



Universidad de
Oviedo



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

**ÁREA DE CIENCIA DE LOS MATERIALES E INGENIERÍA
METALÚRGICA**

ESTUDIO DE NUEVOS LIGANTES PARA LA FABRICACIÓN DE BRIQUETAS A PARTIR DE LODOS DE ACERÍA

Dña. CABAL ÁLVAREZ, Beatriz

TUTORES:

D. BELZUNCE VARELA, Francisco Javier

Dña. VEGA AGUIRRE, Noelia

FECHA: Julio de 2019

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	8
1.1.-	Antecedentes	8
1.2.-	Objetivo y Alcance.....	9
2.	ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....	11
2.1.-	El Proceso Siderúrgico Integral.....	11
2.1.1.-	Preparación de las Materias Primas	11
2.1.2.-	Horno Alto	12
2.1.3.-	Acería.....	14
2.1.4.-	Laminación	16
2.2.-	Subproductos generados y su posible reutilización.....	17
2.2.1.-	Escorias	19
2.2.2.-	Lodos	20
2.2.3.-	Polvos.....	21
2.2.4.-	Cascarilla de laminación	22
2.3.-	Procesos de Aglomeración en la Industria Siderúrgica.....	28
2.3.1.-	Aglomeración en la etapa de preparación de materias primas.....	28
2.3.2.-	Aglomeración de subproductos siderúrgicos	29
2.4.-	Análisis de la Aglomeración de los subproductos Objeto de Estudio.....	30
2.4.1.-	Pelletización.....	33
2.4.2.-	Briqueteado	34
2.4.3.-	Extrusión.....	35
3.	REQUISITOS DEL PROCESO	36
3.1.-	Requisitos de las briquetas	36
3.1.1.-	Propiedades mecánicas	36

3.1.2.-	Composición química	38
3.2.-	Requisitos de los ligantes	40
4.	ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS: LIGANTES PARA LA AGLOMERACION DE MINERALES DE HIERRO	42
4.1.-	Ligantes inorgánicos	42
4.1.1.-	Bentonita	42
4.1.2.-	Cemento	44
4.1.3.-	Silicatos de sodio	45
4.1.4.-	Ventajas y desventajas de los ligantes inorgánicos	46
4.2.-	Ligantes orgánicos.....	46
4.2.1.-	Carboximetilcelulosa	48
4.2.2.-	Copolímeros aniónicos de acrilamida	51
4.2.3.-	Almidón y sus derivados.....	53
4.2.4.-	Humatos	55
4.2.5.-	Gomas de Guar	56
4.2.6.-	Alquitranes y bitúmenes	57
4.2.7.-	Residuos orgánicos	58
4.2.8.-	Aditivos para ligantes orgánicos.....	60
4.2.9.-	Ventajas y desventajas de los ligantes orgánicos.....	63
4.3.-	Ligantes combinados.....	64
4.3.1.-	Ligantes orgánicos en combinación con bentonita	64
4.3.2.-	Combinación de varios componentes	68
4.4.-	Decisión adoptada	69
5.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	73
5.1.-	Caracterización de los materiales	73
5.1.1.-	Lodos a aglomerar	73

5.1.2.-	Ligantes.....	75
5.2.-	Preparación de las mezclas.....	77
5.2.1.-	Experimento 1: aglomeración de lodos gruesos de acería.....	78
5.2.2.-	Experimento 2: aglomeración de lodos gruesos de acería junto con lodos aceitosos	80
5.3.-	Fabricación de las briquetas	83
5.4.-	Ensayos de caracterización de las briquetas.....	89
5.4.1.-	Ensayos de caída.....	89
5.4.2.-	Humedad de las briquetas	91
6.	RESULTADOS	93
6.1.-	Experimento 1: aglomeración de lodos gruesos de acería	93
6.1.1.-	Mezclas con una humedad de entre el 6 y el 7%	93
6.1.2.-	Mezclas con una humedad del 3%	101
6.1.3.-	Mezclas con una humedad del 5%	101
6.1.4.-	Mezclas con una humedad del 10%	104
6.2.-	Experimento 2: Aglomeración de lodos gruesos de acería y lodos aceitosos	107
6.2.1.-	Mezclas con una humedad del 5-6% y con un 10% de lodos aceitosos	108
6.2.2.-	Mezclas con una humedad del 3% y con un 10% de lodos aceitosos	114
6.2.3.-	Mezclas con una humedad del 3% y un 15% de lodos aceitosos	119
6.3.-	Factores influyentes en el aglomerado de lodos.....	125
6.3.1.-	Humedad inicial de la mezcla.....	125
6.3.2.-	Tipos de lodos a aglomerar	126
6.3.3.-	Ligante empleado.....	131
6.3.4.-	Parámetros del proceso	136
7.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	139

7.1.-	Briqueteado de lodos gruesos de acería	139
7.1.1.-	Mezclas con una humedad de entre el 6 y el 7%	140
7.1.2.-	Mezclas con una humedad del 3%	140
7.1.3.-	Mezclas con una humedad del 5%	140
7.1.4.-	Mezclas con una humedad del 10%	140
7.2.-	Briqueteado de lodos gruesos de acería y lodos aceitosos	141
7.2.1.-	Mezclas con un 10% de lodos aceitosos y entre un 5 y un 6% de humedad 141	
7.2.2.-	Mezclas con un 10% de lodos aceitosos y un 3% de humedad	142
7.2.3.-	Mezclas con un 15% de lodos aceitosos y un 3% de humedad	142
7.3.-	Tiempo de curado y Par de operación.....	143
8.	BIBLIOGRAFÍA	144
	ANEXOS	151
A1.-	Humedad de inicial las mezclas	151
A1.1.-	Mezclas formadas exclusivamente por lodos gruesos de acería	151
A1.2.-	Mezclas formadas por lodos gruesos de acería y lodos aceitosos.....	152
A2.-	Resultados de los Ensayos.....	154
A2.1.-	Índice de caída.....	154
A2.2.-	Evolución de la humedad	163

ESTUDIO DE NUEVOS LIGANTES PARA LA FABRICACIÓN DE BRIQUETAS A PARTIR DE LODOS DE ACERÍA

RESUMEN

La necesidad de reducir al máximo posible la cantidad de residuos que se generan como consecuencia de la actividad siderúrgica ha fomentado la reutilización de estos residuos. Con el objetivo de reutilizar la fracción gruesa de los lodos que se generan en la acería y los lodos aceitosos que se producen durante las operaciones de laminación, se ha propuesto la aplicación de un proceso de briqueteado para poder introducirlos a continuación en el convertidor de la acería, y aprovechar de este modo el alto contenido en hierro de estos residuos. El briqueteado es un proceso de aglomeración que consiste en la formación de briquetas mediante el prensado en frío del material. Para que las briquetas puedan mantenerse unidas durante su transporte y carga en el convertidor, es necesario el empleo de un ligante.

Este proyecto se centra en la evaluación de la efectividad de posibles ligantes en el briqueteado de dos mezclas, una formada exclusivamente por lodos gruesos de acería y la otra, por estos mismos junto con lodos aceitosos. Varios tipos de ligantes han sido analizados y, de entre ellos, se han seleccionado los más adecuados. Entonces, se han llevado a cabo ensayos a escala de laboratorio con ambas mezclas bajo distintas condiciones de humedad y contenido de lodos aceitosos, para comprobar si era posible fabricar briquetas con alguna de las dos mezclas mediante el empleo de los ligantes seleccionados, y para determinar cuál era el ligante más efectivo y si su efectividad se veía afectada por cambios en la humedad de la mezcla. Por otro lado, se ha evaluado la generación de finos y la evolución de la humedad de las briquetas fabricadas para ver si cumplen con los requisitos para su carga en el convertidor. Además, se ha determinado el tiempo óptimo de curado y se han definido las variables recomendadas en la operación de briqueteado. Finalmente, se han propuesto otros ensayos que podría resultar interesante llevar a cabo en el futuro.

1. INTRODUCCIÓN

1.1.- ANTECEDENTES

En la actualidad, con el objetivo de contribuir a la protección del medioambiente y participar en la lucha contra el cambio climático, es de vital importancia reducir al mínimo la cantidad de residuos que son enviados al vertedero. Para ello, desde el punto de vista de la producción industrial, es primordial tratar de reutilizar la mayor parte posible de los residuos que se generan a lo largo de las distintas operaciones que se llevan a cabo para la fabricación de un producto.

La industria siderúrgica produce multitud de residuos de diferente naturaleza y composición a lo largo de su actividad industrial, principalmente escorias, lodos y polvos, los cuales pueden reutilizarse, en función de sus propiedades y de los componentes que los formen, tanto dentro de la propia industria siderúrgica, como en otros sectores, por ejemplo, en la industria cementera. Uno de los residuos que se puede reutilizar internamente es la fracción gruesa de los lodos que se generan en las operaciones de lavado de los gases que se producen en el convertidor de la acería durante la fabricación de acero, puesto que contienen un alto porcentaje en hierro metálico. Por ello, resulta muy interesante su reutilización en el convertidor de la acería ya que, de este modo, se consigue aprovechar dicho contenido en hierro para la fabricación de acero. Otro de los residuos cuya reutilización resulta interesante son los lodos aceitosos, los cuales se producen durante las operaciones de lavado y enfriado de la superficie de las piezas de acero en el proceso de laminación. Al igual que ocurre con los lodos gruesos de acería, tienen un alto porcentaje de hierro metálico, aunque, además, contienen cantidades importantes de aceite, lo cual complica notablemente su gestión.

La siderurgia que ha propuesto la realización de este proyecto está adoptando diversas medidas para la preparación para la reutilización de estos dos tipos de residuos, de manera que, en la mayor medida posible, puedan dejar de considerarse residuos y pasen a ser subproductos del proceso productivo. Actualmente, se lleva a cabo la aglomeración de lodos gruesos de acería junto con otro residuo, la cascarilla que se produce durante las operaciones de laminación, mediante un proceso de briqueteado, seguido de un curado a temperatura ambiente para reducir la humedad de las briquetas fabricadas. Para poder llevar a cabo el

briqueteado de manera satisfactoria y que las propiedades mecánicas de las briquetas fabricadas cumplan con los requisitos mínimos exigibles para su reintroducción en el convertidor de la acería, es necesario emplear un ligante, es decir, una sustancia que sea capaz de mantener unidas las partículas del aglomerado. De lo contrario, se generará un exceso de finos durante el transporte de las briquetas hasta el convertidor que, no sólo perjudicará al proceso de producción del acero al cargarlas en este, sino que, además, podrían producirse emisiones de polvo durante su transporte.

Hoy en día, en dicha siderurgia se emplean melaza y cemento como ligantes para llevar a cabo el proceso de briqueteado. No obstante, el uso de estos ligantes tiene una gran desventaja, y es que introducen elementos contaminantes en el aglomerado. Por un lado, la melaza aporta azufre y fósforo, elementos que pueden afectar gravemente a la calidad del acero y, el cemento, añade silicio, lo cual provoca una disminución del rendimiento del proceso de producción. En ese sentido, surgió el proyecto de buscar nuevos ligantes que consigan proporcionar a las briquetas las propiedades mecánicas necesarias para su reintroducción en el convertidor de la acería, pero que no introduzcan ningún elemento o compuesto contaminante en su estructura que afecte a la calidad del acero, al proceso de producción o a la vida útil de las instalaciones.

Como consecuencia de esto, la empresa propuso realizar un estudio sobre los distintos tipos de ligantes inorgánicos, orgánicos y combinados. A partir de las conclusiones de este estudio, se realizó una evaluación de los dos ligantes seleccionados como los más apropiados, llevándose a cabo diferentes ensayos a escala de laboratorio para comprobar la efectividad de ambos ligantes en el briqueteado, tanto de mezclas formadas exclusivamente por lodos gruesos de acería, como de mezclas que incluyen cierto porcentaje de lodos aceitosos, para distintas condiciones de humedad de la mezcla a aglomerar.

1.2.- OBJETIVO Y ALCANCE

El objetivo de este proyecto es la fabricación de briquetas a partir de una mezcla de lodos gruesos de acería, con y sin lodos aceitosos, en diferentes condiciones de humedad, mediante el empleo de un ligante que sea capaz de proporcionar a las briquetas las propiedades mecánicas necesarias para su reutilización en el convertidor de la acería y que no introduzca elementos contaminantes en la estructura de las briquetas.

En primer lugar, se estudiarán los principales ligantes inorgánicos, orgánicos y combinados que se pueden emplear para la pelletización de minerales de hierro, al tratarse del proceso en el que se centra la mayor parte de los artículos sobre ligantes. Se analizarán sus ventajas y sus puntos débiles, especialmente en cuanto a las propiedades mecánicas que aportan al aglomerado y si introducen o no elementos contaminantes en este, su estabilidad térmica, la dificultad que supone su mezclado con el material a aglomerar, la dosis en la que se emplean y su precio.

En segundo lugar, se seleccionarán los dos ligantes más apropiados de entre los estudiados y se comprobará su efectividad en el briqueteado de una mezcla de lodos gruesos de acería, con y sin lodos aceitosos, bajo distintas condiciones de humedad de la mezcla. Para ello, se llevarán a cabo dos experimentos a escala de laboratorio. En el primero, se tratará de briquetear una mezcla de lodos gruesos de acería, mientras que, en el segundo, se intentará briquetear una mezcla de lodos gruesos de acería junto con un 10 o un 15% de lodos aceitosos, puesto que, debido a que la gestión de estos últimos resulta bastante complicada, es interesante aumentar su contenido en la mezcla.

Las briquetas fabricadas serán sometidas a ensayos de caída, con el objetivo de determinar si cumplen con los requisitos en cuanto a generación máxima de finos. Se medirá, además, su humedad para comprobar cuál es el tiempo de curado, a temperatura ambiente, necesario para que las briquetas reduzcan su humedad hasta alcanzar un valor inferior al máximo permitido.

El objetivo final será comprobar cuál de los dos ligantes seleccionados resulta más efectivo, si su rendimiento se ve afectado por las distintas condiciones de humedad y cómo afecta la inclusión de lodos aceitosos al proceso de briqueteado y a las características de las briquetas fabricadas.

2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1.- EL PROCESO SIDERÚRGICO INTEGRAL

La finalidad de la industria siderúrgica es la fabricación de acero en forma de productos laminados tales como: bobinas, chapas, hojalata, galvanizados, perfiles, carriles y redondos [1].

El proceso siderúrgico integral podría dividirse en cuatro etapas fundamentales: preparación de las materias primas, horno alto, acería y laminación, tal y como se muestra en la Figura 2.1.

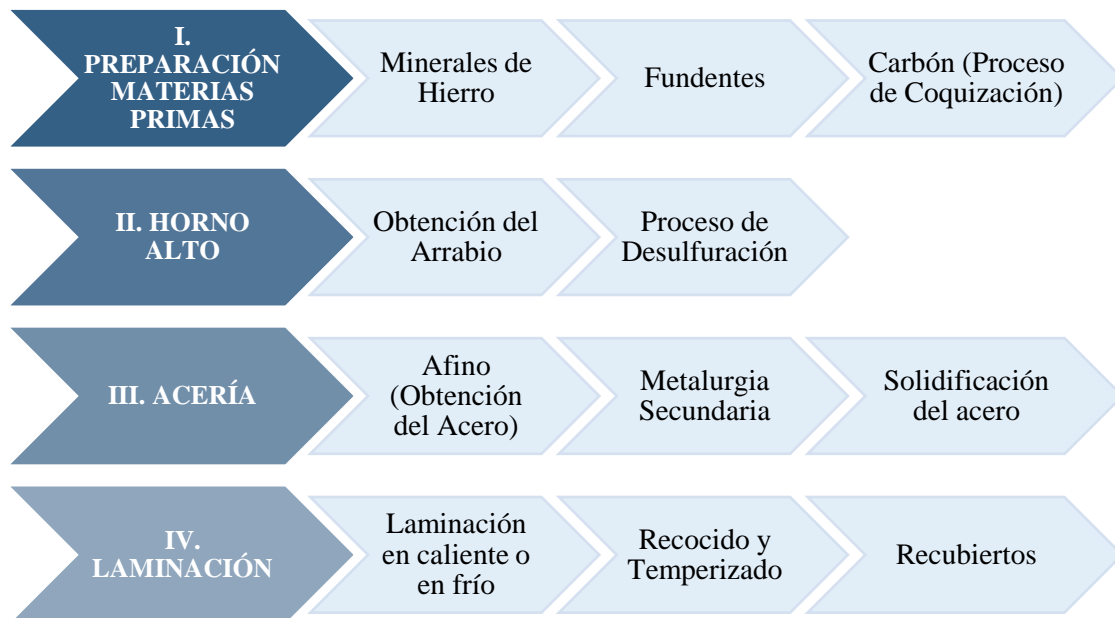


Figura 2.1.- Esquema del proceso siderúrgico.

2.1.1.- Preparación de las Materias Primas

El primer paso del proceso de obtención del acero es el acondicionamiento de las materias primas requeridas para tal fin: minerales de hierro, fundentes y cok.

El acondicionamiento de los minerales de hierro se lleva a cabo en el denominado Parque de Minerales. En este parque se reciben y se almacenan los minerales de hierro en pilas independientes en función de su procedencia y de su granulometría. Los tamaños más

gruesos (entre 8 y 30 mm de diámetro) serán enviados directamente al horno alto mientras que los finos (menos de 8 mm de diámetro) deberán ser aglomerados previamente en un proceso de sinterización o de pelletización (Figura 2.2).

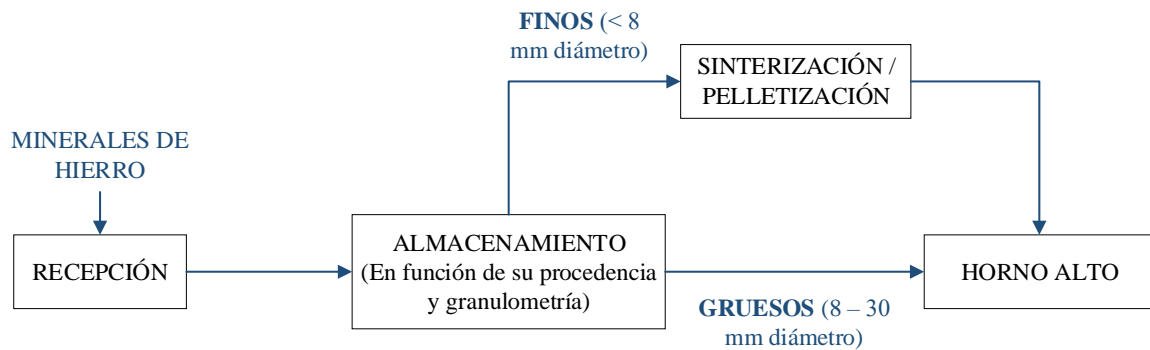


Figura 2.2.- Acondicionamiento de los minerales de hierro.

Los fundentes son productos que se añaden tanto en las operaciones de sinterización, como en la fabricación del arrabio en horno alto y en la fabricación del acero en el convertidor. Con la adición de fundentes se consigue una escoria de bajo punto de fusión y reducida viscosidad, que además absorbe los elementos que perjudican la calidad del producto final [2]. Los fundentes más utilizados son caliza, dolomía y cuarzo.

Por último, además de minerales de hierro y fundentes, en el horno alto se carga cok. Este se obtiene a partir de carbones, mayoritariamente hulla. La mezcla de carbones se trata en las baterías de cok, donde finalmente se obtiene el cok, que es el combustible que se carga en el horno alto.

2.1.2.- Horno Alto

En el horno alto se lleva a cabo la eliminación del oxígeno que se encuentra combinado con el hierro, es decir, se lleva a cabo la reducción de los minerales de hierro. El objetivo de este proceso es la obtención de arrabio, que es un producto metálico compuesto por hierro (95%), carbono (3.5%) y otros elementos (silicio, magnesio, azufre y fósforo), que se extrae en estado líquido [1].

En el horno alto se introducen diferentes productos aportadores de hierro (minerales de hierro, sinter y pellets), cok y fundentes, además de viento (aire) caliente como fuente del oxígeno necesario para la combustión con el cok (Figura 2.3).

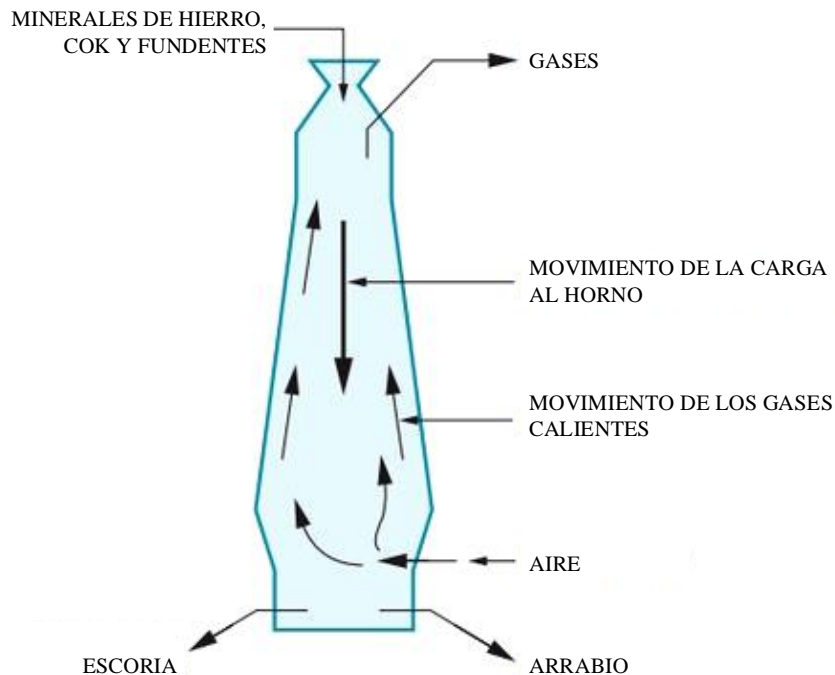


Figura 2.3.- Horno Alto [3].

El cok sufre una combustión incompleta, generándose el gas CO que, al entrar en contacto con los óxidos de hierro (mineral, sinter y pellets), reacciona con los mismos y se forma CO₂, liberándose el hierro en forma líquida, que se va almacenando en el crisol. Por otra parte, las impurezas del mineral son atrapadas por los fundentes, formando una escoria líquida que flota sobre el arrabio, puesto que su peso específico es menor.

En el curso de este proceso se generan gases, que salen por la zona superior, y que deben ser correctamente depurados, mientras que, por la zona inferior del horno alto, se extraen la escoria y el arrabio.

Finalmente, antes de ser enviado a la acería, el arrabio se somete a un proceso de desulfuración, con el objetivo de disminuir su contenido en azufre hasta unos valores adecuados para la fabricación del acero [1].

2.1.3.- Acería

En la acería se reduce el contenido de carbono y también el de otros elementos del arrabio hasta un rango previamente establecido y, de esta forma, se produce acero.

En primer lugar, se transporta el arrabio líquido desde el horno alto hasta la acería. Una vez allí, por medio de una cuchara, se introduce en el convertidor, donde se llevará a cabo el proceso mediante el cual se transformará en acero. En el convertidor se introduce, además del arrabio líquido, chatarra, y mediante una lanza se inyecta oxígeno puro, con objeto de llevar a cabo la oxidación del exceso de carbono y de las demás impurezas presentes en el baño [1].

Simultáneamente al soplado de oxígeno, se introducen los fundentes necesarios (cal, dolomía y espato flúor) que formarán una escoria que captará los compuestos formados en las reacciones de oxidación, evitando así que vuelvan a pasar al acero. Para favorecer la agitación del baño y, por tanto, las reacciones en el convertidor, se inyecta por el fondo de éste un gas inerte, generalmente argón o nitrógeno [2].

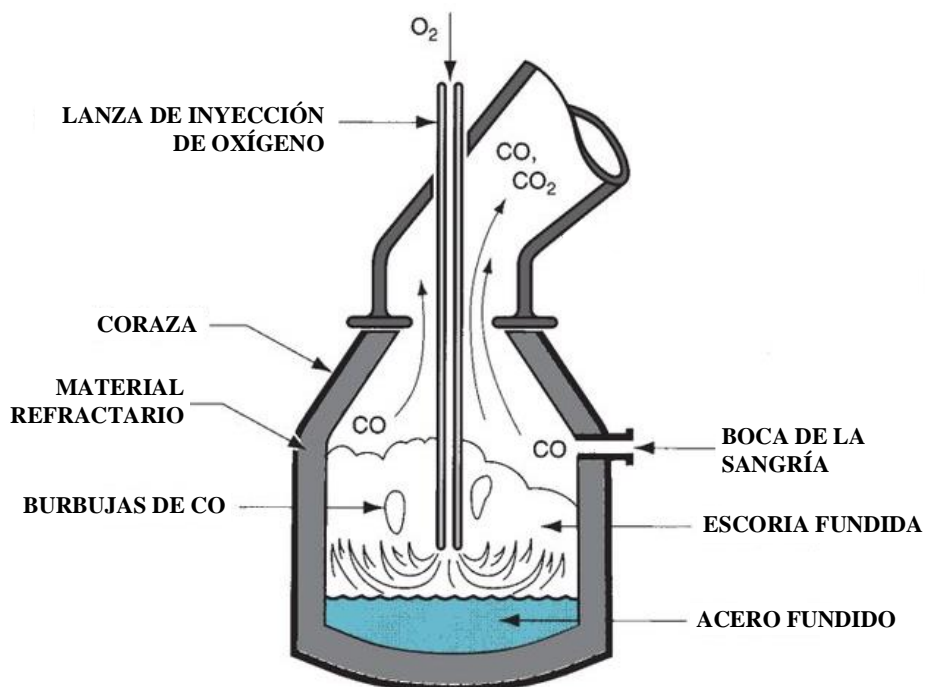


Figura 2.4.- Convertidor [3].

Antes de pasar a la etapa de solidificación, el acero líquido que se obtiene en el convertidor debe ser transportado a las instalaciones de metalurgia secundaria. En dichas instalaciones, se somete al acero a uno o varios de los tratamientos siguientes [1]:

- Ajuste de la composición: se añaden al acero los elementos necesarios para encajar su composición dentro de la especificación pedida.
- Desulfuración: para reducir el contenido en azufre del acero.
- Desgasificación: con objeto de disminuir el contenido de gases disueltos en el acero.
- Calentamiento: para elevar la temperatura del acero antes de su colada.

Tras pasar por estas instalaciones y realizar los consiguientes procesos, se obtiene un acero que cumple con las especificaciones requeridas y listo para pasar al proceso de solidificación. En el proceso de solidificación del acero, se obtienen los semiproductos que serán transformados posteriormente para darles la forma final. Existen varios procesos de solidificación del acero [2], aunque hoy en día el más utilizado es la colada continua (Figura 2.5).

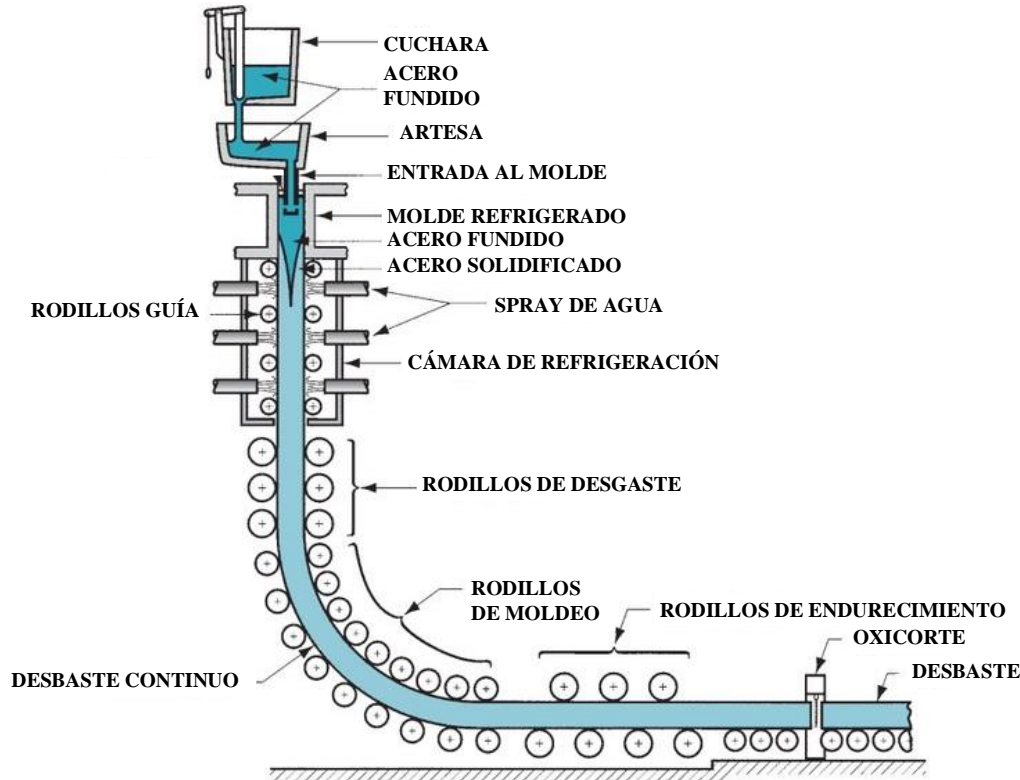


Figura 2.5.- Colada continua [3].

En la colada continua, el acero líquido se cuela directamente a través de la artesa en un molde abierto, fuertemente refrigerado, donde solidifica para formar un producto de sección uniforme, desbaste, que se obtiene de manera continua [2]. De este proceso se obtienen desbastes planos (utilizados en la fabricación de productos planos), desbastes de sección cuadrada (utilizados en la fabricación de perfiles y carriles) y palanquillas (utilizados en la fabricación de redondos) [1]. Todos estos productos se cortan a la medida necesaria para su posterior tratamiento en los trenes de laminación.

2.1.4.- Laminación

La laminación consiste en hacer pasar el desbaste entre dos rodillos que giran a la misma velocidad y en sentido contrario, con objeto de reducir paulatinamente su espesor mediante la presión vertical ejercida. Dado que el volumen y el ancho del desbaste se mantienen aproximadamente constantes durante su laminación, el producto experimentará un alargamiento que será directamente proporcional a la disminución del espesor entre la entrada y la salida [2].

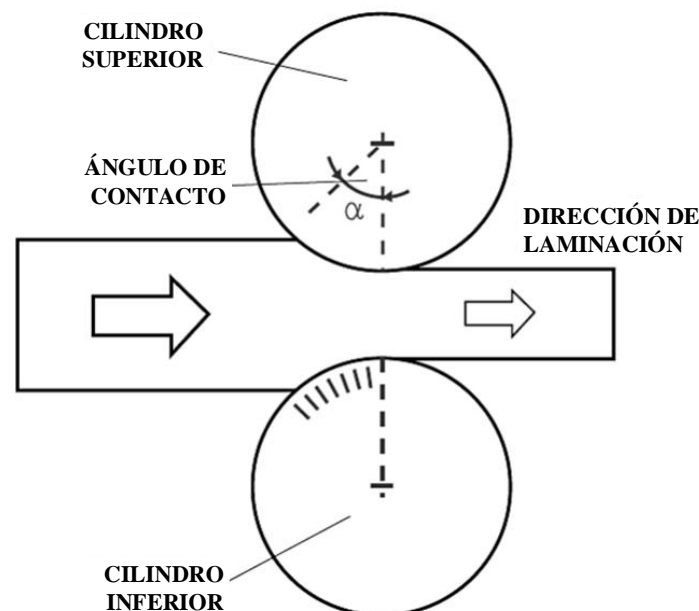


Figura 2.6.- Proceso de Laminación [2].

Existen dos procesos principales de laminación: laminación en caliente y laminación en frío. Se considera laminación en caliente cuando la temperatura a la que se realiza la

conformación es superior a la de recristalización del acero [2]. En estas condiciones, la deformación del acero tiene lugar a alta temperatura, de manera que su estructura interna y sus propiedades mecánicas apenas se alteran. Tras la laminación en caliente se pueden obtener ya productos finales, así como semiproductos, que deberán pasar por un proceso de laminación en frío y de recocido.

En cambio, cuando se busca obtener una chapa muy fina con un buen acabado superficial y un estrecho margen de tolerancia en su espesor [1], es necesario recurrir a la laminación en frío, que es el proceso de laminación que se realiza a temperatura ambiente. La laminación en frío produce una fuerte perturbación en la estructura interna del acero, que provoca un fuerte endurecimiento y una reducción muy importante de su capacidad de deformación. Por ello, es necesario someterlo finalmente, en primer lugar, a un tratamiento de recocido (calentamiento del material, un mantenimiento de la temperatura y un enfriamiento controlado), con objeto de devolverle al acero la estructura y propiedades anteriores a la laminación en frío y, posteriormente, a un proceso de temperizado para proporcionar al acero cierta dureza superficial.

Como resultado del proceso de laminación se obtienen productos de acero, con diferentes formas: perfiles estructurales, carriles de ferrocarril, redondos y chapas finas en forma de bandas o bobinas.

Finalmente, se pueden aplicar recubrimientos metálicos, no metálicos o dúplex (combinación de un recubrimiento metálico con una o más capas de recubrimientos orgánicos) para prevenir la corrosión de los productos finales de acero. Se producen así diferentes productos recubiertos, como hojalata, chapas galvanizadas y chapas prepintadas.

2.2.- SUBPRODUCTOS GENERADOS Y SU POSIBLE REUTILIZACIÓN

Hoy en día, con el objetivo de contribuir en la lucha contra el cambio climático, es primordial la adaptación de un modelo de economía circular (Figura 2.7), es decir, de aprovechamiento de recursos, que permita reducir el impacto ambiental y mejorar la competitividad de los procesos productivos. Para ello, es necesario reducir el consumo de materias primas y

maximizar la reutilización y el valor de los residuos generados a lo largo del proceso, de forma que puedan ser considerados subproductos.



Figura 2.7.- Economía circular.

Cada día, en la Industria Siderúrgica, se producen cantidades importantes de subproductos, tales como escorias, lodos y otros “residuos” que se generan como consecuencia de la actividad industrial. Estos subproductos contienen cantidades considerables de hierro, por lo que resulta muy interesante su reutilización en el proceso. En función de su composición, en otros casos se emplearán en aplicaciones externas a la industria siderúrgica, siempre con el objetivo de recuperar y reutilizar la mayor parte posible de los mismos y contribuir así al alcance de dicho modelo de economía circular.

