lodos de horno alto (LHA) y arcilla, que no presentan ningún daño debido al corazón negro, al ensayo de capilaridad, obteniéndose los resultados recogidos en la tabla 23.

Piezas	Succión [g/(cm ² xmin)]
LHA10090005	0,35
LHA10090010	0,29
LHA10090015	0,25
LHA10100005	0,49
LHA10100010	0,40
LHA10100015	0,32
LHA20090005	0,61
LHA20090010	0,53
LHA20090015	0,47
LHA30090005	0,84
LHA30090010	0,69
LHA30090015	0,61

Tabla 23. Resultados ensayo capilaridad o succión. Piezas LHA.

El rango de valores de succión obtenidos tras el ensayo, está comprendido entre 0,25 gr/cm²×min, correspondiente a las piezas cerámicas fabricadas con el porcentaje del 10% de lodos de horno alto (LHA), conformadas a una presión de 15 MPa y cocidas a una temperatura máxima de 900°C (LHA10090015) y 0,84 gr/cm²×min, piezas con 30% de lodos de horno alto (LHA), conformadas a 5 MPa y cuya temperatura máxima de cocción corresponde a 900°C (LHA30090005). El valor medio de succión que presentan las piezas que tienen en la mezcla lodos de horno alto (LHA) es de 0,49 gr/cm²×min.

Nuevamente, los valores obtenidos en el ensayo de succión para las piezas fabricadas con porcentajes de lodos de horno alto (LHA) y arcilla, han resultado bastante elevados. Si se tiene en cuenta que el valor límite de succión permitido es de 0,45 gr/cm²×min, en este caso, sólo 5 grupos de piezas cumplen con lo estipulado.

Piezas	Succión [g/(cm ² xmin)]
LHA10090005	0,35
LHA10090010	0,29
LHA10090015	0,25
LHA10100010	0,40
LHA10100015	0,32

Tabla 24. Piezas LHA por debajo del umbral permitido de succión.

De entre las piezas cerámicas con contenidos de lodos de horno alto (LHA) de las que han sido sometidas al ensayo de capilaridad, que cumplen con el criterio de estar por debajo del límite de succión de $0,45 \text{ gr/cm}^2 \times \text{min}$, sólo lo han cumplido aquellas que tienen menor porcentaje de residuo en su composición (10%). En un sentido contrario, al aumentar la temperatura de cocción, se eleva el valor de succión de las piezas. En este caso, el parámetro que favorece una menor succión de agua por parte de las piezas cerámicas es el menor porcentaje de residuo (10%) en el contenido de la pieza.

6.3.3. Piezas con porcentajes de LLD y arcillas

Las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de lodos de acería LD (LLD) y arcilla, han sido sometidas al ensayo de capilaridad, de la misma forma con la que se ha operado con las mezclas residuo/arcilla anteriores, apoyándose en la norma UNE EN 722-11. Una vez finalizado el ensayo, se han obtenido valores de succión de las piezas, que van desde $0,16 \text{ gr/cm}^2 \times \text{min}$, correspondiente a las piezas fabricadas con un contenido en lodos de acería LD (LLD) del 20%, se han conformado a una presión de 15 MPa y cocido a la temperatura máxima de 1100°C (LLD20110015), y $0,48 \text{ gr/cm}^2 \times \text{min}$, en las piezas con un contenido en lodos de acería LD (LLD) del 30%, conformadas a la presión de 5 MPa y cuya temperatura de cocción máxima corresponde a 1100°C (LLD30110005). Así mismo, el valor medio de succión que presentan las piezas que tienen en la mezcla lodos de acería LD (LLD) es de $0,31 \text{ gr/cm}^2 \times \text{min}$.

Piezas	Succión [$\text{g}/(\text{cm}^2 \times \text{min})$]
LLD10090005	0,31
LLD10090010	0,26
LLD10090015	0,21
LLD10100005	0,35
LLD10100010	0,26
LLD10100015	0,20
LLD10110005	0,30
LLD10110010	0,27
LLD10110015	0,19
LLD20090005	0,37
LLD20090010	0,33

LLD20090015	0,29
LLD20100005	0,41
LLD20100010	0,31
LLD20100015	0,25
LLD20110005	0,32
LLD20110010	0,24
LLD20110015	0,16
LLD30090005	0,45
LLD30090010	0,33
LLD30090015	0,32
LLD30100005	0,43
LLD30100010	0,35
LLD30100015	0,30
LLD30110005	0,48
LLD30110010	0,42
LLD30110015	0,29

Tabla 25. Resultados ensayo capilaridad o succión. Piezas LLD.

En las piezas cerámicas fabricadas con contenidos de lodos de acería LD (LLD), los resultados del ensayo de capilaridad ofrecen valores altos de succión, pero al contrario de lo que sucedía en los casos de las mezclas, bien de escorias de acería LD, bien de lodos de horno alto con arcilla, casi la totalidad de los datos de succión de las piezas fabricadas con porcentajes de lodos de acería LD (LLD), se encuentran por debajo del límite de 0,45 gr/cm²×min de succión.

Solamente un grupo de piezas fabricadas con porcentajes de lodos de acería LD (LLD) y arcilla, ha superado este valor límite de succión.

Piezas	Succión [g/(cm ² xmin)]
LLD30110005	0,48

Tabla 26. Piezas LLD por encima del umbral permitido de succión.

La succión en las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de lodos de acería LD (LLD) y arcilla, disminuye según decrece el porcentaje de residuo en la mezcla. Así mismo, a mayor presión de conformado, mejora el comportamiento de las piezas respecto a la

succión. En cuanto a la temperatura, este parámetro operacional también tiene cierta influencia respecto a los valores de succión que presentan las piezas, a mayor temperatura máxima de cocción en el horno, disminuye la succión en las piezas cerámicas con contenidos de lodos de acería LD (LLD).

6.3.4. Resumen: Capilaridad o succión

El ensayo de capilaridad, es de suma importancia para la correcta ejecución de la obra, a la hora de poner en contacto la pasta de mortero con el ladrillo en una construcción y evitar los posibles problemas de fraguado. La práctica de sumergir brevemente en agua los ladrillos antes de su colocación, es aconsejable en cualquier caso, e imprescindible si la succión es mayor de $0,15 \text{ gr/cm}^2 \times \text{min}$, para evitar la deshidratación del mortero, lo cual impediría su correcto fraguado y el desarrollo adecuado de la resistencia de la obra.

Todas las piezas cerámicas fabricadas presentan valores de succión muy elevados, aun los que se sitúan por debajo del límite de succión, más de $10 \text{ gr/cm}^2 \times \text{min}$, lo que puede ocasionar la deshidratación del mortero en obra por parte del ladrillo, disminuyendo la adherencia de la pieza cerámica con el mortero. Por este motivo y para las piezas cerámicas fabricadas con los residuos siderúrgicos, es conveniente humedecerlas adecuadamente antes de su colocación en obra. De esta forma, las piezas cerámicas no deshidratarán la pasta de mortero, asegurándose un correcto fraguado y evitando que se produzcan discontinuidades en los contactos ladrillo/mortero, y por consiguiente fisuras en la construcción.

Una posible solución, y para reducir los valores de succión que han presentado las piezas cerámicas fabricadas con residuos siderúrgicos y arcilla después del ensayo de capilaridad, consiste en someter a los ladrillos a un tratamiento de hidrofugado, después de la etapa de cocción.

Los ladrillos hidrofugados son aquellos que se someten a un proceso que consiste en aplicar, por inmersión o por aspersion con duchas, un producto hidrofugante o impermeabilizante específico, por ejemplo, una solución de siliconatos en agua. Un producto químico que confiere a los productos cerámicos la característica de repeler el

agua, con lo que se reduce la velocidad de entrada de la misma por capilaridad. Este proceso se lleva a cabo en la zona de embalaje de los ladrillos.

6.4. Eflorescencias

El ensayo de eflorescencias, es utilizado para determinar la aparición o no, de manchas de color blanquecino, que pueden ser visibles en la cara vista de un ladrillo en una edificación. Estas manchas blanquecinas están formadas por distintos tipos de sales, en un mayor porcentaje de sulfatos, aunque también puede existir presencia de carbonatos y/o cloruros. Estas sales solubles cristalizan al evaporarse el agua, no existiendo una relación directa entre el porcentaje de sales en la pieza y la aparición de la eflorescencia, ya que a veces se producen con porcentajes bajos, del orden del 0,01%, siendo lo más común sulfatos y nitratos de calcio, sodio o potasio.

Generalmente las eflorescencias poseen una composición, que difiere de la estructura que presentan las sales contenidas en el interior de las piezas cerámicas. Este hecho, puede explicarse por la separación de sales que se genera en la formación de la eflorescencia, debido a la diferente solubilidad de los compuestos que participan en la misma. Los sulfatos de sodio, potasio o magnesio son más solubles que el sulfato de calcio, y por ese motivo, va a ser arrastrados hacia la superficie más rápidamente.

Las sales que potencialmente pueden provocar eflorescencias, tienen su origen en las propias piezas cerámicas, aunque también pueden tener un origen externo, pueden proceder de los elementos que estén en contacto con los ladrillos y pasar a los mismos, como de la pasta de mortero o del propio terreno.

El contenido de sales en un cerámico, desde el punto de vista del propio cerámico, viene dado por la existencia previa en las materias primas de dichas sales, o bien porque se han formado en las etapas de secado y/o de cocción, a causa de los gases en contacto con las piezas cerámicas en el secadero o en el horno, o bien a causa de las transformaciones físico-químicas en las piezas, que suceden en la etapa de cocción.

Los sulfatos son las sales predominantes que producen las eflorescencias en la cerámica estructural y proceden de compuestos de azufre existentes en la materia prima. Hay que tener en cuenta, que los sulfatos presentes en la materia prima no tienen por qué ser los

que permanecen en el producto final después de la etapa de cocción, y que además, las piezas cerámicas cocidas suelen contener más productos solubles que la materia prima de la que proceden.

Las eflorescencias además de ser un problema estético de la cerámica estructural, pueden producir daños en los ladrillos, siempre que la cristalización de las sales sea cuantiosa y no sólo en la superficie, sino también en el interior a nivel capilar, generando importantes esfuerzos mecánicos que ocasionan la aparición de desconchamientos y agrietamiento de las piezas cerámicas (Blanco(I), 2007).



Figura 66. Detalle de ladrillo con eflorescencias en obra (Blanco(I), 2007).

El ensayo de eflorescencias se ha realizado siguiendo el procedimiento especificado en la norma UNE 67029 EX 1995. Según el mismo, la evaluación del grado de eflorescencia de cada pieza de la muestra, se realiza por comparación visual con una pieza patrón. Permitiendo clasificar a las piezas en cuatro categorías, según la capacidad que presenten de generar eflorescencias, como no eflorescida, ligeramente eflorescida, eflorescida y muy eflorescida. Esta clasificación viene determinada por dos factores, la intensidad de la eflorescencia y la superficie afectada por ella en la pieza.

Según sea la intensidad de la eflorescencia se pueden diferenciar de tres tipos, el velo fino cuando se observa una capa de eflorescencia muy fina y semitransparente, distinguible únicamente al comparar con la pieza patrón; el velo grueso, si se observa una capa de eflorescencia fina con cierta transparencia; y la mancha, cuando se tiene una capa de eflorescencia de espesor variable y opaca.

El segundo factor tiene en cuenta el porcentaje de la superficie de la cara de la pieza que está afectada por la eflorescencia, diferenciando, si la superficie afectada es inferior al 5%, está entre el 5% y el 25% o si por el contrario, ha resultado superior al 25% (AENOR, 1995).

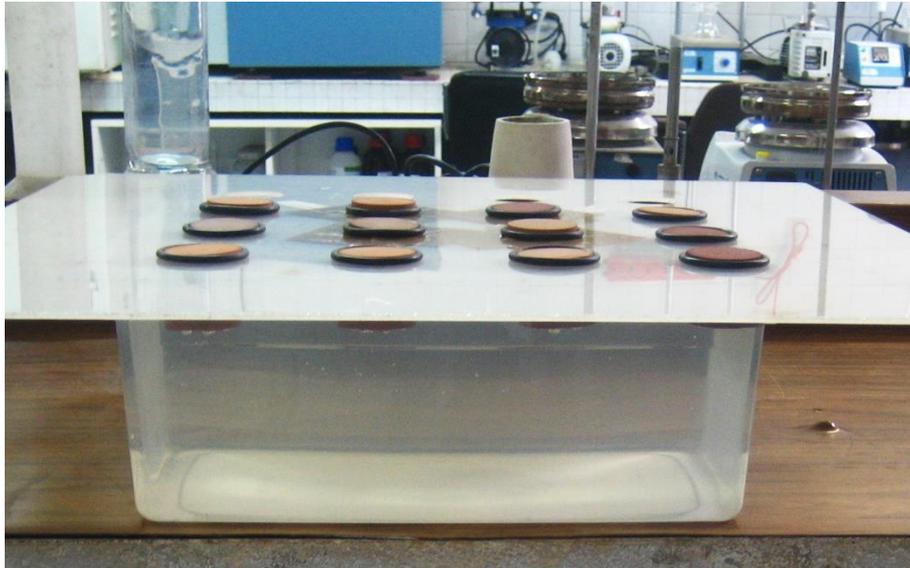


Figura 67. Piezas cerámicas durante el ensayo de eflorescencias en el laboratorio.

6.4.1. Piezas con porcentajes de ELD y arcillas

Las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de escorias de acería LD (ELD) y arcilla, han sido sometidas al ensayo de eflorescencias, tomando como referencia la norma UNE 67029 EX 1995. Para ello, se ha utilizado a las piezas cerámicas de forma cilíndrica, sumergiéndolas en agua destilada durante 7 días, dejando una cara al aire, para posteriormente dejar que sequen durante 24 horas al aire y transcurrido este período, finalmente, meterlas en la estufa junto con la pieza patrón durante un día. Una vez realizado este procedimiento se comparan visualmente, teniendo en cuenta los parámetros de clasificación ya descritos.

El ensayo de eflorescencias es un ensayo de tipo destructivo.



Figura 68. Piezas con el 10% ELD y cocidas a 900 °C en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.



Figura 69. Piezas con el 10% ELD y cocidas a 1000 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.



Figura 70. Piezas con el 10% ELD y cocidas a 1100 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.



Figura 71. Piezas con el 20% ELD y cocidas a 900 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.



Figura 72. Piezas con el 20% ELD y cocidas a 1000 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.



Figura 73. Piezas con el 20% ELD y cocidas a 1100 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.



Figura 74. Piezas con el 30% ELD y cocidas a 900 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.



Figura 75. Piezas con el 30% ELD y cocidas a 1000 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.



Figura 76. Piezas con el 30% ELD y cocidas a 1100 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.

Como se puede observar las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de escorias de acería LD (ELD) y arcilla, después de ser sometidas al ensayo de eflorescencias, según la norma UNE 67029 EX 1995, han sido clasificadas como se recoge en la tabla 27.

Piezas	Resultado del ensayo
ELD10090005	No eflorescido
ELD10090010	No eflorescido
ELD10090015	No eflorescido
ELD10100005	Ligeramente eflorescido
ELD10100010	Ligeramente eflorescido
ELD10100015	Ligeramente eflorescido
ELD10110005	Eflorescido
ELD10110010	Eflorescido
ELD10110015	Eflorescido
ELD20090005	No eflorescido
ELD20090010	No eflorescido
ELD20090015	No eflorescido
ELD20100005	Ligeramente eflorescido
ELD20100010	Ligeramente eflorescido
ELD20100015	Eflorescido
ELD20110005	Eflorescido
ELD20110010	Eflorescido
ELD20110015	Ligeramente eflorescido
ELD30090005	No eflorescido
ELD30090010	No eflorescido
ELD30090015	No eflorescido
ELD30100005	Ligeramente eflorescido
ELD30100010	Ligeramente eflorescido
ELD30100015	Ligeramente eflorescido
ELD30110005	Ligeramente eflorescido
ELD30110010	Ligeramente eflorescido
ELD30110015	Ligeramente eflorescido

Tabla 27. Resultados ensayo eflorescencias. Piezas ELD.

Las piezas cerámicas con contenidos de escoria de acería LD (ELD), que después del ensayo de eflorescencias, han recibido la catalogación de no eflorescido, son las correspondientes a aquellas que han sido cocidas a la temperatura máxima de cocción de 900°C, indiferentemente del contenido de escoria de acería LD (ELD) en la mezcla y de la presión de conformado. El resto de piezas, presentan eflorescencias en mayor a menor medida.

6.4.2. Piezas con porcentajes de LHA y arcillas

Las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de lodos de horno alto (LHA) y arcilla, y que no han sido desechadas por los daños producidos por la formación de corazón negro, se han sometido al ensayo de eflorescencias, repitiendo la misma metodología seguida con las piezas con contenido de escoria de acería LD y que está recogida en la norma UNE 67029 EX 1995.



Figura 77. Piezas con el 10% LHA y cocidas a 900 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.



Figura 78. Piezas con el 10% LHA y cocidas a 1000 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.



Figura 79. Piezas con el 20% LHA y cocidas a 900 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.



Figura 80. Piezas con el 30% LHA y cocidas a 900 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.

Observando los resultados después de someter a las piezas con porcentajes de lodos de horno alto (LHA) y arcilla, al ensayo de eflorescencias, se han clasificado las mismas según se recoge en la tabla 28.

Piezas	Resultado del ensayo
LHA10090005	Eflorescido
LHA10090010	Eflorescido
LHA10090015	Eflorescido
LHA10100005	Eflorescido
LHA10100010	Eflorescido
LHA10100015	Eflorescido
LHA20090005	Eflorescido
LHA20090010	Eflorescido

LHA20090015	Eflorescido
LHA30090005	Eflorescido
LHA30090010	Eflorescido
LHA30090015	Eflorescido

Tabla 28. Resultados ensayo eflorescencias. Piezas LHA.

En este caso, todas las piezas cerámicas fabricadas con contenidos de lodos de horno alto (LHA) que no han sido desechadas, después del ensayo de eflorescencias, presentan manchas blanquecinas de diferente consideración, por lo que todas ellas, indiferentemente del porcentaje de lodos de horno alto (LHA), de la presión de conformado o de la temperatura máxima de cocción, reciben la clasificación de eflorescido.

6.4.3. Piezas con porcentajes de LLD y arcillas

Por último, las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de lodos de acería LD (LLD) y arcilla, han sido sometidas al ensayo de eflorescencias, tomando como referencia la norma UNE 67029 EX 1995, al igual que se ha procedido con las piezas fabricadas con porcentajes de los otros residuos siderúrgicos.



Figura 81. Piezas con el 10% LLD y cocidas a 900 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.



Figura 82. Piezas con el 10% LLD y cocidas a 1000 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.



Figura 83. Piezas con el 10% LLD y cocidas a 1100 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.



Figura 84. Piezas con el 20% LLD y cocidas a 900 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.



Figura 85. Piezas con el 20% LLD y cocidas a 1000 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.



Figura 86. Piezas con el 20% LLD y cocidas a 1100 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.