La Figura 2.8 muestra los principales subproductos que se generan a lo largo del proceso siderúrgico.

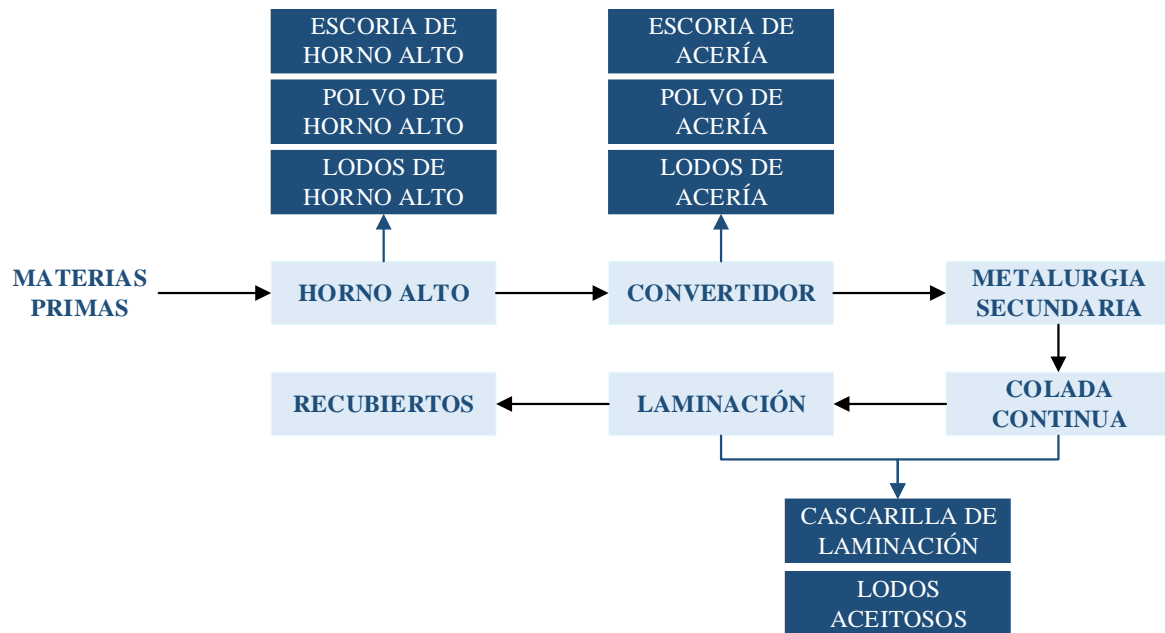


Figura 2.8.- Principales subproductos generados en el proceso siderúrgico.

En los apartados siguientes se analizará la composición, aplicaciones y las barreras existentes en el reciclaje de los siguientes subproductos: escorias, lodos, polvos y cascarilla de laminación.

2.2.1.- Escorias

Las principales escorias que se producen en la industria siderúrgica son la escoria de horno alto y la escoria de acería. Estos subproductos están compuestos mayoritariamente por silicatos de aluminio y calcio y óxidos de magnesio [4]. La cantidad de estos elementos en la escoria depende de la composición química de las materias primas utilizadas y del tipo de refractario empleado en las paredes del horno.

Se generan alrededor de 200 – 400kg de escoria de horno alto por tonelada de arrabio y unos 200kg de escoria de acería por tonelada de acero fundido [4]. Cada tipo de escoria tiene distintas aplicaciones en función de sus propiedades. La escoria de horno alto se emplea principalmente en la fabricación de cemento Portland, ya que su composición es muy similar a la del clinker [5], aunque también se utiliza como agregado o ligante en la fabricación de hormigón o en la fabricación de materiales cerámicos [4].

Por otro lado, la escoria de acería suele ser empleada como fundente y cargada de nuevo en horno alto, gracias a su alta basicidad y al óxido de calcio y de magnesio que esta contiene. Sin embargo, esta aplicación se encuentra limitada por el fósforo presente en la escoria, de forma que tan sólo se puede volver a cargar un 25% de la escoria que se genera [6]. Otras aplicaciones que se le puede dar a este tipo de escoria es como fertilizante, en el acondicionamiento de suelos [5] o como agregado en carreteras, estando esta aplicación limitada por el contenido en CaO de la escoria, ya que este óxido se puede hidratar y expandir, por lo que es necesario estabilizarlo con anterioridad. Por último, estas escorias también pueden emplearse como material abrasivo en procesos de granallado y en la fabricación de balasto. Ambas aplicaciones están limitadas por la conductividad de la escoria. En la primera, una alta conductividad podría causar corrosión en la superficie de la pieza que se pretende tratar y, en la segunda aplicación, una alta conductividad podría afectar a la estabilidad y al funcionamiento de las vías de tren donde se emplee dicho balasto. Aproximadamente el 75% de la escoria de acería se reutiliza, ya sea dentro o fuera de la acería, tan sólo el 25% restante se envía a vertedero [6].

2.2.2.- Lodos

Los principales tipos de lodos que se producen son los lodos de horno alto, los lodos de acería y los denominados lodos aceitosos, que se generan en las operaciones de laminación.

Los dos primeros tipos de lodos se obtienen como resultado de una limpieza húmeda de los gases que se generan en el horno alto y en la acería respectivamente. Estos lodos están compuestos mayoritariamente de hierro, calcio, silicio, manganeso y óxidos de aluminio [4].

Se generan unos 6kg de lodos de horno alto por tonelada de arrabio y unos 15 – 16kg de lodos de acería por tonelada de acero fundido [4]. Una de las principales barreras para la reutilización de ambos tipos de lodo es su contenido en zinc, elemento que tiende a acumularse en las partículas más pequeñas del lodo, por lo que suelen dividirse en dos fracciones: lodos finos (retienen la mayor parte del zinc) y lodos gruesos.

Los lodos finos de horno alto y los lodos finos de acería con un contenido en zinc relativamente bajo pueden ser reutilizados en las unidades de sinterización con objeto de

volver a ser cargados el horno alto, mientras que los que tienen mayores contenidos de zinc se envían al vertedero.

Por otro lado, los lodos gruesos de horno alto suelen emplearse en la industria cementera o en la fabricación de cerámicas, aunque deben añadirse en pequeñas cantidades para evitar modificar las características del producto final [4].

Al igual que los lodos gruesos de horno alto, los lodos gruesos de acería también pueden emplearse en la industria cementera. No obstante, su porcentaje en hierro metálico es muy alto (50 – 65% [6]) por lo que resulta muy interesante su reciclaje dentro de la propia industria siderúrgica. Por ello, es habitual su reutilización en el convertidor de la acería tras su aglomeración, mediante briqueteado, pelletización o extrusión.

Por último, es necesario mencionar la generación de lodos aceitosos durante el proceso de laminación, tanto en frío como en caliente, como consecuencia del contacto de la superficie oxidada de las chapas con los lubricantes y refrigerantes utilizados en la laminación. Estos lodos están constituidos por aceites, grasas y partículas finas. El contenido en hierro varía entre el 30 y el 60%, el contenido de humedad entre el 20 y el 50% y el contenido en aceite entre el 1.5 y el 30% [6]. Es habitual que sean enviados a vertedero, aunque cantidades pequeñas de estos lodos pueden reciclarse en las unidades de sinterización o pelletización para ser posteriormente reintroducidos en horno alto, siendo la principal barrera para su reciclaje su contenido en aceite y su humedad.

2.2.3.- Polvos

Los principales polvos que se producen durante el proceso siderúrgico son los polvos de horno alto. Están formados mayoritariamente por una mezcla de óxidos, principalmente de hierro, además de zinc, silicio, magnesio y otros óxidos ya en menores cantidades. Se generan entre 7 y 45kg de polvos por tonelada de arrabio, que se recogen en la limpieza en seco de los gases que se generan en el horno alto [4].

Su principal aplicación es su reutilización en la planta de sinterización, aunque debe comprobarse la cantidad de zinc que contienen y, si fuera necesario, reducirla.

2.2.4.- Cascarilla de laminación

La cascarilla de laminación es un subproducto que se origina a causa de la oxidación de la superficie del acero cuando este se ve sometido a altas temperaturas (laminación en caliente) o a largas exposiciones al aire (laminación en frío).

La separación de la cascarilla de laminación se puede realizar por medios mecánicos (simplemente en el contacto bajo presión de los cilindros de laminación con el desbaste o la banda) o por medios químicos, en este caso, en el proceso de decapado ácido o '*Acid Pickling*', que consiste en disolver la cascarilla de laminación mediante el uso de un ácido y seguidamente recuperar la cascarilla diluida en el ácido mediante un proceso de regeneración del ácido. En este último caso, se generaría otro subproducto, el '*Pickle liquor*', cuya composición variaría en función del ácido que se emplee para eliminar la cascarilla de laminación de la superficie del acero [4].

La cascarilla de laminación está formada por óxidos de hierro, como wustita, magnetita y hematita, además de trazas de metales no férricos, compuestos de metales alcalinos y aceites de laminación. Se generan entre 35 y 40kg de cascarilla de laminación por tonelada de acero producido [4]. Debido a su alto contenido en hierro, la tendencia es reutilizarla en las unidades de sinterización, pelletización o briqueteado, aunque su reciclaje está limitado en función de su contenido en aceite [6]. La cascarilla de laminación también se puede emplear en la producción de pigmentos [4].

A continuación, en la Tabla 2.1, se muestra un resumen de los distintos subproductos que se generan en una planta siderúrgica, cantidades producidas de cada uno de ellos, sus principales barreras para la reutilización y sus posibles aplicaciones.

Tabla 2.1.- Subproductos generados, cantidad generada, barreras para su reutilización y posibles aplicaciones [4], [5], [6].

Subproducto		Cantidad Generada	Barreras Reutilización	Posibles Aplicaciones	
Escorias	Horno Alto	200 – 400kg/t arrabio	---	Industria cementera Agregado/ligante en la fabricación de hormigón o materiales cerámicos	
	Acería	200kg/t acero fundido	Contenido en P Conductividad Expansividad (CaO)	Fertilizante Acondicionamiento de suelos Agregado en carreteras Vertedero	
Lodos	Horno Alto	6kg/t arrabio	Contenido en Zn y Pb	Vertedero (alto contenido en Zn) Reutilización en sinterización (bajo contenido en Zn)	
				Fabricsación de cerámicas Industria cementera	
	Acería	15 – 16kg/t acero fundido	Contenido en Zn	Vertedero (alto contenido en Zn) Reutilización en sinterización (bajo contenido en Zn)	
				Reciclaje vía briqueteado y reutilización en el convertidor Industria cementera	
	Aceitosos		---	Contenido en aceite y humedad	Pequeñas cantidades pueden ser reutilizadas en la planta de sinterización o en horno alto en forma de pellet Vertedero
	Polvos	Horno Alto	7 – 45kg/t arrabio	Contenido en Zn	Reutilización en sinterización o en el horno alto
Cascarilla	Laminación	35 – 40kg/t acero producido	Contenido en aceite	Reutilización en sinterización o reciclaje vía briqueteado o pelletización para su reutilización en el horno alto o en el convertidor Producción de pigmentos	

El presente estudio se centra en la reutilización, mediante un proceso de aglomeración, de lodos gruesos de acería, procedentes de dos plantas siderúrgicas A y B, y lodos aceitosos, por lo que se dedicará una mayor atención a este tipo de subproductos.

Se generan al año unas 85000t de lodos de acería en total en ambas plantas, siendo el porcentaje de lodos gruesos del 22% en la planta A y del 27% en la planta B. En cuanto a su composición, los lodos gruesos de la planta A cuentan con un porcentaje total de hierro del 85%, un 70% de hierro metálico y un 7 – 8% de humedad, mientras que los lodos gruesos de la planta B contienen un 70% de hierro total, un 60% de hierro metálico y un 10 – 13% de humedad. Como se puede observar, se trata de unos subproductos con una alta concentración de hierro, por lo que existe un gran interés en su reutilización dentro de la propia siderurgia.

Como se ha mencionado anteriormente, los lodos de acería se obtienen durante la limpieza húmeda de los gases que se generan en el proceso de obtención de acero en el convertidor. Los gases que se producen en el convertidor pasan, en primer lugar, por un proceso de lavado con agua en el cual se separa el gas limpio de los polvos, que quedan retenidos en el agua formando un lodo. Este lodo pasa a un sedimentador primario, en el que se separan los lodos gruesos que, tras ser escurridos, se someterán a un proceso de aglomeración y serán reintroducidos en convertidor. El agua que contiene las partículas más finas pasará al sedimentador secundario, dónde se separarán las aguas claras de los lodos finos, los cuales suelen pasar a un filtro prensa para reducir su contenido en agua y en función de su contenido en zinc, son enviados a vertedero o son reutilizados en la planta de sinterización.

En la Figura 2.9 se muestra un esquema del proceso de obtención de los lodos de acería, finos y gruesos.

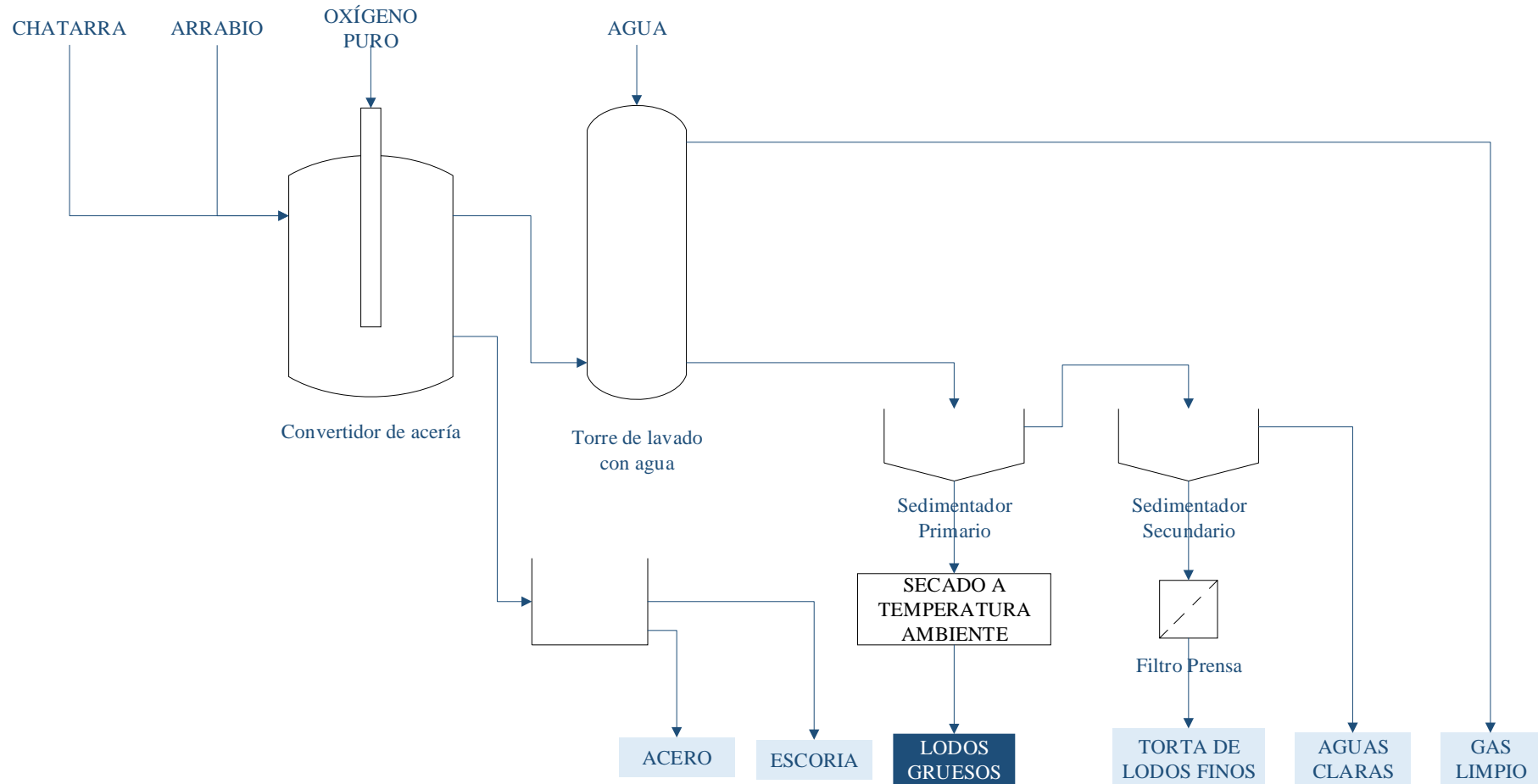


Figura 2.9.- Diagrama del proceso de obtención de lodos de acería.

En cuanto a los lodos aceitosos, se generan al año unas 15000t en total en ambas plantas mencionadas anteriormente. De estas, se recicla internamente un 80%, mientras que el 20% restante se lleva a un vertedero interno. Los lodos aceitosos contienen un 62% de hierro total, por lo que, al igual que ocurría con los lodos gruesos de acería, existe un gran interés en su reutilización. No obstante, tienen una humedad de entre el 19 – 20% y un contenido en aceites de entre el 1.5 y el 30% [6], lo cual hace que su gestión resulte complicada.

Los lodos aceitosos se obtienen como resultado de las operaciones de enfriamiento y limpieza de las piezas durante el proceso de laminación en caliente. Durante este proceso, se emplea agua con el objetivo de enfriar y limpiar la superficie de la pieza de acero. El agua, tras recoger las impurezas de la superficie del acero (óxidos, lubricantes y aceites), es enviada a unos fosos, donde la cascarilla de laminación va decantando periódicamente hasta que, finalmente, es extraída y escurrida. Esta primera cascarilla que se obtiene, al tener poca proporción en aceite, es habitualmente reutilizada en las unidades de sinterización.

El resto de la mezcla pasa a un foso longitudinal. En el foso longitudinal se separan las cascarillas aceitosas (mayor proporción en aceite), que se van depositando en el fondo, el aceite, que forma una capa en la superficie y las aguas sucias. Las cascarillas aceitosas se extraen y se llevan a un escurridor. En función de su contenido en aceite, serán reutilizadas internamente en las unidades de sinterización o en el horno alto. Por otro lado, el aceite se retira y se trata para su recuperación.

Por último, el agua sucia pasará por unos filtros de arena seguidos de un decantador, en el cual se separarán los denominados lodos aceitosos del agua clarificada. Estos lodos, en función de su composición, son reciclados internamente en el horno alto o son llevados a vertedero. Por su lado, el agua sucia se envía a la torre de refrigeración, donde, tras ser enfriada, se recircula al proceso de laminación en caliente para volver a ser empleada en el enfriamiento y limpieza de las piezas. En la Figura 2.10 se muestra un esquema del proceso de obtención de lodos aceitosos.

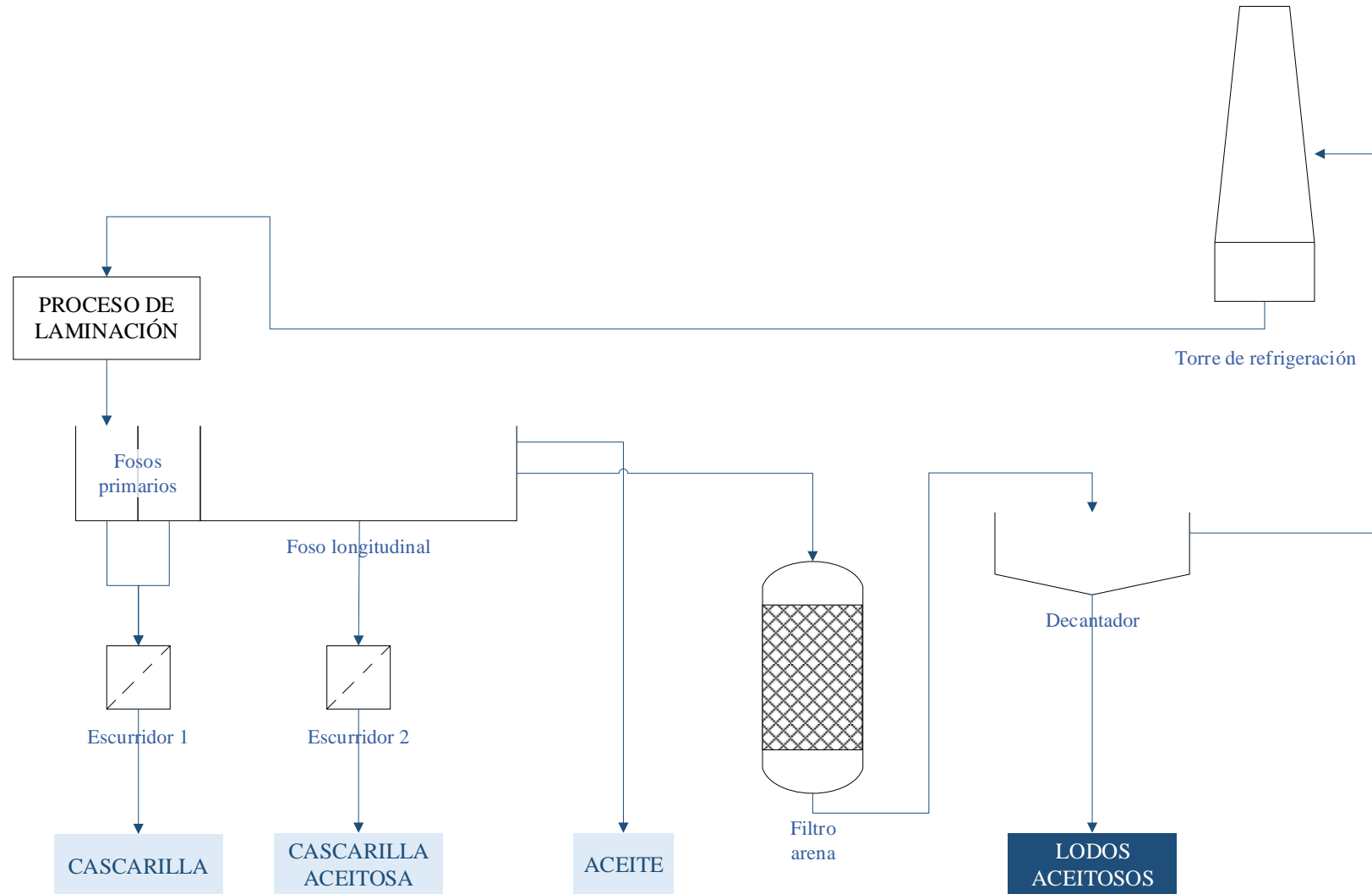


Figura 2.10.- Diagrama del proceso de obtención lodos aceitosos.

2.3.- PROCESOS DE AGLOMERACIÓN EN LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA

La aglomeración es un proceso que consiste en la unión de partículas de mineral en bloques mayores, por aplicación de calor o de un material cementante [7] (Figura 2.11).

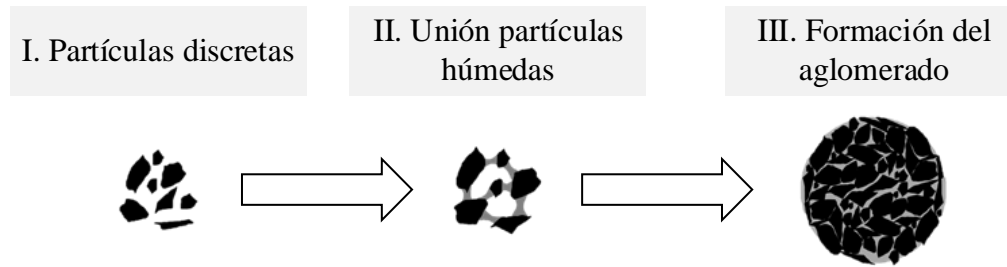


Figura 2.11.- El proceso de aglomeración [8].

Existen varias aplicaciones de los procesos de aglomeración en la industria siderúrgica integral, pudiéndose clasificar en aglomeración de finos de mineral de hierro, cok y fundentes durante la etapa de preparación de materias primas y aglomeración de los distintos subproductos generados a causa de su actividad.

2.3.1.- Aglomeración en la etapa de preparación de materias primas

Durante la etapa de preparación de las materias primas, es necesario aglomerar los finos de material, tanto de mineral de hierro, como de cok y de fundentes, previamente a su carga en el horno alto. Esto es debido a que la carga sólida que se introduce en el horno alto, debe de permitir el ascenso de la corriente gaseosa, es decir, debe de tener cierta permeabilidad o, de lo contrario, no se producirán adecuadamente las reacciones químicas necesarias para la producción de arrabio. Si la carga sólida contuviera un exceso de finos, estos ocuparían los huecos entre los fragmentos más gruesos, impidiendo el paso de los gases y, por tanto, perjudicando al proceso [2]. Con el objetivo de aglomerar los finos de dichas materias primas se emplean principalmente dos procesos, la pelletización y la sinterización.

Mediante la pelletización se consigue, además de proporcionar a los finos de mineral de hierro la granulometría adecuada para su carga en el horno alto, aumentar su riqueza. La aglomeración se produce en tambores o discos rotatorios, en los cuales se hace rodar las

partículas mezcladas con un ligante, bentonita en la mayoría de los casos, en un tambor o en un disco de pelletización. De este modo, se forman pequeñas esferas que van creciendo progresivamente hasta formar un aglomerado de entre 10 y 15mm de diámetro [2] (efecto “bola de nieve”). La resistencia mecánica de estos pellets no es muy alta, por lo que, para que puedan soportar las duras condiciones de transporte y su carga en el horno alto, se someten a un endurecimiento por cocción en hornos especiales para tal fin. Dicho endurecimiento, se produce por la reducción de la humedad del pellet y por la transformación del ligante en una masa vítrea de estructura amorfa en la que se hayan dispersos los granos de material. Tras la cocción, la resistencia mecánica de los pellets es muy elevada, siendo incluso superior a la de muchos minerales compactos y a la del sinter.

En la sinterización en cambio, los finos de mineral de hierro junto con finos de cok y fundentes se extienden sobre una cinta transportadora, bajo la cual se encuentra un ventilador que aspira aire a través de los orificios de la cinta. Mediante un mechero de ignición se enciende la parte superior de la mezcla. A medida que el ventilador aspira aire, el fuego va profundizando en la capa, de forma que, al llegar al final del recorrido, los finos están aglomerados formando una torta de material sinterizado. Dicha torta se trocea, obteniéndose como resultado el denominado sinter, un producto de geometría irregular, duro, resistente, poroso y tenaz, de entre unos 30 y 60 mm de diámetro aproximadamente [2]. En este proceso es posible incluir además subproductos derivados de las distintas operaciones para la producción de acero, como polvos de horno alto, lodos finos de horno alto y acería (si el contenido en zinc es bajo), cascarilla de laminación y lodos aceitosos.

2.3.2.- Aglomeración de subproductos siderúrgicos

En cuanto a la gestión de subproductos, se pueden emplear distintos procesos de aglomeración con el objetivo de su reutilización, ya sea en el horno alto o en el convertidor de acería. Además de la sinterización, en la que, como se ha mencionado, se pueden introducir ciertas cantidades de varios subproductos junto con los finos de mineral de hierro, cok y fundentes, es posible emplear otros procesos de aglomeración íntegra de subproductos de la siderurgia (lodos gruesos de acería, lodos aceitosos, polvos de horno alto y lodos aceitosos.). Estos procesos se encuentran limitados por la composición (contenido en elementos perjudiciales para el proceso, aceites y humedad) y la heterogeneidad de los subproductos, lo que hace que sean procesos operativamente más complicados.

Los tres métodos principales para la aglomeración de residuos siderúrgicos son la pelletización, el briqueteado y la extrusión, los cuales se pueden clasificar en función de si emplean o no presión para formar el aglomerado. Mientras que en el briqueteado y en la extrusión se consigue aglomerar los materiales compactándolos mediante la aplicación de una fuerza externa, en la pelletización, como se ha mencionado anteriormente, se hace rodar las partículas mezcladas con un ligante en un tambor o en un disco de pelletización de manera que formen pequeñas esferas que crecen progresivamente hasta formar un aglomerado del tamaño adecuado.

En cada uno de estos procesos se obtienen aglomerados de diferentes formas, tal y como se puede observar en la Figura 2.12.



Figura 2.12.- Principales procesos de aglomeración de residuos siderúrgicos [9], [10], [11].

2.4.- ANÁLISIS DE LA AGLOMERACIÓN DE LOS SUBPRODUCTOS OBJETO DE ESTUDIO

En el presente estudio se estudia la reutilización en el convertidor de lodos gruesos de acería y lodos aceitosos, a causa de su alto contenido en hierro metálico, mediante un proceso de aglomeración. Los procesos más adecuados para llevar a cabo esta operación son la pelletización, el briqueteado y la extrusión, puesto que son las principales tecnologías de aglomeración de subproductos siderúrgicos.

En estos procesos, el contenido en humedad de la mezcla que se pretende aglomerar es un factor fundamental en la formación de los aglomerados, ya que provoca la aparición de una

tensión superficial (tensión neutral) que mantiene las partículas juntas [12]. No obstante, esta tensión neutral no es suficiente para que exista la cohesión necesaria entre los granos, en especial, cuando comienzan a secarse. Para que los aglomerados puedan mantenerse unidos durante su transporte y carga en el horno alto o en el convertidor, es necesario emplear un ligante o, de lo contrario, se producirá la formación de polvos que resultará en emisiones al medio ambiente y que perjudicará al proceso de producción.

La aglomeración de los finos de material, se produce entonces por la acción de diversas fuerzas de interacción. La Figura 2.13 muestra el sistema partículas de minerales de hierro-ligante que se forma durante la aglomeración, así como las fuerzas de interacción resultantes.

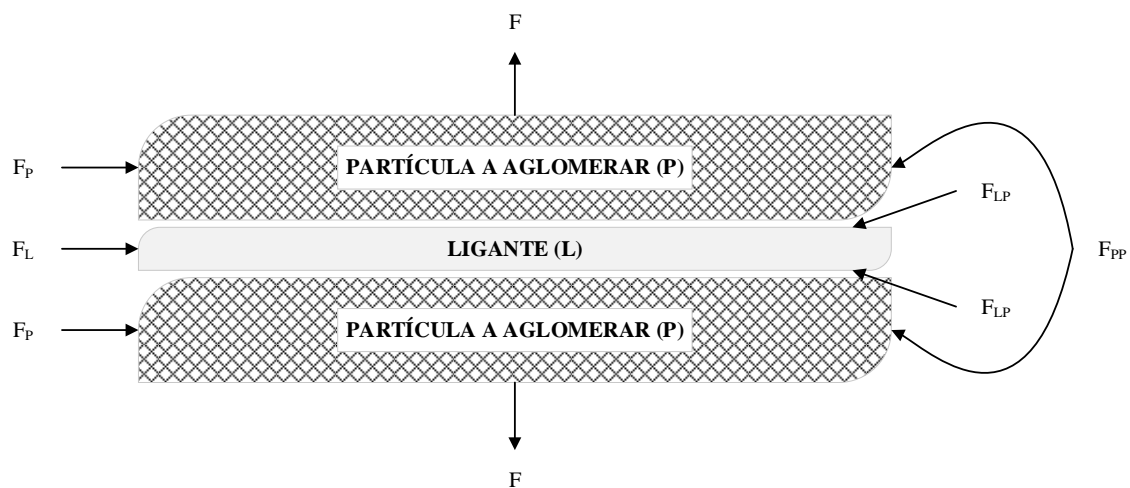


Figura 2.13.- Fuerzas de interacción en la aglomeración [13].

Como se puede observar, existen dos fases, ligante (L) y partículas a aglomerar (P), además de una interfaz entre el ligante y las partículas (LP) [13]. Las cuatro fuerzas de interacción que existen en el sistema son las siguientes:

- Fuerzas de cohesión del ligante (F_L). Son las fuerzas de interacción neta entre las moléculas del ligante. Definen la resistencia mecánica del ligante.
- Fuerzas de adhesión en la interfaz (F_{LP}). Son la suma de las fuerzas de Van der Waals, fuerzas electrostáticas, magnéticas y viscosas, así como los enlaces químicos y de hidrógeno entre el ligante y las partículas a aglomerar.
- Fuerzas de cohesión de las partículas del material a aglomerar (F_P). Son las fuerzas de interacción neta entre las moléculas de las partículas a aglomerar.

- Fuerzas de interacción entre las partículas del material a aglomerar (F_{PP}). Son la suma de las fuerzas de Van der Waals, fuerzas electrostáticas, magnéticas, fuerzas de entrelazado mecánico y fuerzas capilares (en presencia de agua).

El aglomerado obtenido se romperá cuando se ejerza sobre el mismo una fuerza exterior (F) mayor que la resultante de las fuerzas de interacción citadas. En general, para el estudio del fallo de un ligante tan sólo se tienen en cuenta las fuerzas de adhesión en la interfaz y las de cohesión del ligante. Esto es debido a que, por un lado, las fuerzas de interacción entre las partículas del material a aglomerar suelen ser despreciables [14]. De entre ellas, las más importantes son las fuerzas capilares, que desaparecen cuando el aglomerado se seca, quedando sólo las fuerzas de Van der Waals, fuerzas electrostáticas, magnéticas y fuerzas de entrelazado mecánico, las cuales son despreciables en comparación con las fuerzas F_L y F_{LP} . Por otro lado, las fuerzas de cohesión entre las partículas del material a aglomerar son muy grandes, mayores que F_L y F_{LP} , por lo que el fallo se producirá antes en la capa del ligante o en la interfaz [13] (Figura 2.14).

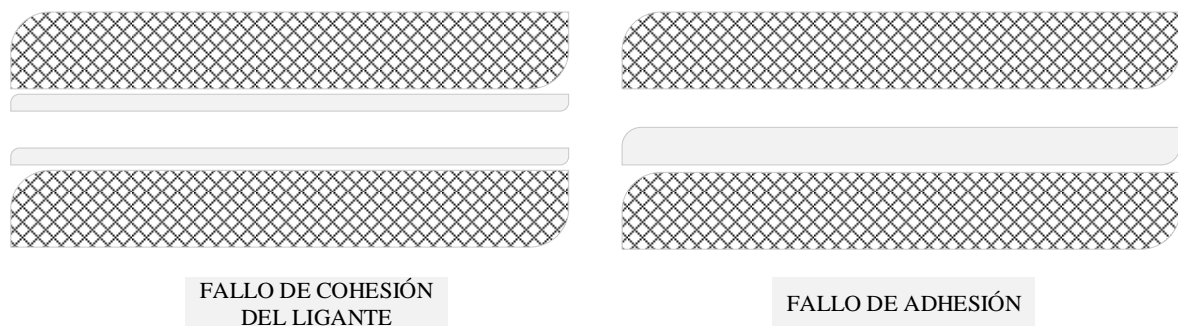


Figura 2.14.- Causas de la rotura de un aglomerado.

Por tanto, para producir aglomerados resistentes es importante que, en primer lugar, el ligante establezca enlaces químicos con las partículas de hierro y entre sus propias moléculas. Para conseguir esto, los ligantes deben de incluir en su estructura ciertos grupos funcionales, los cuales se revisarán más adelante para el caso de los ligantes orgánicos. Además de su estructura química, una alta viscosidad del ligante en solución proporcionará grandes fuerzas de cohesión. Por último, para que las fuerzas adhesivas en la interfaz sean suficientemente grandes, el ligante debe poder ser dispersado sobre la mayor superficie posible de las partículas del material que se pretende aglomerar [14], siendo esto de gran importancia para la calidad final del aglomerado.

Con el objetivo de comprender mejor cómo se desarrollan los procesos de aglomeración de subproductos mencionados anteriormente, se describirán en un mayor grado de detalle los procesos de pelletización, briqueteado y extrusión.

2.4.1.- Pelletización

La pelletización es un proceso de aglomeración en el cual se obtienen pellets, pequeñas esferas de 10 – 15mm de diámetro [2]. La Figura 2.15 muestra un diagrama del proceso.

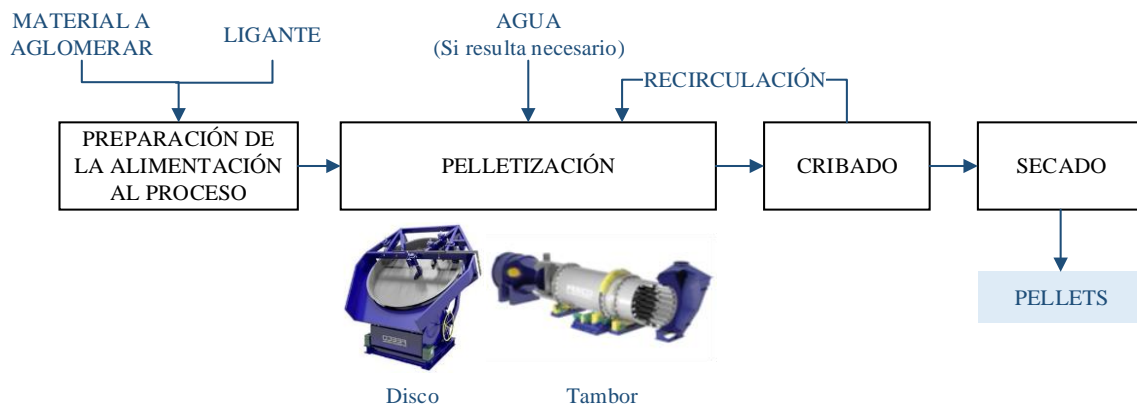


Figura 2.15.- Proceso de pelletización [15].

En primer lugar, los materiales a aglomerar son acondicionados, dosificados y mezclados junto con los ligantes necesarios para que se lleve a cabo su aglomeración. Entonces, se introduce esta mezcla en el tambor o en el disco de pelletización y da comienzo la etapa de nucleación. En caso de que dicha mezcla contenga una humedad menor de la requerida para la formación de los pellets, una vez dentro del disco o del tambor de pelletización, se añade agua mediante el uso de unos difusores.

Durante la etapa de nucleación se empiezan a formar pequeñas esferas y, a medida que los materiales alimentados se empiezan a agregar en la superficie de estas esferas, éstas crecen hasta adquirir un tamaño mayor, formando los denominados pellets crudos o en verde.

Entonces, se realiza una criba: los pellets de menos de 10 mm de diámetro o mayores de 15 mm se desagregan y se reintroducen en el proceso de pelletización, mientras que los pellets con diámetro entre 10 y 15 mm continúan hacia la última etapa, la etapa de endurecimiento. En esta etapa, en función de las características del pellet crudo y de la aplicación que se les quiera dar, los pellets pueden ser endurecidos mediante un proceso de cocción en horno [12]

o simplemente se dejan madurar a temperatura ambiente con el objetivo de que se elimine la humedad y adquieran las propiedades físicas y metalúrgicas adecuadas.

Una distribución uniforme del ligante, así como de la humedad en la alimentación al proceso es decisiva para mejorar las características de los pellets, especialmente para evitar la formación de aglomerados no deseados antes de la formación del pellet [12].

2.4.2.- Briqueteado

El briqueteado es un proceso de aglomeración que consiste en la formación de briquetas (aglomerados con forma similar a una almohada) mediante prensado en frío. La Figura 2.16 a continuación muestra un esquema del proceso.

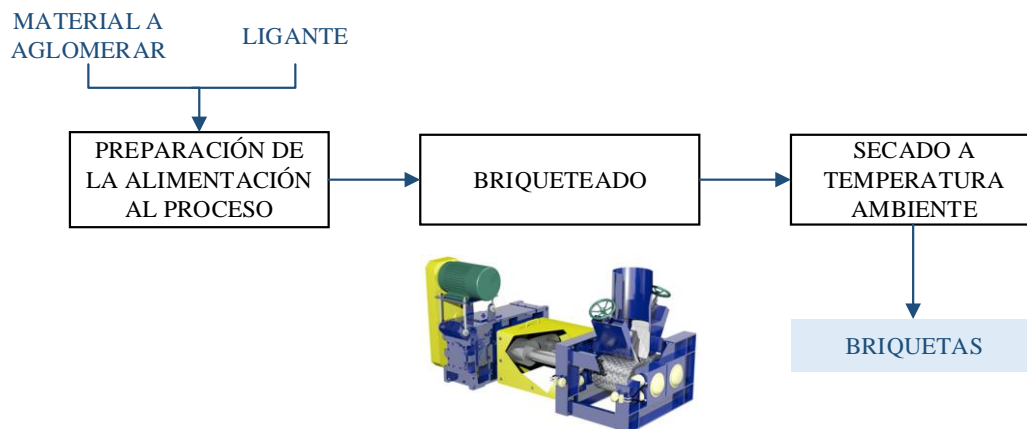


Figura 2.16.- Proceso de briqueteado [15].

Los finos del material a aglomerar junto con la dosis adecuada de ligante son mezclados y alimentados entre dos rodillos que giran a la misma velocidad, pero en sentido contrario. Cada rodillo tiene la forma de la mitad de una briqueta, de forma que, cuando los rodillos se juntan, ambas mitades se unen presionando el material que, de este modo, adquiere la forma de una briqueta completa [16]. Las briquetas fabricadas se secan a temperatura ambiente y, antes de ser enviadas a planta para su reutilización, se realiza una criba de los finos generados, que volverán a ser reintroducidos en el proceso de briqueteado.

Puesto que el prensado se realiza en frío, son necesarias prensas de gran potencia, capaces de generar elevadas presiones [2]. Mediante el briqueteado se consiguen briquetas de tamaño, peso, composición y forma uniformes.

2.4.3.- Extrusión

Al igual que en el proceso de briqueteado, en la extrusión se consigue aglomerar el material mediante la aplicación de presión. La Figura 2.17 muestra un esquema del proceso.

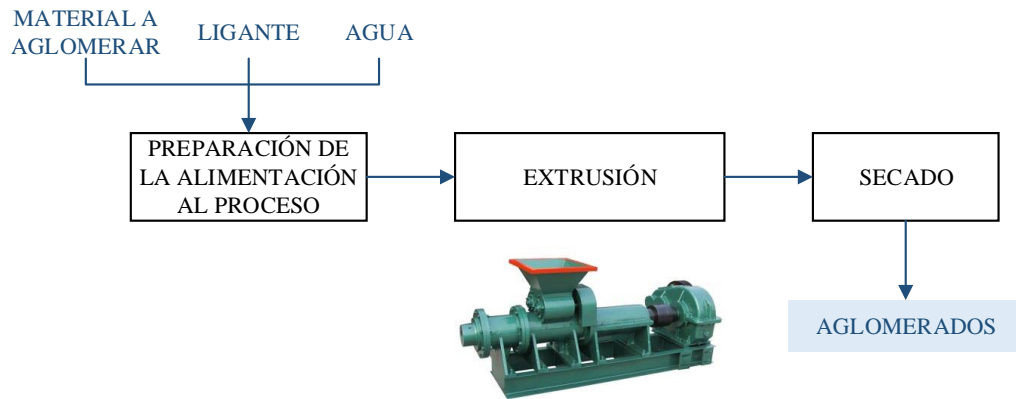


Figura 2.17.- Proceso de extrusión.

En este proceso, la mezcla homogénea de material que se pretende aglomerar junto con las dosis adecuadas de ligante y de agua se introducen a través de una tolva en la máquina de extrusión. Mediante un tornillo sin fin se empuja la mezcla a través de unos orificios circulares, de manera que sale el material compactado en forma de aglomerados cilíndricos. Puesto que en este proceso se obtienen productos con mayor humedad que en el briqueteado, estos necesitan ser secados artificialmente, por ejemplo, mediante un secador rotatorio o ‘trommel’ [17].

Por último, tal y como se indicó en el proceso de briqueteado, en el proceso de extrusión también es necesario hacer una criba de los finos generados, para evitar su envío a planta.

Aunque los tres procesos son válidos para la aglomeración de los subproductos objeto de estudio, se ha seleccionado el proceso de briqueteado, puesto que se trata de la práctica habitual en ambas plantas A y B para su carga en el convertidor de acería.

3. REQUISITOS DEL PROCESO

Con el objetivo de aprovechar el hierro metálico contenido en altos porcentajes en los lodos gruesos de acería y en los lodos aceitosos, tal y como se ha mencionado anteriormente, se va a someter a dichos subproductos a un proceso de briqueteado para su posterior reutilización en el horno del convertidor de la acería.

A continuación, se describirán las propiedades que deben tener las briquetas fabricadas para que puedan ser cargadas en el convertidor, así como los requisitos que debe cumplir un ligante para que el briqueteado se pueda llevar a cabo con éxito.

3.1.- REQUISITOS DE LAS BRIQUETAS

Para que las briquetas fabricadas puedan ser reutilizadas en el convertidor de la acería es necesario que cumplan con los requisitos que se exigen para el resto de las materias primas que se emplean en el proceso. Por ello, las especificaciones que deben cumplir los minerales de hierro, el sinter o el cok son también aplicables a las briquetas. De lo contrario, el rendimiento del proceso disminuiría y la reutilización de las briquetas no resultaría rentable.

3.1.1.- Propiedades mecánicas

Existen tres ensayos principales para la determinación de las propiedades mecánicas en frío de las materias primas que se introducen en el proceso: la resistencia mecánica, la resistencia a la caída y resistencia a la abrasión, y la resistencia a la rotura.

En primer lugar, para la determinación de la resistencia mecánica del cok se emplean los índices MICUM e IRSID definidos en la ISO 556-1980 [18] y la UNE 32018 [19]. Ambos ensayos tratan de medir la degradación granulométrica que experimenta un producto cuando es sometido a una rotación dentro de un tambor que gira a velocidad constante. En primer lugar, antes de comenzar los ensayos, es necesario preparar una muestra de ensayo de 200 kg y dividirla en cuatro porciones de 50 kg, cada una con la misma distribución de tamaños.

En el ensayo MICUM se introduce una de las porciones de la muestra de ensayo en el tambor, el cual comienza a girar dando 100 vueltas a una velocidad de 25 rpm, transcurridas las

cuales, se detiene. A continuación, se deja transcurrir un minuto para que el polvo se deposite en el interior y se descarga el contenido del tambor en una bandeja. Por último, se realiza el análisis granulométrico del producto recogido, empleando tamices de malla de 10, 20 y 40 mm, y se mide el porcentaje en peso de cada fracción con respecto a la masa total.

En cuanto al ensayo IRSID, se puede llevar a cabo de dos maneras: como una continuación del ensayo MICUM o de forma directa. En el primer caso, una vez finalizado el ensayo MICUM, se vuelve a introducir el producto en el tambor, dónde se somete a otras 400 vueltas a la misma velocidad y, por último, se realiza un cribado y, de nuevo, la determinación de las fracciones. En el segundo caso, que se emplea cuando sólo se desea obtener el índice IRSID, se llevan a cabo los mismos pasos que en el Ensayo MICUM, pero girando el tambor durante 500 vueltas en vez de 100 vueltas.

Por otro lado, el método para la evaluación de la resistencia a la caída y a la abrasión de los minerales de hierro, denominado '*Tumble test*', queda definido en la ISO 3271:2007 [20], mediante los índices de caída y de abrasión. Para la realización del ensayo, en primer lugar, se prepara una muestra de 60 kg, constituida por pellets de tamaño mayor de 6.3 mm y menor de 40 mm de diámetro, y se divide en cuatro porciones de 15 kg, que son las que se emplearán para la determinación de la resistencia a la caída y la abrasión. El ensayo es similar a los ensayos MICUM e IRSID, sólo que en este caso el tambor gira 200 vueltas y la luz de los tamices que se emplean es de 6.30 mm y 500 μm . El índice de caída se determinará como el porcentaje de la masa total de la muestra que es mayor que 6.30 mm y, el índice de abrasión será el porcentaje en masa del material menor que 500 μm .

Por último, para la determinación de la resistencia a la rotura ante la caída del material se emplea el método descrito en la JIS M8711-1987 [21], denominado '*Shatter test*', mediante el índice de resistencia a la rotura. Para calcularlo, se prepara una muestra de 20 kg de material entre 10 y 50 mm de tamaño. A continuación, se introduce dicha muestra en una caja de acero, que se eleva hasta una altura de 2 m. Entonces, se abren las puertas que se encuentran en el inferior de la caja, y se deja caer el material sobre una plataforma de acero. Se realizan estos pasos 4 veces consecutivas y, finalmente, se pasa la muestra por un tamiz de luz de 10 mm. El porcentaje de masa mayor de 10 mm es el índice de resistencia a la rotura.

De los tres ensayos mencionados, es de especial interés este último, el ‘*Shatter test*’, puesto que es el que se lleva a cabo habitualmente en ambas plantas para determinar si las briquetas que se pretenden reintroducir en el convertidor de la acería tienen unas propiedades mecánicas suficientemente buenas para ello. Con este propósito, está establecido un índice de resistencia a la rotura de, como mínimo, un 70%.

3.1.2.- Composición química

Desde el punto de vista de la composición química de las briquetas, al igual que ocurre con los minerales de hierro, la presencia de impurezas puede afectar gravemente a la calidad del arrabio y del acero, al proceso de producción en general y a la vida útil de las instalaciones. A este respecto, los principales elementos perjudiciales para el proceso de producción del acero se muestran a continuación en la Tabla 3.1, así como sus efectos y los límites en los que se deben introducir.

Tabla 3.1.- Impurezas en los minerales de hierro y sus efectos en el proceso [2], [22], [23], [24], [25].

Elemento/ Compuesto	Límite Máximo	Etapas del Proceso	Efectos
SiO ₂	< 4%	Sinterización Horno Alto	Aumento de la cantidad necesaria de fundentes y combustibles. Formación de mayor cantidad de escoria (reducción del rendimiento).
Al ₂ O ₃	0.8 – 1.5%	Sinterización Horno Alto	Aumento de la viscosidad de la escoria (dificulta su evacuación).
Álcalis (K ₂ O, Na ₂ O)	< 0.02%	Sinterización Pelletización Horno Alto	Generación de atascos en la columna por la cual desciende el material (disminución de la producción). Corrosión de los ladrillos de carbono.
P	0.04 – 0.05%	Producción metal	Disminución de la ductilidad y la tenacidad en frío del acero.
S	< 0.01%	Sinterización Horno Alto Producción Acero	Generación de grietas en el acero durante su solidificación. Disminución del punto de fusión y de la resistencia y la cohesión del acero. Mayor fragilidad del acero.
Zn	< 100ppm	Sinterización Horno Alto	Coste de eliminación del Zn contenido en los polvos. Generación de incrustaciones corrosivas (ZnO).
Pb	< 100ppm	Sinterización Horno Alto	Coste de eliminación del Pb contenido en los polvos. Filtración (líquido) y generación de incrustaciones (vapor) en el refractario. Alta toxicidad.

La impureza más común en el mineral de hierro es el silicio. El silicio, debido a su afinidad con el oxígeno, en las condiciones habituales de temperatura del horno alto, permanece en su mayoría en forma de óxido (SiO_2) en la escoria [2], por lo que es fácilmente extraíble del proceso. No obstante, la introducción de cantidades excesivas de silicio provoca la necesidad de emplear cantidades extra de fundentes y combustibles para poder escorificarlo [23], además de incrementar la cantidad de escoria y, por tanto, reducir el rendimiento del proceso.

La alúmina (Al_2O_3) es la impureza que se encuentra en mayor cantidad en el mineral de hierro después del silicio. Se trata de un elemento difícil de reducir, por lo que no pasa al arrabio. Sin embargo, su presencia en la escoria aumenta su viscosidad, dificultando su evacuación [23], por lo que el contenido de alúmina en el mineral debe de ser controlado.

Por otro lado, los álcalis (K_2O , Na_2O), aunque pasan en su mayoría a la escoria, una parte de ellos es reciclada dentro del horno, dando lugar a volatilizaciones y reducciones sucesivas que intervienen en el proceso de una manera desfavorable. Los álcalis atacan el refractario del horno, acumulándose sobre las zonas frías de las paredes, atascando la columna descendente de material y disminuyendo la producción [2]. Además, se pueden llegar a introducir en los poros de los ladrillos de carbono del horno en forma de vapores que, al condensarse, provocan la corrosión de estos [23].

El fósforo, en cambio, al ser un elemento fácilmente reducible, pasa en su mayoría al baño metálico del horno alto [2]. Es un elemento muy perjudicial para el acero y debe ser eliminado al máximo dentro de lo posible. Por ello, se debe reducir al mínimo la entrada de fósforo en el proceso. El fósforo disminuye la ductilidad y la tenacidad en frío del acero, lo que provoca que aceros con alto contenido en fósforo puedan ser frágiles a temperaturas próximas a la ambiente [23].

Otro elemento perjudicial para el acero es el azufre. Su reducción en el horno alto es parcial, de modo que parte de este pasa al arrabio y parte a la escoria. Aunque parte del azufre se volatiliza por oxidación y formación de SO_2 y SO_3 , esto ocurre en una proporción muy pequeña, ya que el azufre tiende a formar sulfuro de hierro (FeS) [2], que pasa al arrabio, por lo que el gas de horno alto no contiene prácticamente SO_2 ni SO_3 . El azufre genera grietas en caliente en el acero durante su solidificación. Además, disminuye su punto de fusión, su resistencia y cohesión y aumenta su fragilidad [22], por lo que se debe de tratar de reducir al máximo la cantidad de azufre que entra al proceso para impedir que pase al acero.

Por último, el zinc y el plomo también se pueden considerar perjudiciales para el proceso de producción de acero. Parte del zinc que se introduce en el horno alto es arrastrado por los gases del tragante, dificultando y encareciendo su depuración, y el resto cae hacia el horno de nuevo [2], dando lugar a incrustaciones corrosivas (ZnO), que pueden llegar a causar la deformación del revestimiento [25].

En cuanto al plomo, este elemento se presenta en tres formas en el horno alto: como vapor, como polvo y en estado líquido. La parte del plomo que se vaporiza constituye un peligro para las paredes del horno puesto que, al depositarse sobre el refractario, puede provocar incrustaciones que lo deterioren [2]. Por otro lado, el plomo que sale del horno en forma de polvo junto con los gases de escape, al igual que en el caso del zinc, dificulta y encarece la depuración de la corriente gaseosa. Por último, el plomo que no se vaporiza no se incorpora al arrabio, sino que, a causa de su elevada densidad, se deposita por debajo de éste. Este plomo líquido puede resultar muy peligroso, ya que se puede introducir por las juntas de las paredes del horno, filtrándose entre el refractario e incluso por debajo de él, pudiendo llegar incluso a levantarlo y causa una avería muy peligrosa [2]. Además, el plomo es un elemento altamente tóxico por lo que se debe tener mucho cuidado al operar con él.

Finalmente, es necesario tener en cuenta que para que se lleve a cabo de manera adecuada el proceso de producción de arrabio en el horno alto, los materiales aportadores de hierro que se introducen en este, deben de tener un contenido mínimo en hierro metálico y un contenido máximo en humedad. Los criterios que siguen ambas plantas estudiadas implican que dichos materiales contengan al menos un 45% en hierro metálico y una humedad inferior al 3%, preferiblemente inferior al 1%.

3.2.- REQUISITOS DE LOS LIGANTES

La elección del ligante es crucial para el proceso de briqueteado, ya que es necesario para que la briqueta genere la menor cantidad de polvo posible durante su manejo, transporte y carga en el convertidor, evitando que se produzcan emisiones no deseadas al medio ambiente y que se introduzca un exceso de finos en el convertidor.

En primer lugar, en cuanto a su composición química, un ligante apropiado para el briqueteado de lodos gruesos de acería no debe introducir en la briqueta componentes que

influyen negativamente al proceso de fabricación del acero o que aumenten la producción de contaminantes [26], tales como los mencionados en el apartado anterior. Las impurezas más comunes que pueden introducir los ligantes son silicio, alúmina, fósforo y azufre [13], por lo que es preciso prestar especial atención al contenido de estas en el ligante.

En cuanto a propiedades mecánicas, el ligante debe de ser capaz de mantener sus propiedades aglomerantes una vez la briqueta se haya secado, proporcionando las características mecánicas requeridas para su transporte, manejo y su reutilización en el horno alto o en convertidor (resistencia mecánica, resistencia a la caída y a la abrasión y resistencia a la rotura).

Mediante el briqueteado de los lodos gruesos de acería se pretende aprovechar “residuos” que, de otra forma, serían enviados a vertedero, por tanto, no sólo se espera conseguir una mejora en el rendimiento del proceso, sino una mejora medioambiental. Es por ello, que estos dos primeros requisitos se pueden considerar indispensables a la hora de seleccionar un ligante óptimo.

Por otro lado, no debe suponer una gran dificultad la adición, mezcla y dispersión del ligante con los subproductos a aglomerar. Es muy importante que el ligante se mezcle adecuadamente con estos, de lo contrario, el producto final será muy heterogéneo. Por tanto, si el ligante y los subproductos que se pretenden aglomerar se mezclan fácilmente, no será necesario invertir en nuevos equipos más sofisticados para realizar la operación de mezclado.

Por último, es necesario que el ligante sea asequible económicamente.

4. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS: LIGANTES PARA LA AGLOMERACION DE MINERALES DE HIERRO

Los ligantes pueden dividirse en inorgánicos, orgánicos y ligantes combinados. A continuación, se van a revisar los ligantes más importantes para su uso en la pelletización de minerales de hierro, puesto que la mayor parte de la bibliografía que se ha encontrado se basa en este proceso. Se describirá a modo general la química de cada ligante y sus características y se discutirán sus ventajas e inconvenientes. Aunque el proceso de estudio es el briqueteado y no la pelletización, este análisis puede servir como punto de partida para la investigación.

4.1.- LIGANTES INORGÁNICOS

Los principales ligantes inorgánicos son la bentonita, el cemento y el silicato de sodio, siendo la bentonita el ligante inorgánico por excelencia utilizado en la pelletización de los minerales de hierro.

4.1.1.- Bentonita

La bentonita es un tipo de arcilla constituida mayoritariamente por minerales del tipo de la montmorillonita, minerales formados por dos capas tetraédricas (Si – O) separadas por una capa octaédrica (Al – O – OH) [27]. Estas capas están ligadas débilmente entre sí y pueden ser separadas cuando se humedecen, es decir, son fácilmente dispersables en agua. Cuando la bentonita se seca, las capas pueden unirse mecánicamente o electrostáticamente a otras superficies, actuando como un ligante [28].

La estructura de la bentonita se muestra a continuación en la Figura 4.1.

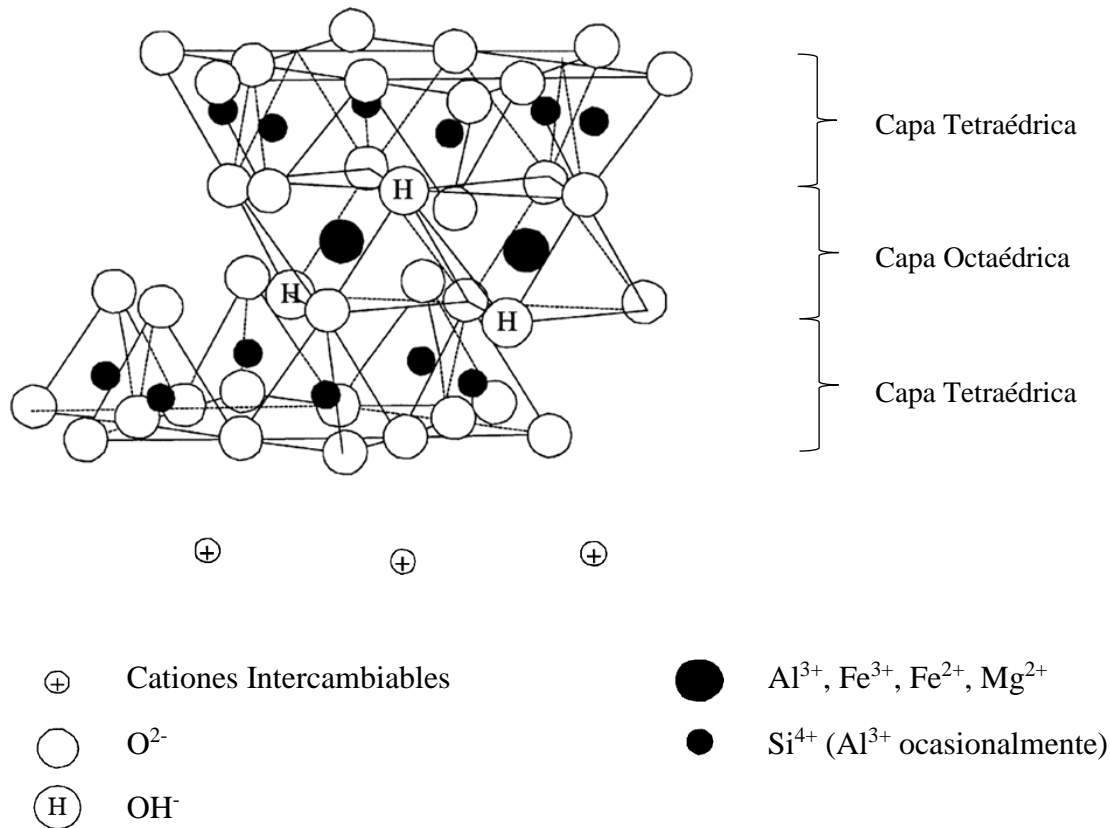


Figura 4.1.- Estructura de la bentonita [28].

La sustitución del Si tetravalente de la capa tetraédrica por un ion divalente Fe^{2+} o Mg^{2+} se conoce como sustitución isomórfica, la cual provoca un déficit de cargas positivas, por lo que se requiere la adsorción de cationes intercambiables (Na^+ y Ca^{2+} normalmente) para equilibrar las cargas [27]. Cuando se combina con agua, la hidratación de estos cationes intercambiables hace que la bentonita se expanda, transformándose en una matriz que une las partículas de hierro [29]. La capacidad de expansión de montmorillonita varía dependiendo del tipo de catión intercambiable. Los iones de calcio tienden a interactuar más con los aluminosilicatos, lo que los hace menos propensos a la hidratación [28]. Es decir, la montmorillonita de sodio se hidrata y se expande más fácilmente que la bentonita de calcio cuando estas se ponen en contacto con agua.

La expansión de la bentonita cuando se pone en contacto con agua tiene tres efectos que son de interés en el proceso de pelletización [28]:

- 1) Absorbe agua, lo cual facilita el control de la humedad de los pellets. Además, aumenta la viscosidad del fluido entre los granos de mineral en el pellet, volviéndolos plásticos y redondos y facilitando su manejo y transporte.

- 2) La bentonita expandida se puede dispersar fácilmente en el material que se pretende aglomerar. Durante el secado, las partículas de la arcilla se unen a los granos de mineral y entre ellas, proporcionando al pellet seco una excelente resistencia a la compresión.
- 3) Tanto el sodio como el calcio actúan como agentes fundentes.

Las dosis requeridas de bentonita para la pelletización de minerales de hierro varían entre el 0.5 y el 1.0% del peso total del mineral de hierro a aglomerar [29]. Mediante su uso, se consiguen pellets con muy buenas propiedades mecánicas y, además, se trata de un ligante del cual se puede disponer con facilidad y a bajo coste [30].

4.1.2.- Cemento

Los otros ligantes inorgánicos más empleados en la pelletización de minerales de hierro, son los ligantes de cemento, los cuales reaccionan químicamente con el agua para formar cemento hidratado. Su acción aglomerante no es reversible, ya que cuando el cemento se endurece aún contiene el agua que se empleó para hidratarlo. Muchos cementos contienen componentes de calcio y, por tanto, los pellets ligados con cementos pueden actuar como fundentes. En comparación con la bentonita, su principal desventaja es que requieren cierto tiempo (horas) para endurecer completamente el pellet. No obstante, existen compuestos que pueden actuar como aceleradores de este proceso de endurecimiento como, por ejemplo, el cloruro de calcio. Añadiendo un 2% de CaCl_2 al cemento se duplica la dureza que se obtendría en condiciones normales en un día [28]. Dosis mayores aumentan la velocidad y, aunque para la fabricación de hormigón una gran cantidad de cloruro de calcio puede afectar negativamente a las propiedades estructurales de este, en el caso de la pelletización no es un factor importante.

El ligante de cemento más común es el cemento Portland, el cual reacciona con agua para formar una mezcla que liga las partículas. Su composición típica se muestra en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1.- Composición típica del cemento de Portland [28].

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Otros ¹
67%	22%	5%	3%	3%

¹ Otros componentes de diversos tipos dependiendo de la función que se le quiera dar al cemento.

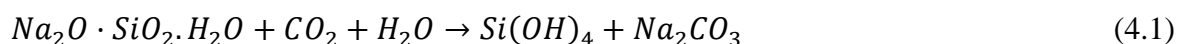
La dosis habitual necesaria de cemento Portland para la pelletización de minerales de hierro es de aproximadamente un 10% o más. Si se emplea cemento Portland con las características químicas apropiadas y con una alta área superficial, se puede disminuir la dosis hasta entre un 4 y un 6% [31].

Aparte de los cementos Portland, son de interés los cementos de aluminato de calcio, los cuales pueden contener menos de un 0.4% de SiO₂, con lo que se consigue minimizar el contenido en silicio del pellet. Además, estos cementos se pueden endurecer en 24 horas lo mismo que el cemento Portland en 28 días, e incluso se pueden endurecer más rápido si se les añade cal hidratada [28]. No obstante, se necesita una gran cantidad de agua para que el proceso se lleve a cabo adecuadamente y sólo son efectivos para pellets de pequeño tamaño, ya que sus las propiedades empeoran al aumentar el tamaño del pellet.

4.1.3.- Silicatos de sodio

Por último, otros ligantes inorgánicos importantes en la pelletización de minerales de hierro son los silicatos de sodio. Los silicatos de sodio son materiales que se obtienen como resultado de la fundición de arenas de cuarzo con carbonato de sodio y la posterior disolución del cristal fundido resultante con agua a alta presión. Mediante este proceso, es posible obtener una gran variedad de ácidos silícicos solubles en agua, teniendo en cuenta que las propiedades de los silicatos de sodio varían en función del ratio SiO₂/Na₂O [28]. De forma general, para hacer referencia a los silicatos de sodio, se emplea la fórmula Na₂O·SiO₂·xH₂O, teniendo en cuenta que dicho ratio puede variar.

Los silicatos de sodio ejercen su función como ligantes mediante la precipitación de gel de sílice, silicato de sodio y ácidos silícicos [32]. La maduración del silicato de sodio es resultado de la polimerización del ácido polisilícico, la cual se puede producir mediante el calentamiento o deshidratación del silicato de sodio, o por su exposición a dióxido de carbono [28], en cuyo caso se llevaría a cabo la siguiente reacción (4.1):



Mediante el empleo de dosis de aproximadamente un 1 % de silicato de sodio con un ratio SiO₂/Na₂O de 3.21 se obtienen pellets con unas propiedades mecánicas similares a las que

se consiguen con una misma dosis de bentonita, pudiéndose prácticamente duplicar dichos resultados si se aumenta la dosis a un 4% [32].

Recientemente se han llevado a cabo investigaciones sobre la posible adición de nanomateriales con base de carbono al silicato de sodio líquido para la formación de mini-pellets de finos de mineral de hierro. Estos aditivos, no contienen elementos perjudiciales para el proceso de obtención del acero y, mediante su uso, se consigue incrementar la resistencia mecánica del ligante, reforzándolo. En un estudio se utilizaron nanotubos de carbón (NC7000 de Nanocyl) y nano-plaquetas de grafito (HC11 de Nacional de Grafito) como aditivos, y silicato de sodio con un ratio $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ de 2.15 como ligante. Los resultados mostraron que la dosis óptima de nanomateriales es del 0.1 % y que se mejoraban notablemente los resultados si tras mezclar los aditivos con el ligante, se dejaba reposar la mezcla durante un periodo de 15 días. La incorporación de estos aditivos al silicato de sodio proporciona aglomerados con una resistencia a la compresión un 285% mayor que cuando se emplea solamente silicato de sodio [33].

4.1.4.- Ventajas y desventajas de los ligantes inorgánicos

En general los ligantes inorgánicos proporcionan muy buenas propiedades mecánicas a los pellets (resistencia a la caída, resistencia a la compresión y estabilidad térmica) [34], por ello, su uso en la pelletización de minerales de hierro está muy extendido. No obstante, añaden al pellet cantidades significativas de compuestos contaminantes, como SiO_2 y Al_2O_3 que, como se ha mencionado anteriormente, son elementos que perjudican al rendimiento del proceso de obtención de acero, incrementando la cantidad de escoria que se forma en el horno [35]. Por otro lado, aunque se emplean en dosis mucho mayores en comparación con otros ligantes, esto se ve compensado por su menor precio y porque al emplear una mayor cantidad de ligante se facilita la mezcla con el material a aglomerar.