Figura 87. Piezas con el 30% LLD y cocidas a 900 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.



Figura 88. Piezas con el 30% LLD y cocidas a 1000 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.



Figura 89. Piezas con el 30% LLD y cocidas a 1100 °C, en la parte superior, correspondientes a todas las presiones de conformado después del ensayo de eflorescencias y en la fila inferior piezas patrón.

A la vista de los resultados obtenidos después de someter a las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de lodos de acería LD (LLD) y arcilla, al ensayo de eflorescencias, se ha clasificado a las mismas según se recoge en la tabla 29.

Piezas	Resultado del ensayo
LLD10090005	Eflorescido
LLD10090010	Ligeramente eflorescido
LLD10090015	Ligeramente eflorescido
LLD10100005	No eflorescido
LLD10100010	No eflorescido
LLD10100015	No eflorescido
LLD10110005	Eflorescido
LLD10110010	Eflorescido

LLD10110015	Ligeramente eflorescido
LLD20090005	No eflorescido
LLD20090010	No eflorescido
LLD20090015	No eflorescido
LLD20100005	No eflorescido
LLD20100010	No eflorescido
LLD20100015	No eflorescido
LLD20110005	Eflorescido
LLD20110010	Eflorescido
LLD20110015	Eflorescido
LLD30090005	No eflorescido
LLD30090010	No eflorescido
LLD30090015	No eflorescido
LLD30100005	Eflorescido
LLD30100010	Eflorescido
LLD30100015	Eflorescido
LLD30110005	Eflorescido
LLD30110010	Eflorescido
LLD30110015	Eflorescido

Tabla 29. Resultados ensayo eflorescencias. Piezas LLD.

Las piezas cerámicas fabricadas con contenidos de lodos de acería LD (LLD) en la mezcla, que han sido clasificadas a la vista de los resultados como no eflorescidas, son las piezas que indiferentemente a la presión de conformado a la que han sido sometidas para su fabricación, tienen un contenido del 10% de lodos de acería LD y han sido cocidas a una temperatura máxima de 1000 °C. Así mismo, las piezas con porcentaje del 20% de lodos que han sido cocidas tanto a la temperatura máxima de 900 °C, como a la de 1000 °C. Por último, también han sido clasificadas como no eflorescidas, las piezas fabricadas con un 30% de lodos de acería LD (LLD) en su composición y sometidas a cocción en el horno a una temperatura máxima de 900 °C. El resto de las piezas cerámicas presentan eflorescencias en mayor o menor medida.

6.4.4. Resumen: Eflorescencias

La aparición de eflorescencias en las piezas cerámicas, está relacionada con la composición de las materias primas con las cuales se ha fabricado dichas piezas. Ya que el mecanismo por el cual se forman las eflorescencias consiste en que el agua en contacto con la cara

inferior de las piezas, disuelve sales que están presentes en las materias primas (arcilla, escoria de acería LD (ELD), lodos de horno alto (LHA), lodos de acería LD (LLD)), entrando en las piezas por capilaridad hasta llegar a la cara vista, la cara superior en contacto con el aire en el ensayo, donde al evaporarse el agua deja depositadas las sales que transporta, apareciendo en la superficie de dicha cara, manchas de color blanquecino. Estas manchas blanquecinas están formadas por distintos tipos de sales, en un mayor contenido de sulfatos, aunque también puede existir presencia de carbonatos y/o cloruros.

La aparición de estas manchas blanquecinas en las piezas cerámicas fabricadas es de vital importancia, si las piezas fabricadas van a ser utilizadas como ladrillos de cara vista, no teniendo tanta transcendencia si el uso en obra va a ser como ladrillos tabiqueros.

En el ensayo realizado, la mayoría de las piezas han desarrollado eflorescencias en mayor o menor medida, mientras que en un menor número, han sido catalogadas como no eflorescidas.

Dentro del grupo de piezas fabricadas con contenidos de escoria de acería LD (ELD) en la mezcla, las piezas que no han desarrollado eflorescencias, son las que han sido cocidas a la menor temperatura, 900°C, con indiferencia del contenido de escoria en la mezcla y la presión de conformado. Todas las que han sido sometidas a un proceso de cocción en el horno a temperaturas superiores, 1000°C o 1100°C, presentan manchas blanquecinas en mayor o menor medida, en su cara superior.

Todas las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de lodos de horno alto (LHA) y arcilla, han desarrollado eflorescencias, con indiferencia al contenido de residuo en la mezcla, la presión de conformado y/o la temperatura máxima de cocción.

Por su parte, el grupo de piezas fabricadas con contenidos de lodos de acería LD (LLD) en la mezcla, es el que presenta un mayor número de piezas que no han sido afectadas por las eflorescencias. Las piezas que han sido cocidas en el horno a la temperatura máxima de 1000°C y han sido fabricadas con los contenidos del 10% y 20%; y las piezas que han sido cocidas a la temperatura máxima de 900°C, y fabricadas con el 20% y 30% de lodos de acería LD (LLD) en la mezcla, con indiferencia de la presión de conformado, son las piezas que no presentan eflorescencias en sus caras superiores.

Piezas	Clasificación
ELD10090005	No eflorescido
ELD10090010	No eflorescido
ELD10090015	No eflorescido
ELD20090005	No eflorescido
ELD20090010	No eflorescido
ELD20090015	No eflorescido
ELD30090005	No eflorescido
ELD30090010	No eflorescido
ELD30090015	No eflorescido
LLD10100005	No eflorescido
LLD10100010	No eflorescido
LLD10100015	No eflorescido
LLD20090005	No eflorescido
LLD20090010	No eflorescido
LLD20090015	No eflorescido
LLD20100005	No eflorescido
LLD20100010	No eflorescido
LLD20100015	No eflorescido
LLD30090005	No eflorescido
LLD30090010	No eflorescido
LLD30090015	No eflorescido

Tabla 30. Piezas cerámicas clasificadas como no eflorescidas.

Se puede evitar la formación de eflorescencias en las piezas cerámicas, gracias a diferentes procedimientos. Una forma de muy extendido uso en la industria cerámica, consiste en añadir sustancias que reaccionen con las sales solubles volviéndolas insolubles, otro método consiste en generar una concentración de sales solubles en la cara vista de las piezas cerámicas, de carácter muy alcalino, para que de esta forma reaccionen con las sustancias que generan la eflorescencia, logrando que sean muy poco visibles.

Las sustancias que más se utilizan en la industria de cerámica estructural para la prevención de las eflorescencias, son los carbonatos de bario y el cloruro de bario. La adición de estas sustancias debe de realizarse en la etapa de homogenización de la mezcla de alimentación a los molinos y nunca antes.

Otra forma que ayuda a prevenir la formación de eflorescencias, consiste en mantener la temperatura de salida de los gases por chimenea en la etapa de cocción, por encima de la temperatura de rocío de los gases, alrededor de los 120 °C (Velasco, 2005).

6.5. Densidades, porosidades y absorción de agua

Los ensayos que llevan al cálculo de los parámetros densidad, porosidad y absorción de agua de las piezas cerámicas fabricadas, se han llevado a cabo tomando como guía las normas UNE EN 993-1-1996 y UNE EN 993-2-1996, para determinar el comportamiento del material (AENOR, 1996), (AENOR(II), 1996). Resulta más favorable, obtener piezas cerámicas ligeras de cara a su utilización como material de construcción, estando este parámetro condicionado por el contenido en metales pesados, como el hierro.

De la misma forma, la porosidad de un material conformado tiene una incidencia directa en otros parámetros como la resistencia mecánica, ya que si la pieza cerámica es muy porosa, su resistencia mecánica será baja. La porosidad también influye en otras características, como el comportamiento de la pieza frente a ataque químico, el aislamiento térmico, el aislamiento acústico, etc.

El aislamiento acústico de las piezas cerámicas está directamente relacionado con las propiedades mecánicas que posea el producto, siendo este mayor, cuanto mayor sea su masa por unidad de superficie (masa superficial, kg/m^2), cuanto más pesadas sean. Respecto al aislamiento térmico, se tendrá un aislamiento térmico mayor cuanto mayor sea la porosidad de las piezas cerámicas, debido a que la conductividad térmica es más baja en los materiales porosos que en los materiales de mayor densidad.

6.5.1. Densidades

La densidad de un material se puede definir como la masa que posee por unidad de volumen. Entendiendo por masa, al valor equivalente a la suma de la masa sólida y la masa del aire contenido en su porosidad, por lo que se puede asumir en definitiva, que es igual a la masa sólida.

Por otro lado, el volumen de un material está constituido por la suma de tres volúmenes, el correspondiente al de la masa sólida, el volumen de los poros cerrados y el volumen de la porosidad abierta.

Teniendo en cuenta estos conceptos, se pueden diferenciar tres tipos de densidad, la densidad real (ρ_r), la densidad aparente (ρ_{ap}), y la densidad absoluta o global (ρ_g).

$$\rho_r = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen Másico}}$$

$$\rho_{ap} = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen Aparente}}$$

$$\rho_g = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen Total}}$$

Donde el volumen aparente resulta de la suma del volumen de la masa y del volumen de los poros cerrados.

La densidad real se determina mediante la norma UNE EN 993-2, utilizando el método del picnómetro, si bien también puede calcularse empleando el método del volumenómetro. Una metodología que ofrece una menor precisión, pero que ha sido utilizada en este estudio de investigación, debido a que es el dispositivo del que se dispone en el laboratorio.



Figura 90. Volumenómetro utilizado en el ensayo.

En el método del voluménometro lo que se mide es el volumen de líquido desplazado por un sólido sumergido en su interior. Conociendo de antemano el peso seco de este sólido y viendo el volumen de líquido que este desplaza, tendremos el valor de la densidad real del material.

$$\rho_r = \frac{\text{Peso seco sólido}}{\text{Volumen líquido desplazado}}$$

Por otro lado, la densidad absoluta o global y la densidad aparente se han determinado a partir del ensayo con la balanza hidrostática, después de haber saturado a las piezas cerámicas con agua.

$$\rho_g = \frac{\text{Peso seco pieza}}{\text{Peso húmedo} - \text{Peso sumergido}} \times \text{Densidad agua}$$

$$\rho_{ap} = \frac{\text{Peso seco pieza}}{\text{Peso seco} - \text{Peso sumergido}} \times \text{Densidad agua}$$



Figura 91. Balanza hidrostática empleada en los ensayos.

6.5.1.1. Piezas con porcentajes de ELD y arcillas

Las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de escorias de acería LD (ELD) y arcilla han sido sometidas a los ensayos con el voluménometro y la balanza hidrostática, para determinar la densidad real, la densidad absoluta o global y la densidad aparente. Estos ensayos se han llevado a cabo con las piezas cerámicas con forma de paralelepípedo.

Piezas	Densidades (gr/cm ³)		
	Global	Aparente	Real
ELD10090005	1,85	2,68	2,79
ELD10090010	1,93	2,68	2,88
ELD10090015	1,98	2,69	2,98
ELD10100005	1,87	2,64	2,86
ELD10100010	1,95	2,69	2,90
ELD10100015	2,00	2,67	2,84
ELD10110005	1,96	2,65	2,88
ELD10110010	2,02	2,66	2,93
ELD10110015	2,07	2,65	2,91
ELD20090005	1,88	2,77	2,98
ELD20090010	1,95	2,79	2,90
ELD20090015	1,99	2,75	2,99
ELD20100005	1,87	2,75	2,80
ELD20100010	1,94	2,79	2,90
ELD20100015	1,99	2,77	3,00
ELD20110005	2,00	2,78	3,02
ELD20110010	2,03	2,75	2,96
ELD20110015	2,07	2,75	2,90
ELD30090005	1,74	2,61	2,99
ELD30090010	1,93	2,91	3,01
ELD30090015	2,02	2,92	3,03
ELD30100005	1,88	2,83	2,95
ELD30100010	1,94	2,85	2,96
ELD30100015	1,99	2,87	2,94
ELD30110005	1,91	2,84	2,97
ELD30110010	1,97	2,83	3,06
ELD30110015	2,03	2,80	2,96

Tabla 31. Resultado ensayo densidades. Piezas ELD.

La densidad absoluta o global, de las piezas fabricadas con contenido de escoria de acería LD (ELD), se encuentra entre los valores de 1,74 gr/cm³ y 2,07 gr/cm³. El valor más bajo se corresponde con las piezas con un porcentaje del 30% de escoria de acería LD en la

mezcla, conformadas a una presión de 5 MPa y cocidas a una temperatura máxima de 900 °C (ELD30090005). Mientras que con una densidad de 2,07 gr/cm³, nos encontramos con dos grupos de piezas, las denominadas con los códigos ELD10110015 y ELD20110015, las primeras con un porcentaje del 10% de escoria de acería LD en la mezcla y el segundo grupo de piezas con un porcentaje del 20%, ambas fabricadas con la misma presión de conformado, 15 MPa, y a la temperatura máxima de cocción en el horno de 1100 °C.

La densidad aparente se encuentra comprendida entre 2,61 gr/cm³ correspondiente a las piezas con el código ELD30090005, al igual que para la densidad global en el valor mínimo, y 2,92 gr/cm³ de las piezas con porcentajes del 30% de escoria de acería LD en la mezcla, conformadas a una presión de 15 MPa y cocidas a la temperatura máxima de 900 °C.

Por su parte, la densidad real para estas piezas, va desde los 2,79 gr/cm³, en las piezas con el código ELD10090005, a los 3,06 gr/cm³ correspondiente a las piezas con el porcentaje del 30% de escoria de acería LD (ELD), conformadas a una presión de 10 MPa y cocidas en el horno a la temperatura máxima de 1100 °C.



Figura 92. Gráfico comparativo densidades. Piezas ELD.

El pequeño aumento de magnitud de la densidad aparente y de la densidad real, va de la mano con el aumento del porcentaje de escoria de acería LD (ELD) en las piezas cerámicas fabricadas, algo no exento de lógica ya que a mayor porcentaje de residuo en la mezcla, mayor contenido en hierro, lo que implica una mayor densidad. En cuanto a los valores de la densidad absoluta o global, este efecto no está tan claro.

Los valores de la densidad aparente están muy próximos a los de la densidad real, mientras que la diferencia existente entre los valores de la densidad absoluta o global y la densidad aparente es mucho mayor, este hecho significa que los valores de la porosidad abierta de las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de escoria de acería LD (ELD), van a ser superiores a los de la porosidad cerrada.

6.5.1.2. Piezas con porcentajes de LHA y arcillas

Siguiendo la misma metodología que en el caso de las piezas fabricadas con porcentajes de escoria de acería LD, se ha operado con las piezas fabricadas con contenidos de lodos de horno alto (LHA) en la mezcla, en las cuales, no ha aparecido el fenómeno del corazón negro. Determinando la densidad absoluta o global, la densidad aparente y la densidad real, a partir de los ensayos de inmersión bajo vacío para saturación de las piezas y pesada con la balanza hidrostática, y con el volumenómetro, aplicando posteriormente las formulas ya vistas.

Piezas	Densidades (gr/cm ³)		
	Global	Aparente	Real
LHA10090005	1,76	2,61	2,83
LHA10090010	1,83	2,60	2,87
LHA10090015	1,91	2,63	2,76
LHA10100005	1,82	2,64	2,81
LHA10100010	1,88	2,63	2,83
LHA10100015	1,92	2,61	2,78
LHA20090005	1,69	2,67	2,86
LHA20090010	1,74	2,68	2,93
LHA20090015	1,80	2,68	2,81
LHA30090005	1,61	2,68	2,81
LHA30090010	1,67	2,70	3,02
LHA30090015	1,73	2,70	2,91

Tabla 32. Resultado ensayo densidades. Piezas LHA.

La densidad absoluta o global de las piezas fabricadas con contenidos de lodos de horno alto (LHA), se mueve entre los valores de $1,61 \text{ gr/cm}^3$ y $1,92 \text{ gr/cm}^3$. El valor más bajo se corresponde con las piezas con un contenido del 30% de lodos de horno alto (LHA) en la mezcla, conformada a una presión de 5 MPa y cocida a la temperatura máxima de $900 \text{ }^\circ\text{C}$ (LHA30090005). El valor más alto obtenido, corresponde con la densidad de $1,92 \text{ gr/cm}^3$, resultado determinado para las piezas con el código LHA10110015, con contenido del 10% de lodos de horno alto (LHA) en la mezcla, fabricadas con la presión de conformado de 15 MPa, y temperatura máxima de cocción en el horno de 1100°C .

La densidad aparente se encuentra comprendida entre el valor de $2,60 \text{ gr/cm}^3$ correspondiente a las piezas con el código LHA10090010, y $2,70 \text{ gr/cm}^3$ que presentan dos grupos de piezas, las que tienen un porcentaje del 30% de lodos, se han conformado a la presión de 10 MPa y cocido a la temperatura máxima de $900 \text{ }^\circ\text{C}$, y las que tienen el código LHA30090015. Mientras que la densidad real para estas piezas, va desde los $2,76 \text{ gr/cm}^3$ (LHA10090015) a los $3,02 \text{ gr/cm}^3$ (LHA30090010).



Figura 93. Gráfico comparativo densidades. Piezas LHA.

Los valores de la densidad aparente están más próximos a los de la densidad real, que los de la densidad absoluta o global a los de la densidad aparente, lo que indica, que los valores de la porosidad abierta de las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de lodos de horno alto (LHA), van a ser superiores a los de la porosidad cerrada.

El valor de la densidad absoluta o global, decrece al aumentar el contenido de lodos de horno alto (LHA) en la mezcla. Mientras que en el caso de la densidad aparente y la densidad real, la magnitud crece al aumentar el contenido de lodos de horno alto (LHA). Esto es debido, a que según aumentamos el contenido de lodos de horno alto, va aumentando el peso de la pieza saturada de agua. Lo que indica que, la porosidad abierta va aumentando según aumenta el contenido de residuo en las piezas.

Por otro lado, aparentemente todas las densidades aumentan de manera poco significativa, según se eleva la temperatura máxima de cocción en el horno, para un mismo contenido de lodos de horno alto (LHA) en la mezcla.

6.5.1.3. Piezas con porcentajes de LLD y arcillas

Continuando en la aplicación de los mismos métodos que en los casos anteriores, se han calculado los valores que densidad absoluta o global, densidad aparente y densidad real, de las piezas fabricadas con porcentajes de lodos de acería LD (LLD) y arcilla, gracias a los ensayos con la balanza hidrostática después de haber saturado con agua a las piezas, y el voluménometro, con la aplicación de las formulas ya descritas.