4.2.- LIGANTES ORGÁNICOS

Los ligantes inorgánicos, como se ha mencionado en el apartado anterior, contienen importantes cantidades de silicio. La bentonita, el ligante inorgánico principal en la pelletización de minerales de hierro, contiene aproximadamente un 60% [14] de silicio y el

cemento de Portland un 22% [28]. Con el objetivo de reducir el contenido en silicio y otros elementos contaminantes que introducen estos ligantes en el pellet, en los últimos años se ha extendido el uso de los denominados ligantes orgánicos. Estos ligantes comienzan a evaporarse a temperaturas relativamente bajas, aproximadamente 300°C [8], por lo que no dejan cenizas en la estructura del pellet. Gracias a esta característica, se consigue reducir el contenido en silicio de este y, como consecuencia, reducir la cantidad de escoria que se forma en el horno y aumentar el rendimiento del proceso.

Las propiedades de unión de los ligantes orgánicos varían dependiendo de su estructura molecular, por lo que resulta interesante conocer qué elementos deben contener en su estructura para poder desempeñar su función de forma óptima. La estructura ideal de un ligante orgánico se muestra a continuación en la Figura 4.2. Tal y como se puede observar, esta consta de los siguientes elementos [13]:

- Grupos polares (X) como, por ejemplo, $-\text{COO}^-$, $-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$, $-\text{NO}_2$, capaces de reaccionar con los principales iones que se encuentran en la superficie del hierro, Fe^{3+} y Fe^{2+} . Los grupos polares promueven la dispersión y la adhesión del ligante a las partículas de hierro. Estudios sobre el potencial de ionización y la afinidad de electrones concluyeron que el carboxilo es el grupo polar que más fácilmente reacciona con los iones de hierro [13] y, por tanto, el grupo polar óptimo.
- Grupos hidrófilos (Y). Estos grupos afectan a la afinidad de los grupos polares con la superficie de los minerales de hierro. Los grupos hidrófilos que contenga el ligante deberán ser donantes de electrones (como, por ejemplo $-\text{NH}_2$, $-\text{OH}$) ya que, de lo contrario, reducirán dicha afinidad.
- Esqueleto formado por una cadena orgánica fuerte y resistente al calor (P) con cierto grado de polimerización (n). Para que el aglomerado tenga una buena resistencia mecánica, así como estabilidad térmica, el esqueleto molecular del ligante debe contener el mayor número posible de enlaces dobles y triples, ya que vuelven la molécula más rígida y resistente. Además, la incorporación de anillos aromáticos mejora la estabilidad térmica.

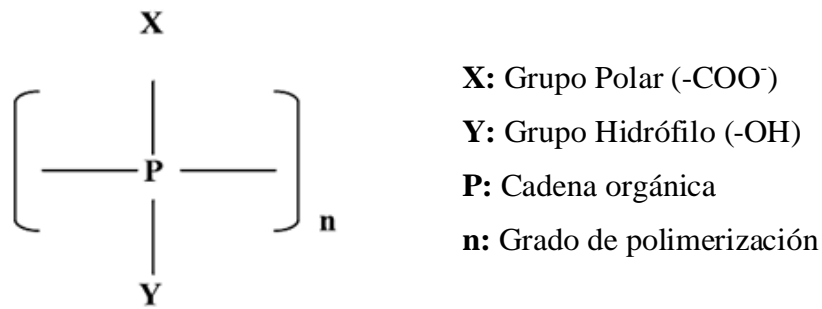


Figura 4.2.- Estructura ideal de una molécula de un ligante orgánico [13].

Tomando como referencia esta estructura ideal, existen multitud de ligantes orgánicos que pueden ser empleados en la pelletización de minerales de hierro, desde compuestos sintéticos como acrilamidas, compuestos naturales como la celulosa o el almidón y sus derivados, hasta subproductos o residuos de otras industrias como por ejemplo las melazas de la industria azucarera o residuos de la industria papelera. A continuación, se revisarán los ligantes orgánicos más importantes.

4.2.1.- Carboximetilcelulosa

Uno de los principales ligantes orgánicos que se emplea en la pelletización de minerales de hierro es la carboximetilcelulosa (CMC), un compuesto orgánico derivado de la celulosa. La celulosa ((C₆H₁₀O₅)_n) es un polímero natural formado por la unión de moléculas de β-glucosa que, al hidrolizarse completamente, se convierte en glucosa (C₆H₁₂O₆) [36].

Para la obtención de la CMC, la celulosa es sometida a un proceso de digestión junto con hidróxido de sodio y se hace reaccionar con ácido cloroacético [8]. La Figura 4.3 a continuación muestra la estructura de la CMC que se obtiene.

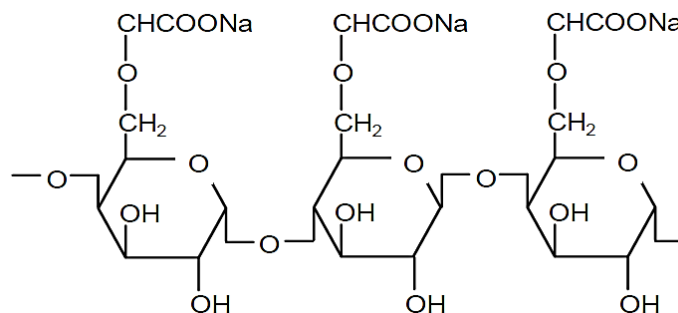


Figura 4.3.- Estructura de la carboximetilcelulosa [8].

Tanto la celulosa como la CMC pueden ser modificadas con el objetivo de controlar su solubilidad y de mejorar sus propiedades como ligante de minerales de hierro en el proceso de pelletización.

La celulosa sin modificar no es soluble en agua y, a lo largo de su estructura, tan sólo cuenta con grupos hidroxilo (-OH) capaces de unirse al hierro [14]. A causa de ello, durante el proceso de fabricación de la CMC, algunos de estos grupos son reemplazados por grupos carboximetilos de sodio (-CH₂COONa) [8]. De esta forma no sólo se consigue que el polímero sea soluble en agua, sino que además se introducen grupos carboxilo [14], ideales para su unión con el hierro. En cualquier caso, aunque la CMC contiene los grupos funcionales que se consideran óptimos para su unión con el hierro, su esqueleto está formado por azúcares unidos entre sí por enlaces simples [14], por lo que la molécula no es muy resistente.

En general, con dosis muy pequeñas de CMC como ligante se consiguen pellets de buena calidad. Con aproximadamente un 0.1% de CMC se pueden obtener pellets crudos con propiedades similares a las obtenidas con un 0.5% de bentonita [14]. No obstante, los resultados pueden variar en función de la fuente de celulosa que se haya empleado para la obtención de la CMC [8]. Por ejemplo, si se emplea madera (40 – 50% de celulosa), se obtendría CMC con una viscosidad media, mientras que si se emplea algodón (90 – 99% de celulosa), se conseguiría CMC de alta viscosidad [14].

Numerosos ligantes basados en celulosa y en CMC han demostrado ser apropiados para la pelletización de minerales de hierro y algunos han sido comercializados. Uno de los ligantes comerciales basados en CMC más empleado en procesos de pelletización de minerales de hierro es Peridur®, desarrollado en 1980 por la empresa AkzoNobel (Tabla 4.2).

Tabla 4.2.- Ligante Peridur® de AkzoNobel [37].

	DESCRIPCIÓN	DOSIS	SECADO	OBSERVACIONES
Peridur	Carboximetilcelulosa de sodio	0.02 – 0.05 %	No se especifica.	Aumenta la resistencia a la compresión tanto del aglomerado crudo como tras el secado. Mayor porosidad, temperatura de fusión y reducibilidad y menor contenido en Feo del pellet.

Peridur® es un ligante orgánico diseñado para la aglomeración de minerales de hierro. Mediante el uso de dosis de entre un 0.0044 – 0.44% de este ligante [38], siendo la dosis habitual de entre el 0.02 y el 0.05% [37], se pueden obtener pellets crudos de igual o incluso mayor resistencia que los que se obtendrían con dosis mucho mayores de bentonita, lo que compensa su alto precio. Además, aunque se emplee en dosis muy pequeñas, no es necesario utilizar un equipo especial de mezclado para dispersar el ligante sobre el material a aglomerar, ya que, puesto que el ligante es soluble en agua, se puede emplear en solución, facilitando así su mezclado y asegurando una distribución igualitaria del ligante sobre los minerales de hierro [28].

No introduce elementos contaminantes en el pellet como silicio, alúmina, azufre o fósforo, por lo que no sólo se incrementa el rendimiento del proceso, sino que previene la emisión de contaminantes a la atmósfera, ya que los únicos productos que se obtienen mediante su combustión son CO₂ y vapor de agua [37].

Por último, mediante el uso de Peridur® se consiguen diversas mejoras en las propiedades metalúrgicas de los pellets, tales como una mayor porosidad y reducibilidad (debido a la evaporación del ligante durante la etapa de maduración), un menor contenido en FeO (a causa de la estructura más porosa de los pellets, la oxidación de estos es más uniforme y completa) y unas mayores temperaturas de fusión cuando se emplean como materias primas en el horno alto (ya que no introduce los silicatos que se introducen cuando se emplea bentonita) [37].

Otro ligante comercial derivado de la carboximetilcelulosa es el ligante Aqualon™, un ligante orgánico diseñado para la aglomeración de minerales de hierro desarrollado en 1989 por la empresa Aqualon Company. Se puede emplear en dosis de entre un 0.0044 y un 0.44%, preferiblemente entre un 0.022 y un 0.22%, junto con agua (2 – 20%), para su mejor hidratación y dispersión. Mediante el uso de este ligante se proporciona a los pellets una mayor resistencia a la compresión en seco en comparación con otros ligantes orgánicos comerciales [39]. No obstante, además de CMC, contiene tripolifosfato de sodio que, aunque aumenta el rendimiento de del ligante, introduce fósforo en el aglomerado.

4.2.2.- Copolímeros aniónicos de acrilamida

Junto con los ligantes derivados de CMC, los copolímeros aniónicos de acrilamida de base petroquímica son los ligantes orgánicos más empleados en la pelletización de minerales de hierro. Estos ligantes, cuya estructura se muestra en la Figura 4.4, se obtienen mediante la reacción del acrilato de sodio con monómeros de acrilamida bajo condiciones controladas [8].

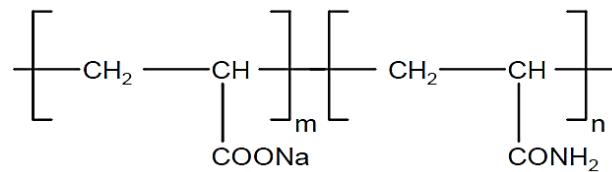


Figura 4.4.- Estructura de los copolímeros aniónicos de poli(acrilamida) [8].

Puesto que su proceso de producción es muy versátil, el polímero puede ser diseñado en función de los requisitos de su aplicación, pudiéndose variar su peso molecular, sus iones y su forma física [8]. Esto supone un gran punto a favor del uso de este tipo de ligantes, ya que en cada planta, tanto el contenido en humedad y el tamaño de partícula de los materiales a aglomerar, como la resistencia mecánica requerida para los pellets finales, son diferentes [14], por lo que el ligante se podrá adaptar a las diferentes condiciones de cada caso.

Como se puede observar en la estructura que se muestra en la Figura 4.4, esta contiene grupos carboxilo, identificados anteriormente como los grupos polares óptimos, los cuales proporcionan una buena adhesión del ligante. Los grupos de amidas (CONH₂) también ayudan en la unión de ambos elementos, pero no se espera de ellos que funcionen tan bien como los carboxilos, además de que son elementos aceptores de electrones y no donantes [14], por lo que disminuyen la afinidad de los grupos polares con la superficie de los minerales de hierro.

El ligante por excelencia dentro de este tipo de ligantes orgánicos es el Alcotac® de BASF. La Tabla 4.3 muestra algunos de los ligantes Alcotac® comercializados por la empresa.

Tabla 4.3.- Distintos ligantes de la marca Alcotac® de BASF [40].

	DESCRIPCIÓN	DOSIS	SECADO DEL AGLOMERADO	OBSERVACIONES
CB6	Ligante polimérico.	0.3 – 2.0 %	No se especifica.	Aumenta la resistencia a la compresión tanto del aglomerado crudo como tras el secado. Necesita un cierto nivel de humedad para trabajar adecuadamente.
CB8	Solución acuosa de poliacrilato de amonio.	0.1 – 1.0 %	No es necesario tratarlo térmicamente para adquirir altas resistencias a la compresión, basta con secarlo a temperatura ambiente durante 24h.	Aumenta la resistencia a la compresión tanto del aglomerado crudo como tras el secado.
CB9	Solución basada en ácido poliacrílico.	0.1 – 1.0 %	No es necesario tratarlo térmicamente para adquirir altas resistencias a la compresión, basta con secarlo a temperatura ambiente durante 24h.	Aumenta la resistencia a la compresión tanto del aglomerado crudo como tras el secado y proporciona alta resistencia al desgaste.
CB10	Solución basada en ácido poliacrílico.	0.1 – 1.0 %	No es necesario tratarlo térmicamente para adquirir altas resistencias a la compresión, basta con secarlo a temperatura ambiente durante 24h.	Aumenta la resistencia a la compresión tanto del aglomerado crudo como tras el secado y proporciona alta resistencia al desgaste.
CB11	Solución basada en ácido poliacrílico.	0.1 – 1.0 %	No es necesario tratarlo térmicamente para adquirir altas resistencias a la compresión, basta con secarlo a temperatura ambiente durante 24h.	Aumenta la resistencia a la compresión tanto del aglomerado crudo como tras el secado y proporciona alta resistencia al desgaste.
FE14	Polímero base para preparación de ligantes para la peletización de minerales de hierro.	0.1 – 0.4 kg/t	No se especifica.	El uso de este polímero en combinación con carbonato de sodio proporciona una mayor resistencia a la compresión del pellet seco.

Los ligantes Alcotac® de BASF están diseñados para reemplazar parcial o totalmente a la bentonita. En general, los ligantes de Alcotac® se emplean en dosis de entre un 0.1% a un 2%, produciendo pellets que no necesitan un tratamiento térmico posterior al proceso de pelletización, sino que es suficiente con dejarlos secar a temperatura ambiente para que

adquieran unas buenas propiedades mecánicas. Mediante su empleo en la aglomeración de minerales de hierro, se obtienen altas resistencias a la compresión tanto del aglomerado crudo como una vez seco y, además, proporcionan una alta resistencia al desgaste [40].

Otro ligante común dentro de este grupo es el Floform®, un ligante aniónico de poliacrilamida fabricado por SNF Floerger capaz de distribuir la humedad más igualitariamente que la bentonita [14] y que puede reemplazarla empleándose tan solo 0.20 kg de ligante por tonelada de material que entra al proceso de aglomeración, por lo que aumenta el contenido total de hierro en el pellet en un 0.3 – 0.4% [8].

4.2.3.- Almidón y sus derivados

Además de los copolímeros aniónicos de acrilamida y la CMC, resultan también interesantes los ligantes de almidón y sus derivados. Los almidones son compuestos constituidos por dos tipos de polímeros: 25% de amilosa (molécula lineal y de bajo peso molecular) y 75% de amilopectina (molécula muy ramificada con alto peso molecular) aproximadamente, ambas unidas mediante gránulos insolubles en agua [41]. Se producen a partir de materia vegetal, como maíz, patatas o trigo [28], por lo que son fáciles de producir, y sus propiedades varían dependiendo de la materia prima que se emplee en su fabricación. La estructura de sus dos principales componentes, la amilosa y la amilopectina, se muestra a continuación en la Figura 4.5 y en la Figura 4.6 respectivamente.

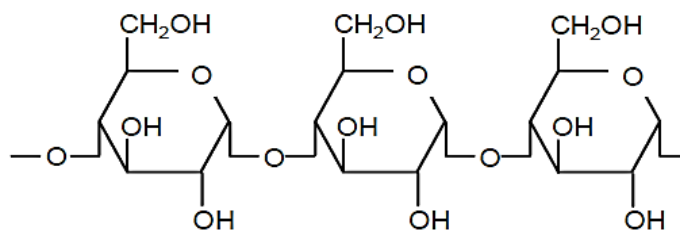


Figura 4.5.- Estructura de la amilosa [8].

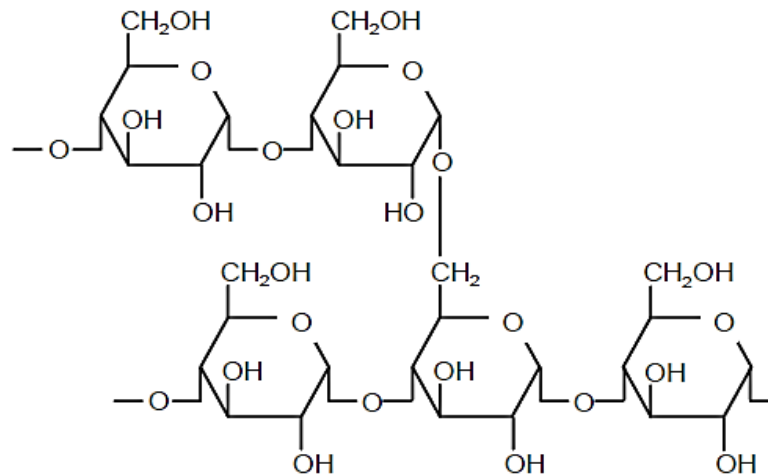


Figura 4.6.- Estructura de la amilopeptina [8].

Su estructura está constituida por azúcares unidos mediante enlaces simples, al igual que la celulosa, pero orientados de forma distinta. A causa de esta diferencia, las moléculas de celulosa suelen ser altamente cristalinas, ya que tienden a tomar una forma lineal mientras que el almidón tiende a formar una espiral. Son además más estables que el almidón, el cual se evapora en un 50% al alcanzar temperaturas de 300°C [14].

El almidón suele ser modificado química o físicamente con el objetivo de debilitar sus gránulos y volverlo más soluble en agua, para que sea capaz de formar geles [41]. Es posible además modificar su estructura para incluir grupos carboxilo y mejorar las propiedades adhesivas del ligante [14]. Las dextrinas (Figura 4.7) son derivados del almidón, y se producen mediante la hidrólisis de este en ácido o mediante el tostado de almidones no modificados [8].

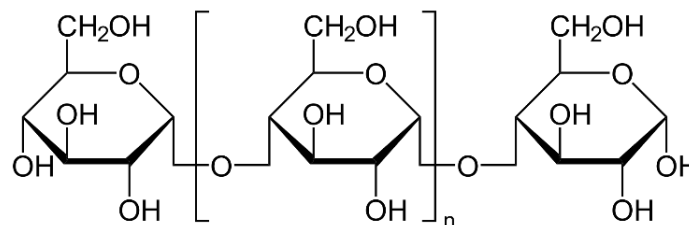


Figura 4.7.- Estructura de las dextrinas [42].

Las dextrinas que se obtienen pueden tener diversas viscosidades y solubilidades en función de la extensión de la reacción durante su descomposición [8], por lo que ambas propiedades pueden controlarse en función de los requisitos del proceso.

El almidón modificado tiene buenas propiedades como ligante y resulta menos costoso que los derivados de la celulosa [14], no obstante, no puede emplearse como sustituto completo de la bentonita, puesto que provoca que las superficies de los pellets sean pegajosas, lo que, una vez seco el pellet, resulta en superficies rugosas [41]. Esto puede producir la abrasión de los pellets durante su transporte y manejo, provocando la formación de polvo. Por ello, se suele emplear en dosis de aproximadamente 0.005% junto con bentonita [14] o junto con resinas o polímeros solubles en agua.

4.2.4.- Humatos

Otro grupo de ligantes orgánicos interesantes para la pelletización de minerales de hierro son los humatos, productos que se obtienen de la descomposición de materia orgánica, pudiéndose encontrar en el suelo, en la turba, en el lignito y en otros materiales [8]. Se desconoce su estructura molecular exacta, aunque se cree que es un compuesto altamente reactivo, amorfo, en el que predominan complejos polielectrolitos aromáticos y grupos carboxilo, hidroxilo y fenólicos a lo largo de su estructura. La Figura 4.8 muestra la estructura de los humatos propuesta por M. Schnitzer y S.U. Khan [43].

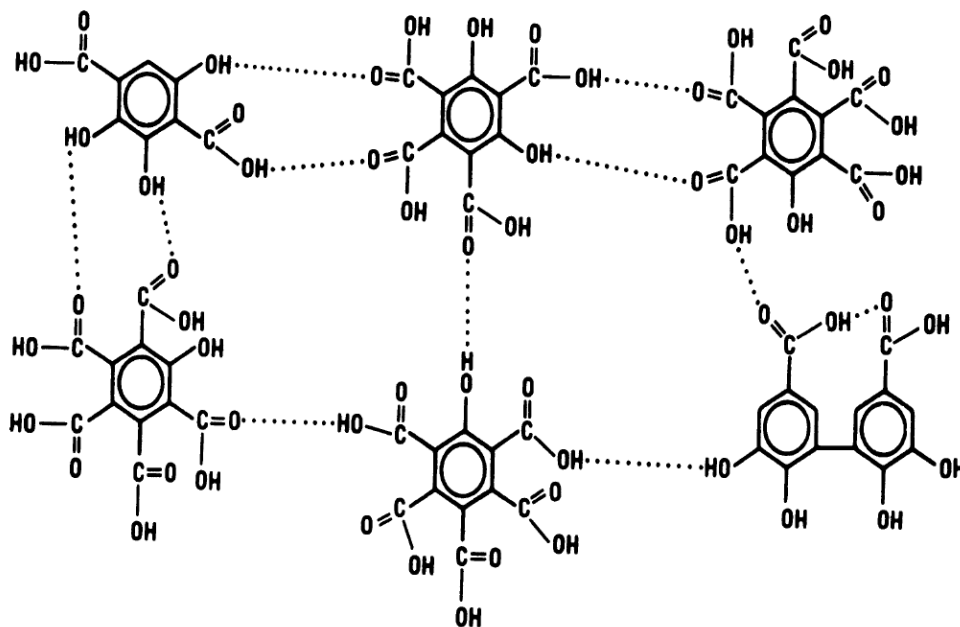


Figura 4.8.- Estructura de los humatos, propuesta por M. Schnitzer y S.U. Khan [43].

Tanto los grupos carboxilo como los hidroxilo, que contienen los humatos en su estructura, como se ha mencionado anteriormente, son muy convenientes en la estructura de un ligante, ya que el carboxilo forma enlaces químicos con la superficie de las partículas de hierro y el hidroxilo mejora la afinidad e incrementa el carácter hidrofílico de las partículas de hierro. Además de dichos grupos, contienen grupos fenólicos, los cuales favorecen la estabilidad térmica del ligante [13].

El principal ligante basado en sustancias húmicas que ha sido patentado y comercializado recibe el nombre de Funa®, desarrollado en una Universidad de China [8]. El ligante Funa® resulta significativamente más barato que los anteriores ligantes orgánicos descritos anteriormente y, mediante su uso en dosis de aproximadamente un 1.5%, es posible obtener pellets con similares o incluso mayores resistencias a la compresión, tanto del pellet seco como húmedo, en comparación con los pellets producidos mediante el empleo de una misma dosis de bentonita [13].

4.2.5.- Gomas de Guar

Otros ligantes orgánicos que se puede emplear en la pelletización de minerales de hierro son las gomas de Guar, polisacáridos no iónicos de alto peso molecular. Están constituidas principalmente por almidones y proteínas y forman dispersiones coloidales extremadamente viscosas en agua empleándose en dosis muy bajas, lo que las hace muy interesantes para la pelletización [8], ya que una alta viscosidad tiende a producir buenos resultados. Como ocurre con la mayoría de ligantes orgánicos, el coste de las gomas de Guar se ve muy afectado por la alta competitividad que existe en su obtención y por los costes de transporte, por lo que es más interesante emplear este tipo de ligantes en zonas cercanas a sus fuentes de obtención, como, por ejemplo, India, Paquistán, Tejas y Oklahoma [14].

La estructura de las gomas de Guar es similar a la del almidón y puede ser fácilmente modificada, por lo que se puede emplear como ligante de diversos materiales (Figura 4.9).

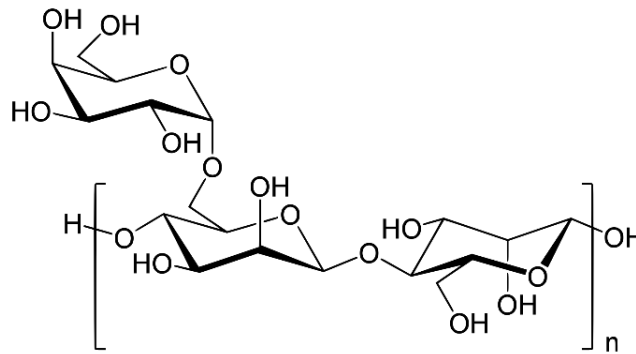


Figura 4.9.- Estructura molecular de las gomas de Guar [44].

Como se puede observar, las gomas de Guar cumplen con varias de las características que se requieren para un ligante orgánico, tales como un alto peso molecular, una estructura ramificada y grupos hidroxilo [14]. Aunque no cuenta con el grupo iónico óptimo, el carboxilo, la abundancia de grupos hidroxilo a lo largo de su cadena molecular las lleva a adsorberse a superficies de óxido hidratado fácilmente, proporcionando propiedades mecánicas superiores a las obtenidas con un 0.5% de bentonita con tan solo un 0.1% de goma de Guar [8]. En cualquier caso, al igual que ocurría con los almidones, las gomas de Guar son fácilmente modificables, por lo que es posible introducir grupos carboxilo en su estructura y mejorar sus propiedades ligantes [14].

4.2.6.- Alquitranes y bitúmenes

Otros ligantes orgánicos que resultan interesantes para la aglomeración de minerales de hierro son los alquitranes y bitúmenes. Se trata de hidrocarburos pesados de bajo coste, disponibles tanto de forma natural como de residuo del refinado de aceite. Son materiales muy adhesivos y que se endurecen cuando se calientan a determinadas temperaturas, no muy altas, debido a la pérdida de volátiles [28]. Al tratarse de compuestos altamente viscosos e hidrofóbicos, es muy difícil mezclarlos con los minerales de hierro que se pretenden aglomerar [14], por lo que la mayoría de las aplicaciones de los ligantes de bitúmenes es en la formación de briquetas, ya que no tiene las características necesarias para la formación de bolas en los tambores o discos de pelletización [28].

Algunas breas sulfuradas solubles en agua se han estudiado como ligantes en la pelletización de minerales de hierro, aunque las propiedades de los pellets crudos como la resistencia a la compresión de los pellets secos resultaron ser inferiores a las obtenidas mediante el empleo

de bentonita [14]. No obstante, un alquitrán soluble en agua fabricado por Kureha Chemical Company se empleó como ligante en dosis de entre 0.2 – 0.4% [28] y las propiedades mecánicas que se midieron fueron comparables e incluso superiores a las que se obtuvieron cuando se empleó bentonita.

4.2.7.- Residuos orgánicos

Por último, es posible también emplear residuos orgánicos como ligantes para la aglomeración de minerales de hierro. Su principal desventaja es que los residuos son muy variados y sus propiedades no se pueden controlar del todo, por lo que es difícil encontrar una fuente de residuos orgánicos con buenas propiedades de aglomeración y rendimiento constante, además de que se descomponen rápidamente.

Algunos residuos que tienen ciertas propiedades de aglomeración incluyen melazas, restos orgánicos y residuos del día a día (especialmente residuos que contengan lactosa), lodos de aguas residuales municipales y lodos de la industria papelera [28].

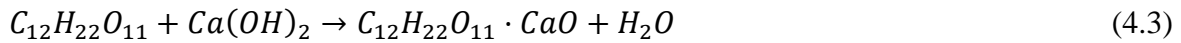
De entre ellos, los más comúnmente empleados son las melazas, unos subproductos de la industria azucarera. Están compuestas principalmente por azúcares (30 – 60%), proteínas (<10%) y varios minerales inorgánicos (<10%) que se pueden encontrar en la caña de azúcar o en la remolacha azucarera [8], aunque su composición varía en función de diversos factores como el método de producción o la estación [45].

El uso de la melaza sola o en conjunto con cal en el briqueteado de residuos producidos durante la fabricación del acero está ampliamente extendido, puesto que no son compuestos muy caros y se puede disponer de ellos fácilmente [45]. Mediante el uso de melaza, con la dosis y el tiempo de maduración suficientes, es posible conseguir pellets con unas propiedades mecánicas similares a las proporcionadas por la bentonita [46]. No obstante, es más común su uso en combinación con cal, siendo el ratio melaza/cal habitual de entre 2:1 y 4:1 [28].

Cuando se emplea melaza en conjunto con cal, en primer lugar, la cal actúa como secante, reduciendo la humedad del material que se pretende aglomerar, mediante la reacción (4.2) que se muestra a continuación.

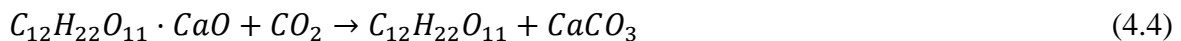


En segundo lugar, se produce la reacción de formación de sacarato de calcio. Los álcalis, conocidos como bases (sustancias que producen iones OH^- cuando se encuentran en una solución), en soluciones alcalinas y bajo ciertas condiciones se combinan con la sacarosa para formar sacaratos. La sacarosa actúa como un ácido débil y libera iones de hidrógeno H^+ que reaccionan con los iones OH^- de la base para producir agua y sacarato. En el caso de la combinación de melaza con cal hidratada, la sacarosa reacciona con esta última para producir monosacarato ($C_{12}H_{22}O_{11} \cdot CaO$), disacarato ($C_{12}H_{22}O_{11} \cdot 2CaO$) o trisacarato de calcio ($C_{12}H_{22}O_{11} \cdot 3CaO$) en función de la concentración y la temperatura de la solución [47]. La reacción que se lleva a cabo se muestra a continuación (4.3):



Esta reacción de formación de sacarato puede llevarse a cabo por la combinación de los iones de hidrógeno de la melaza con los iones OH^- contenidos de forma natural en la propia mezcla que se desea aglomerar. Se trata de una reacción exotérmica, por lo que se produce una evaporación parcial de agua de entre el 1 – 2% durante la maduración del pellet, la cual debe llevarse a cabo a temperatura ambiente puesto que esta reacción es lenta a altas temperaturas [28].

Por último, el sacarato de calcio reacciona con el CO_2 del aire para formar carbonato de calcio y sacarosa recristalizada [8], tal y como se observa en la reacción (4.4):



Básicamente, el azúcar actúa como un catalizador durante esta reacción y forma una red de carbonato de calcio que liga los materiales. Los pellets que se obtienen empleando esta combinación de ligantes son débiles al principio, pero en aproximadamente una hora, tras su maduración, alcanzan su máxima resistencia [28]. No obstante, aunque su coste es menor en comparación con otros ligantes orgánicos, resultan más caras que la bentonita, se emplean en grandes cantidades y, lo más importante, pueden introducir azufre y fósforo en el aglomerado [48], lo cual, como ya se ha mencionado anteriormente, supone una gran desventaja ya que, de pasar al acero, el azufre genera grietas en caliente en el acero durante su solidificación y el fósforo disminuye su tenacidad y su ductilidad en frío.

4.2.8.- Aditivos para ligantes orgánicos

Por último, resulta interesante mencionar los diferentes aditivos que se pueden emplear junto con los ligantes orgánicos para favorecer la interacción entre estos y las partículas de minerales de hierro que se pretenden aglomerar. El más comúnmente empleado es el carbonato de sodio, pero también se suelen emplear compuestos con boro, como la colemanita, o agentes quelantes o dispersantes como el ácido cítrico o el silicato de sodio.

El carbonato de sodio (Na_2CO_3) es un aditivo que se suele añadir a la CMC y a los ligantes de poliacrilamida para la precipitación de los iones divalentes de calcio y de magnesio contenidos en el agua, suavizándola y acelerando la disolución y la dispersión del ligante [14]. Es habitual añadir el carbonato de sodio como polvo seco, en dosis de aproximadamente el 50% en peso del ligante empleado, aunque las dosis varían en función de las características de los minerales de hierro a aglomerar y de las condiciones del proceso [8].

Otro aditivo habitual son los compuestos de boro, como la colemanita o el bórax. Su baja temperatura de fusión favorece el sinterizado y la pelletización de los granos de mineral de hierro. Además, mediante el uso de ligantes orgánicos junto con compuestos de boro se consigue aumentar la resistencia a la compresión y disminuir la formación de polvo de los pellets tratados térmicamente a unos 1200 - 1300°C [49].

En otros casos, se emplean agentes quelantes y dispersantes para favorecer la unión de los ligantes orgánicos con los minerales de hierro. Un agente quelante es una sustancia que forma complejos (quelatos) con iones de metales pesados. Los metales pueden reaccionar con ligandos que contienen O, S y N, dando lugar a la formación de un complejo metálico constituido por un enlace coordinado en el cual ambos electrones son aportados por el ligando [50] (Figura 4.10).

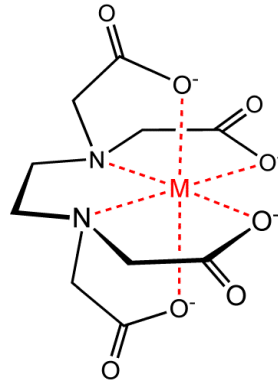


Figura 4.10. Formación de un quelato [50].

Por otro lado, los agentes dispersantes, también denominados dispersantes, se añaden a una suspensión para promover la separación de ciertas partículas. Son por lo general materiales de bajo peso molecular que se pueden adsorber fuertemente a partículas formando una barrera de repulsión electrostática que repele a las fuerzas positivas de interacción que existen entre los materiales particulados [14], evitando que dichas partículas pasen a formar parte del aglomerado.

Multitud de agentes quelantes y dispersantes han demostrado mejorar las características de unión de determinados ligantes orgánicos. Tres de los principales agentes quelantes y dispersantes en la pelletización de minerales de hierro son el ácido cítrico, el tripolifosfato de sodio (STPP) y el hexametáfosfato de sodio (SHMP) [8] cuya estructura se muestra en la Figura 4.11.

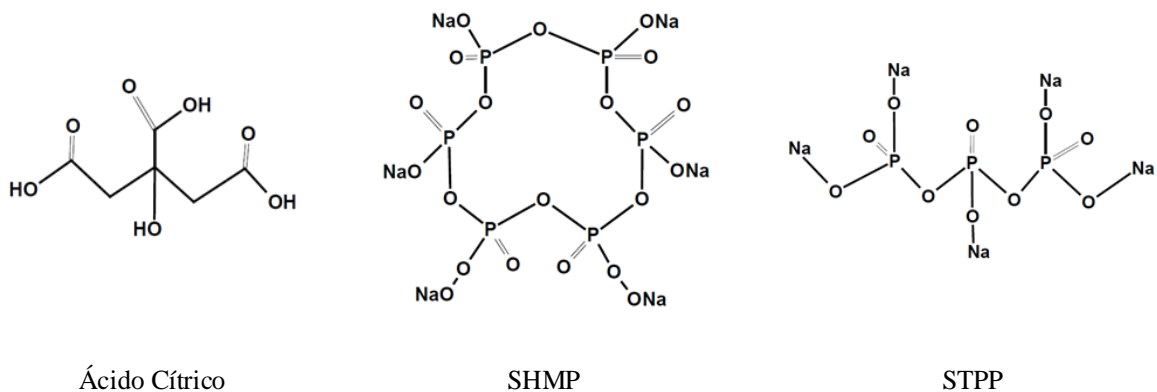


Figura 4.11.- Agentes quelantes y dispersantes [8].

Estos compuestos secuestran los elementos contenidos en los materiales alimentados al proceso de pelletización que pueden interferir con los ligantes orgánicos aniónicos, como el calcio y el magnesio, consiguiendo mejorar la dispersión de los ligantes orgánicos sobre las partículas del material a aglomerar [14]. La Tabla 4.4 muestra la función de cada compuesto y su dosis necesaria para la pelletización de minerales de hierro.

Tabla 4.4.- Dosis requeridas en el empleo de agentes quelantes y dispersantes [14].

COMPUESTO	FUNCIÓN	DOSIS
Ácido cítrico	Agente quelante	45 – 90 mg/t alimentación
STPP	Agente quelante/dispersante	Hasta un 50% del peso del ligante orgánico
SHMP	Agente dispersante	Entre un 30 – 50% del peso del ligante orgánico

Con el objetivo de emplear almidón como ligante orgánico sin necesidad de utilizar además bentonita, es posible emplear aditivos como cloruro de calcio, carbonato de sodio, ácido cítrico o ácido poliacrílico en dosis de 1.0 kg/t junto con 0.25 kg/t de almidón [41]. Mediante el empleo de ácido cítrico y ácido poliacrílico, especialmente este último, se consigue reducir la formación de polvos por abrasión, además de una mayor resistencia a la compresión de los pellets producidos en comparación con los obtenidos mediante el empleo almidón (1 kg/t) junto con bentonita (5 kg/t) [41].

Por último, cabe destacar la posibilidad de emplear el ligante Peridur® de AkzoNobel junto con silicato de sodio. Mediante el empleo de este ligante en dosis de aproximadamente un 0.03 % junto con silicato de sodio con un ratio $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ de entre 1:1 a 1:4 en dosis de entre un 0.04 y un 0.06 % se consigue no sólo mejorar las propiedades físicas del aglomerado, sino aumentar la reducibilidad del hierro contenido en los aglomerados en comparación con cuando se emplea un ligante inorgánico [51]. La Tabla 4.5 muestra una patente sobre el uso del ligante Peridur® junto con silicato de sodio.

Tabla 4.5.- Peridur® en combinación con silicato de sodio.

PATENTE	COMPOSICIÓN DEL LIGANTE	AÑO
US 2007/0119563 A1 [51]	0.005% – 0.2% Peridur® + 0.0001 – 0.08% Silicato de sodio (Na ₂ O/SiO ₂ entre 1:1 – 1:4).	2007

4.2.9.- Ventajas y desventajas de los ligantes orgánicos

Los ligantes orgánicos, como se ha mencionado anteriormente, puesto que se evaporan a temperaturas relativamente bajas, no introducen silicio en el pellet, con lo que se consigue reducir la cantidad de escoria que se forma en el horno alto o en el convertidor y, por lo tanto, aumentar el rendimiento del proceso.

En el convertidor de acería el índice de basicidad (CaO/SiO₂) debe estar entre un 3.5 – 4.5 [2] para el funcionamiento adecuado del proceso. Resulta contraproducente añadir pellets que modifiquen este parámetro aumentando el contenido de SiO₂, ya que esto provocaría la necesidad de emplear cantidades extra de fundentes y de cok para que el proceso se continuara llevando a cabo de forma adecuada.

Si bien los ligantes orgánicos en general cumplen con los requisitos en cuanto a composición química, en ocasiones, resulta complicado mezclarlos con el material que se pretende aglomerar y tienen una baja estabilidad térmica [34]. Esto último provoca que, si resulta necesario un proceso de endurecimiento a altas temperaturas, los ligantes pierdan parte de sus propiedades de unión, dando lugar a pellets más débiles y a una generación de finos mayor durante su transporte que en comparación con cuando se emplea un ligante inorgánico, como, por ejemplo, la bentonita. No obstante, también hace que los ligantes orgánicos, al evaporarse, aumenten la porosidad del pellet, mejorando por tanto su reactividad. Por último, aunque normalmente su precio es muy elevado, este se ve compensado, puesto que se emplean en dosis muy pequeñas [35].

4.3.- LIGANTES COMBINADOS

En la actualidad, muchos estudios se han centrado en la combinación de ligantes orgánicos con inorgánicos, más concretamente con bentonita, con el objetivo de sacar partido de las ventajas que puede aportar el uso de cada tipo de ligante.

Mediante el uso de ligantes orgánicos en combinación con bentonita se pueden obtener pellets con mejores propiedades mecánicas y una mayor estabilidad térmica en comparación con los producidos empleando solamente ligantes orgánicos [34]. Se logra además, reducir la dosis necesaria de bentonita (en un 50% - 0.5% cuando se añade un 0.025% de ligante orgánico [34]), reducir el coste de los pellets y mejorar el rendimiento del proceso [35].

4.3.1.- Ligantes orgánicos en combinación con bentonita

La razón por la cual las investigaciones se centran en la combinación de ligantes orgánicos con bentonita y no con otro ligante inorgánico, es el descubrimiento de que los ligantes orgánicos pueden interactuar fuertemente con esta, modificando su estructura a nivel cristalino y macromolecular [52]. Por tanto, es fundamental estudiar cómo esta interacción puede influenciar al proceso de aglomeración y las propiedades mecánicas resultantes del aglomerado, ya que esto proporcionaría información muy útil para el desarrollo de nuevos ligantes.

La teoría más extendida sobre cómo se desarrolla dicha interacción manifiesta que la bentonita forma una estructura denominada '*house-of-cards*' capaz de unirse a los ligantes orgánicos mediante interacciones electrostáticas o adsorción química.

En primer lugar, la bentonita, al absorber agua y expandirse, forma una estructura gelatinosa de forma que varias de las capas que la forman se dispersan de la estructura original cristalina de la montmorillonita. La superficie de estas capas está cargada negativamente, mientras que sus bordes están cargados positivamente, a causa de la rotura de los enlaces silicio-oxígeno y aluminio-oxígeno en la estructura de la montmorillonita. Estas capas floculan en la dirección en la que la energía tiende a ser lo menor posible, construyendo las siguientes formas cuasicristalinas mediante interacciones electrostáticas, ordenadas de menor a mayor probabilidad de ocurrencia: cara-cara, borde-borde y borde-cara (Figura 4.12) [30].

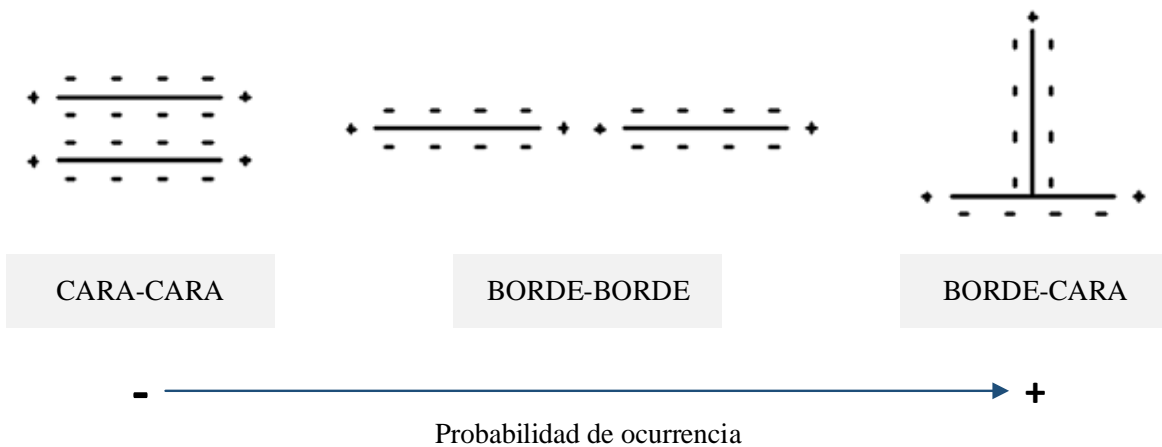


Figura 4.12.- Interacciones electrostáticas en la formación de la estructura 'house-of-cards' de la bentonita [30].

Estas dos últimas son las que forman una estructura denominada 'house-of-cards', la cual se muestra en la Figura 4.13.

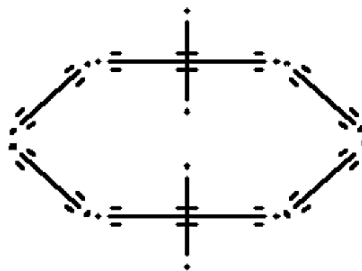


Figura 4.13.- Estructura 'house-of-cards' de la bentonita [30].

Los grupos carboxilo e hidroxilo contenidos en la estructura de los ligantes orgánicos, como se ha mencionado anteriormente, se unen a la estructura formada por la bentonita mediante adsorción química o interacción electrostática. Por un lado, el Al^{3+} de los bordes de las capas de la montmorillonita se adsorbe químicamente a los grupos carboxilo de los ligantes orgánicos. Por otro lado, los iones Mg^{2+} y Ca^{2+} interlaminares forman quelatos con los grupos carboxilo e hidroxilo, de manera que estos grupos aniónicos entran en las capas de la montmorillonita, disminuyendo su potencial Z. El menor potencial Z de los ligantes combinados en comparación con la bentonita sola, hace que este tipo de ligantes atraiga más cationes durante la pelletización y que los ratios de absorción de agua y de expansión sean mayores [30].

La estructura formada por la bentonita y los ligantes orgánicos se muestra en la Figura 4.14.

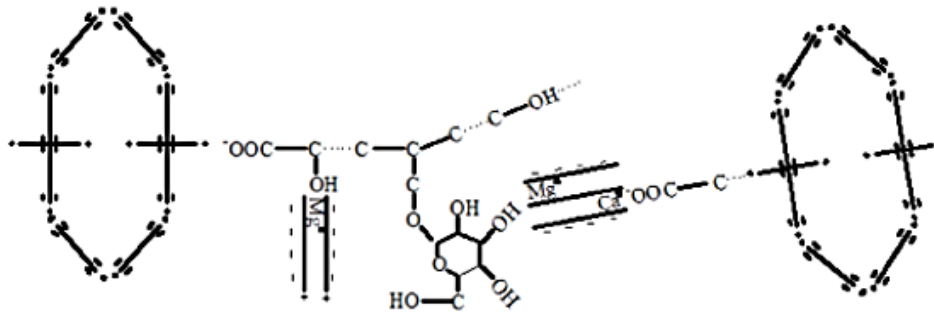


Figura 4.14.- Estructura formada por CMC (ligante orgánico) y bentonita (ligante inorgánico) [30].

Esta estructura es más estable que la formada sólo por la bentonita y facilita y fortalece la unión entre el ligante combinado y los minerales de hierro a aglomerar. La resistencia a la caída y la resistencia a la compresión de los pellets crudos producidos con un ligante combinado son superiores a las obtenidas con la bentonita [30], razón por la cual resulta interesante su estudio.

Existen varias investigaciones y patentes sobre el empleo de bentonita junto con ligantes orgánicos. A continuación, se van a revisar las combinaciones entre bentonita y los tres tipos de ligantes orgánicos principales, es decir, la CMC, los copolímeros de acrilamida y el almidón.

En primer lugar, en cuanto a la combinación de CMC con bentonita, se ha determinado que para una misma dosis de ligante inorgánico (1%) se duplica la resistencia a la compresión del pellet crudo añadiendo un 0.2% de CMC [32] y, aunque una vez se seca el pellet dicha resistencia disminuye, continúa siendo superior a la resistencia a la compresión del pellet seco cuando se emplea tan sólo bentonita.

No obstante, aunque el ligante Peridur® de AkzoNobel sea un ligante orgánico basado en la CMC, al menos hasta ahora, no se ha promovido su uso en combinación con bentonita exclusivamente, aunque en su patente se menciona que de emplearse junto con bentonita debería ser en dosis de entre un 0.022 y un 0.22% de Peridur®, entre un 5 y un 15% de agua y un 0.22% de bentonita [38].

Sí se ha patentado su uso junto con bentonita y compuestos de boro como aditivos (colemanita, tetraborato de sodio, borato de calcio). Dicha patente, que se muestra en la Tabla 4.6 a continuación, indica que mediante el empleo de dichos aditivos, especialmente tetraborato de sodio, se consiguen una resistencia a la caída y una resistencia a la compresión, tanto del pellet crudo como del pellet seco, similares o incluso superiores a las que se obtendrían empleando un 0.5 % de bentonita [53]. Por tanto, se consigue reducir el contenido en silicio introducido en el pellet, pero sin perder propiedades mecánicas.

Tabla 4.6.- Peridur® en combinación con bentonita y compuestos de boro.

PATENTE	COMPOSICIÓN DEL LIGANTE	AÑO
US 2005/0223937 A1 [53]	0.005% – 0.2% Peridur® + 0.1 – 3% Bentonita + 0.03 – 0.5% Aditivos (colemanita, tetraborato de sodio o borato cálcico).	2005

Por otro lado, en cuanto a la combinación de bentonita junto con copolímeros de acrilamida, cabe destacar los estudios que ha llevado a cabo la empresa BASF con su gama de ligantes Alcotac®. Esta compañía ha apostado por la combinación de ligantes, ha estudiado las interacciones que se producen entre ellos y ha desarrollado un nuevo ligante orgánico, Alcotac® CS, para su empleo junto con bentonita. Las propiedades mecánicas de los pellets producidos mediante el empleo de 220 g/t de este nuevo ligante junto con un 0.22% de bentonita resultan superiores a las de los pellets fabricados utilizando solamente bentonita. Además, durante el estudio de las interacciones entre ambos tipos de ligante, se comprobó que el grado de interacción del ligante Alcotac® CS con la bentonita era mucho mayor en comparación con otros ligantes orgánicos de la marca [52].

Por otro lado, han desarrollado dos nuevas patentes sobre nuevos ligantes poliméricos para su empleo junto con bentonita, obteniendo en ambos casos resultados prometedores. Dichas patentes se muestran en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7.- Patentes de BASF sobre ligantes combinados.

PATENTE	COMPOSICIÓN DEL LIGANTE	AÑO
WO 2018/153995 A1 [54]	0.022% ligante orgánico + 1% bentonita Ligante orgánico: copolímero constituido preferiblemente por un 68% de un copolímero basado en monómeros de acrilamida, un 30% de acrilato de sodio y un 2% de viniloxibutilpolietilenglicol.	2018
US 2019/0010577 A1 [55]	0.02% ligante orgánico + 0.3% bentonita Ligante orgánico: copolímero constituido preferiblemente por un 50% de un copolímero basado en monómeros de acrilamida, un 48% ácido 2-acrilamido-2-metilpropano sulfónico de sodio y un monómero de tipo 1: $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}-(\text{EO})_n-(\text{PeO})_m-\text{H}$ Dónde n = 24-45; m = 10; EO: óxido de etileno; PeO: óxido de pentileno.	2019

Otra combinación alternativa entre ligantes es el empleo de almidón junto con bentonita. Mediante dosis de 1 kg/t de almidón con 5 kg/t de bentonita se consiguen pellets con altas resistencias a la abrasión y a la compresión [41]. Con el objetivo de reducir la cantidad de bentonita y, por tanto, la cantidad de silicio introducido en el pellet, se ha estudiado la posibilidad de reproducir las propiedades superficiales que se obtienen cuando se emplean esos 5 kg/t de bentonita, añadiendo almidón (1 kg/t) junto con tan sólo una fina capa de bentonita (1.7 kg/t) [41] en la superficie de los pellets. No obstante, se ha comprobado que las propiedades resultantes de los pellets producidos mediante este último método son muy inferiores a las que se obtienen cuando se emplea una cantidad de bentonita mayor.

4.3.2.- Combinación de varios componentes

Por último, existe la opción de emplear ligantes formados por multitud de distintos componentes como, por ejemplo, las combinaciones desarrolladas en las patentes que se muestran en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8.- Ligantes combinados de más de dos componentes.

PATENTE	COMPOSICIÓN DEL LIGANTE	AÑO
WO 2009/109024 A1 [56]	0.045 – 0.05% Bentonita + 0.01 – 0.02% Melaza + 0.004 – 0.009% Poliacrilamida + 0 – 0.01% Almidón + 0 – 0.02% Compuesto de carbono (natural o sintético)	2009
US 005476532 A [57]	0.06% Peridur® 230 + 0.2% Bentonita + 1.5% Dolomía + Material particulado (bauxita, cemento Portland o Kaolin)	1995

Mediante el empleo de ambas combinaciones de ligantes, se consiguen obtener pellets con buenas propiedades mecánicas (resistencia a la caída y resistencia a la compresión, tanto del pellet crudo como seco), además de disminuir la cantidad de elementos contaminantes en su estructura, haciéndola insignificante en comparación con la cantidad de estos elementos que se introduce en el pellet cuando se emplea bentonita.

No obstante, a no ser que, o bien se proporcionen dichas combinaciones de ligantes ya mezcladas, o bien los componentes que las forman sean de fácil obtención, no resultan interesantes, puesto que complican la logística y el almacenamiento, incrementando el número de materiales a transportar y a almacenar en comparación con cuando tan sólo se emplean uno o dos ligantes.

4.4.- DECISIÓN ADOPTADA

A continuación, se va a discutir cuál es la mejor alternativa entre el empleo de ligantes inorgánicos, orgánicos y combinados, centrándose en su composición química, las propiedades mecánicas y la estabilidad térmica de los pellets que se producen mediante su uso y, por último, el nivel de dificultad con la que se realiza su mezclado con el material a aglomerar. El precio y la dosis necesaria de ligante no van a ser factores determinantes en la elección, puesto que, en el caso de los ligantes orgánicos e inorgánicos, ambos factores se compensan, ya que los primeros se emplean en dosis muy bajas, pero su precio es muy alto y, los últimos, aunque su precio es más bajo, se emplean en dosis mayores. En cuanto a los ligantes combinados, puesto que se reduce la cantidad de ligante orgánico necesaria, su precio es menor que el de los ligantes orgánicos, pero mayor que el de los inorgánicos. Con la dosis ocurre lo contrario, será mayor que la de los ligantes orgánicos, pero menor que la

de los inorgánicos, por lo que se puede decir que se encuentran en un punto intermedio en términos de dosis y precio.

En primer lugar, atendiendo a la composición química de los ligantes, los inorgánicos introducen cantidades importantes de sílice, un elemento que, como ya se ha mencionado anteriormente, resulta perjudicial para el proceso, ya que reduce su rendimiento al aumentar la cantidad de escoria producida en el horno. Lo contrario ocurre con los ligantes orgánicos que, puesto que se evaporan a temperaturas relativamente bajas, no introducen elementos contaminantes en el pellet. Por último, los ligantes combinados, de nuevo, se encuentran en un punto intermedio. Contienen bentonita, por lo que introducirán sílice en el pellet, aunque será en menor cantidad que los ligantes inorgánicos, ya que la dosis de bentonita que se emplea es menor.

En cuanto a las propiedades mecánicas de los pellets, cuando se emplean ligantes inorgánicos o combinados, se obtienen muy buenos resultados, especialmente en los casos en los que es necesario llevar a cabo un proceso de endurecimiento por cocción. Los ligantes orgánicos, si bien por lo general obtienen mejores resultados en cuanto a la resistencia del pellet crudo, la resistencia del pellet tras ser sometido a un tratamiento térmico disminuye significativamente. Esto es debido a la estabilidad térmica del ligante. En los pellets producidos mediante el empleo de ligantes orgánicos, puesto que estos se evaporan a temperaturas relativamente bajas (300°C), al someterlos a ese proceso de endurecimiento a altas temperaturas, desaparecen del pellet, debilitándolo y aumentando por tanto la generación de finos. Lo contrario ocurre con los ligantes inorgánicos. Debido a la mayor estabilidad térmica de estos ligantes, permanecen en la estructura del pellet, reforzando la unión entre partículas.

Por último, en cuanto al mezclado de los ligantes con el material a aglomerar, es más complicado el de los ligantes orgánicos que el de los inorgánicos debido a que se emplea una dosis menor, por lo que es más difícil dispersar el ligante de manera homogénea. En el caso de los ligantes combinados, es también complicado, puesto que en primer lugar es necesario mezclar ambos tipos de ligante, obteniendo el ligante combinado que, posteriormente se deberá mezclar con el material a aglomerar. En cambio, los ligantes inorgánicos, al emplearse en dosis mayores, son más fáciles de dispersar de manera homogénea.

Para poder tomar una decisión adecuada, es necesario, por un lado, tener en cuenta que la bibliografía encontrada se centra en su mayoría en la pelletización de minerales de hierro y, por otro lado, diferenciar entre las distintas aplicaciones de los procesos de aglomeración en la industria siderúrgica mencionados anteriormente en el apartado 2.3: la preparación de materias primas y la gestión de subproductos. La Figura 4.15 muestra la diferencia entre ambas operaciones, clave para la elección del tipo de ligante adecuado.

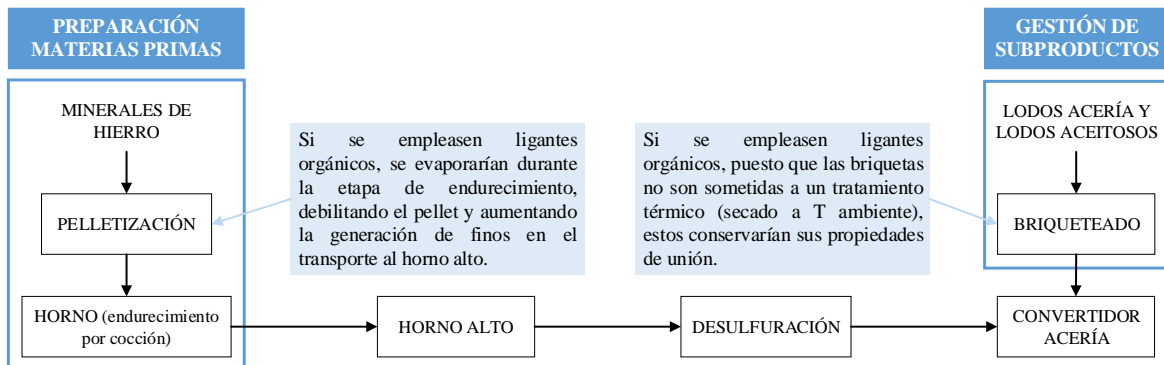


Figura 4.15.- Comportamiento de los ligantes orgánicos en función del proceso en el que se empleen.

Como se puede observar, durante la preparación de las materias primas, los minerales de hierro una vez pelletizados, son sometidos a un proceso de endurecimiento por cocción para aumentar su resistencia mecánica y, entonces, son transportados al horno alto. Si se empleasen ligantes orgánicos en estas condiciones, se evaporarían en la operación de endurecimiento, debilitando el pellet y aumentando la generación de finos durante su transporte al horno alto. En cambio, en el caso de estudio se pretende fabricar briquetas y transportarlas directamente al convertidor de acería, sin tratamiento térmico previo, por lo que los ligantes orgánicos permanecerán en la estructura de la briqueta, es decir, seguirán ejerciendo su función, por lo que la generación de finos durante su transporte al convertidor será baja. Además, una vez en el convertidor, puesto que con la evaporación de los ligantes orgánicos aumenta la porosidad de la briqueta, se incrementará la reactividad de estas.

Teniendo esto en cuenta, se ha elaborado la Tabla 4.9, en la cual se realiza una comparación entre los tres tipos de ligantes, aplicados al caso de estudio.

Tabla 4.9.- Comparación entre los distintos tipos de ligantes [35], [14], [52], [34].

FACTOR	INORGÁNICOS	ORGÁNICOS	COMBINADOS
Propiedades mecánicas	Buenas propiedades mecánicas.	Buenas propiedades mecánicas sin tratamiento térmico.	Buenas propiedades mecánicas.
Contaminantes	Introducen contaminantes (SiO ₂ , Al ₂ O ₃).	No introducen contaminantes.	Introducen contaminantes (SiO ₂ , Al ₂ O ₃). No obstante, en menor cantidad que los inorgánicos.
Mezclado	Sencillo. Se emplean en dosis mayores.	Complicado. Resulta compleja la dispersión de una dosis tan pequeña de ligante.	Complicado. Es necesario mezclar primero los componentes del ligante y, posteriormente, mezclar el ligante combinado con el material a aglomerar.
Dosis	Alta	Baja	Intermedia
Precio	Bajo	Alto	Intermedio

Tal y como muestra la Tabla 4.9, la principal desventaja de los ligantes orgánicos será su mezclado. Al emplearse en dosis tan pequeñas resulta complicado mezclar el ligante con el material a aglomerar de manera homogénea, por lo que deberá realizarse cuidadosamente para asegurar una buena dispersión. A cambio, se consiguen buenas propiedades mecánicas, una mejor reactividad y, lo más importante, no introducen elementos contaminantes en el aglomerado, como ocurre con los ligantes inorgánicos y con los combinados, los cuales podrían reducir el rendimiento del proceso. Puesto que el precio, como se ha mencionado anteriormente, no es un factor determinante ya que se ve compensado con la dosis, los ligantes orgánicos han sido seleccionados como la mejor opción para su aplicación al briquetado de lodos gruesos de acería y lodos aceitosos para su reutilización en el convertidor.

Dentro de los ligantes orgánicos, se han seleccionado dos ligantes comerciales, un derivado de la carboximetilcelulosa de sodio (P) y un copolímero de ácido acrílico y acrilamida (C). Se ha optado por estos dos ligantes orgánicos por tratarse de los ligantes orgánicos comerciales cuyo uso se encuentra más extendido a lo largo del mundo para la aglomeración de minerales de hierro.

5. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En el presente estudio se ha tratado de determinar si era posible la fabricación de briquetas mediante el uso de los dos ligantes orgánicos seleccionados, a los cuales se hará referencia como ligantes P (derivado de la carboximetilcelulosa de sodio) y C (copolímero de ácido acrílico y acrilamida). Con este fin se ha procedido a aglomerar dos mezclas, una constituida tan sólo por lodos gruesos de acería y, la otra, con estos mismos lodos, más lodos aceitosos. La gestión de estos últimos, los lodos aceitosos, resulta complicada, por lo que, como ya se ha mencionado anteriormente, es muy interesante incluir en la mezcla el mayor porcentaje posible de estos. Además, puesto que en la práctica industrial la humedad de los lodos es muy variable, se ha estudiado la aglomeración de ambas mezclas a distintas humedades, con el objetivo de determinar si el ligante sigue siendo efectivo independientemente de la humedad de la mezcla a aglomerar.

A continuación, se describe la caracterización de los materiales que se han empleado en el proceso, se detalla cómo se han preparado las mezclas a aglomerar, la cantidad de cada ligante utilizada y cómo se ha llevado a cabo el proceso de briqueteado. Por último, se describen los ensayos que se han realizado para la caracterización de las briquetas.

5.1.- CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Los materiales que se han empleado para la fabricación de las briquetas se pueden clasificar en materiales a aglomerar y ligantes. A continuación, se describe la composición de los materiales a aglomerar, es decir, de los lodos y las principales características de los ligantes.

5.1.1.- Lodos a aglomerar

En el proceso de aglomeración, como ya se ha mencionado anteriormente, se emplearon tres tipos de lodos: lodos gruesos de acería de la planta A, lodos gruesos de acería de la planta B y lodos aceitosos.

La Tabla 5.1 y la Tabla 5.2 muestran la apariencia y los componentes mayoritarios presentes en los lodos de la planta A y B respectivamente. Además de los componentes que se detallan

en dichas tablas, ambos lodos presentan cantidades comprendidas entre un 0.15 y un 0.3%, de alúmina y manganeso y, en cantidades aún menores (0.01% – 0.06%), zinc, fósforo, azufre y plomo que, aunque son elementos perjudiciales para el proceso de producción de acero, se encuentran en cantidades muy pequeñas.

Tabla 5.1.- Lodos gruesos de acería de la planta A.

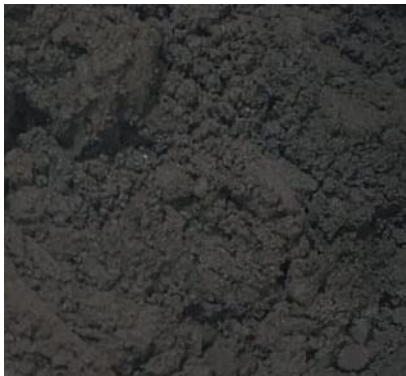

LODOS GRUESOS DE ACERÍA DE LA PLANTA A		
APARIENCIA	CARACTERIZACIÓN	
	Fe total [%]	85.00
	Fe metálico [%]	71.37
	H ₂ O [%]	7.62
	CaO [%]	4.79
	C [%]	2.13
	SiO ₂ [%]	1.34
	MgO [%]	0.99

Tabla 5.2.- Lodos gruesos de acería de la planta B.


LODOS GRUESOS DE ACERÍA DE LA PLANTA B		
APARIENCIA	CARACTERIZACIÓN	
	Fe total [%]	72.50
	Fe metálico [%]	60.63
	H ₂ O [%]	13.40
	CaO [%]	10.97
	C [%]	2.30
	SiO ₂ [%]	1.29
	MgO [%]	2.46

Como se puede observar, ambos lodos cuentan con un alto porcentaje de hierro metálico que hace que su reutilización resulte muy interesante. Este porcentaje es mayor en los lodos de la planta A que en los de la planta B (71.37% frente a un 60.63%), mientras que el porcentaje

de elementos fundentes (CaO, SiO₂, MgO), así como el contenido en humedad, es mayor en los lodos de la planta B que en los de la planta A.

Por último, en cuanto a los lodos aceitosos, la Tabla 5.3 muestra la apariencia y los componentes mayoritarios de los mismos.

Tabla 5.3.- Lodos aceitosos.

LODOS ACEITOSOS		
APARIENCIA	CARACTERIZACIÓN	
	Fe total [%]	62.00
	H ₂ O [%]	20.00
	Aceite [%]	9.00

Los lodos aceitosos, si bien disponen de un alto contenido en hierro total (62%), éste es menor que el de los otros dos lodos estudiados. Además, al contener aceite, son pegajosos y pastosos, lo que dificulta su aglomeración. Por último, como se puede observar, son los lodos que tienen la mayor humedad de los tres lodos que se han tratado de aglomerar.

5.1.2.- Ligantes

Se han utilizado dos ligantes para llevar a cabo la aglomeración de las distintas mezclas de lodos: el ligante C, un copolímero de ácido acrílico y acrilamida, y el ligante P, un ligante basado en la carboximetilcelulosa de sodio.

La apariencia y algunas de las principales características de ambos ligantes se muestran a continuación en las Tabla 5.4 (ligante C) y Tabla 5.5 (ligante P).

Tabla 5.4.- Ligante C [40], [58].



LIGANTE C		
APARIENCIA	CARACTERÍSTICAS	
	Descripción	Copolímero de ácido acrílico y acrilamida
	Apariencia	Polvo blanco
	Densidad [g/cm³]	0.75
	Viscosidad [mPa.s]	50 - 200
	pH	1.5
	Humedad [%]	20 – 80
	Tamaño de partícula [μm]	90% > 400

Tabla 5.5.- Ligante P [59].

LIGANTE P		
APARIENCIA	CARACTERÍSTICAS	
	Descripción	Carboximetilcelulosa de sodio
	Apariencia	Polvo amarillento
	Densidad [g/cm³]	0.45
	Viscosidad [mPa.s]	4000 - 8000
	pH	7 - 10
	Humedad [%]	Máx. 8
	Grado de sustitución	0.7 - 0.8

Ambos ligantes muestran numerosas diferencias entre sí. En cuanto a la apariencia, el ligante C es un polvo de color blanco, mientras que el ligante P tiene un color amarillento. El ligante C es más denso (0.75 frente a 0.45 g/cm³) y tiene un mayor contenido en humedad que el ligante P (entre un 20 y un 80% de agua frente a un máximo de un 8%). En cambio, el ligante P es mucho más viscoso que el ligante C (4000 – 8000 mPa·s frente a 50 – 200 mPa·s). Por

último, en cuanto al pH, el ligante P tiene un pH neutro-básico (7 – 10), mientras que el ligante C presenta un pH ácido (1.5) [40], [58], [59].

5.2.- PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS

Con el objetivo de comprobar la efectividad de los ligantes orgánicos P y C y determinar si ésta se ve afectada por la humedad de la mezcla y por el contenido en lodos aceitosos, se han aglomerado dos mezclas diferentes.

La primera mezcla, estaba constituida por un 75% de lodos gruesos de acería de la planta A (LGA) y un 25% de la planta B (LGB), es decir, con una relación LGA/LGB = 3/1, ratio que se mantuvo constante en todos los experimentos.

La segunda mezcla tenía además un 10% de lodos aceitosos (AC), por lo que las proporciones de LGA y LGB fueron del 67.5% y del 22.5% respectivamente, para mantener la relación 3/1 mencionada anteriormente. Se había previsto que, si fuera posible fabricar briquetas con un 10% de lodos aceitosos, se aumentaría dicho porcentaje hasta un 15%, ya que, como se ha mencionado anteriormente, la gestión de estos lodos resulta complicada, por lo que interesa aumentar en la medida de lo posible su contenido en la mezcla. Al emplear un 15% de lodos aceitosos, resultarían entonces los porcentajes de LGA y de LGB de un 63.75% y de un 21.25% respectivamente. La Tabla 5.6 muestra la composición de todas las mezclas que se ha pretendido aglomerar.