Piezas	Densidades (gr/cm ³)		
	Global	Aparente	Real
LLD10090005	1,90	2,71	2,90
LLD10090010	1,97	2,73	2,94
LLD10090015	2,02	2,74	2,94
LLD10100005	1,97	2,74	2,92
LLD10100010	2,03	2,73	3,02
LLD10100015	2,07	2,70	3,10
LLD10110005	2,04	2,71	2,84
LLD10110010	2,13	2,69	3,05
LLD10110015	2,17	2,67	2,81
LLD20090005	1,96	2,86	3,11
LLD20090010	2,02	2,86	3,13
LLD20100005	2,02	2,89	3,05
LLD20100010	2,09	2,85	3,07

LLD20100015	2,12	2,87	3,06
LLD20110005	2,13	2,84	3,03
LLD20110010	2,21	2,84	3,14
LLD20110015	2,25	2,80	3,20
LLD30090005	1,58	2,27	3,27
LLD30090010	1,66	2,30	3,21
LLD30090015	1,69	2,27	3,27
LLD30100005	2,02	3,02	3,05
LLD30100010	2,10	3,02	3,34
LLD30100015	2,16	3,01	3,30
LLD30110005	2,11	3,04	3,17
LLD30110010	2,19	3,03	3,35
LLD30110015	2,28	3,01	3,10

Tabla 33. Resultado ensayo densidades. Piezas LLD.

La densidad absoluta o global de las piezas fabricadas con contenidos de lodos de acería LD (LLD), se encuentra entre los valores de 1,58 gr/cm³ y 2,28 gr/cm³. El valor más bajo se corresponde con las piezas con un porcentaje del 30% de lodos de acería LD (LLD) en la mezcla, conformada a una presión de 5 MPa y cocida a una temperatura máxima de 900 °C (LLD30090005). Mientras que con la densidad de 2,28 gr/cm³, se encuentran las piezas con el código LLD30110015, con un 30% de lodos de acería LD en la mezcla, fabricada con la presión de conformado de 15 MPa y temperatura máxima de cocción en el horno de 1100 °C.

La densidad aparente, se encuentra comprendida entre 2,27 gr/cm³ que coincide en dos grupos de piezas, las piezas con el código LLD30090005, al igual que para la densidad absoluta o global en cuanto al valor mínimo, y las piezas con contenidos del 30% de lodos de acería LD (LLD) en la mezcla, que han sido conformadas a una presión de 15 MPa y cocidas a la temperatura máxima de 900 °C en el horno. Y en el extremo superior, el valor 3,04 gr/cm³ de las piezas con un porcentaje del 30% de lodos de acería LD en la mezcla, conformada a 5 MPa de presión y cocida a 1100 °C.

Por último, la densidad real para estas piezas, va desde los 2,81 gr/cm³ (LLD10110015) a los 3,35 gr/cm³ (LLD30110010).



Figura 94. Gráfico comparativo densidades. Piezas LLD.

Se puede observar cómo, con la excepción los valores de densidades correspondientes a las piezas con los códigos LLD30090005, LLD30090015 y LLD30090015, todas ellas con el porcentaje más elevado de lodos de acería LD en la mezcla y cocidas a la temperatura máxima de 900 °C en el horno, los valores de la densidad aparente están muy próximos a los de la densidad real, mientras que los de la densidad absoluta o global se encuentran más separados de los correspondientes a la densidad aparente. Este hecho, manifiesta que los valores de la porosidad abierta de las piezas cerámicas fabricadas con contenidos de lodos de acería LD (LLD), van a ser superiores a los de la porosidad cerrada.

El ligero aumento de magnitud de la densidad absoluta o global y de la densidad aparente, va de la mano con el aumento de contenido de lodos de acería LD en la mezcla, mientras que no se cumple esta relación directa con las piezas fabricadas con el porcentaje del 30% de lodos de acería LD y arcilla, y sometidas a una temperatura máxima de cocción en el horno de 900 °C, indiferentemente a la presión de conformado, en las cuales, las densidades absoluta o global y la aparente, disminuyen muy claramente con el aumento del contenido de lodos de acería LD.

Los valores de la densidad real de las piezas fabricadas con porcentajes de lodos de acería LD y arcilla, mantienen una cierta tendencia a crecer según se aumenta en contenido del residuo siderúrgico en la mezcla.

Manteniendo constante el porcentaje de lodos de acería LD se puede observar como generalmente, al elevar la temperatura de cocción en el horno, las densidades de las piezas cerámicas aumentan de manera poco significativa.

6.5.1.4. Resumen: Densidades

La diferencia entre densidades es mínima entre las piezas cerámicas fabricadas con los distintos residuos. Siendo las piezas fabricadas con lodos de acería LD (LLD), con un mayor contenido en hierro (86,85% Fe_2O_3), las que presentan los valores más altos de densidad. Seguidas por las piezas fabricadas con porcentajes de escoria de acería LD (ELD), que aunque presentan contenidos en hierro (22,16% a 31,52% Fe_2O_3), semejantes al de los lodos de horno alto (LHA) (30,03% Fe_2O_3), no poseen tanta cantidad de materia carbonosa (40,63%), por lo que serán más pesadas al no generarse tanta porosidad en la etapa de cocción en el horno. Finalmente y por este motivo, las piezas fabricadas con lodos de horno alto (LHA), son las que tienen densidades menores.

Residuo		Densidades (gr/cm^3)		
		Global	Aparente	Real
ELD	Valor Mínimo	1,74	2,61	2,79
	Valor Máximo	2,07	2,92	3,06
LHA	Valor Mínimo	1,61	2,60	2,76
	Valor Máximo	1,92	2,70	3,02
LLD	Valor Mínimo	1,58	2,27	2,81
	Valor Máximo	2,28	3,04	3,35

Tabla 34. Valores mínimos y máximos de densidades de los diferentes residuos siderúrgicos.

Se puede observar que como norma general, la densidad crece al aumentar el contenido de residuo dentro del mismo grupo de piezas. Del mismo modo, el aumento de la temperatura eleva ligeramente el valor de la densidad. Mientras que si se incrementa la presión de conformado, la densidad de las piezas también aumenta.

6.5.2. Porosidades

Una vez que ya se conoce el valor de la densidad real, mediante el método del voluménometro y el correspondiente a la densidad absoluta o global, gracias a las mediciones con la balanza hidrostática, de las piezas cerámicas, se puede calcular el valor de la porosidad total. Por otro lado, habiendo determinado el valor de la densidad absoluta o global y de la densidad aparente, se puede calcular el valor de la porosidad abierta. Finalmente, el valor de la porosidad cerrada se puede determinar conociendo los datos de densidad absoluta o global, de la densidad real y de la densidad aparente, o simplemente por diferencia entre la porosidad total y la porosidad abierta.

$$\text{Porosidad total} = \left(1 - \frac{\rho_{\text{absoluta}}}{\rho_{\text{real}}}\right) \times 100$$

$$\text{Porosidad abierta} = \left(1 - \frac{\rho_{\text{absoluta}}}{\rho_{\text{aparente}}}\right) \times 100$$

$$\text{Porosidad cerrada} = \text{Porosidad total} - \text{Porosidad abierta}$$

La porosidad nos da una idea de la relación existente entre el volumen de los huecos que tiene un material y su volumen total. La porosidad total, es por lo tanto, la suma de la porosidad abierta, generada por los huecos de la pieza que son accesibles, más la porosidad cerrada, que está constituida por los huecos internos de la pieza y, por tanto, no son accesibles.

6.5.2.1. Piezas con porcentajes de ELD y arcillas

Una vez conocidas la densidad absoluta o global, la densidad aparente, así como la densidad real de las piezas fabricadas con porcentajes de escoria de acería LD (ELD) y arcilla, puede calcularse el valor de la porosidad total y la porosidad abierta mediante las formulas antes descritas. Determinando por último, el valor de las porosidad cerrada por diferencia.

Piezas	Porosidades (%)		
	Porosidad abierta	Porosidad total	Porosidad cerrada
ELD10090005	30,95	33,56	2,61
ELD10090010	28,25	33,02	4,77

ELD10090015	26,53	33,69	7,16
ELD10100005	29,09	34,56	5,47
ELD10100010	27,41	32,80	5,39
ELD10100015	25,00	29,38	4,38
ELD10110005	26,20	32,08	5,88
ELD10110010	23,96	30,98	7,02
ELD10110015	21,86	28,94	7,08
ELD20090005	32,13	36,87	4,74
ELD20090010	30,26	32,84	2,58
ELD20090015	27,45	33,22	5,77
ELD20100005	31,94	33,06	1,12
ELD20100010	30,45	32,94	2,49
ELD20100015	28,32	33,69	5,37
ELD20110005	28,21	33,86	5,65
ELD20110010	26,14	31,60	5,46
ELD20110015	24,44	28,50	4,06
ELD30090005	33,25	41,81	8,56
ELD30090010	33,52	35,78	2,26
ELD30090015	30,68	33,29	2,61
ELD30100005	33,57	36,38	2,81
ELD30100010	32,04	34,47	2,43
ELD30100015	30,48	32,23	1,75
ELD30110005	32,72	35,85	3,13
ELD30110010	30,23	35,54	5,31
ELD30110015	27,63	31,68	4,05

Tabla 35. Resultado ensayo porosidades. Piezas ELD.

La porosidad abierta en las piezas cerámicas fabricadas con contenido de escoria de acería LD (ELD) en la mezcla, se encuentra comprendida en un rango de valores que va desde 21,86% (ELD10110015), correspondiente a las piezas fabricadas con un menor contenido, el 10% de escoria de acería LD (ELD), a la mayor presión de conformado 15 MPa, y a una mayor temperatura máxima de cocción 1100 °C; al 33,57% (ELD30100005), piezas con

un porcentaje del 30% de escoria de acería LD (ELD) en la mezcla, conformadas a la presión de 5 MPa y sometidas a cocción a 1000 °C en el horno. Este porcentaje de porosidad abierta, es muy semejante a los valores de las piezas cerámicas con mayor contenido de escoria de acería LD, el 30%, conformadas a menos presión, 5 MPa y cocidas a menor temperatura máxima, 900 °C. Piezas con los códigos ELD30090005 (33,25%) y ELD30090010 (33,52%).

Por otro lado, las piezas cerámicas que obtienen el valor más bajo de porosidad total, correspondiente al 28,50%, han sido las piezas fabricadas con un porcentaje del 20% de escorias de acería LD y arcilla, sometida a una presión de 15 MPa en la etapa de conformado y cocida a la temperatura máxima de 1100 °C. Mientras que en el otro extremo, con una porosidad total del 41,81%, se encuentran las piezas cerámicas con el 30% de residuo en la mezcla, que han sido conformadas a la presión de 5 MPa y sometidas a la temperatura máxima de cocción de 900 °C en el horno.



Figura 95. Gráfico comparativo porosidades. Piezas ELD.

Se puede observar la evolución de las porosidades en las piezas fabricadas con porcentajes de escoria de acería LD (ELD) y arcilla, comprobándose como en cada grupo de piezas fabricadas a la misma temperatura máxima de cocción y con el mismo contenido de escoria

de acería LD en la mezcla, la porosidad, de manera general, disminuye al aumentar la presión de conformado.

6.5.2.2. Piezas con porcentajes de LHA y arcillas

La determinación de la porosidad total y la porosidad abierta, se ha realizado en base a las mismas formulas empleadas en el apartado anterior, una vez que se conoce los valores de las densidades absoluta o global, real y aparente, de las piezas fabricadas con porcentajes de lodos de horno alto y arcilla, y que no han sido descartadas debido a la aparición de corazón negro tras la etapa de cocción en el horno. Mientras que la porosidad cerrada se ha calculado por diferencia entre las dos primeras.

Piezas	Porosidades (%)		
	Abierta	Total	Cerrada
LHA10090005	32,50	37,65	5,15
LHA10090010	29,57	36,20	6,63
LHA10090015	27,31	30,91	3,6
LHA10100005	31,19	35,30	4,11
LHA10100010	28,57	33,45	4,88
LHA10100015	26,50	31,04	4,54
LHA20090005	36,78	41,11	4,33
LHA20090010	34,85	40,47	5,62
LHA20090015	32,71	36,03	3,32
LHA30090005	39,80	42,64	2,84
LHA30090010	38,25	44,79	6,54
LHA30090015	35,93	40,65	4,72

Tabla 36. Resultado ensayo porosidades. Piezas LHA.

La porosidad abierta se mueve entre los valores del 26,50%, correspondiente a las piezas fabricadas con el porcentaje del 10% de residuo (LHA), conformadas a la presión de 15 MPa y sometidas a la temperatura de 1000 °C en la etapa de cocción (LHA10100015), y del 39,80%, porosidad abierta que presentan las piezas con el código LHA30090005, que presentan el 30% de lodos de horno alto (LHA) en su composición, han sido conformadas a la presión de 5 MPa y cocidas a 900 °C.

La porosidad total se encuentra acotada entre los porcentajes del 30,91% y del 44,79% de las piezas con los códigos LHA10090015, piezas con un contenido de lodos (LHA) del 10%, conformadas a la presión de 15 MPa y que han sido cocidas a la temperatura máxima de 900 °C, y LHA30090010, correspondiente a las piezas con un contenido del 30% de residuo (LHA), conformadas a la presión de 10 MPa y cocidas a la temperatura máxima de 900 °C.



Figura 96. Gráfico comparativo porosidades. Piezas LHA.

Al realizar una comparación entre los valores de las porosidades obtenidos, para la misma temperatura de cocción de 900 °C y aumentando el contenido de lodos de horno alto en la mezcla del 10% al 20%, el porcentaje tanto de la porosidad abierta como de la total, aumentan levemente su valor. Por otro lado, para el mismo contenido de lodos de horno alto, si se eleva la temperatura máxima de cocción de los 900 °C a los 1000 °C, tanto la porosidad abierta como la porosidad total decrecen también levemente.

Parece pues evidente, que el incremento del contenido del residuo (LHA) en la mezcla, aumenta el porcentaje de porosidad, mientras que el factor temperatura tiene el efecto contrario, disminuye la porosidad. Mientras que la presión de conformado, manteniendo

a los parámetros de, contenido de lodos de horno alto y temperatura máxima de cocción constantes, hace que el porcentaje de porosidad de las piezas disminuya al aumentarla.

6.5.2.3. Piezas con porcentajes de LLD y arcillas

La porosidad existente en las piezas fabricadas con porcentajes de lodos de acería LD (LLD) y arcilla, da una idea de la relación que existe entre el volumen de los huecos que tienen las piezas cerámicas y su volumen total. La porosidad total es entonces, la suma de la porosidad abierta, formada por los huecos de la pieza accesibles, más la porosidad cerrada, que está constituida por los huecos internos de la pieza y, por tanto, no accesibles. Se ha calculado la porosidad total y la porosidad abierta en base a las formulas antes descritas, mientras que la porosidad cerrada se ha determinado por diferencia entre las dos primeras.

Piezas	Porosidades (%)		
	Porosidad abierta	Porosidad total	Porosidad cerrada
LLD10090005	29,98	34,42	4,44
LLD10090010	27,65	32,77	5,12
LLD10090015	26,31	31,27	4,96
LLD10100005	28,02	32,57	4,55
LLD10100010	25,69	32,72	7,03
LLD10100015	23,19	33,05	9,86
LLD10110005	24,45	28,10	3,65
LLD10110010	21,07	30,18	9,11
LLD10110015	18,91	23,04	4,13
LLD20090005	31,64	37,16	5,52
LLD20090010	29,24	35,39	6,15
LLD20090015	27,15	34,15	7,00
LLD20100005	30,16	33,74	3,58
LLD20100010	26,71	31,86	5,15
LLD20100015	25,97	30,58	4,61
LLD20110005	24,90	29,48	4,58
LLD20110010	22,17	29,60	7,43

LLD20110015	19,91	29,87	9,96
LLD30090005	30,38	51,60	21,22
LLD30090010	27,87	48,21	20,34
LLD30090015	25,20	48,17	22,97
LLD30100005	32,95	33,69	0,74
LLD30100010	30,56	37,19	6,63
LLD30100015	28,22	34,54	6,32
LLD30110005	30,72	33,56	2,84
LLD30110010	27,56	34,64	7,08
LLD30110015	24,24	26,61	2,37

Tabla 37. Resultado ensayo porosidades. Piezas LLD.

La porosidad abierta en las piezas fabricadas con contenidos de lodos de acería LD (LLD) en la mezcla, toma valores que van desde el 18,91% de las piezas con el código LLD10110015, al 32,95% correspondiente a las piezas cerámicas con el código LLD30100005. Mientras que la porosidad total se encuentra entre un valor mínimo de 23,04%, correspondiente a las mismas piezas que tienen el valor mínimo de porosidad abierta (18,91%), las piezas fabricadas con porcentaje del 10% de lodos (LLD), que han sido conformadas con la presión de 15 MPa y cocidas a la temperatura máxima de 1100 °C. Y un valor máximo del 51,60%, que corresponde a las piezas con el 30% de lodos de acería LD en la mezcla, que ha sido conformada a 5 MPa de presión y cocida en el horno a una temperatura máxima de 900 °C.

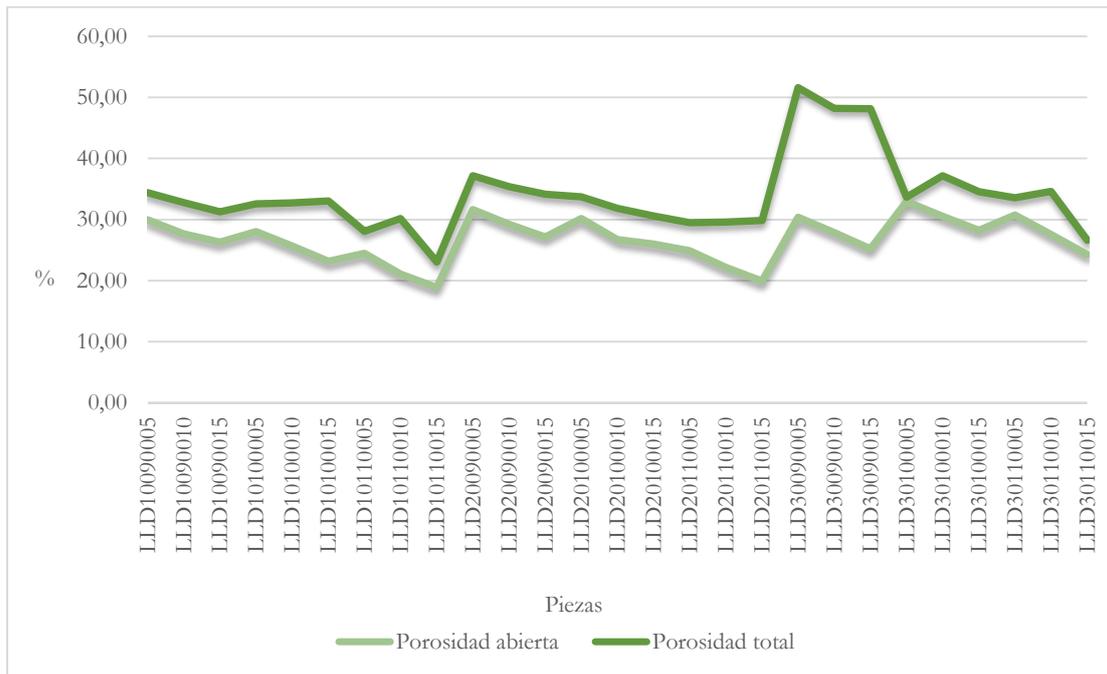


Figura 97. Gráfico comparativo porosidades. Piezas LLD.

Se puede observar la evolución de las porosidades en las piezas fabricadas con contenidos de lodos de acería LD (LLD) en la mezcla, comprobándose como en cada grupo de piezas fabricadas a la misma temperatura máxima de cocción y con el mismo porcentaje de lodos de acería LD en la mezcla, la porosidad, de manera genérica, disminuye al aumentar la presión de conformado.

Por otro lado, llama la atención la porosidad cerrada que presentan las piezas cerámicas fabricadas con el 30% de lodos de acería LD en la mezcla y cocidas a la temperatura máxima de 900 °C (LLD300900XX), dada su magnitud frente a la porosidad abierta y el peso que tiene en el valor de la porosidad total. En el caso de las piezas con el código LLD30090005, fabricadas con un porcentaje del 30% de lodos LLD, conformadas a la presión de 5 MPa y cocidas a la temperatura máxima de 900 °C, la porosidad cerrada es del 41,13% respecto a la porosidad total. Mientras que para las piezas con el código LLD30090010 (30% LLD, 10 MPa y 900 °C), la porosidad cerrada aporta un 42,18% a la magnitud de la porosidad total. Por último, en las piezas con el código LLD30090015 (30% LLD, 15 MPa y 900 °C), la porosidad cerrada supone un 47,69% de la porosidad total. Este hecho, puede ser debido al elevado contenido de residuo (30% LLD) en la mezcla que tienen las piezas, combinado con una temperatura de cocción baja (900 °C).

La tendencia que se observa con los datos obtenidos de porosidad de las piezas fabricadas con porcentajes de lodos de acería LD (LLD) y arcillas, es que si se mantiene constante la temperatura máxima de cocción en el horno, al aumentar el porcentaje de lodos LD en la mezcla, aumenta la porosidad de las piezas. Mientras, que si se mantiene constante el contenido de lodos de acería LD, al elevar la temperatura máxima de cocción, la porosidad disminuye. En cuanto a la presión de conformado y su influencia sobre la porosidad de las piezas, es obvia, para un mismo contenido de residuo (LLD) y temperatura máxima de cocción, al elevar la presión de conformado, disminuye la porosidad.

6.5.2.4. Resumen: Porosidades

Después de analizar los datos relativos a la porosidad abierta y la porosidad total, se puede llegar en una primera impresión, a que las piezas cerámicas fabricadas con indiferencia del residuo que se ha utilizado como una de las materias primas, tienen una porosidad elevada. Siendo el factor de mayor contribución, el valor de la porosidad abierta.

Residuo		Porosidades (%)	
		Porosidad abierta	Porosidad total
ELD	Valor Mínimo	21,86	28,50
	Valor Máximo	33,57	41,81
LHA	Valor Mínimo	26,50	30,91
	Valor Máximo	39,80	44,79
LLD	Valor Mínimo	18,91	23,04
	Valor Máximo	32,95	51,60

Tabla 38. Valores mínimos y máximos de porosidades de los diferentes residuos siderúrgicos.

Las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de lodos de horno alto (LHA) y arcilla, presentan los mayores valores de porosidad abierta de media, respecto a todas las demás piezas. Por el contrario, esto no es así, respecto a los valores de porosidad total, debido a la magnitud de la porosidad cerrada que algunas piezas presentan. Se observa que piezas cerámicas fabricadas con contenidos de lodos de acería LD (LLD) en la mezcla, presentan una porosidad cerrada mayor que en las otras piezas, llegando incluso en algún caso, como ocurre con las piezas con los códigos LLD30090005, LLD30090010 y LLD30090015, a alcanzar valores similares a los que han registrado de porosidad abierta.

Como norma general, los datos muestran que la porosidad aumenta con el incremento del contenido de residuo en la mezcla, y en un sentido contrario, al elevar la temperatura máxima de cocción en el horno, la porosidad de las piezas cerámicas disminuye. En cuanto a la presión de conformado, comparando los valores obtenidos de porosidad, para un mismo porcentaje de residuo en la mezcla y una temperatura máxima de cocción constante, al elevar la presión, disminuye la porosidad de las piezas.

6.5.3. Absorción de agua

La capacidad de absorción de agua que pueden presentar las piezas cerámicas fabricadas, se ha determinado empleando el método de la balanza hidrostática de una manera similar a como se ha operado para determinar la densidad absoluta o global y la densidad aparente. Para ello, se debe de introducir a las piezas cerámicas en agua, previamente saturadas, con la finalidad de conocer el volumen total, mediante el principio de Arquímedes. Siendo la capacidad de absorción de agua, la relación entre el peso del agua absorbida hasta saturación por las piezas y el peso en seco, en tanto por ciento.

$$\text{Absorción de agua} = \frac{\text{Peso saturado} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} \times 100$$

6.5.3.1. Piezas con porcentajes de ELD y arcillas

Después de haber obtenido los pesos, en seco y saturadas de agua, de las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de escoria de acería LD (ELD) y arcilla, se ha aplicado la fórmula descrita sobre estas líneas, cosechando los valores de absorción de agua recogidos en la tabla 39 para estas piezas.

Piezas	Absorción (%)
ELD10090005	16,68
ELD10090010	14,64
ELD10090015	13,38
ELD10100005	15,50
ELD10100010	14,04
ELD10100015	12,46
ELD10110005	13,34
ELD10110010	11,82

ELD10110015	10,54
ELD20090005	17,05
ELD20090010	15,48
ELD20090015	13,72
ELD20100005	16,99
ELD20100010	15,64
ELD20100015	14,20
ELD20110005	14,09
ELD20110010	12,85
ELD20110015	11,75
ELD30090005	19,04
ELD30090010	17,30
ELD30090015	15,13
ELD30100005	17,84
ELD30100010	16,49
ELD30100015	15,25
ELD30110005	17,12
ELD30110010	15,29
ELD30110015	13,61

Tabla 39. Resultado ensayo absorción de agua. Piezas ELD.

El valor mínimo de absorción de agua, con el porcentaje del 10,54%, se corresponde con las piezas con el código ELD10110015, que tienen en su composición el contenido más bajo de escoria de acería LD en la mezcla, el 10%, se han fabricado con la mayor presión de conformado, 15 MPa, y se han sometido a la mayor temperatura máxima de cocción, 1100°C, en el horno. Por otro lado, el valor máximo de absorción de agua, el 19,04%, es el que presentan las piezas que identificadas con el código ELD30090005, que tienen el mayor porcentaje de escoria de acería LD en la mezcla, el 30%, se han sometido a la presión más baja de conformado, 5 MPa, para su fabricación y han sido cocidas a la menor temperatura máxima, los 900 °C.

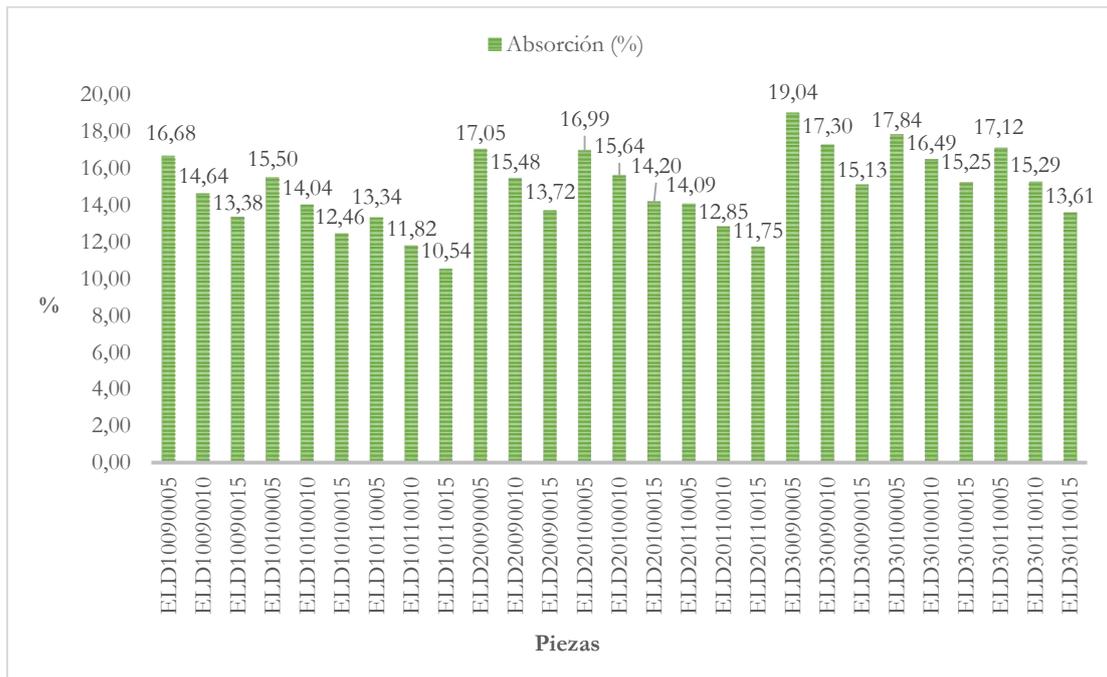


Figura 98. Gráfico resultados absorción de agua. Piezas ELD.

Se puede comprobar como, según los resultados del ensayo de absorción de agua de las piezas cerámicas fabricadas con contenidos de escoria de acería LD (ELD), puede decirse que a mayor contenido de escoria de acería LD en las piezas, mayor absorción de agua presentan estas, con las mismas condiciones de temperatura y presión. Además, al aumentar la presión de conformado y la temperatura máxima de cocción, manteniendo constante el contenido de escoria de acería LD en la mezcla, la absorción de agua disminuye.

6.5.3.2. Piezas con porcentajes de LHA y arcillas

La absorción de agua de las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de lodos de horno alto (LHA) y arcilla, que no han sido desechadas, igualmente a como se ha operado con las piezas con contenidos de escoria de acería LD, se calcula por medio de la relación entre el peso de agua que sature la pieza cerámica y el peso seco de la misma, saturando las piezas con agua en una campana de vacío y aplicando la fórmula anteriormente descrita.

Piezas	Absorción (%)
LHA10090005	18,39
LHA10090010	16,10
LHA10090015	14,27
LHA10100005	17,15
LHA10100010	15,17
LHA10100015	13,81
LHA20090005	21,78
LHA20090010	19,92
LHA20090015	18,12
LHA30090005	27,31
LHA30090010	25,48
LHA30090015	23,32

Tabla 40. Resultado ensayo absorción de agua. Piezas LHA.

En las piezas cerámicas fabricadas con contenidos de lodos de horno alto (LHA) en la mezcla, que se han podido someter a ensayos, los valores de absorción de agua van desde el 13,81% al 27,31%, que se corresponden con las piezas con el código LHA10100015, con un porcentaje del 10% de lodos de horno alto (LHA), prensadas a 15 MPa y sometidas a la temperatura máxima de cocción de 1000 °C, y las piezas que han sido identificadas con el código LHA30090005 (30% LHA, 5 MPa y 900 °C) respectivamente.

Las piezas cerámicas fabricadas con el menor contenido (10%) de lodos de horno alto (LHA), sometidas a la mayor presión en la etapa de conformado (15 MPa) y temperatura de cocción máxima de 1000 °C, presentan la menor absorción de cantidad de agua en el ensayo. Por otro lado, las piezas cerámicas fabricadas con el mayor contenido de residuo (30% LHA), que han sido conformadas a la menor presión posible (5 MPa) y cocido a la menor de las temperaturas máximas (900 °C), son las que presentan la mayor capacidad de absorción de agua.

Las piezas fabricadas con el mismo contenido de lodos de horno alto (LHA) en la mezcla, y a la misma temperatura máxima de cocción, al ir aumentando la presión de conformado, su capacidad de absorción de agua disminuye.

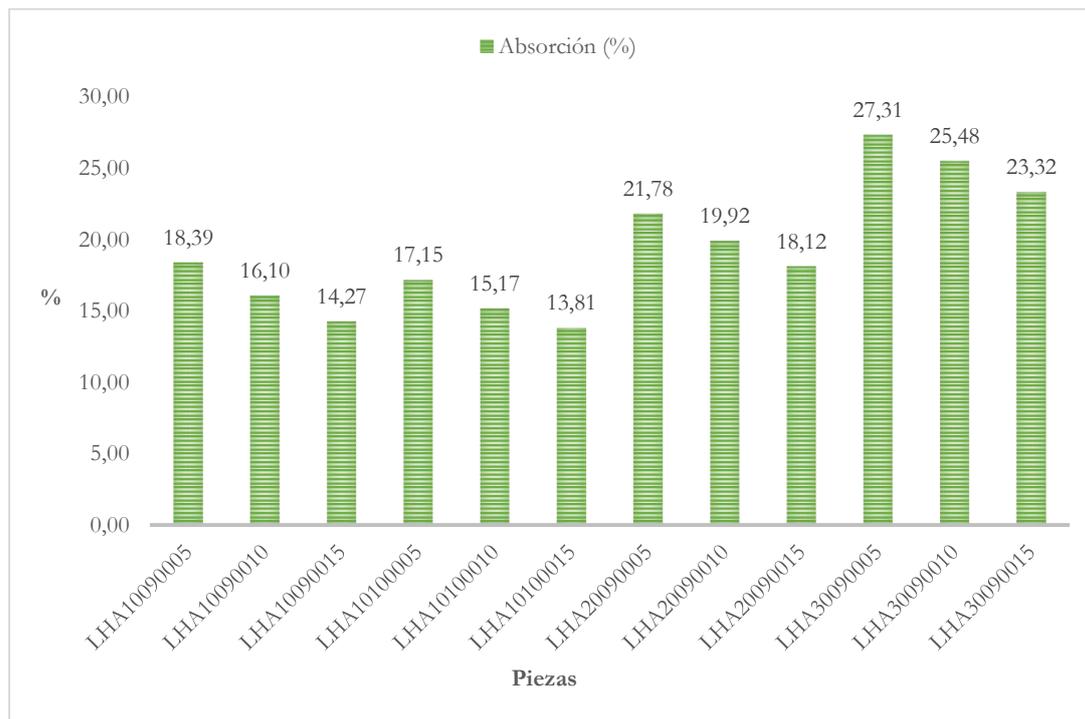


Figura 99. Gráfico resultados absorción de agua. Piezas LHA.

Según los datos obtenidos, la capacidad de absorción de agua que presentan las piezas cerámicas para la misma temperatura máxima de cocción, en el caso de los lodos de horno alto (LHA) sólo puede considerarse la temperatura de 900 °C; e idéntica presión de conformado, aumenta al elevar el porcentaje de residuo (LHA) en la mezcla. Lo que indica que a más residuo, igual a mayor absorción de agua.

Si se compara los valores de la capacidad de absorción de agua, manteniendo constante el contenido de lodos de horno alto (LHA) y la presión de conformado, variando la temperatura máxima de cocción de 900 °C a 1000 °C, se ha verificado que la absorción de agua disminuye al elevarse la temperatura de cocción. Por lo tanto, a mayor temperatura máxima de cocción en el horno, menor absorción de agua.

En cuanto a la influencia de la presión de conformado sobre la capacidad de absorción de agua, que presentan las piezas fabricadas con porcentajes de lodos de horno alto (LHA) y arcilla, queda claro, que a igualdad de condiciones de contenido de residuo (LHA) y temperatura máxima de cocción, un aumento de la presión conlleva una disminución de la absorción de agua.

6.5.3.3. Piezas con porcentajes de LLD y arcillas

Siguiendo la misma metodología que la empleada con las piezas cerámicas fabricadas con contenidos de escorias de acería LD y con lodos de horno alto respectivamente, se ha determinado los valores de la capacidad de absorción de agua para las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de lodos de acería LD (LLD) y arcilla.

Piezas	Absorción (%)
LLD10090005	15,75
LLD10090010	13,98
LLD10090015	13,01
LLD10100005	14,19
LLD10100010	12,62
LLD10100015	11,15
LLD10110005	11,92
LLD10110010	9,89
LLD10110015	8,71
LLD20090005	16,14
LLD20090010	14,41
LLD20090015	13,05
LLD20100005	14,90
LLD20100010	12,75
LLD20100015	12,20
LLD20110005	11,63
LLD20110010	10,02
LLD20110015	8,85
LLD30090005	19,13
LLD30090010	16,73
LLD30090015	14,83
LLD30100005	16,26
LLD30100010	14,53
LLD30100015	13,03
LLD30110005	14,54
LLD30110010	12,55
LLD30110015	10,63

Tabla 41. Resultado ensayo absorción de agua. Piezas LLD.

Los valores obtenidos después del ensayo de absorción de agua para las piezas cerámicas fabricadas con contenidos de lodos de acería LD (LLD) en la mezcla, van desde el 8,71%

correspondiente a las piezas con el código LLD10110015, piezas con la menor cantidad de lodos de acería LD en la mezcla (10%), que han sido conformadas a la mayor presión posible (15 MPa), y cocidas en el horno a la temperatura máxima de 1100 °C. Hasta el 19,13%, correspondiente a las piezas cerámicas fabricadas con el porcentaje del 30% de residuo (LLD) y arcilla, que han sido sometidas a la presión de 5 MPa y a la temperatura máxima de cocción de 900 °C en el horno (LLD30090005).

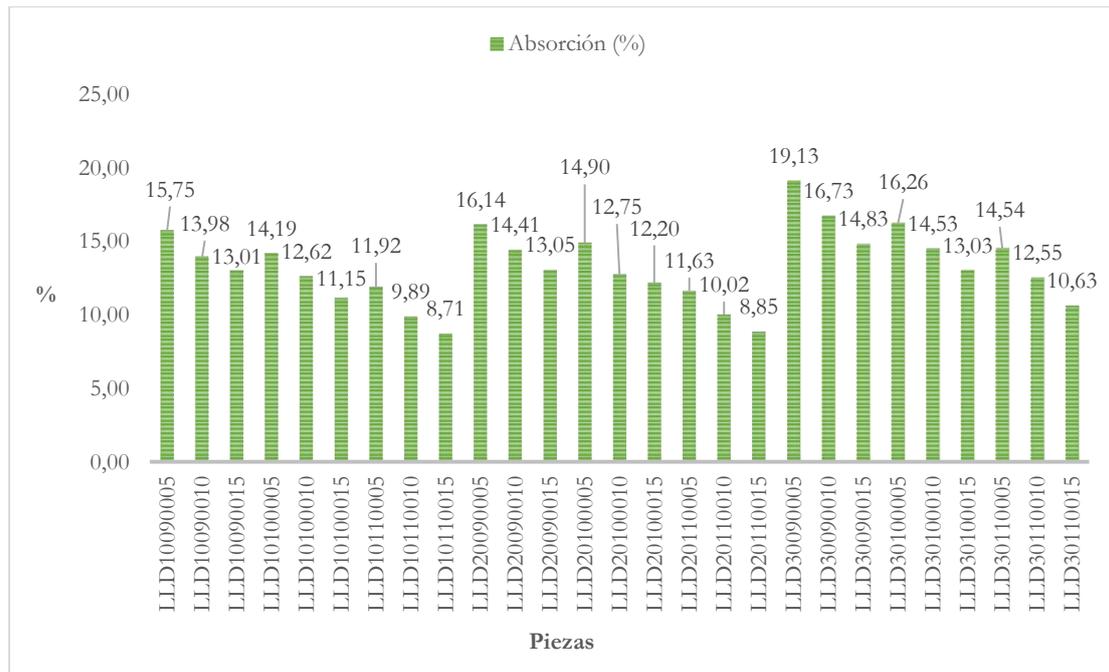


Figura 100. Gráfico resultados absorción de agua. Piezas LLD.