Tabla 5.6.- Composición de las mezclas a aglomerar.

EXPERIMENTO	LGA [%]	LGB [%]	AC [%]
1	75,00	25,00	0,00
2	67,50	22,50	10,00
	63,75	21,25	15,00

En cuanto a la cantidad de ligante, se ha empleado siempre una dosis del 0.3% del total de la mezcla de lodos, al tratarse de la dosis que se había optimizado en anteriores ensayos realizados en la empresa.

5.2.1.- Experimento 1: aglomeración de lodos gruesos de acería

En este primer experimento realizado con tan sólo lodos gruesos de acería, se prepararon varias mezclas constituidas cada una por 3 kg de LGA y 1 kg de LGB, sumando un total de 4 kg. Con el objetivo de determinar la efectividad de los ligantes bajo diferentes grados de humedad, se realizaron varios ensayos modificando la humedad de las mezclas. La Tabla 5.7. a continuación, muestra los valores a los cuales se ha ajustado la humedad de cada una de las mezclas.

Tabla 5.7.- Humedades consideradas en el experimento 1.

Humedad		Mezclas
Descripción	[%]	
Natural	6 – 7	LG1 LG4 LG5
Muy seca	3	LG2
Seca	5	LG3 LG7
Húmeda	10	LG6

En la columna ‘Mezclas’, las siglas ‘LG’ (Lodos Gruesos de acería) y el número que sigue, identifican la mezcla de lodos gruesos de acería cuya humedad se ha ajustado a cada uno de los valores que aparecen en la Tabla 5.7. Como se explicará en mayor grado de detalle en el apartado 5.4.2, todas las mediciones de humedad se han realizado por triplicado. Mediante estos tres dígitos se puede consultar fácilmente en el Anexo A1.1 los valores individuales obtenidos en cada medición, el valor medio y la desviación típica, de la humedad de los lodos empleados en la preparación de cada mezcla, así como de la humedad de la mezcla final.

De este modo, se han realizado ensayos sin alterar la humedad natural de los lodos (entre el 6 y el 7% en este experimento) para comprobar cómo funcionan los ligantes con esta humedad y, además, se han realizado otros ensayos al 3% y al 5% de humedad, tras dejar secar el lodo a temperatura ambiente, y un último ensayo al 10% de humedad, añadiendo agua mediante un dispersor.

Una vez preparadas las mezclas con la humedad adecuada, se dividió cada mezcla en dos muestras de 2 kg, a una de las cuales se le añadió posteriormente un 0.3% de ligante P o un 0.3% de ligante C, realizándose el mezclado en la mezcladora de la briqueteadora durante 4 minutos a una velocidad de aproximadamente 115 rpm.

La Tabla 5.8 muestra la identificación asignada para cada una de las pruebas que se llevaron a cabo, el ligante utilizado y la humedad y la composición de las distintas muestras empleadas en cada prueba.

Tabla 5.8.- Muestras finales preparadas en el experimento 1.

Prueba	Ligante	Humedad muestra [%]	Composición muestra	
			LGA [%]	LGB [%]
LG1P1	0.3% P	6.99	75	25
LG1P2		6.99	75	25
LG4P1		6.42	75	25
LG4P2		6.42	75	25
LG5P		6.57	75	25
LG1C	0.3% C	6.99	75	25
LG4C		6.42	75	25
LG5C1		6.57	75	25
LG5C2		6.57	75	25
LG2P	0.3% P	2.90	75	25
LG2C	0.3% C	2.90	75	25
LG3P	0.3% P	4.93	75	25
LG7P		5.07	75	25
LG3C	0.3% C	4.93	75	25
LG6P1	0.3% P	9.74	75	25
LG6P2		9.74	75	25

La nomenclatura que se ha seleccionado para cada prueba ha sido establecida en base al criterio que se describe a continuación. En primer lugar, como se ha mencionado anteriormente, los tres primeros dígitos, es decir, las siglas ‘LG’ y el número que sigue, identifican la mezcla de lodos gruesos de acería que se ha empleado en cada prueba. El siguiente dígito, es una P o una C en función del ligante que se haya empleado para la aglomeración de los lodos. Finalmente, el último dígito indica el número de repetición del ensayo, el cual sólo aparece en aquellas pruebas que se realizaron por duplicado. La Figura 5.1 muestra un ejemplo de la nomenclatura empleada en este primer experimento.

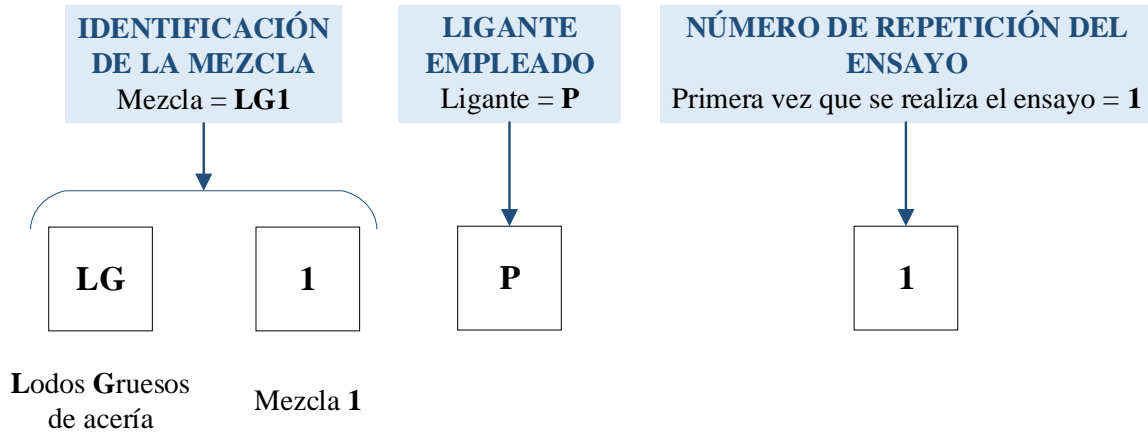


Figura 5.1.- Ejemplo de la nomenclatura empleada en el experimento 1.

Como se puede observar, no se realizó la aglomeración de la fracción con un 10% de humedad con el ligante C, debido a que no se disponía de material suficiente para ello.

5.2.2.- Experimento 2: aglomeración de lodos gruesos de acería junto con lodos aceitosos

Para la preparación de las mezclas de lodos gruesos de acería y lodos aceitosos, en primer lugar, se prepararon varias mezclas constituidas por 2.7 kg de LGA y 0.9 kg de LGB, sumando un total de 3.6 kg (75% de LGA y 25% de LGB).

Cada una de estas mezclas se dividió en dos muestras de 1.8 kg cada una, a las cuales se añadieron 0.2 kg de lodos aceitosos, AC, de forma que estos lodos constituyeran aproximadamente el 10% de la muestra, que entonces tendría un peso total de 2 kg. En los casos en los que se pretendió briquetear muestras con un 15% de AC, a cada fracción 1.8 kg se añadieron 0.32 kg de AC, sumando un total de 2.12 kg por muestra. Al contrario que en el caso anterior, se ajustó la humedad de cada muestra de 2 kg (10% AC) o de 2.12 kg (15% AC) en vez de la de la mezcla de partida de 4 kg, a causa de que el mezclado de los lodos aceitosos con los otros dos tipos de lodos debía de realizarse en la mezcladora de la briqueteadora para que quedara suficientemente homogénea y la capacidad de ésta no era suficiente para contener la totalidad de la mezcla.

Las humedades de las muestras resultantes fueron las que se muestran a continuación en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9.- Humedades consideradas en el experimento 2.

Humedad		Mezclas
Descripción	[%]	
Natural	3%	LGAC1 LGAC2 LGAC7 LGAC8
Húmedo	5 – 6%	LGAC3 LGAC4 LGAC5 LGAC6 LGAC9 LGAC10

En la columna ‘Mezclas’, las siglas ‘LGAC’ (Lodos Gruesos de acería y lodos ACEITOSOS) junto con el número que las sigue, identifican la mezcla de lodos gruesos de acería y lodos aceitosos cuya humedad se ha ajustado a cada uno de los valores que aparecen en la Tabla 5.9. De este modo, se puede consultar el Anexo A1.2 para ver los valores individuales obtenidos en cada una de las tres mediciones de humedad realizadas, el valor medio y la desviación típica, de la humedad de los lodos empleados en la preparación de cada muestra, así como de la humedad de la muestra final.

Como se puede observar, la humedad natural de la mezcla de los lodos era mucho menor que en el experimento anterior (del 3% frente al 6 – 7%). Esto era debido a que los lodos LGA empleados en estas pruebas tenían una humedad media del 1.4 %, que como se trata del componente mayoritario de la mezcla, provocó que la humedad de ésta disminuyera considerablemente.

Por esta razón se ha añadido agua mediante el uso de un dispersor hasta aumentar la humedad de los lodos a un 5 – 6%, que era aproximadamente la humedad natural de los lodos empleados en el experimento anterior, con objeto de poder comparar los resultados de ambos experimentos.

Una vez preparadas las muestras con la humedad deseada, se procedió a añadir a cada una un 0.3% de ligante, P o C, realizándose la mezcla en la mezcladora de la briqueteadora durante 4 minutos a una velocidad de aproximadamente 115 rpm.

La Tabla 5.10 muestra la identificación asignada para cada una de las pruebas que se llevaron a cabo, el ligante utilizado y la humedad y la composición de las distintas muestras empleadas en cada prueba.

Tabla 5.10.- Muestras finales preparadas en el experimento 2.

Prueba	Ligante	Humedad muestra [%]	Composición muestra		
			LGA [%]	LGB [%]	AC [%]
LGAC1P1	0.3% P	3.18	67.50	22.50	10.00
LGAC1P2		3.18	67.50	22.50	10.00
LGAC2C	0.3% C	3.18	67.50	22.50	10.00
LGAC3P	0.3% P	5.70	67.50	22.50	10.00
LGAC9P		5.42	67.50	22.50	10.00
LGAC4C	0.3% C	5.61	67.50	22.50	10.00
LGAC5C		5.70	67.50	22.50	10.00
LGAC6C		5.42	67.50	22.50	10.00
LGAC10C		6.06 ²	67.50	22.50	10.00
LGAC7P1	0.3% P	3.59 ²	63.75	21.25	15.00
LGAC7P2		3.59 ²	63.75	21.25	15.00
LGAC7P3		3.59 ²	63.75	21.25	15.00
LGAC8C	0.3% C	2.75	63.75	21.25	15.00

La nomenclatura empleada para la identificación de las pruebas es similar a la utilizada en el experimento 1. Como se ha mencionado anteriormente, las siglas ‘LGAC’ junto con el número que las sigue identifican la mezcla de lodos gruesos de aceria y lodos aceitosos que se empleó para llevar a cabo cada prueba. El siguiente dígito, al igual que en el experimento 1, es una P o una C en función del ligante que se haya utilizado. Finalmente, el último dígito, al igual que en el caso anterior, indica el número de repetición del ensayo. La Figura 5.2 muestra un ejemplo de la nomenclatura empleada en este experimento.

² La humedad de la fracción fue calculada en función de la composición de la fracción y de la humedad de sus componentes por separado, no fue medida.

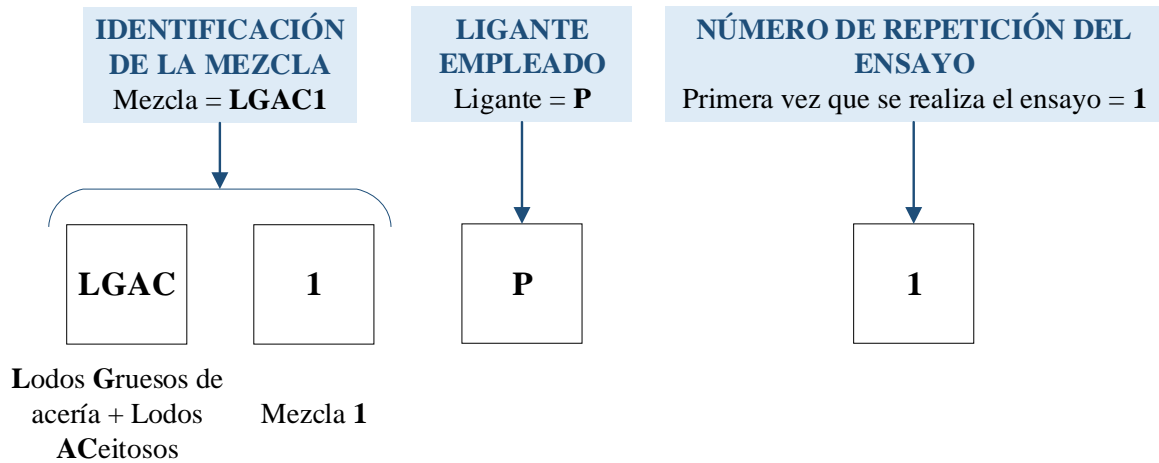


Figura 5.2.- Ejemplo de la nomenclatura empleada en el experimento 2.

5.3.- FABRICACIÓN DE LAS BRIQUETAS

El equipo empleado para la fabricación de las briquetas se muestra en la Figura 5.3.



Figura 5.3.- Equipo empleado para la fabricación de las briquetas con sus partes principales.

Como se puede observar, está constituido principalmente por los siguientes componentes:

- Mezcladora. Realiza el mezclado de los materiales que se pretenden aglomerar.
- Tornillo sin fin. Transporta el material hasta los rodillos. Es movido por medio de un motor.
- Rodillos. Realizan la compactación del material. Son movidos por medio de un motor.
- Rampa para la salida de las briquetas fabricadas.
- Controles. Permiten realizar el ajuste de la velocidad del tornillo sin fin y de la velocidad de los rodillos.
- Pantallas. Muestran los valores de los distintos parámetros del proceso.
- Seta de emergencia. Provoca la parada inmediata del funcionamiento de la máquina.

Por último, aunque no se pueda apreciar en la Figura 5.3, al lado izquierdo de la briqueteadora se disponía de un sistema hidráulico para regular la posición del rodillo inferior y la compactación de la briqueta.

El proceso de fabricación de briquetas comienza en la mezcladora (Figura 5.4), en la cual se mezclan los lodos a aglomerar con el ligante durante 4 minutos hasta obtener una mezcla homogénea.



Figura 5.4.- Mezcladora.

Entonces, la mezcla se alimenta en el tornillo sin fin horizontal de manera manual, con ayuda de una pequeña espátula. Esto resulta necesario a causa de la forma de la mezcladora que, al ser un recipiente redondeado y no una tolva, impide una alimentación por gravedad del material (Figura 5.5).

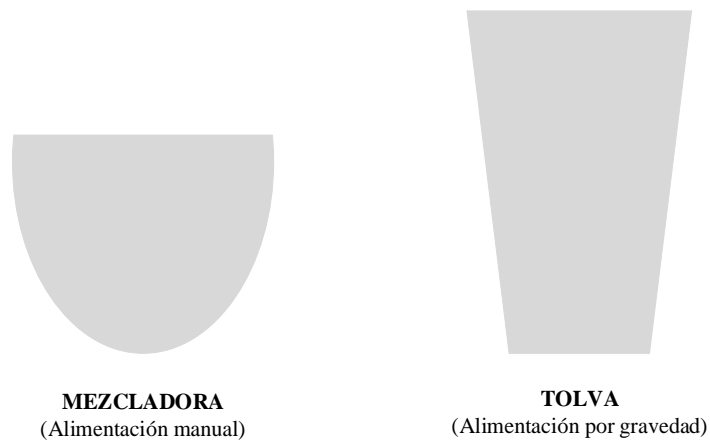


Figura 5.5.- Diferencias en la alimentación del material empleando la mezcladora actual o una tolva.

A medida que se va introduciendo material en el tornillo sin fin, éste lo transporta hacia los rodillos. Cada rodillo tiene cavidades con la forma de la mitad de una briqueta (Figura 5.6) de manera que, cuando ambos rodillos se juntan, ambas mitades se unen compactando el material, que adquiere la forma de una briqueta completa.

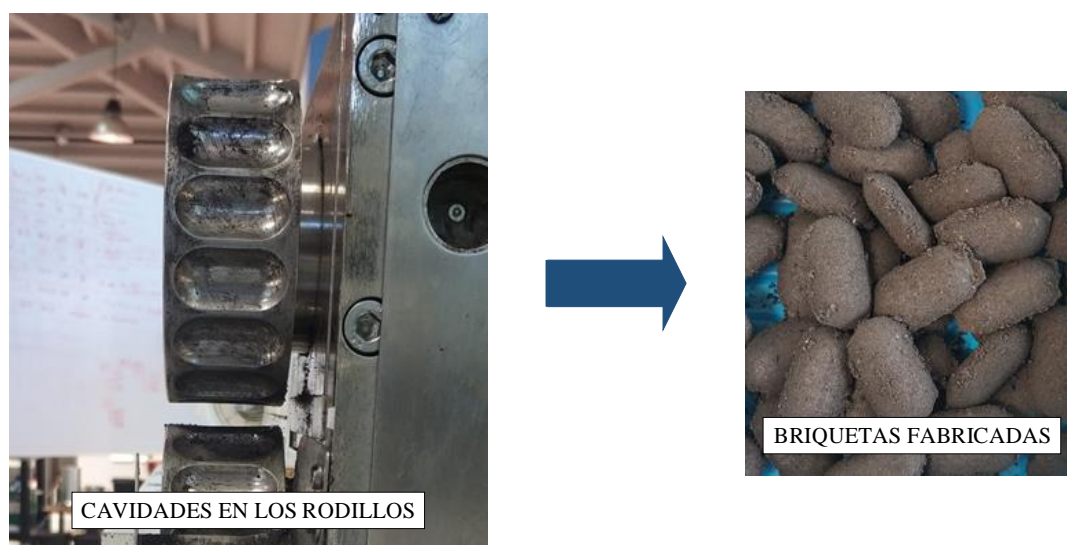


Figura 5.6.- Cavidades de los rodillos y briquetas fabricadas.

Las briquetas fabricadas tienen un tamaño aproximado de 32 mm de largo, 16 mm de ancho y 10 mm de espesor en su parte central. La Figura 5.7 muestra una comparativa del tamaño de la briqueta.

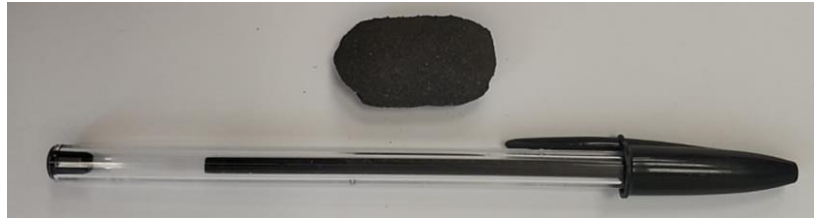


Figura 5.7.- Comparativa del tamaño de una briqueta.

Hay varios parámetros del proceso que se pueden controlar: la fuerza que ejerce el sistema hidráulico sobre el rodillo inferior, la separación entre rodillos, la velocidad del tornillo sin fin y la velocidad de giro de los rodillos. La Figura 5.8 muestra un esquema de la briqueteadora y los parámetros más importantes que intervienen en el briquetado.

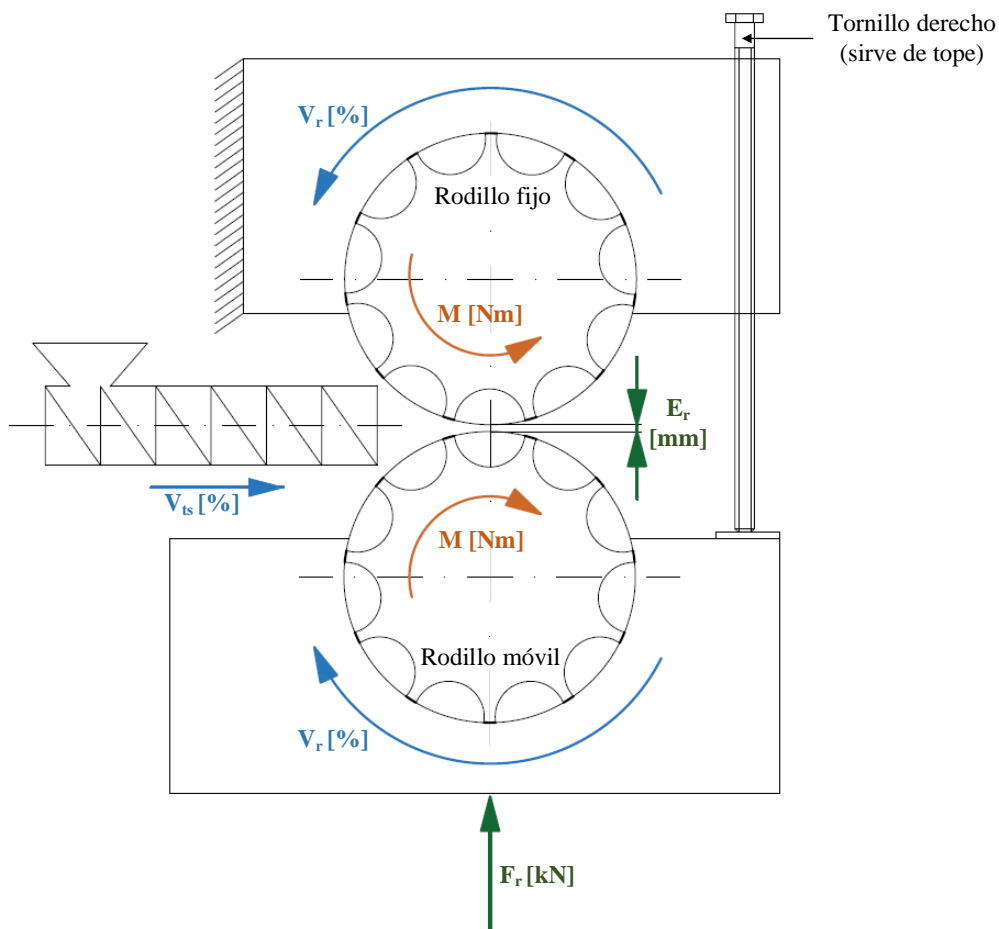


Figura 5.8.- Parámetros de control en el briquetado.

En los experimentos llevados a cabo, antes del comienzo del briqueteado, se procedió a realizar el ajuste de los dos primeros parámetros mencionados, la fuerza que ejerce el sistema hidráulico sobre el rodillo inferior móvil (F_r), y la separación entre los rodillos (E_r), para asegurar que el proceso se lleve a cabo de manera adecuada.

En primer lugar, se estableció la distancia mínima que debe existir entre los rodillos mediante el ajuste de los tornillos que sirven de topes para impedir que la separación entre los rodillos disminuya al aplicar la fuerza F_r sobre el rodillo inferior. Aunque en la Figura 5.8 no se muestre dibujado, hay otro tornillo al lado izquierdo de los rodillos. En cualquier caso, la distancia entre ambos rodillos debe ser de al menos 0.3 mm para evitar que los rodillos se toquen en ningún momento. En los ensayos se emplearon diferentes separaciones, entre 0.3 y 0.7 mm, dependiendo del desarrollo de la operación. Por ejemplo, si las briquetas no salían separadas unas de otras, es decir, si salían unidas entre sí por sus bordes, significaba que la separación era demasiado grande, por lo que había que reducirla. En cambio, en otras ocasiones se observó que una de las razones del bloqueo de la briqueteadora era que la separación entre los rodillos era demasiado pequeña y, en estos casos, se procedió a aumentarla.

Una vez establecido el tope, se presurizaba el sistema hidráulico para ajustar la posición del rodillo inferior (moviéndolo hacia arriba). Cuando éste alcanzaba el tope, se seguía aumentando la presión hasta que era suficiente para la compactación de la briqueta. En los experimentos llevados a cabo fue necesario que la fuerza ejercida en el rodillo por el sistema hidráulico estuviera comprendida entre 44 y 48 kN. Estos valores se encuentran ya próximos a la máxima fuerza permitida (50 kN), pero si no se empleaban fuerzas tan altas, las briquetas no salían suficientemente compactadas.

Una vez definidos la separación entre los rodillos y la fuerza que ejerce el sistema hidráulico en el rodillo inferior, se comenzaron a realizar las pruebas de briqueteado. Fue entonces cuando se tuvieron que ajustar las demás variables: el modo en el que se realizaba la alimentación de material en el tornillo sin fin, la velocidad del tornillo sin fin (V_{ts}) y la velocidad de los rodillos (V_r).

En cuanto a la alimentación de material en el tornillo sin fin, puesto que, como se ha mencionado anteriormente, se realizaba de forma manual, sólo se puede indicar que en función de cómo se alimentara el material, se controlaba la cantidad de material transportada

por el tornillo sin fin que, como se verá más adelante, influía en el par (M) ejercido por los rodillos durante el briqueteado.

La velocidad del tornillo sin fin y la velocidad de los rodillos, en cambio, se controlaron mediante el ajuste de unos variadores de velocidad, pudiendo darles valores entre el 0 y el 100%. El ajuste de ambas velocidades se realizó de manera simultánea, ya que ambas variables están muy relacionadas entre sí. Si la velocidad del tornillo es demasiado alta o la velocidad de los rodillos demasiado baja, llegará demasiado material a los rodillos y se bloquearán. En caso contrario, si la velocidad del tornillo es demasiado baja o velocidad de los rodillos es demasiado alta, llegará poco material a los rodillos y las cavidades de éstos no se llenarán.

En conclusión, tanto el flujo de material alimentado en el tornillo sin fin, como la velocidad del tornillo sin fin y la velocidad de los rodillos, influyen en la cantidad de material que llega a las cavidades en los rodillos. Resultó muy importante encontrar un equilibrio entre estas variables, puesto que afectan al par que ejercen los rodillos sobre el material para la consolidación de la briqueta (Figura 5.8). El par ejercido por los rodillos sobre el material a compactar resultó ser uno de los parámetros más importantes en el briqueteado. Si el par de los rodillos era demasiado bajo (menor de 20 Nm), se obtenían briquetas blandas y desmenuzables, pero si el par era excesivo, las briquetas se pegaban a la superficie de las cavidades de los rodillos, llegando incluso a partirse por la mitad (Figura 5.9).



Figura 5.9.- Resultado del proceso de briqueteado con un par del rodillo demasiado alto.

Por ello, fue muy importante comprobar continuamente el valor del par, el cual aparece reflejado en una de las pantallas de la briqueteadora, que servía como controlador del buen funcionamiento del proceso.

En conclusión, resultó necesario ajustar el modo de alimentación y las velocidades del tornillo sin fin y de los rodillos, de manera que se pudiera llevar a cabo la fabricación de las briquetas de forma continua, es decir, llenándose las cavidades adecuadamente y sin atascos, y alcanzando un par de al menos 20 Nm, valor a partir del cual las briquetas salían compactadas.

5.4.- ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS BRIQUETAS

Para caracterizar las briquetas fabricadas se realizaron ensayos de caída a diferentes tiempos de curado a temperatura ambiente (24 horas, 48 horas y 15 días) y medidas de su humedad, en verde y tras 24 horas, 48 horas y 15 días de curado. A continuación, se detalla el procedimiento llevado a cabo en ambos ensayos.

5.4.1.- Ensayos de caída

Con el objetivo de determinar la resistencia a la rotura de las briquetas fabricadas, se han llevado a cabo ensayos de caída de las briquetas tras 24 horas, 48 horas y 15 días de curado a temperatura ambiente. De esta manera, se podrá comprobar la evolución de la generación de finos que se produce con cada serie de briquetas en función del tiempo de curado. No se han realizado ensayos de caída con la briqueta en verde debido a que aún es demasiado débil, siendo necesario que se seque para alcanzar una resistencia mínima.

No ha sido posible llevar a cabo el método descrito anteriormente para la determinación de la resistencia a la rotura, el '*Shatter test*', ya que para ello se precisarían 20 kg de briquetas para realizar cada prueba.

De este modo, el procedimiento llevado a cabo durante estos ensayos fue el siguiente. En primer lugar, se seleccionaron cinco briquetas y se anotó su peso inicial (P_0). Entonces, se elevaron a una altura de 2 m y se dejaron caer sobre una superficie metálica lisa. Se recogieron las briquetas y los finos formados en el impacto contra la superficie metálica y

se volvieron dejar caer desde la misma altura de 2 m. Finalmente, se pasaron los restos de las briquetas y los finos por un tamiz de 10 mm de luz, de manera que se separó la fracción mayor de 10 mm (P_{+10}) y la fracción menor de 10 mm (P_{-10}), tal y como se muestra en la Figura 5.10.

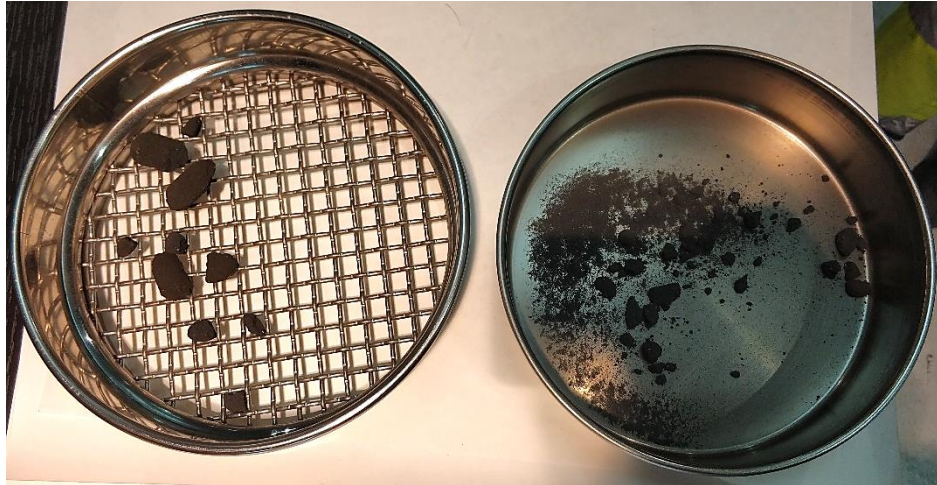


Figura 5.10.- Separación de las fracciones mayor y menor de 10 mm.

A continuación, se pesó la fracción P_{+10} , obteniéndose la P_{-10} por diferencia con el peso inicial, P_0 , al cometerse menos error en la recogida de la fracción más gruesa que de la fracción más fina. Este procedimiento se repitió, en función del número de briquetas fabricadas, tres veces en cada prueba, y se determinó el valor medio, con objeto de obtener resultados representativos. Los valores individuales obtenidos en cada ensayo, el valor medio y la desviación típica se han recogido en el Anexo A2.1.

Una vez se llevaron a cabo los ensayos de caída, se determinó el índice de caída (IC) mediante la fórmula que se muestra a continuación, ecuación (5.1).

$$IC [\%] = \frac{P_{-10}}{P_0} \cdot 100 \quad (5.1)$$

IC Índice de caída [%]

P_{+10} Peso de la fracción de briquetas mayor de 10 mm al finalizar el ensayo [g]

$P_{-10} = P_0 - P_{+10}$ Peso de la fracción de briquetas menor de 10 mm al finalizar el ensayo [g]

P_0 Peso inicial de las cinco briquetas [g]

Este parámetro IC representa el porcentaje de finos (fracción menor de 10 mm) generado tras dos caídas de las briquetas desde una altura de 2 m. Para que los resultados sean considerados satisfactorios, el índice de caída no debe superar el 30%. El índice de caída calculado en cada uno de los ensayos individuales, el valor medio y la desviación típica, se muestran también en el Anexo A2.1.

5.4.2.- Humedad de las briquetas

Con el objetivo de observar cómo evoluciona la humedad de las briquetas en función del ligante empleado, así como de comprobar si guarda alguna relación con los resultados obtenidos en los ensayos de caída y cuánto tiempo de curado es necesario para que las briquetas reduzcan su humedad hasta al menos un 3%, se ha medido la humedad de la briketa en verde y tras 24 horas, 48 horas y 15 días de curado a temperatura ambiente.

Para ello, se ha empleado un determinador electrónico de humedad como el que se puede ver la Figura 5.11.

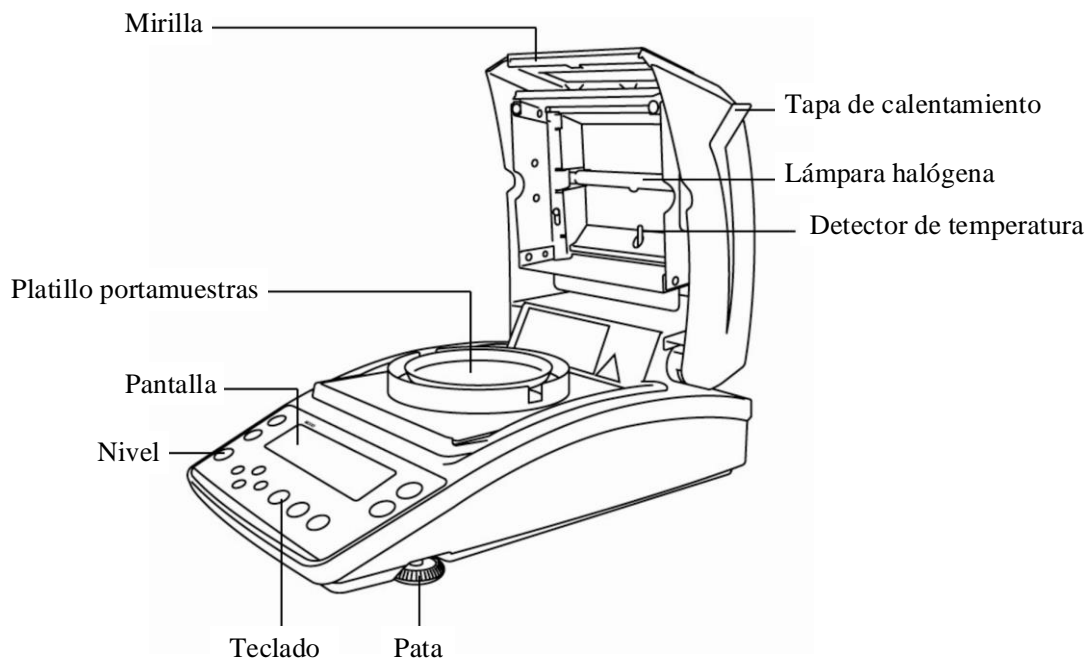


Figura 5.11.- Determinador electrónico de humedad [60].