Con los datos obtenidos, se puede observar la evolución de la capacidad de absorción de agua en las piezas fabricadas con contenidos de lodos de acería LD (LLD) en la mezcla, respecto a los parámetros operacionales. Las piezas cerámicas fabricadas a la misma temperatura máxima de cocción y con el mismo contenido de lodos de acería LD en la mezcla, al aumentar la presión de conformado experimentan una disminución en su capacidad de absorción de agua. Del mismo modo, se puede comprobar que al aumentar el porcentaje de lodos de acería LD (LLD) en la mezcla, a constante presión de conformado y temperatura máxima de cocción, aumenta el contenido de agua absorbida por las piezas. Mientras que si se eleva la temperatura máxima de cocción, manteniendo constantes el contenido de residuo (LLD) en la mezcla y la presión de conformado, se comprueba que el porcentaje de absorción de agua disminuye.

6.5.3.4. Resumen: Absorción de agua

El ensayo para determinar la capacidad de absorción de agua que puedan presentar las piezas cerámicas fabricadas, se emplea para calcular el valor del máximo porcentaje de agua de saturación de las piezas, gracias a la relación entre el peso del agua que sature la pieza y el peso seco de la misma.

Las piezas fabricadas con porcentajes de lodos de horno alto (LHA) y arcilla, muestran que la capacidad de absorción de agua que poseen, es superior al de las piezas fabricadas bien con diferentes porcentajes de escorias de acería LD (ELD), o bien con lodos de acería LD (LLD), respectivamente. Mientras que entre las piezas fabricadas con contenidos de escorias de acería LD (ELD) y las piezas con porcentajes de lodos de acería LD (LLD), los valores obtenidos de absorción de agua han resultado muy semejantes.

	Residuo	Absorción (%)
ELD	Valor Mínimo	10,54
	Valor Máximo	19,04
LHA	Valor Mínimo	13,81
	Valor Máximo	27,31
LLD	Valor Mínimo	8,71
	Valor Máximo	19,13

Tabla 42. Valores mínimos y máximos de absorción de agua de los diferentes residuos siderúrgicos.

Analizando los valores de absorción de agua respecto al contenido de residuo en la mezcla, se puede concluir, que aumentos del porcentaje de residuo siderúrgico en la mezcla de las piezas cerámicas fabricadas, incrementa la capacidad de absorción de agua de las mismas. De modo inverso sucede en el caso de la temperatura, se puede concluir que al elevar la temperatura máxima de cocción en el horno, se disminuye la capacidad de absorción de agua por parte de las piezas cerámicas fabricadas. Algo similar ocurre respecto a la presión de conformado, a igualdad de condiciones de temperatura y contenido de la mezcla, al elevar la presión, disminuye la capacidad de absorción de las piezas cerámicas.

La capacidad de absorción de agua está directamente relacionada con la elevada porosidad abierta que se ha determinado en las piezas cerámicas.

6.6. Caliches

Los caliches o inclusiones calcáreas, son gránulos de color blanco, principalmente de óxido de calcio y en menor medida de óxido de magnesio, que pueden existir en las piezas cerámicas después de la etapa de cocción en el horno.

El óxido de calcio (CaO), se genera en la etapa de cocción de las piezas cerámicas en el horno, por la descomposición del carbonato cálcico (CaCO_3) presente en las materias primas que se utilizan en su fabricación, a temperaturas superiores a los $850\text{ }^\circ\text{C}$, además de dióxido de carbono (CO_2).

El óxido de calcio que se genera en esta etapa, generalmente reacciona durante la cocción de las piezas, formando silicatos o silicoaluminatos en presencia de aluminio. No obstante, dependiendo de la granulometría que tenga el óxido de calcio, si este se encuentra en tamaños de grano grandes, podría no reaccionar, quedando en forma de grano de cal en el cerámico después de la etapa de cocción.

Estos granos de cal en contacto por el efecto de la humedad del ambiente, se pueden hidratar con facilidad, generándose en esta reacción además de calor, hinchamiento del grano de cal, desarrollando esfuerzos en las zonas próximas al grano, si estas zonas se encuentran cerca de la superficie de la pieza cerámica, se producirá un desconchado, un pequeño cráter.

Los desconchados por caliches pueden provocar daños estéticos en las piezas cerámicas, no obstante, en alguna ocasión se puede dar el caso de colapso de la pieza por desintegración (Velasco, 2005).

Para tamaños menores de 0,5 milímetros, la actividad de los caliches es muy baja, siendo muy poco probable que provoquen desconchados. La presión ejercida por el hinchamiento de los granos es proporcional al cuadrado de su radio. Por lo tanto, un grano de cal de 8 milímetros de diámetro producirá una presión 16 veces mayor que otro de 2 milímetros. La resistencia mecánica de la pieza es un factor muy importante para determinar si las piezas cerámicas son vulnerables frente al efecto de los caliches (Blanco(I), 2007).

La norma que se sigue para determinar la presencia de caliches en las piezas cerámicas es la UNE 67039 1993 (AENOR, 1993). El ensayo que describe la norma, consiste en someter a 6 piezas cerámicas a un baño de vapor durante 3 horas, observando la aparición o no, de desconchados por caliches. La norma sólo considera aquellos desconchados, cuya dimensión media es superior a 7 milímetros, y no se tienen en cuenta las pequeñas picaduras producidas por minúsculos granos de cal.

No obstante, la aparición de caliches puede evitarse en gran medida, gracias a diferentes operaciones, bien sobre las materias primas, bien sobre la etapa de cocción, o bien sobre las piezas cerámicas fabricadas.

Una de las operaciones más utilizadas, consiste en realizar una molienda muy fina de las materias primas que intervienen en la fabricación de las piezas cerámicas. Con la molienda hasta granulometrías muy pequeñas, se logra incrementar la superficie específica y por lo tanto, permite una mayor reactividad de los granos de óxido de calcio (CaO) y los de sílice, evitando considerablemente que los granos de cal permanezcan en las piezas cerámicas después de la etapa de cocción, y la posibilidad de que se hidraten en contacto con la humedad ambiente, hinchándose y provocando desconchados.

También se puede mezclar la arcilla con otros materiales, con la finalidad de aumentar el contenido de sílice libre en la mezcla, y así ayudar a que los granos de cal (CaO) reaccionen, mermando la posibilidad de la aparición de caliches.

Otro método para evitar la formación de caliches, consiste en elevar la temperatura de cocción en el horno de manera apropiada, para que el mayor porcentaje de granos de cal (CaO) reaccione, disminuyendo su aparición en las piezas. Al mismo tiempo, al aumentar la temperatura de cocción, se eleva la resistencia mecánica de las piezas, lo que también ayuda a evitar desconchados.

Por último, se puede minimizar la presencia de caliches, actuando sobre las piezas cerámicas nada más salir del horno, al sumergirlas un par de minutos en agua. El agua actúa sobre los granos de cal, haciendo que parte del grano de óxido de calcio se disuelva, disminuyendo así su tamaño (Velasco, 2005).

La granulometría de las materias primas en la mezcla, es clave para la presencia o no de caliches en las piezas cerámicas fabricadas. De ahí, el simple hecho de que todas las

materias primas que se utilizan para la fabricación de las piezas cerámicas, después de los procesos de molienda y cribado, presenten tamaños de grano inferiores a 200 μm , hace muy difícil que se originen desconchados en las piezas.

Se puede concluir que bajo las condiciones de trabajo seguidas en laboratorio, en ninguna de las piezas cerámicas fabricadas se ha detectado la presencia de inclusiones calcáreas, indiferentemente a las materias primas utilizadas, después del ensayo de caliches.

6.7. Expansión por humedad

La expansión por humedad es la capacidad de aumento de volumen que puede aparecer en las piezas cerámicas, ocasionada al ponerse las mismas en contacto con la humedad del ambiente. Después de la etapa de cocción en el horno, las piezas cerámicas salen completamente deshidratadas y con el paso del tiempo, a causa de la humedad del ambiente, tienden a absorber agua, lo que genera un incremento del volumen de las piezas. El mayor incremento de volumen, se suele dar en los primeros días después de que las piezas cerámicas salgan del horno, posteriormente los incrementos son menores a lo largo de un tiempo indefinido, que dependerá de la naturaleza de las materias primas utilizadas en la fabricación de las piezas (Velasco, 2005).

La expansión por humedad puede generar problemas con el tiempo en las obras de fábrica concluidas, ya que con los aumentos de volumen producidos, podría provocarse la aparición de grietas y fisuras en la construcción.

El ensayo que permite determinar la expansión por humedad que pueden experimentar las piezas cerámicas fabricadas de una forma rápida, después de la etapa de cocción en el horno, que se ha llevado a cabo en laboratorio, se ajusta a lo descrito en la norma UNE 67036 1999 (AENOR, 1999). Con este ensayo, además de determinar el valor de la expansión por humedad, se puede calcular otro parámetro, la expansión potencial, que da una idea de lo que aumentarían las piezas cerámicas a partir de un tiempo más o menos lejano del momento en el que fueron cocidas.

Para realizar este ensayo, se han empleado las piezas cerámicas fabricadas con forma de paralelepípedo. En primer lugar, se medirán las piezas tal cual están con un calibre, anotando el valor de su anchura (L_0) en milímetros. A continuación se introducen las piezas

en una estufa a unos 60 °C de temperatura, durante 48 horas, acto seguido se dejan enfriar dentro de un desecador hasta que alcancen la temperatura ambiente y se miden con el comparador (L_1). Una vez tomada esta medida, las piezas se introducen en el horno y se calientan a 600 °C durante 6 horas, con rampas de calentamiento y enfriamiento en un tiempo de como mínimo 2 horas, siendo el enfriamiento hasta la temperatura de 110 °C. A los 110 °C se sacan del horno y de nuevo se introduce a las piezas en el desecador, hasta que alcancen la temperatura ambiente y se toman nuevas medidas (L_2). El último paso, consiste en sumergir las piezas cerámicas en agua a 100 °C durante 24 horas, se sacan y dejan enfriar hasta la temperatura ambiente y se toma una nueva medición (L_3).

Con todas estas medidas y las fórmulas siguientes, se calcula la expansión por humedad y la expansión potencial de las piezas cerámicas fabricadas en las unidades de milímetro por metro (mm/m).

$$\text{Expansión por humedad} = \frac{L_3 - L_2}{L_0} \times 1000$$

$$\text{Expansión potencial} = \frac{L_3 - L_1}{L_0} \times 1000$$

6.7.1. Piezas con porcentajes de ELD y arcillas

Se ha sometido a las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de escoria de acería LD (ELD) y arcilla, al ensayo de expansión por humedad, tomando como guía la norma UNE 67036 1999.

Piezas	Expansión por humedad (mm/m)	Expansión Potencial (mm/m)
ELD10090005	0,00	-0,60
ELD10090010	-0,55	-1,17
ELD10090015	-0,78	-0,92
ELD10100005	0,28	-0,55
ELD10100010	0,00	-0,70
ELD10100015	0,42	-0,28
ELD10110005	-0,42	-0,42
ELD10110010	-0,29	-0,14
ELD10110015	0,29	0,15
ELD20090005	0,27	-0,14

ELD20090010	0,42	-0,14
ELD20090015	0,00	0,29
ELD20100005	0,00	-0,28
ELD20100010	0,85	-0,14
ELD20100015	0,29	0,29
ELD20110005	-0,14	-0,42
ELD20110010	-0,87	-0,58
ELD20110015	0,00	0,15
ELD30090005	-2,49	-2,75
ELD30090010	-0,94	-1,61
ELD30090015	-0,70	-0,98
ELD30100005	-0,41	-0,41
ELD30100010	0,85	0,42
ELD30100015	0,00	-0,43
ELD30110005	-0,28	-0,69
ELD30110010	-0,90	-1,24
ELD30110015	-1,07	-1,79

Tabla 43. Resultado ensayo expansión por humedad. Piezas ELD.

Los valores que se han obtenido después del ensayo de expansión por humedad y la aplicación de las formulas, para las piezas cerámicas con porcentajes de escoria de acería LD (ELD) en la mezcla, se encuentran comprendidos entre los 2,49 mm/m de contracción, correspondiente a las piezas con el código ELD30090005 (30% ELD, 5 MPa, 900 °C) y 0,85 mm/m de expansión, en la piezas con los códigos ELD20100010 (20% ELD, 10 MPa, 1000 °C) y ELD30100010 (30% ELD, 10 MPa, 1000 °C).

En cuanto a los valores de expansión potencial, coincide que son las piezas identificadas con el código ELD30090005 (30% ELD, 5 MPa, 900 °C), las que han experimentado la mayor contracción, 2,75 mm/m. En sentido contrario, también coincide que las piezas con el código ELD30100010 (30% ELD, 10 MPa, 1000 °C), son las que han sufrido la mayor expansión, 0,42 mm/m en este caso.

6.7.2. Piezas con porcentajes de LHA y arcillas

Mediante la misma metodología con la que se ha realizado el ensayo y calculado los parámetros de la expansión por humedad y expansión potencial, para las piezas cerámicas fabricadas con escoria de acería LD, se ha sometido a todas las piezas fabricadas con lodos

de horno alto (LHA) en la mezcla, que no han experimentado daños por la presencia de corazón negro, obteniéndose los resultados correspondientes, expresados en milímetros por metro (mm/m).

Piezas	Expansión por humedad (mm/m)	Expansión Potencial (mm/m)
LHA10090005	-0,67	-1,14
LHA10090010	-1,21	-1,74
LHA10090015	-1,31	-1,38
LHA10100005	0,27	0,00
LHA10100010	-0,14	-0,42
LHA10100015	0,00	0,00
LHA20090005	-1,19	-1,32
LHA20090010	0,00	0,00
LHA20090015	-0,14	-0,14
LHA30090005	11,52	11,40
LHA30090010	9,71	9,46
LHA30090015	-9,79	-10,05

Tabla 44. Resultado ensayo expansión por humedad. Piezas LHA.

Los valores que se han determinado después de aplicar las formulas del ensayo de expansión por humedad, con los datos obtenidos para las piezas cerámicas fabricadas con contenidos de lodos de horno alto (LHA) en la mezcla, no dañadas por el corazón negro, se encuentran comprendidos entre los 9,79 mm/m de contracción correspondiente a las piezas con el código LHA30090015 (30% LHA, 15 MPa, 900 °C) y los 11,52 mm/m de expansión que han presentado las piezas cerámicas con el código LHA30090005, fabricadas en laboratorio con los parámetros operacionales de 30% de LHA, 5 MPa y 900 °C.

Al mismo tiempo, respecto a los valores de expansión potencial, coincide que son las piezas identificadas con el código LHA30090015, las que han experimentado la mayor contracción, 10,05 mm/m. También existe coincidencia respecto al valor de expansión potencial, donde las piezas correspondientes al código LHA30090005 son las que obtienen un valor más alto, 11,40 mm/m en este caso.

6.7.3. Piezas con porcentajes de LLD y arcillas

El ensayo para determinar la expansión por humedad de las piezas fabricadas con porcentajes de lodos de acería LD (LLD) y arcilla, ha sido realizado siguiendo la norma UNE 67036 1999. Obteniendo una serie de medidas, datos de partida para el cálculo de la expansión por humedad y la expansión potencial mediante las formulas antes descritas.

Piezas	Expansión por humedad (mm/m)	Expansión Potencial (mm/m)
LLD10090005	0,00	-0,67
LLD10090010	-0,42	-0,42
LLD10090015	-0,77	-0,70
LLD10100005	-0,14	0,00
LLD10100010	0,44	0,00
LLD10100015	0,45	0,59
LLD10110005	0,28	-0,42
LLD10110010	-0,29	-0,59
LLD10110015	0,30	-0,15
LLD20090005	-0,14	-0,99
LLD20090010	0,15	-0,44
LLD20090015	0,00	-0,29
LLD20100005	-0,72	0,00
LLD20100010	0,15	0,30
LLD20100015	-0,30	-0,45
LLD20110005	0,44	0,00
LLD20110010	0,15	-0,45
LLD20110015	0,30	0,00
LLD30090005	-0,14	-1,24
LLD30090010	0,57	-0,28
LLD30090015	0,44	0,29
LLD30100005	-0,14	0,00
LLD30100010	0,00	-0,15
LLD30100015	0,30	0,15
LLD30110005	-0,29	-0,72
LLD30110010	0,00	-0,46
LLD30110015	0,31	0,00

Tabla 45. Resultado ensayo expansión por humedad. Piezas LLD.

Los valores obtenidos para las piezas cerámicas fabricadas con contenidos de lodos de acería LD (LLD) en la mezcla, después del ensayo de expansión por humedad, están

comprendidos entre 0,77 mm/m de contracción, correspondiente a las piezas identificadas con el código LLD10090015 (10% LLD, 15 MPa, 900 °C), y 0,57 mm/m de expansión por humedad, que presentan las piezas cerámicas fabricadas con el 30% de lodos de acería LD (LLD) y arcilla, sometidas a la presión de conformado de 10 MPa y cocidas a la temperatura máxima de 900 °C.

Por otro lado, respecto a los valores que se han calculado de expansión potencial, las piezas identificadas con el código LLD30090005 (30% LLD, 5 MPa, 900 °C), son las que presentan el valor más bajo, 1,24 mm/m de contracción. Mientras que el valor más elevado corresponde a las piezas con el 10% de residuo (LLD), que han sido conformadas a la presión de 15 MPa y cocido a la temperatura máxima de 1000 °C, a las que corresponde el código LLD10100015, con 0,59 mm/m de expansión potencial.

6.7.4. Resumen: Expansión por humedad

La expansión por humedad de las piezas cerámicas es un proceso que se manifiesta a lo largo del tiempo de forma natural, a partir del mismo momento en que las piezas salen del horno de cocción, debido a que en ese instante se encuentran completamente deshidratadas y al ser expuestas al contacto con la humedad del ambiente, absorben agua, lo que va a producir lentamente con el tiempo, que su volumen vaya aumentando.

Las piezas fabricadas que presentan las mayores diferencias entre valores mínimos y máximos de expansión por humedad obtenidos, son las que tienen contenidos de lodos de horno alto (LHA) en la mezcla, seguidas de las piezas que contienen porcentajes de escoria de acería LD (ELD). Siendo las piezas fabricadas con contenidos de lodos de acería LD (LLD), las que han registrado las variaciones más pequeñas en sus dimensiones. Idénticamente a lo que ocurre con los valores de expansión potencial.

Residuo		Expansión por humedad (mm/m)	Expansión potencial (mm/m)
ELD	Valor Mínimo	-2,49	-2,75
	Valor Máximo	0,85	0,42
LHA	Valor Mínimo	-9,79	-10,05
	Valor Máximo	11,52	11,40
LLD	Valor Mínimo	-0,77	-1,24
	Valor Máximo	0,57	0,59

Tabla 46. Valores mínimos y máximos de expansión por humedad y expansión potencial de los diferentes residuos siderúrgicos.

Las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de residuos siderúrgicos y arcilla, presentan valores de expansión por humedad y de expansión potencial bastante aleatorios, no pudiendo sacarse demasiadas conclusiones.

La expansión por humedad que potencialmente pueden experimentar las piezas cerámicas, viene influenciada en gran medida por la composición de la mezcla de materiales empleada para su fabricación. Del mismo modo, también tienen influencia, las temperaturas de cocción y el tiempo de permanencia en el horno a la máxima temperatura.

El contenido de materiales combustibles presentes en las materias primas empleadas en la fabricación de piezas cerámicas, pueden generar alteraciones que afectan a la expansión por humedad tanto al alza como a la baja (Velasco, 2005).

El valor medio máximo de expansión por humedad para productos de cerámica estructural como las bovedillas, está fijado en 0,55 mm/m, no debiendo superarse individualmente el valor de 0,65 mm/m. En el caso de otro producto cerámico como los ladrillos de cara vista, no existe ningún límite establecido (Blanco(I), 2007).

Para prevenir la expansión por humedad, se recomienda la realización de un estudio concienzudo de los materiales que se utilizan para la fabricación de las piezas cerámicas, así como del proceso industrial empleado.

6.8. Resistencia mecánica

El conocimiento de la resistencia mecánica de los productos cerámicos utilizados en obra sea cual sea su finalidad, resulta de gran interés, debido a que estos han de estar sometidos

a sollicitaciones y cargas, como elementos estructurales o complementarios en la construcción.

Las piezas cerámicas fabricadas con contenido de residuos siderúrgicos y arcilla, con la finalidad de determinar su comportamiento mecánico, han sido sometidas a un ensayo de compresión, ejerciendo un esfuerzo axial en la dirección perpendicular a la tabla o cara mayor, para determinar la tensión aparente de rotura o resistencia a la compresión. Para ello, se ha seguido como guía lo especificado en la norma UNE EN 772-1 2002 (AENOR, 2002).

El ensayo es de carácter destructivo, siendo las piezas de geometría cilíndrica las empleadas en este caso, utilizándose una máquina universal de ensayos mecánicos con el correspondiente dispositivo de ensayos de compresión.



Figura 101. Máquina universal de ensayos mecánicos.



Figura 102. Dispositivo ensayos compresión con pieza cerámica cilíndrica.

Un criterio orientativo para descartar a las piezas cerámicas fabricadas, según la resistencia mecánica a la compresión que ofrezcan después de ser sometidas al ensayo, puede ser el que se sigue con los ladrillos clasificados según el volumen de los huecos respecto al volumen total geométrico. Los ladrillos huecos utilizados en fábricas resistentes, deben de presentar una resistencia mecánica a compresión igual o mayor a 5 MPa, mientras que los ladrillos perforados y los ladrillos macizos, igual o mayor a 10 MPa (AENOR, 1984).

6.8.1. Piezas con porcentajes de ELD y arcillas

Los resultados obtenidos después de haber sometido a las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de escoria de acería LD (ELD) y arcilla, al ensayo de resistencia mecánica a compresión, se muestran en la tabla 47.

Piezas	Diámetro (mm)	Área (mm ²)	Fuerza (N)	Carga (MPa)
ELD10090005	40	1256,64	31640	25,18
ELD10090010	39,99	1256,01	35190	28,02
ELD10090015	40,03	1258,52	60840	48,34
ELD10100005	39,82	1245,35	50370	40,45
ELD10100010	39,9	1250,36	71070	56,84
ELD10100015	39,92	1251,62	87610	70,00
ELD10110005	39,38	1217,98	118960	97,67
ELD10110010	39,13	1202,57	120630	100,31
ELD10110015	39,21	1207,49	183170	151,69
ELD20090005	40,12	1264,19	28970	22,92
ELD20090010	40,13	1264,82	39360	31,12
ELD20090015	40,17	1267,34	44320	34,97
ELD20100005	40,07	1261,04	36290	28,78
ELD20100010	40,07	1261,04	42050	33,35
ELD20100015	40,11	1263,56	52150	41,27
ELD20110005	39,57	1229,76	88970	72,35
ELD20110010	39,58	1230,39	88170	71,66
ELD20110015	39,65	1234,74	116310	94,20
ELD30090005	40,26	1273,03	10130	7,96
ELD30090010	40,11	1263,56	19880	15,73
ELD30090015	40,21	1269,87	23290	18,34
ELD30100005	40,38	1280,63	17450	13,63
ELD30100010	40,4	1281,90	24150	18,84
ELD30100015	40,41	1282,53	32080	25,01
ELD30110005	39,97	1254,75	41450	33,03
ELD30110010	40,01	1257,27	40970	32,59
ELD30110015	39,93	1252,24	59500	47,51

Tabla 47. Resultado ensayo resistencia mecánica. Piezas ELD.

Se puede observar que todas las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de escoria de acería LD (ELD) y arcilla, superan el criterio orientativo mínimo establecido para ladrillos huecos (≥ 5 MPa), para su descarte. Sólo existe un grupo de piezas, identificadas con el código ELD30090005 (30% ELD, 5 MPa, 900 °C), cuya resistencia mecánica a compresión (7,96 MPa), se encuentra por debajo de los 10 MPa, que es el criterio orientativo establecido de resistencia mecánica para desechar ladrillos perforados o ladrillos macizos. Según el mismo criterio establecido, las demás piezas fabricadas con contenido de escoria de acería LD (ELD), podrían ser utilizadas indistintamente como ladrillos huecos, ladrillos perforados o ladrillos macizos.

El ensayo de resistencia mecánica ha alcanzado un valor máximo de 151,69 MPa, correspondiente a la resistencia mecánica a compresión de las piezas identificadas con el código ELD10110015, las cuales, tienen el menor contenido de escoria de acería LD (ELD) en la mezcla y han sido fabricadas a la mayor presión de conformado (15 MPa) y temperatura máxima de cocción (1100°C).

Para hacerse una idea, este valor podría haberse obtenido en el ensayo de resistencia mecánica a compresión simple de materiales como el granito, la caliza, la dolomía, las areniscas muy cementadas, la diabasa, el basalto y otras rocas ígneas, las cuarcitas, los esquistos y otras rocas metamórficas duras. Por lo que, de ser una roca, estaría catalogado según la clasificación ISRM¹, como una roca muy dura (R₅) (Gonzalez de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2004).

Al otro extremo de los valores obtenidos mediante el ensayo de resistencia mecánica a compresión, para las piezas fabricadas con contenidos de escoria de acería LD (ELD) en la mezcla, se encuentra el correspondiente a las piezas cuyo código es ELD30090005 (7,96 MPa), que como ya se ha comentado con anterioridad, es el único resultado que no supera los 10 MPa. No resulta extraño, que se trate de las piezas cerámicas que están fabricadas con el mayor porcentaje de escoria de acería LD (ELD) en la mezcla (30%), se hayan conformado a la presión más baja (5 MPa) y sometido a la temperatura máxima de cocción más baja posible (900 °C) en el horno.

En este caso, según el resultado de resistencia mecánica a compresión simple, se podría establecer un paralelismo con materiales tales, como sal, lutitas, margas, limonitas o carbón, y catalogado según la clasificación ISRM como una roca blanda (R₂) (Gonzalez de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2004).

¹ Clasificación de resistencia mecánica a compresión uniaxial establecida por la International Society for Rock Mechanics (ISRM) en 1981.

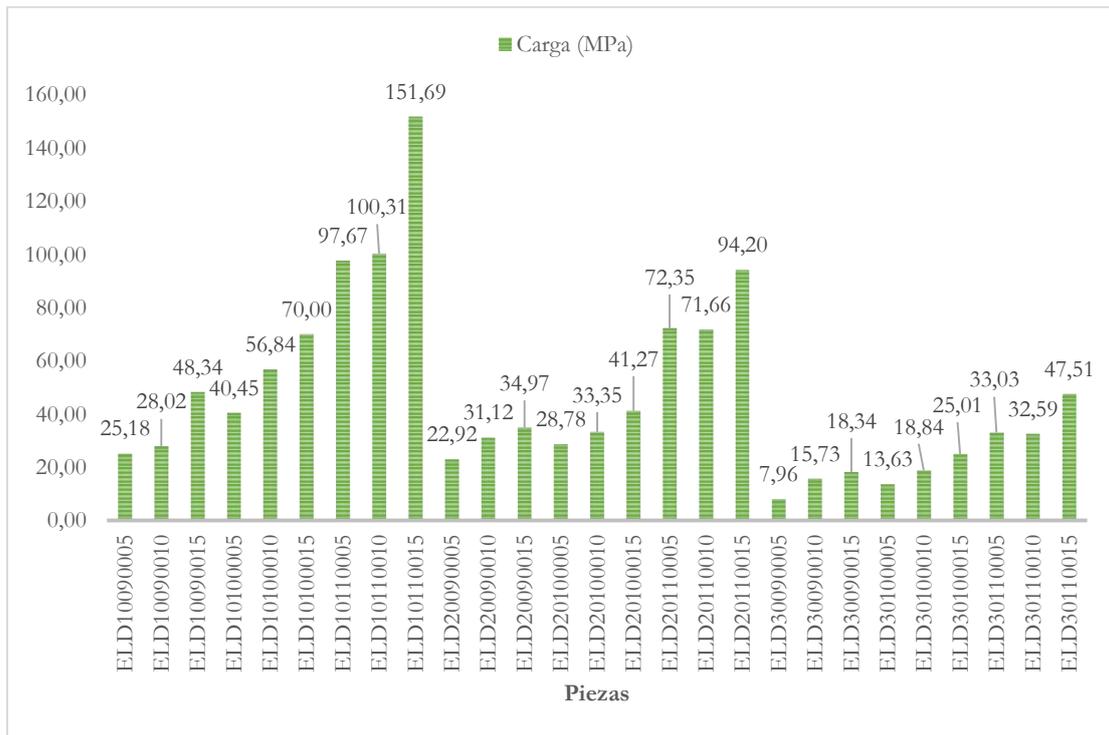


Figura 103. Gráfico resultados resistencia mecánica. Piezas ELD.

El gráfico muestra la distribución en tres tramos de la evolución de la resistencia mecánica en las piezas fabricadas con contenidos de escoria de acería LD (ELD) en la mezcla. Las piezas cerámicas con mayor resistencia mecánica a compresión, corresponden a aquellas fabricadas con los menores porcentajes de escoria de acería LD (ELD) en la mezcla. Por lo que las piezas fabricadas con el 10%, tienen mayor resistencia mecánica que las piezas con el contenido en escoria del 20%, y estas a su vez, más que las del 30% de residuo (ELD), a igual presión de conformado y temperatura máxima de cocción. Por otro lado, se comprueba como la resistencia mecánica de las piezas fabricadas con porcentajes e escoria de acería LD y arcilla, aumenta al elevar la presión de conformado, manteniendo constantes los otros dos parámetros operacionales. Del mismo modo, también aumenta la resistencia mecánica a compresión de las piezas cerámicas al elevar la temperatura máxima de cocción en el horno, manteniendo constantes la composición de la mezcla y la presión de conformado.

Por lo tanto, se puede concluir que tanto el aumento de la temperatura máxima de cocción, como de la presión de conformado, hace que aumente la resistencia mecánica a compresión de las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de residuos siderúrgicos.

Mientras que el aumento del contenido en residuo, tiene en efecto contrario, disminuye la resistencia mecánica a compresión.

6.8.2. Piezas con porcentajes de LHA y arcillas

Para determinar la resistencia mecánica de las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de lodos de horno alto (LHA) y arcilla, no desechadas a casusa de los daños producidos por la aparición de corazón negro, se las ha sometido al ensayo de resistencia mecánica a compresión.

Piezas	Diámetro (mm)	Área (mm ²)	Fuerza (N)	Carga (MPa)
LHA10090005	39,75	1240,98	23280	18,76
LHA10090010	39,79	1243,48	42050	33,82
LHA10090015	39,84	1246,60	52420	42,05
LHA10100005	39,40	1219,22	47200	38,71
LHA10100010	39,46	1222,94	68950	56,38
LHA10100015	39,57	1229,76	83220	67,67
LHA20090005	39,59	1231,01	27530	22,36
LHA20090010	39,77	1242,23	35390	28,49
LHA20090015	39,76	1241,60	39500	31,81
LHA30090005	39,50	1225,42	6020	4,91
LHA30090010	39,70	1237,86	10530	8,51
LHA30090015	39,79	1243,48	15880	12,77

Tabla 48. Resultado ensayo resistencia mecánica. Piezas LHA.

Según el criterio orientativo para descartar piezas cerámicas por su resistencia mecánica a compresión, las piezas identificadas con el código LHA30090005 (4,91 MPa), no cumplirían con el mínimo de resistencia mecánica para cualquier tipo de ladrillo, ya que después del ensayo se ha obtenido un valor por debajo de los 5 MPa. Del mismo modo, las piezas a las que corresponde el código LHA30090010, serían descartadas para su uso como ladrillo perforado o ladrillo macizo, ya que presentan una resistencia mecánica a compresión inferior a los 10 MPa (8,51 MPa). Aunque según este criterio orientativo, estas piezas (LHA30090010), sí podrían ser utilizadas como ladrillo hueco.

Llama la atención, que estas piezas cerámicas se hayan fabricado con el mayor contenido de lodos (LHA) en la mezcla (30%) y cocido a la menor temperatura máxima (900 °C) en el horno. Sólo en el caso en el que se ha aplicado la máxima presión de conformado (15

MPa), las piezas fabricadas con el 30% de lodos de horno alto y cocidas a la temperatura máxima de 900 °C, superan el criterio orientativo para cualquier tipo de ladrillo.

En cuanto al resto de piezas fabricadas con contenido de lodos de horno alto (LHA) en la mezcla, sometidas al ensayo, todas superan la resistencia mecánica a compresión de 10MPa, por lo que pueden ser utilizadas como ladrillo hueco, ladrillo perforado o ladrillo macizo, indistintamente.

La resistencia mecánica a compresión que presentan las piezas fabricadas con contenidos de lodos de horno alto (LHA) en la mezcla, va desde los 4,91 MPa en las piezas identificadas con el código LHA30090005 hasta los 67,67 MPa de las piezas correspondientes al código LHA10100015. Las piezas cerámicas fabricadas con el mayor contenido de residuo (30%) en la mezcla, que han sido sometidas a la presión más baja en la etapa de conformado (5 MPa) y cocido a la temperatura máxima más baja (900 °C) de cocción, son las que presentan una resistencia mecánica más baja. Mientras que las piezas con los parámetros operativos de fabricación opuestos, menor contenido en la mezcla de residuo (10%), mayor presión de conformado (15 MPa) y temperatura máxima de cocción más elevada (1000 °C), son las que presentan la resistencia mecánica a compresión más elevada de todas.

Al comparar los valores obtenidos de resistencia mecánica a compresión de las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de lodos de horno alto (LHA) y arcilla, al igual que se ha hecho antes con las piezas con contenidos de escoria de acería LD, las piezas identificadas con el código LHA30090005, presentan una resistencia mecánica (4,91 MPa) semejante a una roca muy blanda (R_1 según la clasificación ISRM), como el carbón o las margas. Mientras que las piezas con el código LHA10100015, debido al valor de resistencia mecánica obtenido (67,67 Mpa), estarían clasificadas como roca dura (R_4 según la clasificación ISRM), lo que podría ser una caliza porosa, un mármol o una arenisca (Gonzalez de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2004).

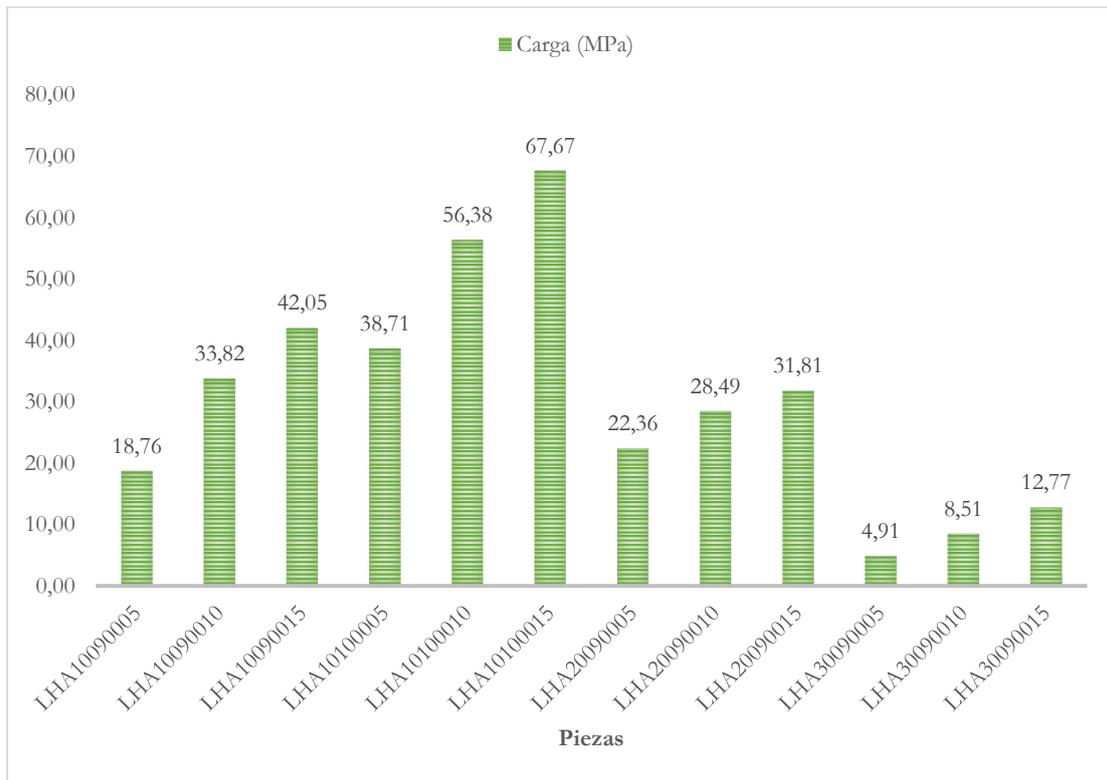


Figura 104. Gráfico resultados resistencia mecánica. Piezas LHA.