Tan sólo es necesario introducir aproximadamente una muestra de 2 g de la briketa cuya humedad se pretende medir en el platillo portamuestras. Seguidamente, el dispositivo,

calienta la muestra hasta que se evapora toda el agua que contiene en su interior y, por diferencia entre el peso inicial y el peso final, devuelve el porcentaje de humedad de la muestra, mostrándolo en la pantalla. Cada medición se ha realizado por triplicado y se ha calculado la media de los tres valores con el objetivo de que el resultado fuese más representativo. Los valores individuales obtenidos en cada medición, el valor medio y la desviación típica se han recogido en el Anexo A2.2.

6. RESULTADOS

6.1.- EXPERIMENTO 1: AGLOMERACIÓN DE LODOS GRUESOS DE ACERÍA

En este primer experimento se ha llevado a cabo el briqueteado de varias mezclas compuestas exclusivamente por lodos gruesos de acería, en concreto por un 75% de lodos gruesos de acería de la planta A y un 25% de la planta B, tal y como se mencionó en el apartado 5.2.1. Se comprobará la efectividad del ligante bajo distintas condiciones de humedad de la mezcla inicial, puesto que, en la práctica industrial, la humedad de los lodos resulta muy variable. Por ello, se han llevado a cabo pruebas entre el 6 y el 7% de humedad (humedad natural de la mezcla de lodos en este experimento 1), al 3%, al 5% y al 10% de humedad.

6.1.1.- Mezclas con una humedad de entre el 6 y el 7%

Se realizaron un total de nueve pruebas para la aglomeración de lodos gruesos de acería con una humedad comprendida entre un 6 y un 7%, es decir, con la humedad natural de la mezcla de lodos, cinco con el ligante P y cuatro con el ligante C.

En la Tabla 6.1 se puede ver, por un lado, la humedad de la mezcla (H_{mezcla}) y el ligante empleado en cada prueba. Además, se han recogido los distintos parámetros que se utilizaron: el espacio entre los rodillos (E_r), la fuerza del rodillo (F_r), la velocidad del tornillo sin fin (V_{ts}) y la velocidad de giro de los rodillos (V_r), a los cuales se hizo referencia en el apartado 5.3, dónde se detalla cómo se debe realizar el ajuste de cada uno de ellos. Por último, también se indica en la tabla si se consiguió o no fabricar briquetas.

Tabla 6.1.- Experimento 1. Parámetros del proceso y producción de briquetas en las pruebas realizadas para la aglomeración de las mezclas LGA + LGB (6-7% humedad).

Prueba	Ligante	H _{mezcla} [%]	Parámetros del proceso				Producción de briquetas
			E _r [mm]	F _r [kN]	V _{ts} [%]	V _r [%]	
LG1P1	P	6.99	0.4	48.0	100	100	SÍ
LG1P2		6.99	0.4	48.0	80	50	SÍ
LG4P1		6.42	0.7	44.5	100	10	SÍ
LG4P2		6.42	0.7	44.5	50 - 60	20	SÍ
LG5P		6.57	0.7	44.7	55	20	SÍ
LG1C	C	6.99	0.4	48.0	80	50	NO
LG4C		6.42	0.7	44.2	53	20	SÍ
LG5C1		6.57	0.7	44.7	70	20	SÍ
LG5C2		6.57	0.6	43.8	54	20	SÍ

Todas las pruebas realizadas con el ligante P dieron lugar a la fabricación de briquetas. La Figura 6.1 muestra las imágenes de las briquetas fabricadas en cada prueba realizada con el ligante P.

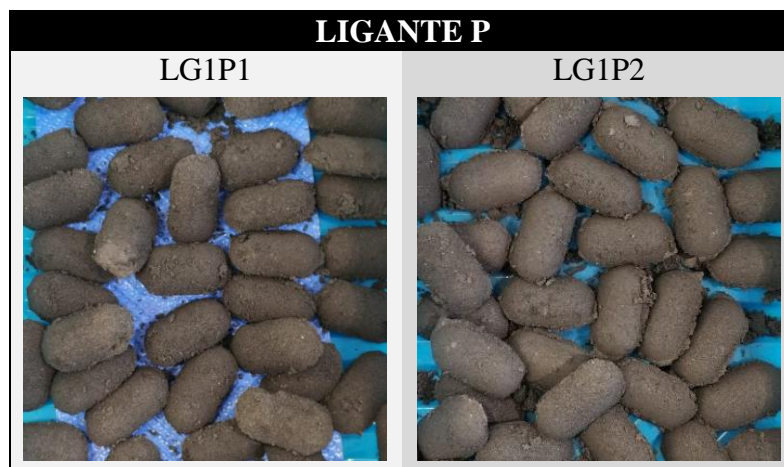


Figura 6.1.- Experimento 1. Briquetas fabricadas a partir de las mezclas LGA + LGB (6-7% humedad) con el ligante P. Continúa en la página siguiente.



Figura 6.1 (continuación).- Experimento 1. Briquetas fabricadas a partir de las mezclas LGA + LGB (6-7% humedad) con el ligante P.

Es importante indicar que las pruebas LG1P1 y LG1P2 fueron las primeras pruebas que se llevaron a cabo. Aunque se han anotado los parámetros del proceso y se han producido briquetas, no se obtuvieron velocidades óptimas, ni se controló el par, pero sirvieron para la puesta en marcha de la máquina.

La prueba LG5P es un duplicado de la LG4P2, que se realizó con el objetivo de optimizar la velocidad del tornillo sin fin, ya que en la prueba LG4P2 no se consiguió trabajar a una velocidad del tornillo sin fin constante, sino que había variado continuamente entre el 50 y el 60%. En la prueba LG5P se consiguió fijar el valor adecuado de la velocidad del tornillo sin fin en un 55%.

En cuanto a las pruebas realizadas con el ligante C, se consiguieron fabricar briquetas en todas las pruebas realizadas salvo en la prueba LG1C. No obstante, la razón no fue el ligante empleado, sino un desplazamiento hacia la izquierda del tornillo sin fin, que provocó que gran parte del material a aglomerar cayera antes de llegar a los rodillos, de forma que resultó imposible el llenado de las cavidades de éstos. La Figura 6.2 muestra las imágenes de las briquetas fabricadas en cada prueba realizada con el ligante C.



Figura 6.2.- Experimento 1. Briquetas fabricadas a partir de las mezclas LGA + LGB (6-7% humedad) con el ligante C.

Por último, es necesario indicar que la prueba LG5C1 pretendía ser un duplicado de la LG4C, aunque, como se puede observar en la Tabla 6.1, no se consiguieron fabricar briquetas con los mismos parámetros. Esto pudo deberse a que, como la alimentación del material en el tornillo sin fin se realiza de forma manual, no resulta fácil duplicar las pruebas.

6.1.1.1. Índice de caída

Con el objetivo de determinar si el índice de caída, es decir, la fracción de finos (menor de 10 mm) generados, es inferior al 30% máximo permitido, se han realizado ensayos de caída, tal y como se detalló anteriormente en el apartado 5.4.1.

La Figura 6.3 muestra los resultados obtenidos en dichos ensayos llevados a cabo con las briquetas fabricadas a partir de la mezcla de lodos gruesos de acería con una humedad de entre el 6 y el 7% mediante el empleo del ligante P.

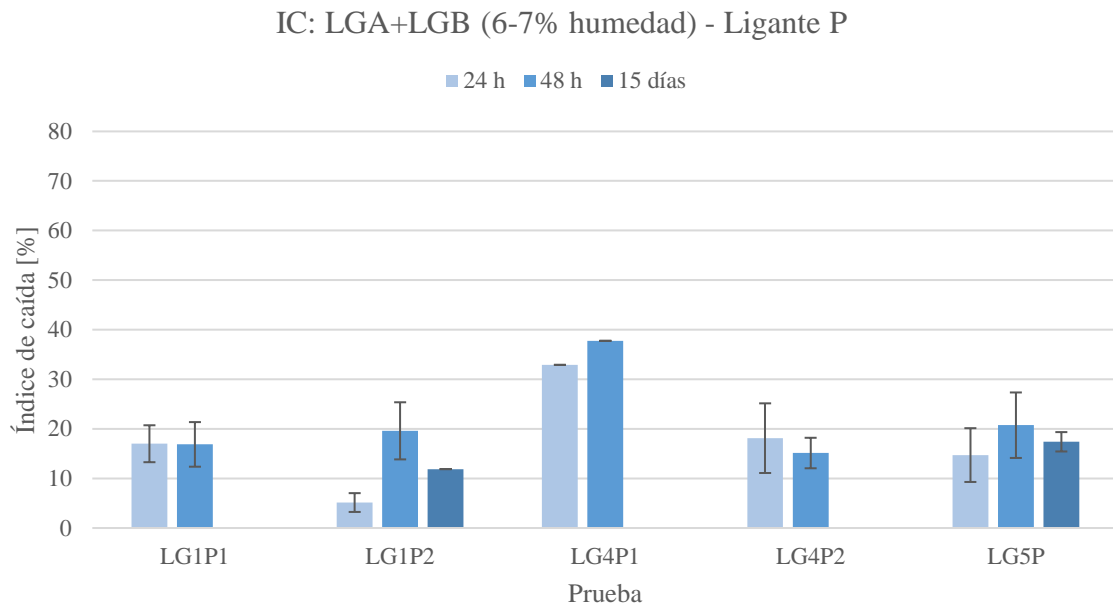


Figura 6.3.- Experimento 1. Índice de caída de las briquetas fabricadas a partir de las mezclas LGA + LGB (6-7% humedad) con el ligante P.

Como se puede observar, a excepción de la prueba LG4P1, en la cual no se consiguió optimizar el par, en el resto de las pruebas se fabricaron briquetas con un índice de caída inferior incluso al 20% aproximadamente.

La prueba con menor índice de caída y, además, con tendencia de los finos a disminuir con el tiempo, fue la prueba LG4P2. No obstante, no se ha seleccionado como óptima, debido a que no se consiguió producir a una velocidad del tornillo sin fin constante y a que se produjeron pocas briquetas, por lo que no se han podido recoger datos sobre el índice de caída ni de la humedad tras 15 días de curado. Por ello, se ha seleccionado como óptimo su duplicado, la prueba LG5P, ya que, aunque los resultados obtenidos en los ensayos de caída han sido un poco peores, se produjo a velocidad del tornillo sin fin constante y, al igual que en la prueba LG4P2, se alcanzó un par de 30 Nm o superior.

A continuación, la Figura 6.4 muestra los resultados obtenidos en los ensayos de caída realizados con las briquetas producidas en el experimento 1 con una humedad inicial de la mezcla del 6-7% empleando el ligante C.

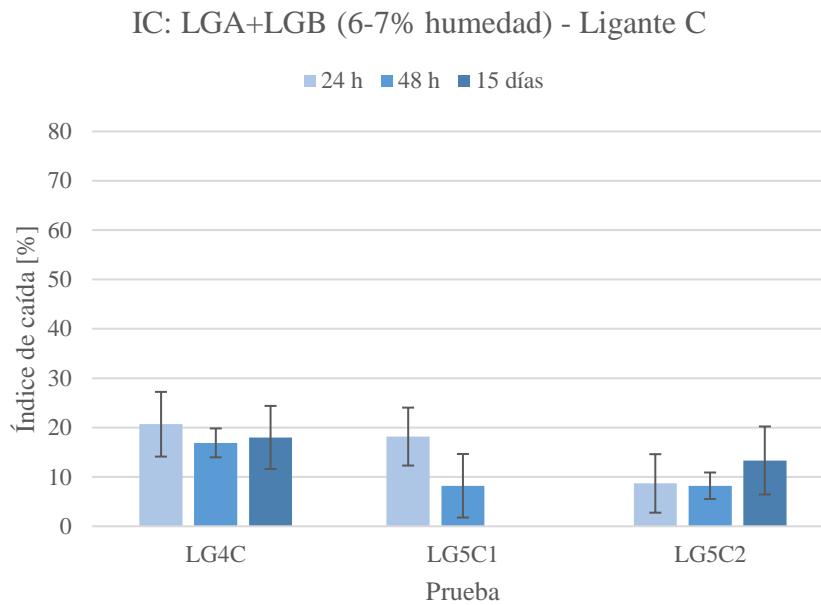


Figura 6.4.- Experimento 1. Índice de caída de las briquetas fabricadas a partir de las mezclas LGA + LGB (6-7% humedad) con el ligante C.

Tal y como muestra la Figura 6.4, en todas las pruebas se han obtenido muy buenos resultados, siendo el índice de caída prácticamente menor al 20% en todos los casos. Se seleccionó como óptima la prueba LG5C2, al ser la prueba en la que la generación de finos fue más baja, además de que se consiguió alcanzar un par entre 40 y 50 Nm.

Por último, cabe destacar la similitud entre los parámetros del proceso seleccionados en las pruebas óptimas realizadas con cada ligante LG5P y LG5C2 (Tabla 6.2).

Tabla 6.2.- Experimento 1. Comparación de los parámetros de proceso de las pruebas óptimas realizadas con la mezcla LGA+LGB (6-7% humedad).

Prueba	Ligante	H_{mezcla} [%]	Parámetros del proceso				Producción de briquetas
			E_r [mm]	F_r [kN]	V_{ts} [%]	V_r [%]	
LG5P	P	6.57	0.7	44.7	55	20	SÍ
LG5C2	C	6.57	0.6	43.8	54	20	SÍ

Parece que, a escala de laboratorio, una velocidad del tornillo sin fin de entre el 54 y el 55% y una velocidad del rodillo del 20% resulta ser un buen ajuste, es decir, un ajuste óptimo

para llevar a cabo el briqueteado de lodos gruesos de acería con una humedad de entre el 6 y el 7%.

6.1.1.2. Evolución de la humedad

Además de la realización de ensayos de caída, se ha medido la humedad inicial de las mezclas y de las briquetas fabricadas en verde y en función del tiempo de curado (24h, 48h y 15 días), tal y como se ha detallado anteriormente en el apartado 5.4.2.

La Figura 6.5 muestra la evolución de la humedad de la mezcla de lodos gruesos de acería, antes y después del briqueteado (verde) y en función del tiempo de curado con el ligante P.

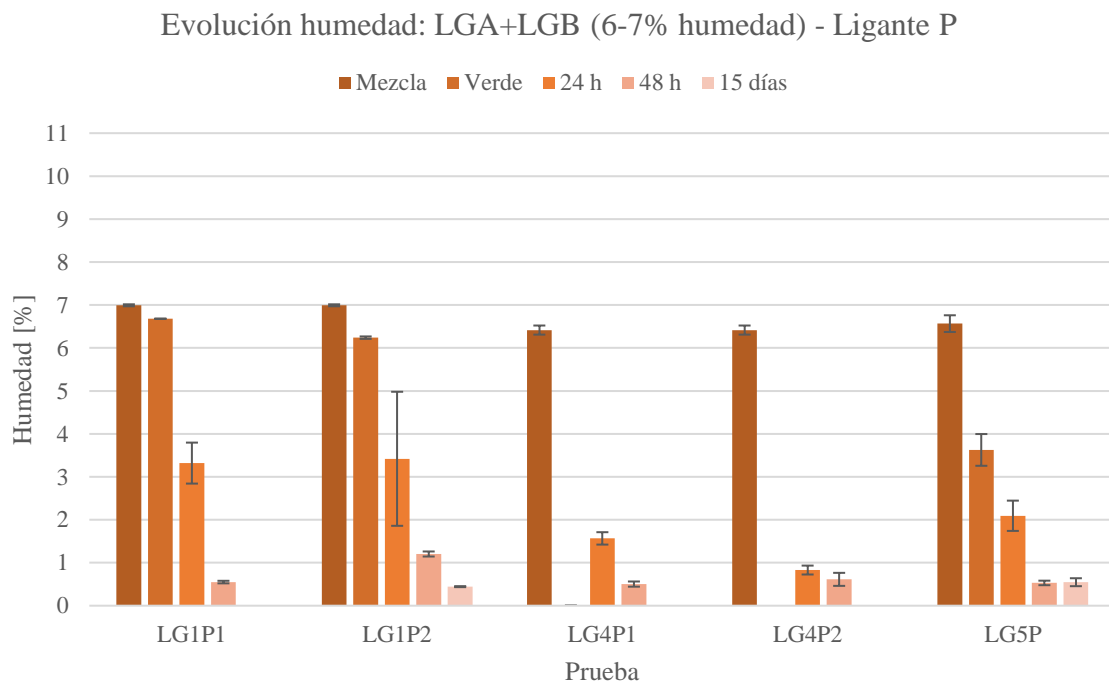


Figura 6.5.- Experimento 1. Evolución de la humedad de las mezclas LGA+LGB (6-7% humedad) antes del briqueteado, después del briqueteado y en función del tiempo de curado con el ligante P.

Como se puede observar, a pesar de que no se haya medido la humedad de la briketa en verde en las pruebas LG4P1 y LG4P2, existe la tendencia de se produzca una disminución de la humedad de la mezcla tras ser briqueteada. Esto es debido a que la aplicación de una fuerza sobre el material para comprimirlo, provoca la expulsión de parte del agua que este contiene.

Por otro lado, en cuanto a la disminución de la humedad de la briqueta con el tiempo de curado, tal y como muestra la Figura 6.5, a excepción de en la prueba LG1P2, la humedad de las briquetas resultó ser inferior al 1% a las 48 h de curado, es decir, el curado se produjo muy rápidamente desde la fabricación de la briqueta.

En cuanto a la evolución de la humedad de la mezcla de lodos gruesos de acería antes y después del briqueteado y en función del tiempo de curado cuando se empleó el ligante C, se han obtenido los resultados que se muestran a continuación en la Figura 6.6.

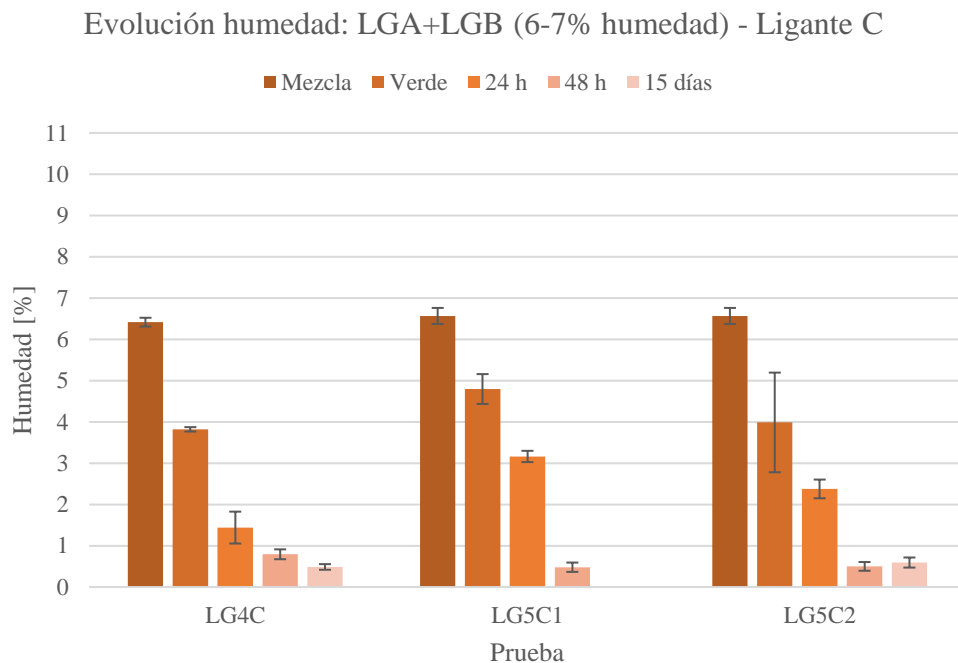


Figura 6.6.- Experimento 1. Evolución de la humedad de las mezclas LGA+LGB (6-7% humedad) antes del briqueteado, después del briqueteado y en función del tiempo de curado con el ligante P.

Como se puede observar ocurre lo mismo que con el ligante P. En las tres pruebas realizadas, la humedad del material ha disminuido tras el briqueteado, y ha continuado disminuyendo aún más con el tiempo de curado, alcanzando en todos los casos una humedad menor del 1% a las 48 h de curado.

6.1.2.- Mezclas con una humedad del 3%

La Tabla 6.3 muestra los parámetros de proceso utilizados en la fabricación de briquetas, tanto con el ligante P como con el ligante C, de una mezcla de lodos gruesos de acería que fue secada a temperatura ambiente hasta que adquirió una humedad del 3%, con el objetivo de estudiar el efecto del ligante con la variación de la humedad.

Tabla 6.3.- Experimento 1. Parámetros de proceso y producción de briquetas en las pruebas realizadas para la aglomeración de la mezcla LGA + LGB (3% humedad).

Prueba	Ligante	H _{mezcla} [%]	Parámetros del proceso				Producción de briquetas
			E _r [mm]	F _r [kN]	V _{ts} [%]	V _r [%]	
LG2P	P	2.90	0.4	48.0	a		NO
LG2C	C	2.90	0.4	48.0	a		NO

a La velocidad del tornillo sin fin y la velocidad de los rodillos se fue variando a lo largo de las pruebas.

Durante estas pruebas, no se consiguieron obtener briquetas con ningún ligante. No obstante, no se puede asegurar que la humedad de la mezcla fuera demasiado baja para que se pudiera llevar a cabo la aglomeración, ya que, como se mencionó anteriormente, en la prueba LG1C el tornillo sin fin se desplazó hacia la izquierda y, durante la realización de las pruebas LG2P y LG2C, aún no se había descubierto este fallo. Además, no fue posible repetir las pruebas con esta humedad por falta del material suficiente para ello.

6.1.3.- Mezclas con una humedad del 5%

De nuevo, con el objetivo de comprobar la efectividad del ligante bajo diferentes condiciones de humedad de la mezcla, se llevaron a cabo pruebas con una humedad del 5% tras secar la mezcla de lodos a temperatura ambiente. En concreto, se realizaron las tres pruebas que se muestran en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4.- Experimento 1. Parámetros del proceso y producción de briquetas en las pruebas realizadas para la aglomeración de las mezclas LGA + LGB (5% humedad).

Prueba	Ligante	H _{mezcla} [%]	Parámetros del proceso				Producción de briquetas
			E _r [mm]	F _r [kN]	V _{ts} [%]	V _r [%]	
LG3P	P	4.93	0.4	48.0	b		NO
LG7P		5.07	0.7	45.1	80	20	SÍ
LG3C	C	4.93	0.4	48.0	b		NO

^b La velocidad del tornillo sin fin y la velocidad de los rodillos se fue variando a lo largo de las pruebas.

Al igual que en las pruebas LG1C, LG2P y LG2C mencionadas anteriormente, en las pruebas LG3P y LG3C tampoco se consiguieron fabricar briquetas a causa del desplazamiento del tornillo sin fin a la izquierda, que aún no se había detectado. Fue precisamente tras realizar la prueba LG3C cuando se detectó este fallo y se ajustó la posición del tornillo sin fin. Entonces, se decidió repetir la prueba con una humedad del 5% con el ligante P, puesto que no se disponía de suficiente material para realizar la prueba con ambos ligantes y parecía que resultaba más fácil operar con el ligante P que con el ligante C. De esta forma, en la prueba LG7P, se consiguieron fabricar briquetas (Figura 6.7) alcanzando un par durante la producción de 20 Nm.



Figura 6.7.- Experimento 1. Briquetas fabricadas a partir de las mezclas LGA + LGB (5% humedad) con el ligante P.

6.1.3.1.- Índice de caída

Los resultados obtenidos en los ensayos de caída realizados con las briquetas fabricadas a partir de una mezcla de lodos con un 5%, de humedad y el ligante P se muestran en la Figura 6.8.

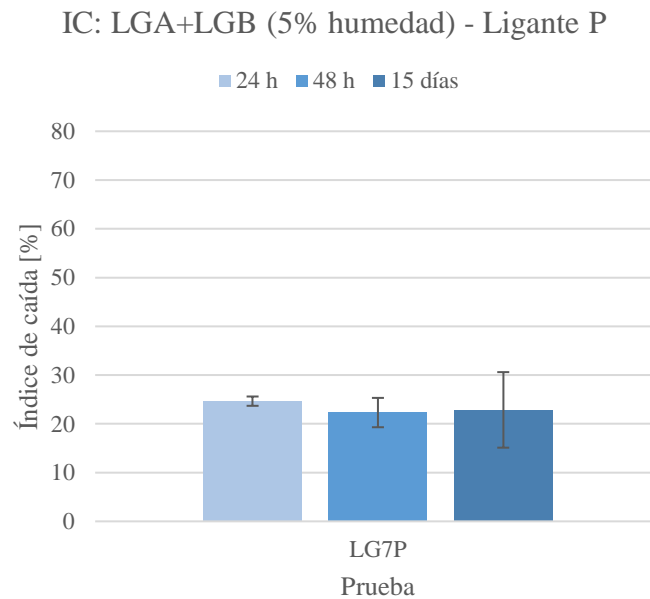


Figura 6.8.- Experimento 1. Índice de caída de las briquetas fabricadas a partir de la mezcla LGA + LGB (5% humedad) con el ligante P.

Los índices de caída obtenidos en la prueba LG7P fueron menores del 30% para todos los tres tiempos de curado probados. En este caso, el índice de caída apenas ha variado con el tiempo de curado entre 24 h y 15 días, sino que más bien parece que permanece constante.

6.1.3.2.- Evolución de la humedad

La Figura 6.9 muestra la evolución de la humedad de la mezcla de lodos gruesos de acería antes y después del briqueteado y cómo evoluciona su humedad con el tiempo de curado.

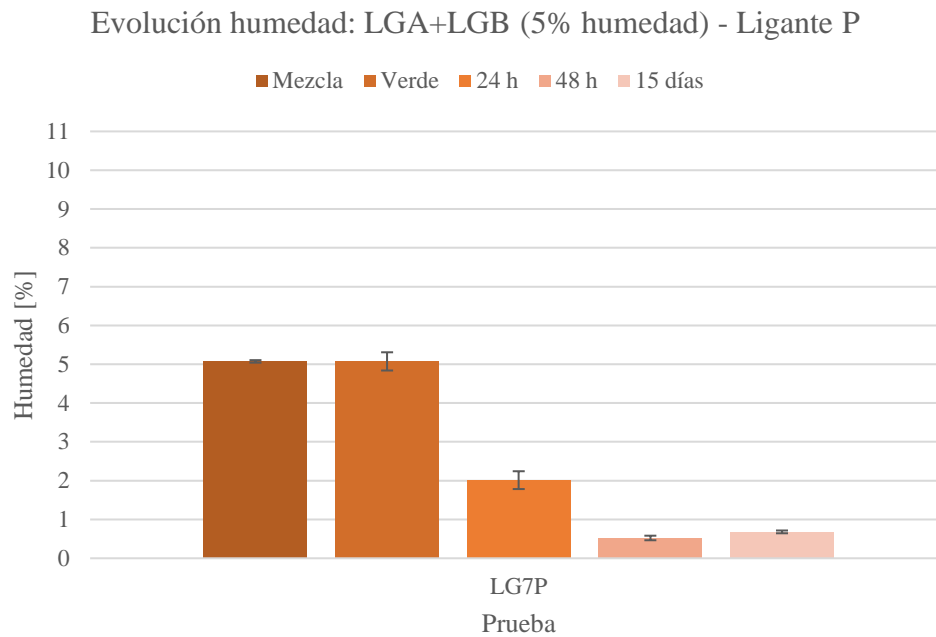


Figura 6.9.- Experimento 1. Evolución de la humedad de la mezcla LGA+LGB (5% humedad) antes del briqueteado, después del briqueteado y en función del tiempo de curado con el ligante P.

En este caso, la humedad del material antes y después de la operación de briqueteado fue prácticamente la misma. Esto puede deberse a que, puesto que durante esta prueba no se consiguió optimizar el par, el material no se compactó lo suficiente como para expulsar bien el agua como en los casos anteriores. En cuanto al tiempo de curado, se alcanza una humedad de aproximadamente el 2% a las 24 h y menor al 1% a las 48 h, por lo que, al igual que en las pruebas realizadas con la humedad comprendida entre el 6 y el 7%, el tiempo necesario para el curado es muy corto.

6.1.4.- Mezclas con una humedad del 10%

Por último, para comprobar cómo actuaban ambos ligantes cuando la humedad de la mezcla era superior a la humedad natural de los lodos, se añadió agua a la mezcla mediante el uso de un dispersor hasta que esta alcanzó un 10% de humedad. Entonces, se realizaron las dos pruebas que se muestran a continuación en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5.- Experimento 1. Parámetros del proceso y producción de briquetas en las pruebas realizadas para la aglomeración de la mezcla LGA + LGB (10% humedad).

Prueba	Ligante	H _{mezcla} [%]	Parámetros del proceso				Producción de briquetas
			E _r [mm]	F _r [kN]	V _{ts} [%]	V _r [%]	
LG6P1	P	9.74	0.6	44.9	10	5	NO
LG6P2		9.74	0.4	47.9	20	5	SÍ

Ambas pruebas se realizaron con el ligante P puesto que no se disponía de material suficiente para probar el ligante C. Tal y como ocurrió con las pruebas realizadas con una humedad del 5%, se eligió el ligante P en lugar del C, porque parecía que resultaba más sencillo operar con él.

En la primera prueba que se llevó a cabo, la LG6P1, no se consiguieron obtener briquetas. La mezcla era demasiado húmeda y pastosa y la velocidad del tornillo sin fin demasiado baja. En la segunda prueba, se aumentó la velocidad del tornillo sin fin y ya se consiguió el compactado de las briquetas (Figura 6.10).

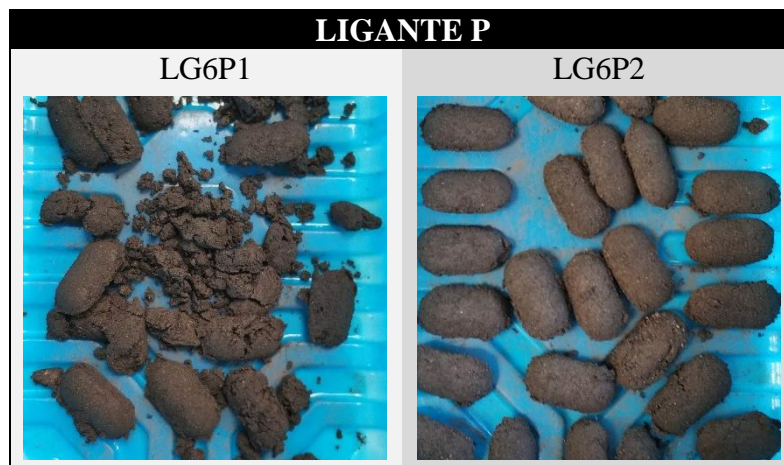


Figura 6.10.- Experimento 1. Briquetas fabricadas a partir de la mezcla LGA + LGB (10% humedad) con el ligante P.

Como se puede observar en la Tabla 6.5, las velocidades que se necesitó aplicar para procesar este material tan húmedo fueron mucho más bajas que las empleadas en los anteriores casos estudiados.

En cualquier caso, para la producción de briquetas en la prueba LG6P2 fue necesario realizar tres paradas durante la operación, ya que la briqueteadora se bloqueaba continuamente. Se

podría decir por tanto que una humedad del 10% resulta demasiado alta para el correcto briqueteado de estos materiales con el ligante P. Por ello, no se recomendaría para la práctica industrial, ya que resulta muy complicado su manejo y su alimentación.

6.1.4.1.- Índice de caída

Los resultados obtenidos en los ensayos de caída realizados con las briquetas fabricadas a partir de la mezcla de lodos gruesos de acería con una humedad del 10% se muestran a continuación en la Figura 6.11.

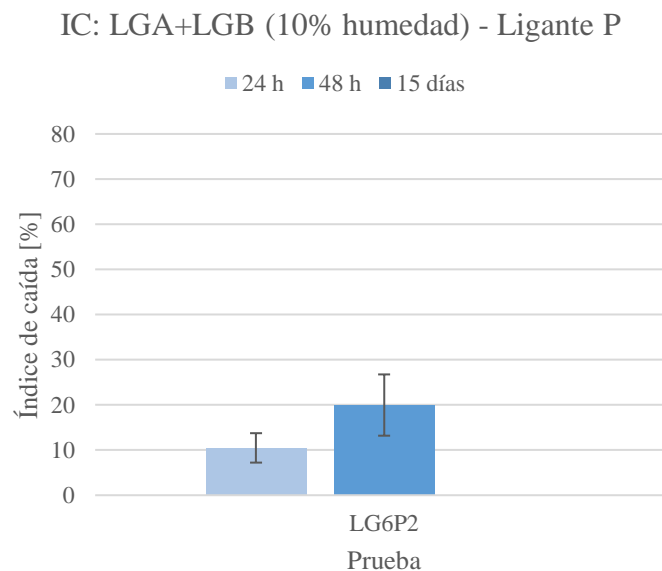


Figura 6.11.- Experimento 1. Índice de caída de las briquetas fabricadas a partir de la mezcla LGA + LGB (10% humedad) con el ligante P.

Como se puede observar, el índice de caída resultó ser menor al 20% a las 24 h y también a las 48 h de curado. En cuanto al índice de caída a los 15 días de curado, no se fabricaron suficientes briquetas para realizar dichos ensayos.

6.1.4.2.- Evolución de la humedad

La Figura 6.12 muestra la evolución de la humedad de la mezcla de lodos antes y después de ser briqueteada y cómo evoluciona su humedad con el tiempo de curado.