El gráfico muestra como un aumento en la temperatura máxima de cocción, manteniendo constantes el contenido de residuo (LHA) y la presión de conformado, hace aumentar la resistencia mecánica de las piezas fabricadas con contenido de lodos de horno alto (LHA) en la mezcla. Mientras que según se aumenta el porcentaje de lodos de horno alto (LHA), para una misma presión de conformado y temperatura máxima de cocción, el efecto es el contrario, la resistencia mecánica a compresión disminuye. Por último, si se mantiene constante el porcentaje de residuo (LHA) y la temperatura máxima de cocción el horno, al elevar la presión de conformado, se produce un crecimiento de la resistencia mecánica.

6.8.3. Piezas con porcentajes de LLD y arcillas

La metodología que se ha seguido para determinar la resistencia mecánica a compresión de las piezas fabricadas con porcentajes de lodos de acería LD (LLD) y arcilla, ha sido la misma que se ha empleado para poder calcular los valores de resistencia mecánica en las piezas con contenidos de escoria de acería LD y lodos de horno alto respectivamente.

Piezas	Diámetro (mm)	Área (mm ²)	Fuerza (N)	Carga (MPa)
LLD10090005	39,9	1250,36	38590	30,86
LLD10090010	40	1256,64	47980	38,18
LLD10090015	40,04	1259,15	69950	55,55
LLD10100005	39,49	1224,80	97260	79,41
LLD10100010	39,54	1227,90	139310	113,45
LLD10100015	39,64	1234,12	172750	139,98
LLD10110005	38,93	1190,31	123570	103,81
LLD10110010	38,8	1182,37	171080	144,69
LLD10110015	38,79	1181,76	224170	189,69
LLD20090005	39,88	1249,11	71880	57,55
LLD20090010	39,97	1254,75	94740	75,50
LLD20090015	39,92	1251,62	108020	86,30
LLD20100005	39,53	1227,28	86230	70,26
LLD20100010	39,55	1228,52	111330	90,62
LLD20100015	39,61	1232,25	134070	108,80
LLD20110005	38,91	1189,08	147230	123,82
LLD20110010	39,03	1196,43	150480	125,77
LLD20110015	39,12	1201,95	191300	159,16
LLD30090005	40,01	1257,27	44660	35,52
LLD30090010	40,01	1257,27	60790	48,35
LLD30090015	39,98	1255,38	72960	58,12
LLD30100005	39,71	1238,48	51470	41,56
LLD30100010	39,75	1240,98	72130	58,12
LLD30100015	39,84	1246,60	87960	70,56
LLD30110005	39,28	1211,81	67560	55,75
LLD30110010	38,5	1164,16	69950	60,09
LLD30110015	38,54	1166,58	93720	80,34

Tabla 49. Resultado ensayo resistencia mecánica. Piezas LLD.

Las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de lodos de acería LD (LLD) y arcilla, superan con creces los valores de la resistencia mecánica a compresión, establecidos en el criterio orientativo para descartar piezas. Pudiendo, para todas las combinaciones estudiadas posibles, fabricarse en forma de ladrillos huecos, ladrillos perforados o ladrillos macizos, indiferentemente.

La resistencia mecánica a compresión que han desarrollado las piezas cerámicas fabricadas con contenidos de lodos de acería LD (LLD) en la mezcla, contempla valores que van desde 30,86 MPa, correspondiente a las piezas con el 10% de residuo (LLD) en la mezcla, conformadas a la presión de 5 MPa y que han sido cocidas a la temperatura máxima de

900 °C, identificadas con el código LLD10090005. Hasta 189,69 MPa, que presentan las piezas con el código LLD10110015, fabricadas con el contenido más bajo posible de lodos de acería LD en su composición (10%), conformadas a la presión más elevada de las que se han realizado (15 MPa) y que han sido sometidas en la cocción a la temperatura más alta (1100 °C).

En cuanto a los valores de resistencia mecánica obtenidos en el ensayo para las piezas fabricadas con contenidos de lodos de acería LD (LLD) en la mezcla, en el caso del valor de resistencia mecánica más bajo de los obtenidos (30,86 MPa), correspondiente a las piezas con el código identificativo LLD10090005, sería semejante al que ofrecerían rocas como esquistos o pizarras, clasificadas según el ISRM, como rocas moderadamente duras (R_3). Mientras que respecto al máximo valor de resistencia mecánica obtenido (189,86 MPa), correspondiente a las piezas con el código LLD10110015, sería un valor parecido al que se obtendría en el mismo ensayo de areniscas muy cementadas, calizas o dolomías, clasificadas según el ISRM como rocas muy duras (R_5) (Gonzalez de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2004).

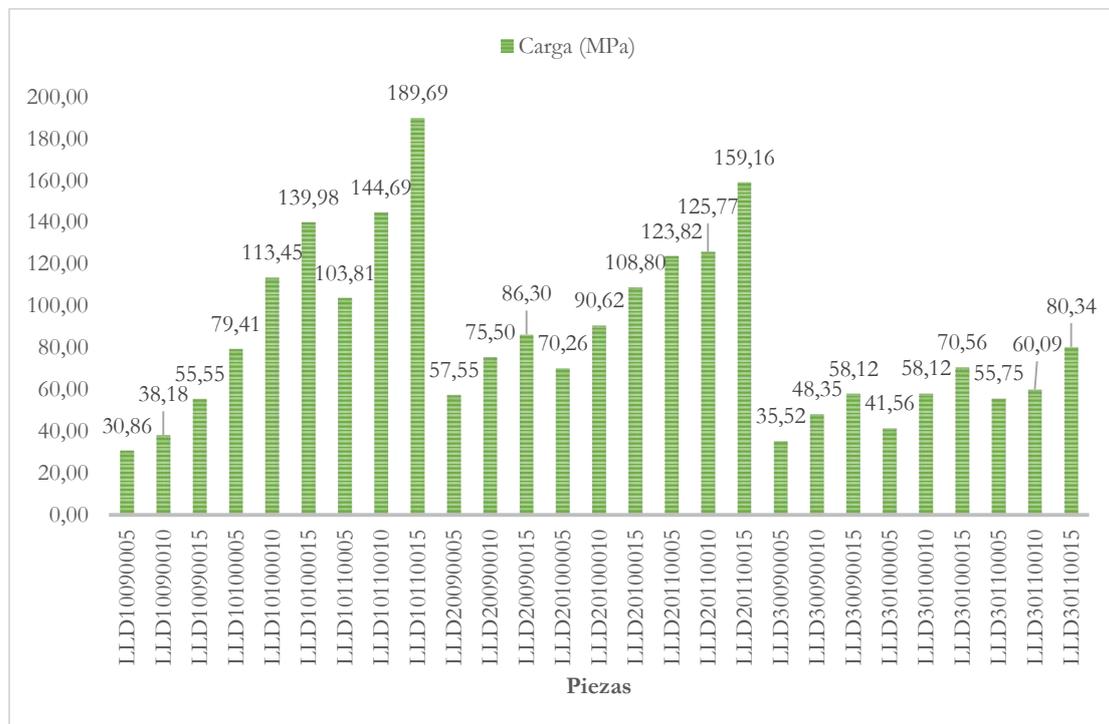


Figura 105. Gráfico resultados resistencia mecánica. Piezas LLD.

El gráfico muestra como de manera general, al elevar el contenido de residuo (LLD) en la mezcla, la resistencia mecánica se ve afectada, disminuyendo su valor. No obstante, esto no ocurre así respecto a las piezas fabricadas con los porcentajes del 10% y 20% respectivamente y que han sido cocidas a la temperatura máxima de 900 °C. Se puede observar como las piezas que tienen un contenido mayor de residuo (20%), presentan una resistencia mecánica mayor que las piezas fabricadas con porcentajes de lodos de acería LD (LLD) menores (10%). Lo mismo ocurre con las piezas del 10% y 30% de lodos de acería LD, que han sido cocidas a la temperatura máxima de 900 °C, donde para un contenido menor de residuo, se obtiene una resistencia mecánica menor.

Manteniendo constantes el porcentaje de lodos de acería LD en la mezcla y la presión de conformado, se observa como al elevar la temperatura de cocción, aumenta el valor de la resistencia mecánica de las piezas cerámicas. Por otro lado, en las piezas fabricadas con iguales parámetros de operación de contenido de residuo en la mezcla y temperatura máxima de cocción, el aumento de la presión de conformado, supone un incremento en la resistencia mecánica a compresión.

6.8.4. Resumen: Resistencia mecánica

Las piezas cerámicas fabricadas con porcentajes de residuos y arcilla, han desarrollado en la mayoría de los casos, resistencias mecánicas a compresión bastante elevadas, llegando incluso a valores cercanos a los 190 MPa en algún caso.

Por otro lado, de todas las piezas cerámicas fabricadas sometidas a ensayo de resistencia mecánica, sólo tres grupos de piezas, identificados por los códigos LHA30090005, ELD30090005 y LHA30090010 respectivamente, han presentado valores de resistencia mecánica a compresión, inferiores a los 10 MPa, y de entre ellos, el correspondiente al código LHA30090005, no supera los 5 MPa. Lo que significa que en uno u otro caso no superarían los valores definidos, adoptados en el criterio orientativo para desechar piezas cerámicas.

Resulta interesante observar, como en los tres grupos de piezas cerámicas que no superan este criterio, coincide que el contenido de residuo (30%) en la mezcla, sea el más alto de los empleados para la fabricación de las piezas, y que la temperatura máxima de cocción

en el horno sea la más baja (900°C) de las utilizadas. Además, estas piezas han sido fabricadas a las presiones de conformado más bajas, 5 MPa en los casos LHA30090005 y ELD30090005, y 10 MPa en el de las piezas LHA30090010, de las empleadas.

Todo ello conduce a pensar, que las piezas cerámicas que desarrollan una resistencia mecánica más deficiente, más baja, son las piezas que se han fabricado con los mayores contenidos de residuo en la mezcla, han sido sometidas a la temperatura máxima más baja de cocción y han pasado por una etapa de conformado a las presiones más bajas.

	Residuo	Carga (MPa)
ELD	Valor Mínimo	7,96
	Valor Máximo	151,69
LHA	Valor Mínimo	4,91
	Valor Máximo	67,67
LLD	Valor Mínimo	30,86
	Valor Máximo	189,69

Tabla 50. Valores mínimos y máximos de resistencia mecánica de los diferentes residuos siderúrgicos.

Las piezas cerámicas fabricadas que han alcanzado los valores de resistencia mecánica más elevados, han sido las piezas con porcentajes de lodos de acería LD (LLD) y arcilla, seguidas por las piezas con contenidos de escoria de acería LD (ELD) y en último lugar, las piezas fabricadas con porcentajes de lodos de horno alto (LHA) en la mezcla. Esto es debido sin duda, al elevado contenido en hierro que presentan los lodos LD (86,85% Fe_2O_3), frente al de las escorias LD (31,52%-22,16% Fe_2O_3) o al de los lodos de horno alto (30,03% Fe_2O_3). Siendo el factor diferenciador entre las piezas cerámicas fabricadas con contenidos de escoria de acería LD (ELD) y las que han sido fabricadas con porcentajes de lodos de horno alto (LHA) en la mezcla, el contenido en materia carbonosa que presentan los últimos (40,63%).

IV. La Prueba Industrial

La Prueba Industrial

Una vez concluido del trabajo de investigación realizado en el laboratorio, se ha establecido contacto con la empresa Cerámica La Espina, con el fin de dar a conocer el trabajo realizado y ver la posibilidad de llevar a cabo una prueba industrial, dando la opción de que se pudiera realizar dicha prueba con cualquiera de los residuos siderúrgicos con los que se han fabricado las piezas cerámicas en el laboratorio.

Finamente la empresa Cerámica La Espina, eligió para realizar la prueba a nivel industrial a los lodos de horno alto (LHA), por su atractivo aprovechamiento energético, determinándose que una posible dosificación pudiera ser con el 3-5% de residuo en la mezcla, y de esta manera, prevenir la aparición de corazón negro. La empresa optó por utilizar el 3% de lodos de horno alto en la dosificación para realizar la prueba industrial.

No se han caracterizado ni físicamente, ni mecánicamente, las piezas cerámicas obtenidas, pero desde el punto de vista de las propiedades organolépticas el resultado ha sido positivo, como puede apreciarse, ya que el color es el adecuado y no presentan mellas, grietas o deformaciones perceptibles a la vista.

Beneficios que se obtienen al utilizar a los lodos de horno alto (LHA) como sustituto en parte de las materias primas empleadas en la fabricación de ladrillos:

- Aprovechamiento de su contenido energético (12.532 KJ/kg).
- Efecto lubricante, lo que se traduce en que la máquina extrusora puede trabajar a menor presión.
- Acabado más fino de la superficie del ladrillo.

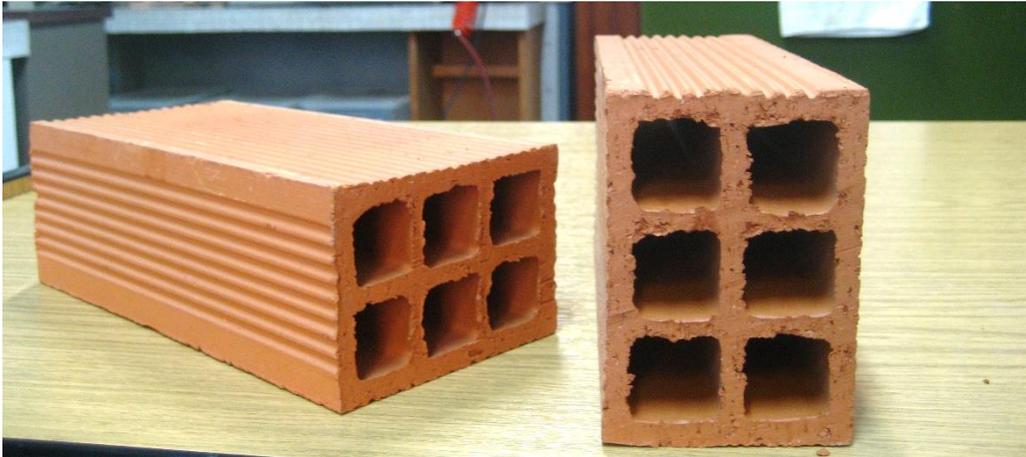


Figura 106. Ladrillos obtenidos en la prueba a nivel industrial.

V. Conclusiones

Conclusiones

- La valorización de residuos es la última oportunidad que se tiene para evitar que estos materiales sean enviados a depósitos o vertederos, lo que supone un beneficio medioambiental, aportando además, el beneficio económico que supone el ahorro de los gastos correspondientes a la gestión de su eliminación, y genera potenciales ganancias con su venta.
- La siderurgia integral, en el proceso de fabricación de acero, consume una gran cantidad de materias primas y energía, al mismo tiempo que genera un gran volumen de diferentes residuos. Mientras que en la fabricación de cerámica estructural, cabe la posibilidad de incorporar con facilidad, flujos de residuos provenientes de otras industrias. Los motivos son varios, por un lado no hay que realizar cambios sustanciales en el proceso productivo, por otro, la naturaleza de las materias primas que se emplean en la fabricación de cerámica estructural, ya que las arcillas que se utilizan no necesitan tener un nivel de calidad elevado, por el contrario, se tolera la presencia de contenidos de impurezas en las mismas.
- Los residuos generados en la industria siderúrgica integral, que se incorporen como sustitutos en parte de las materias primas necesarias para la fabricación de cerámica estructural, quedan fijados en la matriz cerámica de los productos, bien mediante mecanismos de ceramización, bien por encapsulación, dependiendo de la granulometría de los materiales en la mezcla que alimenta a las amasadoras, aislando al material residual del medio ambiente. Lo que refuerza el hecho de que resulte muy interesante el proceso de fabricación de cerámica estructural de cara a la valorización de residuos.
- Es posible establecer una relación de sinergia industrial entre la industria siderúrgica integral y la industria cerámica ladrillera, por medio de la valorización de residuos siderúrgicos en la fabricación de cerámica estructural. Esta sinergia industrial, genera una reducción del impacto ambiental que beneficia a las dos industrias. La industria siderúrgica sale favorecida, al enviar residuos como sub-productos a la industria cerámica ladrillera, minimizando la cantidad de residuos generados, liberando espacios ocupados por los depósitos o vertederos de estos

materiales, y evitando la potencial contaminación del suelo. Mientras que respecto a la industria cerámica ladrillera, al incorporar a estos sub-productos, se consigue reducir el consumo de materias primas necesarias para la fabricación de cerámica estructural, reduciendo además, el impacto ambiental que provocado en la fase de explotación del mineral.

- Los residuos siderúrgicos que se han utilizado como sustitutos en parte de las materias primas que se emplean en la fabricación de productos de cerámica estructural, son la escoria de acería LD, los lodos de horno alto y los lodos de acería LD. Dichos residuos para poder ser incorporados al proceso productivo de fabricación de productos cerámicos para la construcción, han de presentar granulometrías que no excedan de las 200 a 1000 micras, hasta incluso 2 milímetros. Un hecho que ya ocurre en el caso de los lodos de horno alto y los lodos de acería LD. Mientras que en el caso de la escoria de acería LD no sucede lo mismo, estando obligados a someter a este residuo a intensos procesos de trituración y molienda, a causa de su naturaleza, lo que supone un inconveniente por el coste adicional que este hecho constituye de cara a su valorización.
- La escoria de acería LD, los lodos de horno alto y los lodos de acería LD, pueden ser usados una vez alcanzada la granulometría adecuada, como sustitutos de las materias primas que cumplen la función de desgrasante y/o quemante, e incluso en parte de la arcilla, dependiendo del porcentaje incorporado de residuo en la mezcla para la fabricación de las piezas cerámicas.
- En los ensayos de plasticidad se ha comprobado como la adición de cualquiera de los residuos siderúrgicos utilizados a la arcilla, no afecta sustancialmente a la plasticidad de la misma, lo que es indicativo de que la incorporación de estos residuos, no perjudica a la etapa de extrusión en el proceso de fabricación de las piezas cerámicas.
- El alto contenido en materia carbonosa (40,63%) presente en los lodos de horno alto, puede reducir el consumo de combustibles fósiles empleados en la etapa de cocción en el horno (12.532 KJ/kg) para fabricar las piezas cerámicas, representando un valor añadido, pero hay que tener en cuenta que si la dosificación es por encima del porcentaje del 5% de lodos de horno alto en la mezcla, es probable que se produzca el problema de corazón negro en las piezas.

- Variando el porcentaje y/o el tipo de residuo siderúrgico utilizado en la fabricación de las piezas cerámicas, se pueden obtener diferentes colores y tonalidades en los productos después de la etapa de cocción en el horno.
- La gran mayoría de las piezas fabricadas han sido catalogadas como heladizas, después de ser sometidas al ensayo de heladicidad. Sin duda, este hecho está relacionado con el espesor de las piezas, una temperatura máxima de cocción más baja de la adecuada y/o insuficiente tiempo de permanencia en el horno de cocción. Así como, de las características de las materias primas utilizadas, el proceso seguido en la fabricación en laboratorio, que puede generar pequeñas grietas o fisuras imperceptibles a la vista, o la elevada porosidad abierta que presentan las piezas fabricadas, pueden afectar a la durabilidad de las mismas. Al mismo tiempo, se puede paliar este efecto, aumentando la resistencia frente a los ciclos hielo-deshielo y por lo tanto mejorando la durabilidad de las piezas, aplicando un producto hidrofugante en la etapa de empacado de los ladrillos.
- Todas las piezas cerámicas fabricadas en laboratorio, presentan valores elevados de capilaridad o succión, por encima de $10 \text{ gr}/(\text{cm}^2 \times \text{min})$, pudiendo deshidratar el mortero en obra, disminuyendo así la adherencia en la zona de contacto entre las piezas cerámicas y el mortero, y generando problemas de fraguado. Este hecho, es fácilmente evitable humedeciendo adecuadamente las piezas antes de su colocación en obra, lo que conlleva un mayor consumo de agua. En el mismo sentido, es posible reducir la succión de los ladrillos previamente, aplicando un producto hidrofugante en la planta de fabricación.
- La mayoría de las piezas cerámicas fabricadas han desarrollado eflorescencias en mayor o menor medida, debido a la naturaleza de las materias primas que se han utilizado. Este hecho no supone problema alguno, mientras las piezas no sean empleadas como ladrillos de cara vista, y si como ladrillos tabiqueros. Es recomendable evitar o minimizar el contacto de las piezas con humedad. Otra forma de evitar en gran medida la formación de eflorescencias, consiste en añadir sustancias como carbonato de bario o cloruro de bario en la etapa de homogeneización de la mezcla de alimentación a los molinos en la planta de fabricación.

- La densidad real de las piezas fabricadas con porcentajes de los diferentes residuos siderúrgicos, alcanza valores que rondan los 3 gr/cm^3 . Resulta interesante que las piezas cerámicas presenten valores de densidad elevados, ya que piezas cerámicas con mayor peso presentan un mayor aislamiento acústico en construcciones, teniendo en cuenta además, parámetros como la rigidez y la ligereza de la obra. Las piezas cerámicas que presentan las densidades más altas, son las fabricadas con contenidos de lodos de acería LD en la mezcla, hecho relacionado con el alto porcentaje de hierro que contienen ($86,85\% \text{ Fe}_2\text{O}_3$).
- Las piezas cerámicas fabricadas en laboratorio, presentan valores de porosidad elevados, sobre todo debido a la contribución del porcentaje de porosidad abierta (entre $75,54\%$ y el $96,61\%$ en las piezas fabricadas con contenidos de escoria de acería LD, entre el $81,70\%$ y el $93,34\%$ en las piezas con contenidos de lodos de horno alto, y entre el $52,31\%$ y el $97,80\%$ en las piezas con porcentajes de lodos de acería LD, de porosidad abierta frente al total). El tener tan elevado porcentaje de porosidad abierta, no presenta ninguna ventaja respecto a las propiedades de aislamiento térmico, ya que es la porosidad cerrada la que influye en esta propiedad del producto, mientras que la porosidad abierta suele estar relacionada con defectos en el proceso de fabricación. Las piezas que presentan los valores más elevados de porosidad son las que se han fabricado con contenidos de lodos de horno alto en la mezcla, debido su alto contenido en materia carbonosa ($40,63\%$).
- Resultan llamativos los valores obtenidos de resistencia mecánica a compresión que han desarrollado las piezas cerámicas fabricadas. Las piezas con contenidos más bajos de residuos, con mayor cantidad de hierro en su composición y menos porosas, que han sido cocidas a las temperaturas máximas más altas, son las que presentan valores de resistencia mecánica que superan con facilidad los 100 MPa , llegando en algún caso a resistencias cercanas a los 200 MPa . Este hecho puede representar ventajas constructivas, por ejemplo en la construcción de estructuras muro de carga en viviendas unifamiliares o adosadas, o en viviendas colectivas de baja altura.
- La valorización de estos residuos siderúrgicos en la industria cerámica ladrillera, es posible, teniendo en cuenta las limitaciones y recomendaciones ya observadas. La escoria de acería LD y los lodos de acería LD, mediante valorización material,

mientras que los lodos de horno alto, vía valorización material y posteriormente, también valorización energética.

- La valorización de estos residuos siderúrgicos en la industria cerámica ladrillera, podría suponer para una planta con una capacidad de producción de 100.000 toneladas anuales de producto cerámico, el consumo de entre 14.000 y 22.000 toneladas de residuo.
- La valorización de la escoria de acería LD, de los lodos de horno alto o de los lodos de acería LD, se plantea como una solución más, de gestión de estos residuos, a sumar con las demás propuestas presentes y futuras, para reducir los potenciales impactos ambientales.

8.1. Futuros trabajos

Como futuro trabajo, se plantea el estudio de la posibilidad de valorización para mezclas de residuos siderúrgicos, que contengan el porcentaje del 4% de lodos de horno alto (minimizando con este contenido, el riesgo de aparición de corazón negro y aprovechando su poder calorífico en la etapa de cocción del cerámico en el horno), y entre un 11% y un 16% bien de escoria de acería LD, bien de lodos de acería LD; más arcilla.

Para ello, y para evitar los inconvenientes derivados del conformado por presión que se ha empleado para la fabricación de las piezas cerámicas, simulando la etapa de conformado por extrusión, se plantea realizar la fabricación de los productos cerámicos con mezclas de residuos y arcilla, mediante una máquina de extrusión a escala de laboratorio.

VI. Bibliografía

Bibliografía

- AENOR. (1984). *UNE 67026:1984. Ladrillos de arcilla cocida. Determinación de la resistencia a la compresión*. Madrid: AENOR.
- AENOR. (1993). *UNE 67039:1993 EX. Productos cerámicos de arcilla cocida. Determinación de inclusiones calcáreas*. Madrid: AENOR.
- AENOR. (1994). *UNE 103-103-94: Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande*. Madrid: AENOR.
- AENOR. (1995). *UNE 67029:1995 EX. Ladrillos cerámicos de arcilla cocida. Ensayo de eflorescencia*. Madrid: AENOR.
- AENOR. (1996). *UNE-EN 993-1:1996. Métodos de ensayo para productos refractarios conformados densos. Parte 1: Determinación de la densidad aparente, de la porosidad abierta y de la porosidad total*. Madrid: AENOR.
- AENOR. (1997). *UNE 67028:1997 EX. Ladrillos cerámicos de arcilla cocida. Ensayo de beladicidad*. Madrid: AENOR.
- AENOR. (1998). *UNE 150041:1998 EX. Análisis de ciclo de vida simplificado*. Madrid: AENOR.
- AENOR. (1999). *UNE 67036:1999. Productos cerámicos de arcilla cocida. Ensayo de expansión por humedad*. Madrid: AENOR.
- AENOR. (2001). *UNE-EN 772-11:2001. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 11: Determinación de la absorción de agua por capilaridad de piezas para fábrica de albañilería*. Madrid: AENOR.
- AENOR. (2002). *UNE-EN 772-1:2002. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión*. Madrid: AENOR.
- AENOR. (2003). *UNE-EN 771-1. Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: Piezas de arcilla cocida*. Madrid: AENOR.

- AENOR. (2 de Abril de 2012). <http://www.aenor.es/aenor/certificacion/mambiente/iso14001.asp>. Obtenido de <http://www.aenor.es/aenor/certificacion/mambiente/iso14001.asp>.
- AENOR. (2 de Abril de 2012). http://www.aenor.es/aenor/certificacion/mambiente/mab_emas.asp. Obtenido de http://www.aenor.es/aenor/certificacion/mambiente/mab_emas.asp.
- AENOR(I). (1993). *UNE-103-104-93: Determinación del límite plástico de un suelo*. Madrid: AENOR.
- AENOR(I). (1995). *UNE 32105:1995. Combustibles minerales sólidos. Determinación del poder calorífico superior por el método de la bomba calorimétrica*. Madrid: AENOR.
- AENOR(I). (1996). *UNE 67019:1996 EX. Ladrillos cerámicos de arcilla cocida. Definiciones, clasificaciones y especificaciones*. Madrid: AENOR.
- AENOR(II). (1996). *UNE EN 993-2:1996. Determinación de la densidad absoluta*. Madrid: AENOR.
- Ambiental, F. F. (1999). *El reto de la ecoeficiencia, la productividad de los recursos y la ecoinnovación en el sur de la UE*. Barcelona: Agencia Europea del Medio Ambiente.
- Ambientum. (27 de Mayo de 2012). <http://www.ambientum.com/diccionario/listado/diccionario.asp?letra=e>. Obtenido de <http://www.ambientum.com/diccionario/listado/diccionario.asp?letra=e>.
- ArcelorMittal. (24 de Octubre de 2013). *Arcelor Mittal en España*. Obtenido de <http://spain.arcelormittal.com/>
- Ausubel, J. (1992). Industrial ecology: Reflections on a colloquium. *Colloquium paper*. (págs. 879-884). Washington DC: National Academy of Sciences.
- Ayres, R., & Ayres, L. (2002). *A handbook of industrial ecology*. Northampton: Edward Elgar Publishing.
- Bartolomé, J. (1997). El caolín: Composición, estructura, génesis y aplicaciones. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 7-19.
- Blanco(I), F. (2007). *Materiales cerámicos y refractarios*. Oviedo: E.T.S.I.M.O.

- Blanco(II), F. (2004). Tema 3. Cerámicas. Propiedades de las arcillas. (págs. 1-14). Oviedo: E.T.S.I.M.O.
- Blanco, F. (2009). Tema 13. La sinterización en estado sólido. *Materiales Cerámicos* (págs. 1-103). Oviedo: E.T.S.I.M.O.
- CEDEX. (23 de Enero de 2013). *Centro de estudios y Experimentación de obras Públicas*. Obtenido de <http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/F4AC0E92-C7BF-44FE-A972-0CB07F24AFAB/119857/ESCORIASDEACERIALD.pdf>
- CEDEX. (3 de Septiembre de 2014). *Catálogo de residuos utilizables en la construcción. Escorias de acería LD*. Obtenido de http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/ficha_imprimir.aspx?idresiduo=282&idmenu=359
- CEMESA. (27 de Marzo de 2013). *Cerámica Menéndez S.A.* Obtenido de <http://www.ceramicamenendez.es/catalogo.php>
- Chertow, M. (2000). Industrial symbiosis: Literature and taxonomy. *Annual Review of Energy and the Environment*, 313-337.
- CITOUOLA. (10 de Diciembre de 2013). *El Comercio*. Obtenido de <http://www.elcomercio.es/gijon/20071020/economia/arcelor-mittal-finaliza-estudio-20071020.html>
- Comisión, L. (2014). *Reglamento (UE) N° 1357/2014 de la Comisión de 18 de Diciembre de 2014*. Bruselas: Diario Oficial de la UE.
- Costa, I., Massard, G., & Agarwal, A. (2010). Waste management policies for industrial symbiosis development: case studies in European countries. *Journal of Cleaner Production*, 815-822.
- Costa, J., Cervera, S., Cunill, F., Esplugas, S., Mans, C., & Mata, F. (1991). *Curso de ingeniería química: Introducción a los procesos, las operaciones unitarias y los fenómenos de transporte*. Barcelona: Editorial Reverté S.A.
- Côté, R. (1999). Exploring the analogy further. *Journal of Industrial Ecology*, 11-12.

- Criado, E., Regueiro, M., & Sánchez, E. (2001). La industria cerámica en España (1990-2000). *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 413-428.
- Das, B. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Méjico D.F.: International Thomson Editores. Obtenido de <https://mecanicadesuelos.wordpress.com/category/geotecnia/>
- del Olmo, A. (6 de Noviembre de 2008). Desarrollo Sostenible en la utilización de las materias primas. Gijón, Asturias, España.
- Díaz, L., & Torrecillas, R. (2002). Arcillas cerámicas: Una revisión de sus distintos tipos, significados y aplicaciones. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 459-470.
- Doménech, J. (2007). *Huella ecológica y desarrollo sostenible*. Madrid: AENOR ediciones.
- Ehrenfeld, J. (1997). Industrial ecology: A framework for product and process design. *Journal of Cleaner Production*, 87-95.
- Elías(I), X. (2000). Cerámica como tecnologías para la valorización. *Curso de Tecnología Avanzada para la Valorización de Residuos y Subproductos Industriales* (págs. 1-29). Medellín: Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental.
- Elías, X. (2000). *Reciclaje de residuos industriales: aplicación a la fabricación de materiales para la construcción*. Madrid: Diaz de Santos.
- Erkman, S., & Ramaswamy, R. (2003). *Applied industrial ecology: A new platform for planning sustainable societies*. Bangalore: Aicra Publishers.
- España, G. d. (2011). *Ley 22/2011, de 28 de Julio, de residuos y suelos contaminados*. Madrid: Boletín Oficial del Estado.
- Estrada, D., & Espinosa de los Monteros, J. (1982). El secado de los productos cerámicos. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 327-337.
- Europea, C. (2010). *Más inteligente y más limpio. Consumo y producción sostenibles*. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la UE.
- Europea, C. (2011). *COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSEJO, AL COMITÉ ECONÓMICO Y SOCIAL*

- EUROPEO Y AL COMITÉ DE LAS REGIONES. *Innovación para un futuro sostenible. Plan de Acción sobre Ecoinnovación (Eco-AP)*. Bruselas: Dirección General de Medio Ambiente.
- Europeo, P., & Europea, C. d. (2008). *Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de Noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas*. Estrasburgo: Diario Oficial de la UE.
- Fransson, N., & Gärling, T. (1999). Environmental concern: Conceptual, definitions, measurement methods and research findings. *Journal of Environmental Psychology*, 369-382.
- Galán, E., & Aparicio, P. (2006). Materias primas para la industria cerámica. *Utilización de rocas y minerales industriales* (págs. 31-48). Alicante: Sociedad Española de Mineralogía.
- Gärling, F. N. (1999). Environmental concern: Conceptual, definitions, measurement methods and research findings. *Journal of Environmental Psychology*, 369-382.
- Ginés, F., Feliu, C., García-Ten, J., & Sanz, V. (1997). Análisis de los métodos tradicionales utilizados para evaluar la plasticidad. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 25-30.
- Gonzalez de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2004). *Ingeniería geológica*. Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Green, K., & Randles, S. (2006). *Industrial ecology and spaces of innovation*. Northampton: Edward Elgar Publishing.
- Green, K., & Randles, S. (s.f.). *Industrial ecology And* .
- Grimshaw, R. W., & Searle, A. (1971). *The chemistry and physics of clays and allied ceramic materials*. New York: Wiley-Interscience.
- Guggenheim, S., & Martin, R. (1995). Definition of clay and clay mineral: Joint report of the AIPEA and CMS nomenclature committees. *Clay Minerals*, 257-259.

- Hellerstein, J., Bender, J., Hadley, J., & Hohman, C. (1998). Industrias manufactureras. En O.I.T., *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. Tomo III* (págs. 84.1-84.31). Madrid: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales.
- Inglehart, R. (1977). *The silent revolution: Changing values and political styles among Western publics*. Princeton: Princeton University Press.
- Inglehart, R. (1977). The silent revolution: Chaning values and political styles among Western publics. *Princeton University Press*.
- Inglehart, R. (1997). Modernization and postmodernization: Cultural, economic and political change in 43 societies. *Princeton University Press*.
- Inglehart, R. (1997). *Modernization and postmodernization: Cultural, economic and political change in 43 societies*. Princeton: Princeton University Press.
- ISO. (2006). *ISO 14040: 2006. Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework*. Ginebra: International Organization for Standardization.
- ISO(I). (2006). *ISO 14044: 2006. Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines*. Ginebra: International Organization for Standardization.
- Leal, J. (2005). *Ecoeficiencia: marco de análisis, indicadores y experiencias*. Santiago de Chile: Publicación de las Naciones Unidas.
- López, J., F., G., & G., C. (2010). *Cerca i validació de paràmetres de la càrrega de foc en establiments industrials*. Barcelona: Institut d'Estudis de la Seguretat.
- López, M. (15 de Febrero de 2014). *La Nueva España*. Obtenido de <http://www.lne.es/aviles/2014/01/26/cabecera-avilesina-arcelor-batio-2013/1533534.html>
- Lowe, E., Warren, J., & Moran, S. (1997). *Discovering industrial ecology: An executive briefing and sourcebook*. Columbus: Battelle Press.
- Madías, J. (2012). Tratamiento de residuos: Reciclado de barro y polvos de acería al oxígeno. *Acero Latinoamericano*, 38-49.
- Marchán, C., & Regueiro, M. (2014). *Panorama minero*. Madrid: IGME.

- Marx, L., & Mazlish, B. (1996). *Progress: Fact or illusion?* Ann Arbor: University of Michigan Press.
- Maslow, A. (1943). A theory of human motivation. *Psychological Review*, 370-396.
- Maxwell, D., Sheate, W., & Van der Vorst, R. (2006). Functional and systems aspects of the sustainable product and service development approach for industry. *Journal of Cleaner Production*, 1466-1479.
- McDonough, W., & Braungart, M. (2005). *Cradle to cradle. Rediseñando la forma en que hacemos las cosas de la cuna a la cuna*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- MINETUR. (23 de Noviembre de 2014). *Catastro Minero*. Obtenido de <https://geoportal.minetur.gob.es/CatastroMinero/RealizarBusqueda.do;jsessionid=9289ADCE698044292C77CCF130B5311A>
- Morales, J. (2005). *Tecnología de los materiales cerámicos*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- OECD. (2009). *Eco-innovation in industry: Enabling green growth*. Paris: OECD Publishing.
- Platts. (24 de Octubre de 2013). *Glosario del acero*. Obtenido de https://www.steelbb.com/es/steelglossary/#1_3
- Productivo, C. I. (1998). *Política de fomento a la producción limpia*. Santiago de Chile: Ministerio de Economía.
- Ribeiro, M., Labrincha, J., & Ferreira, J. (2002). Valorización de residuos industriales diversos en la industria cerámica. *Residuos*, 90-98.
- Sánchez, E., García-Ten, J., & Regueiro, M. (2006). Materias para la industria cerámica española. Situación actual y perspectivas. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 1-12.
- Trigos, J. (17 de Enero de 2014). *Ferropedia*. Obtenido de http://www.ferropedia.es/wiki/Archivo:JMT1021_5318.JPG
- Truyols, J., García Ramos, J., Casanovas-Cladellas, M., & Santafe-Llopis, J. (1991). El Terciario de los alrededores de Oviedo. *Acta Geológica Hispánica*, 229-233.

UNEP, & SETAC. (2001). *Background paper of the UNEP/SETAC life cycle initiative*. United Nations Publication.

Vázquez, D. (2011). La introducción del concepto de subproducto como una de las principales novedades de la nueva Ley 22/2011, de residuos. *Diario la Ley*.

Velasco, J. (2005). *Patologías de las piezas cerámicas para la construcción*. Toledo: Aitemin.

Whitten, D., & Brooks, J. (1980). *Diccionario de geología*. Madrid: Alianza Editorial.

Zaragoza, A. (2010). Circuito cerrado para una industria sostenible, aportaciones del sector cementero. *Informes de la Construcción*, 53-59.