Evolución humedad: LGA+LGB (10% humedad) - Ligante P

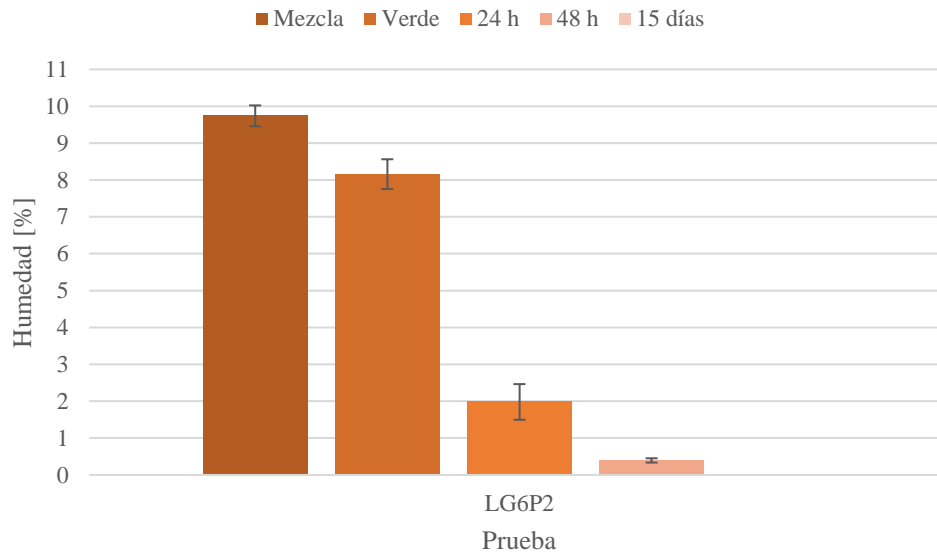


Figura 6.12.- Experimento 1. Evolución de la humedad de la mezcla LGA+LGB (10% humedad) antes del briqueteado, después del briqueteado y en función del tiempo de curado con el ligante P.

Tal y como se muestra en la Figura 6.12, al igual que había ocurrido en la mayoría de las pruebas realizadas con anterioridad, la humedad de la mezcla disminuye por la acción de la fuerza aplicada durante el briqueteado, es decir, la humedad de la briqueta en verde es menor que la humedad de la mezcla antes de ser briquetada. Además, la humedad se reduce hasta aproximadamente un 2% a las 24 h de curado y hasta menos de un 1% a las 48 h de curado, por lo que en este caso también el tiempo de curado es también relativamente corto.

6.2.- EXPERIMENTO 2: AGLOMERACIÓN DE LODOS GRUESOS DE ACERÍA Y LODOS ACEITOSOS

En este experimento la mezcla que se pretendió briquetear estaba formada no solo por lodos gruesos de acería, sino que, además, incluía un 10 o un 15% de lodos aceitosos, tal y como se explicó en mayor grado de detalle en el apartado 5.2.2. Se comenzó añadiendo un 10% de lodos aceitosos y, como se consiguieron fabricar briquetas, se decidió aumentar dicho porcentaje hasta un 15%, ya que, como se ha mencionado anteriormente, resulta interesante aumentar el porcentaje de lodos aceitosos en la mezcla, debido a lo complicado que resulta gestionarlos de otra manera.

Con el objetivo de comprobar la efectividad del ligante bajo distintas condiciones de humedad, se llevaron a cabo las pruebas a un 3% de humedad (humedad natural de la mezcla de lodos en este experimento 2) y a una humedad situada entre un 5 y un 6%, para aquellas mezclas que contenían un 10% de lodos aceitosos. En el caso de mezclas con un 15% de lodos aceitosos tan sólo fue posible realizar las pruebas al 3% de humedad, por falta de tiempo y material suficiente.

6.2.1.- Mezclas con una humedad del 5-6% y con un 10% de lodos aceitosos

Se han llevado a cabo seis pruebas de briqueteado con mezclas formadas por lodos gruesos de acería y un 10% de lodos aceitosos con una humedad de entre el 5 y el 6%, con el objetivo no solo de comprobar cómo afectan al ligante las distintas condiciones de humedad, sino de poder comparar los resultados con los obtenidos a una humedad similar, pero sin lodos aceitosos. Para ello, puesto que la humedad natural de la mezcla de lodos en este experimento era del 3%, se añadió agua mediante un dispersor hasta que se alcanzó dicha humedad situada entre el 5 y el 6%.

Los parámetros de operación empleados en estas pruebas son los que se muestran en la Tabla 6.6 a continuación.

Tabla 6.6.- Experimento 2. Parámetros del proceso y producción de briquetas en las pruebas realizadas para la aglomeración de las mezclas LGA + LGB + 10%AC (5-6% humedad).

Prueba	Ligante	H _{mezcla} [%]	Parámetros del proceso				Producción de briquetas
			E _r [mm]	F _r [kN]	V _{ts} [%]	V _r [%]	
LGAC3P	P	5.70	0.3	45.7	73	50	SÍ
LGAC9P		5.42	0.3	44.9	80	27	SÍ
LGAC4C	C	5.61	0.5	46.4	100	30	SÍ
LGAC5C		5.70	0.3	45.7	55	10	SÍ
LGAC6C		5.42	0.4	44.6	c		NO
LGAC10C		6.06 ^d	0.3	44.9	70	35	SÍ

- ^c La velocidad del tornillo sin fin y la velocidad de los rodillos se fue variando a lo largo de la prueba.
- ^d La humedad de esta mezcla se calculó en función de las humedades medidas en los lodos por separado, puesto que las mediciones de la humedad realizadas no fueron correctas.

Como se puede observar, en las dos pruebas realizadas con el ligante P se consiguieron fabricar briquetas (Figura 6.13).

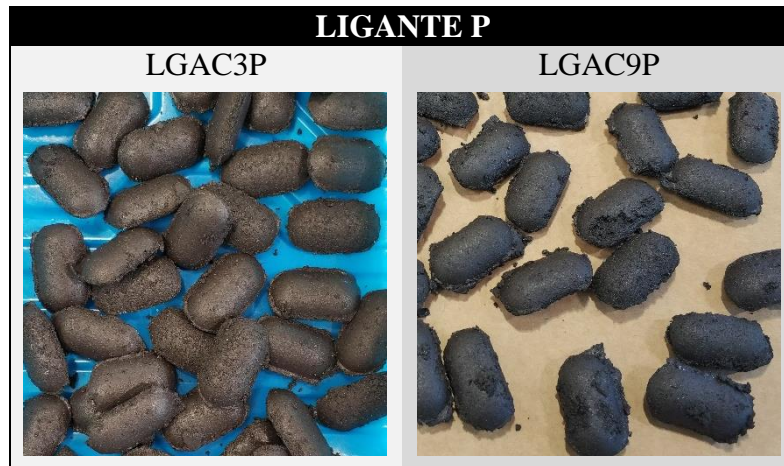


Figura 6.13.- Experimento 2. Briquetas fabricadas a partir de las mezclas LGA + LGB + 10%AC (5-6% humedad) con el ligante P.

En cuanto a las pruebas realizadas con el ligante C, se obtuvieron briquetas en todas las pruebas (Figura 6.14), salvo en la prueba LGAC6C.



Figura 6.14.- Experimento 2. Briquetas fabricadas a partir de las mezclas LGA + LGB + 10%AC (5-6% humedad) con el ligante C.

No obstante, de nuevo, fue a causa del desplazamiento del tornillo sin fin a la izquierda que ocurrió durante la prueba LGAC5C. En la prueba LGAC6C se detectó el fallo y posteriormente se corrigió, de forma que no afectó a más pruebas.

6.2.1.1.- Índice de caída

Los resultados obtenidos en los ensayos de caída realizados con las briquetas fabricadas a partir de una mezcla de lodos gruesos de acería y un 10% de lodos aceitosos, con una

humedad de la mezcla del 5 al 6%, cuando se empleó el ligante P, se muestran en la Figura 6.15.

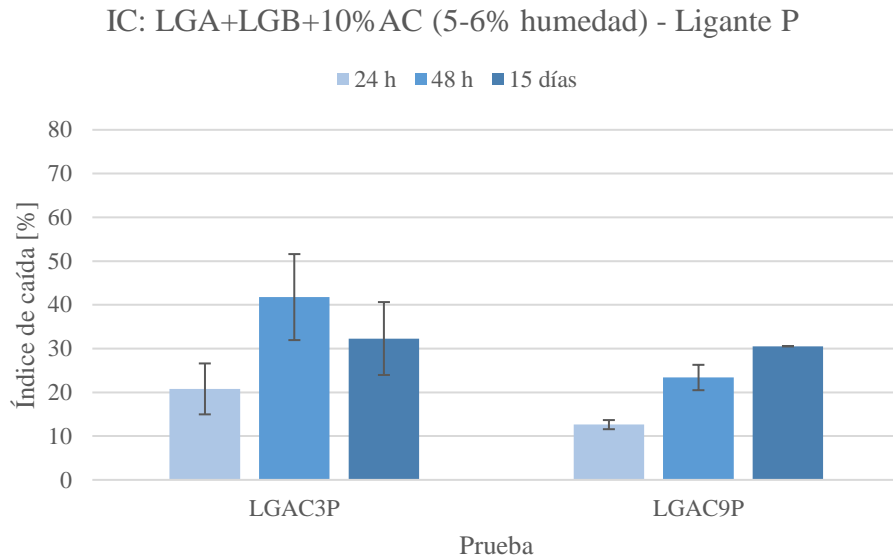


Figura 6.15.- Experimento 2. Índice de caída de las briquetas fabricadas a partir de las mezclas LGA + LGB + 10%AC (5-6% humedad) con el ligante P.

En la prueba LGAC3P, en la que se alcanzó un par comprendido entre 30 y 40 Nm, se obtuvieron buenos resultados a las 24 h de curado. No obstante, tras 48 h de curado, el índice de caída aumentó hasta aproximadamente un 40%, disminuyendo a los 15 días de curado hasta un 32%, pero aun así superando el límite máximo permitido del 30%.

En cambio, en la prueba LGAC9P, se consiguió una buena producción alcanzándose un par de 60 Nm. Los resultados obtenidos muestran que el índice de caída a las 24 y 48 h de curado fue inferior al 30% y, a los 15 días, se sitúa en el 30.5%, razones por las cuales, aunque a los 15 días se supere ligeramente el límite máximo permitido, se puede considerar la prueba LGAC9P como la prueba óptima de esta serie.

Por otro lado, en la Figura 6.15 se puede observar que la prueba LGAC9P mostró una desviación típica de los resultados mucho menor que la prueba LGAC3P. Esto podría deberse a un aumento en la homogeneidad del material al conseguir alcanzar un par mayor.

En cuanto al ligante C, la Figura 6.16 muestra los resultados obtenidos en los ensayos de caída realizados con las briquetas fabricadas con la mezcla de lodos con un 5-6% de humedad.

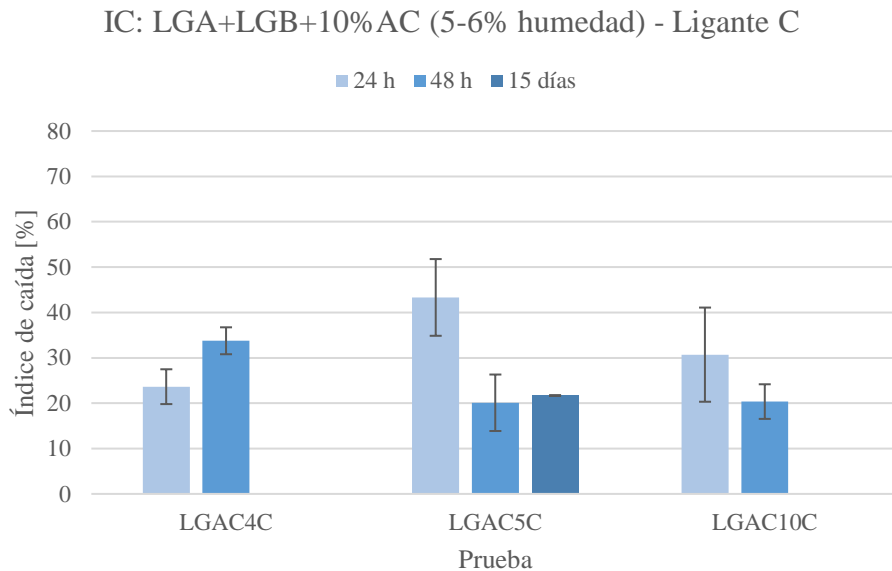


Figura 6.16.- Experimento 2. Índice de caída de las briquetas fabricadas a partir de las mezclas LGA + LGB + 10%AC (5-6% humedad) con el ligante C.

En primer lugar, en la prueba LGAC4C se consiguió una buena producción con un par de 20 Nm, aunque la mezcla de lodos y ligante C resultó difícil de manejar. A las 24 h se obtuvo un índice de caída del 24%, que aumentó hasta alcanzar un 34% a las 48 h, superando el límite máximo permitido.

En cuanto a la prueba LGAC5C, en la cual, como se ha mencionado anteriormente, se produjo el desplazamiento del tornillo sin fin a la izquierda, a las 24 h de curado, el índice de caída resultó ser superior al 40%, reduciéndose hasta aproximadamente un 20% a las 48 h y manteniéndose en ese valor a los 15 días de curado.

Por último, en la prueba LGAC10C, al igual que en la prueba LGAC4C, se consiguió una buena producción con un par de 20 Nm. Además, aunque el índice de caída se situó en torno al 30% tras 24 h de curado, descendió hasta aproximadamente un 20% a las 48 h.

En este caso, ninguna de las pruebas realizadas resultó óptima, ya que en ninguna de ellas se consiguió alcanzar un par superior a 20 Nm. De todas formas, la que proporcionó los mejores

resultados fue la prueba LGAC10C, ya que ha sido la única cuyo índice de caída se mantuvo más o menos por debajo del 30% independientemente del tiempo de curado, además de que parece que la generación de finos tiende a disminuir con el tiempo.

6.2.1.2.- Evolución de la humedad

La Figura 6.17 muestra la evolución de la humedad de la mezcla de lodos antes y después de ser briqueteada y cómo evoluciona su humedad con el tiempo de curado cuando se empleó el ligante P.

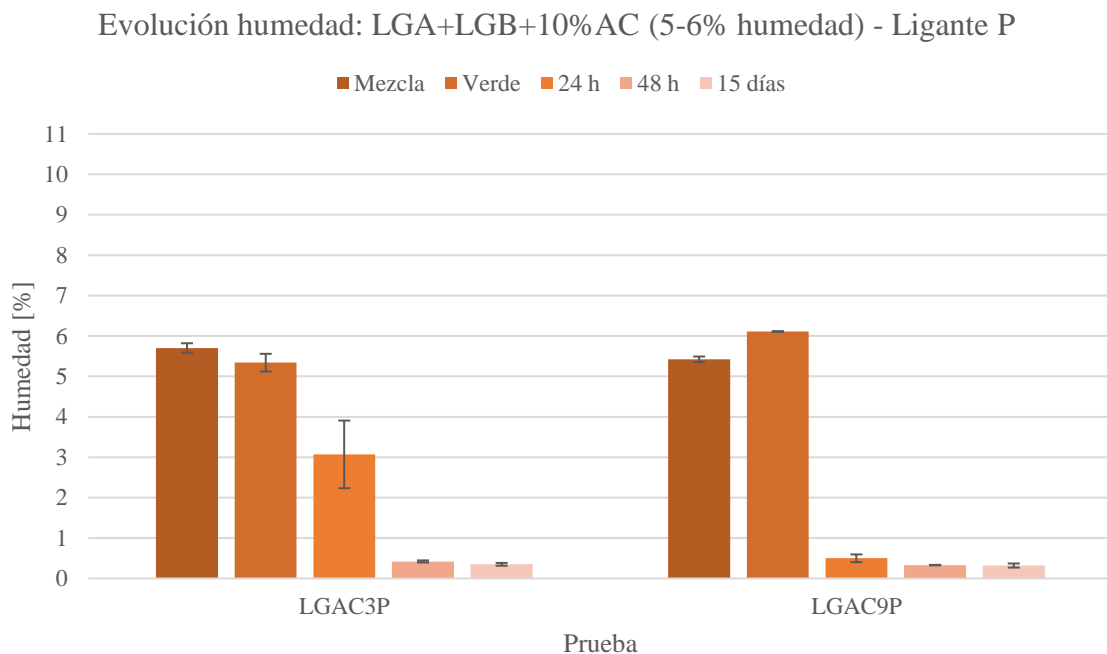


Figura 6.17.- Experimento 2. Evolución de la humedad de las mezclas LGA+LGB +10%AC (5-6% humedad) antes del briqueteado, después del briqueteado y en función del tiempo de curado con el ligante P.

Como se puede observar, en la prueba LGAC3P la humedad de la briqueta en verde disminuyó muy poco en comparación con la disminución que se observaba cuando tan sólo se briqueteaban lodos gruesos de acería (en las pruebas en las que se consiguió optimizar el par). A las 24 h se consiguió una humedad de aproximadamente el 3% y, a partir de las 48 h de curado se redujo a menos del 1%.

En cuanto a la prueba LGAC9P, la humedad medida en la briqueta en verde fue mayor que la humedad que tenía la mezcla de lodos antes de ser briqueteada. No obstante, la humedad de la briqueta disminuye drásticamente hasta menos de un 1% con tan sólo 24 h de curado. Además, si se observa la desviación típica de los resultados, igual que ocurría con los ensayos de caída, los resultados obtenidos en la prueba LGAC9P (par mayor) resultaron ser más homogéneos.

En cuanto al empleo del ligante C, la Figura 6.18 muestra la evolución de la humedad de la mezcla de lodos antes y después de ser briqueteada y cómo evoluciona su humedad con el tiempo de curado.

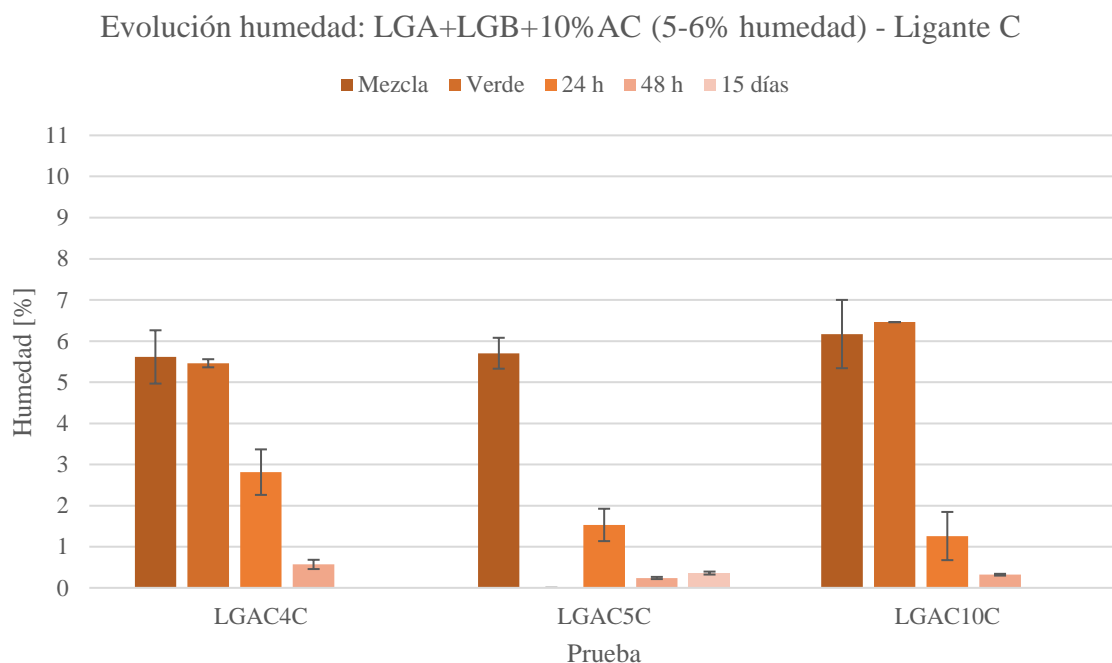


Figura 6.18.- Experimento 2. Evolución de la humedad de las mezclas LGA+LGB +10%AC (5-6% humedad) antes del briqueteado, después del briqueteado y en función del tiempo de curado con el ligante C.

Al igual que ocurría cuando se empleó el ligante P, en la prueba LGAC4C la humedad de la briqueta fue solo ligeramente menor que la de la mezcla original. Por otro lado, la humedad de las briquetas en verde obtenidas en la prueba LGAC10C fue ligeramente superior a la de la mezcla de la que provienen. En cuanto al tiempo de curado, en todas las pruebas se alcanza una humedad menor al 3% tras 24 h de curado (incluso menor al 2% en las pruebas LGAC5C y LGAC10C) y una humedad inferior al 1% a las 48 h.

Más adelante, en el apartado 6.3.2.1, se analizará más en profundidad cómo afecta a los resultados la adición de lodos aceitosos, en comparación con los obtenidos en las pruebas realizadas sólo con lodos gruesos de acería y se propondrá una teoría para explicar las diferencias que se observan entre la humedad en verde y la humedad de la mezcla antes del briqueteado, que contrasta con lo que se había observado cuando tan sólo se empleaban lodos gruesos de acería (notable disminución de la humedad tras el briqueteado).

6.2.2.- Mezclas con una humedad del 3% y con un 10% de lodos aceitosos

Se han realizado un total de tres pruebas para la aglomeración de una mezcla de lodos gruesos de acería y un 10% de lodos aceitosos, siendo la humedad del 3%, es decir, la humedad natural de la mezcla de lodos en este experimento.

Los parámetros de operación empleados durante el desarrollo de estas pruebas se muestran en la Tabla 6.7.

Tabla 6.7.- Experimento 2. Parámetros del proceso y producción de briquetas en las pruebas realizadas para la aglomeración de una mezcla LGA + LGB + 10%AC (3% humedad).

Prueba	Ligante	H _{mezcla} [%]	Parámetros del proceso				Producción de briquetas
			E _r [mm]	F _r [kN]	V _{ts} [%]	V _r [%]	
LGAC1P1	P	3.18	0.7	44.0	50	20	NO
LGAC1P2		3.18	0.3	44.4	15	10	SÍ
LGAC2C	C	3.18	0.3	45.7	55	50	SÍ

Se realizaron dos pruebas con el ligante P, en una de las cuales, la prueba LGAC1P1, no resultó posible la fabricación de briquetas, ya que la briqueteadora se bloqueaba continuamente, a la vez que resultaba muy complicado llenar las cavidades de los rodillos de material. Por el contrario, en la prueba LGAC1P2, se redujo tanto la velocidad del tornillo sin fin como la velocidad de los rodillos, así como el espaciado entre los rodillos, y se consiguieron fabricar briquetas, aunque no se logró alcanzar un par de al menos 20 Nm (Figura 6.19).

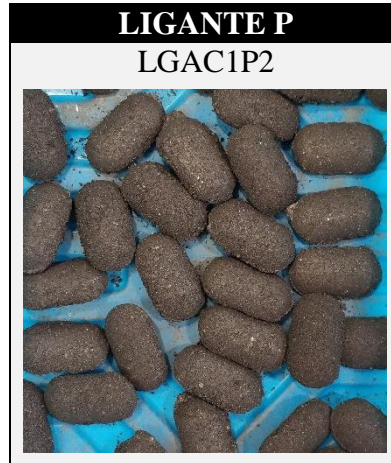


Figura 6.19.- Experimento 2. Briquetas fabricadas a partir de la mezcla LGA + LGB + 10%AC (3% humedad) con el ligante P.

Con el ligante C tan sólo se realizó una prueba, la prueba LGAC2C, en la cual se consiguió la fabricación de briquetas (Figura 6.20).

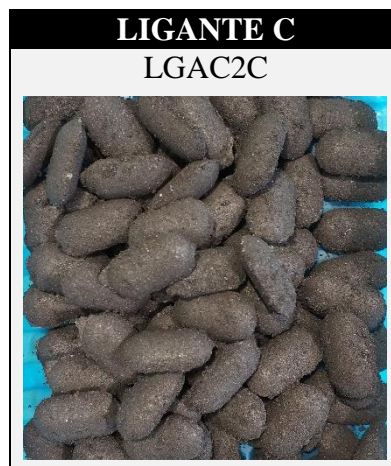


Figura 6.20.- Experimento 2. Briquetas fabricadas a partir de la mezcla LGA + LGB + 10%AC (3% humedad) con el ligante C.

6.2.2.1.- Índice de caída

Los resultados obtenidos en los ensayos de caída realizados con las briquetas fabricadas a partir de una mezcla de lodos gruesos de acería con un 10% de lodos aceitosos, siendo la humedad de la mezcla del 3%, cuando se empleó el ligante P, se muestran en la Figura 6.21.

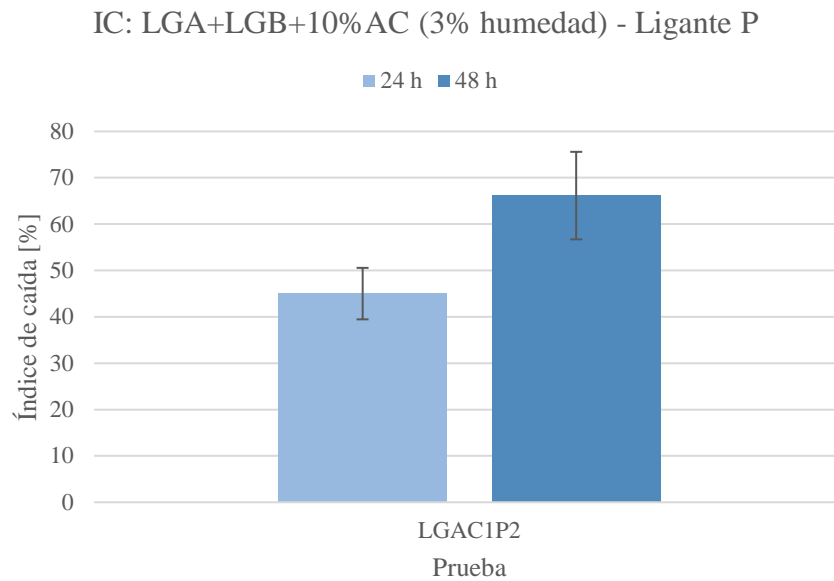


Figura 6.21.- Experimento 2. Índice de caída de las briquetas fabricadas a partir de una mezcla LGA + LGB + 10%AC (3% humedad) con el ligante P.

Como se puede observar, el índice de caída obtenido con las briquetas de la prueba LGAC1P2, superan el máximo permitido del 30%, llegando incluso hasta aproximadamente un 65% a las 48 h de curado. Además, la operación resultó muy complicada. Aun estando los rodillos separados tan solo 0.3 mm, había mucho material en los bordes de la briqueta. Puede que fuera necesario disminuir la cantidad de material de alimentación a los rodillos, bien reduciendo la velocidad del tornillo sin fin o aumentando la de los rodillos.

En cuanto al ligante C, la Figura 6.22 muestra los resultados obtenidos en los ensayos de caída realizados con las briquetas obtenidas a partir de la mezcla de lodos al 3% de humedad.

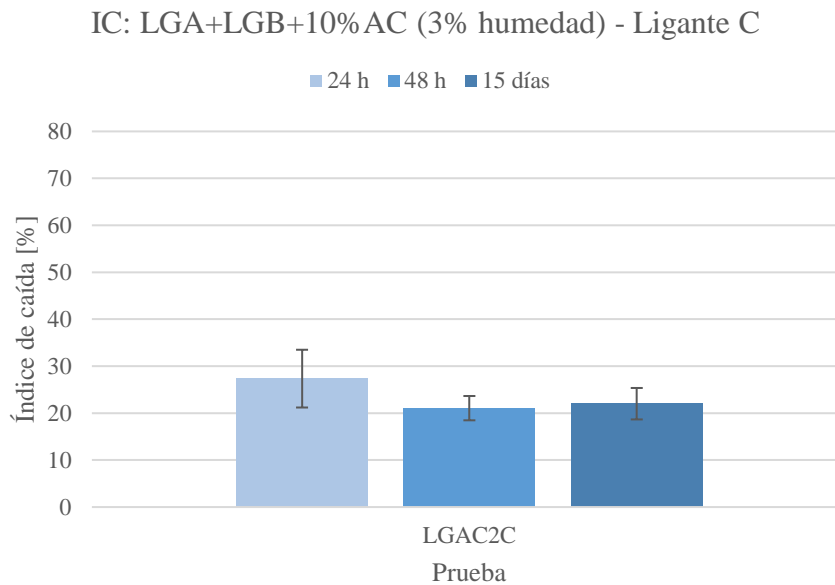


Figura 6.22.- Experimento 2. Índice de caída de las briquetas fabricadas a partir de la mezcla LGA + LGB + 10%AC (3% humedad) con el ligante C.

En la prueba LGAC2C, realizada con el ligante C, se consiguió alcanzar durante la producción un par de hasta 50 Nm. Como se puede observar, al igual que ocurrió con la prueba LGAC9P, los resultados obtenidos fueron muy homogéneos, probablemente a causa de alcanzar un par tan alto. En cuanto al índice de caída, se consiguen resultados menores al 30% para todos los tiempos de curado ensayados.

6.2.2.2.- Evolución de la humedad

La Figura 6.23 muestra la evolución de la humedad de la mezcla de lodos antes y después de ser briqueteada y cómo evoluciona su humedad con el tiempo de curado cuando se empleó el ligante P.

Evolución humedad: LGA+LGB+10%AC (3% humedad) - Ligante P

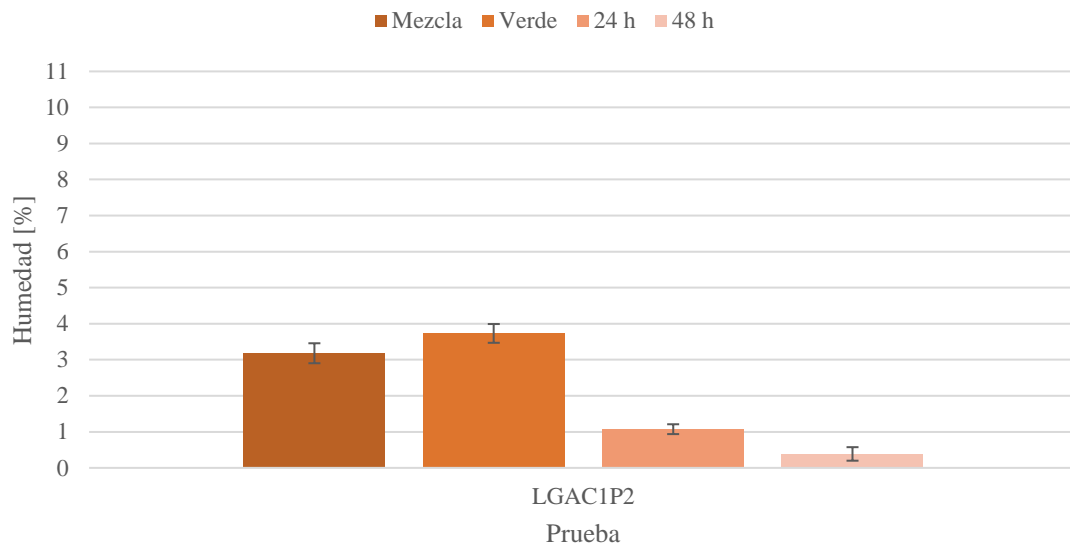


Figura 6.23.- Experimento 2. Evolución de la humedad de la mezcla LGA+LGB+10%AC (3% humedad) antes del briqueteado, después del briqueteado y en función del tiempo de curado con el ligante P.

Tal y como muestra la Figura 6.23, al igual que había ocurrido en algún caso anterior, la humedad de la briqueta en verde fue algo mayor en que la de la mezcla de partida. En cuanto al tiempo de curado, a las 24 h ya se consiguió una humedad de aproximadamente el 1%.

En cuanto al empleo del ligante C, la Figura 6.24 muestra la evolución de la humedad de la mezcla de lodos antes y después de ser briqueteada y cómo evoluciona su humedad con el tiempo de curado.

Evolución humedad: LGA+LGB+10%AC (3% humedad) - Ligante C

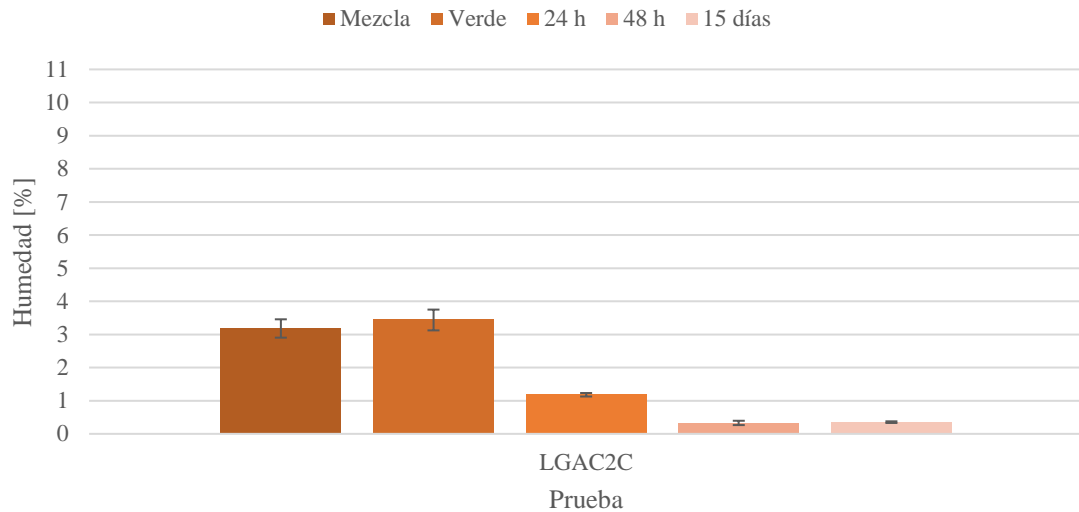


Figura 6.24.- Experimento 2. Evolución de la humedad de la mezcla LGA+LGB+10%AC (3% humedad) antes del briqueteado, después del briqueteado y en función del tiempo de curado con el ligante C.

La evolución de la humedad fue similar a la observada en la prueba LGAC1P2, cuando se empleó el ligante P. La humedad de la briqueta en verde fue ligeramente superior a la de la mezcla inicial de partida. En cuanto al tiempo de curado, a las 24 h, la humedad de la briqueta bajó hasta aproximadamente un 1.2%, reduciéndose hasta valores de menos del 0.5% a las 48 h.

6.2.3.- Mezclas con una humedad del 3% y un 15% de lodos aceitosos

Por último, se llevaron a cabo pruebas en las que se incrementó el porcentaje de lodos aceitosos hasta un 15%. Tan sólo se comprobó la efectividad de los ligantes con un 3% de humedad, es decir, con la humedad natural de la mezcla de lodos en este experimento, ya que no se disponía ni del material ni del tiempo suficiente para llevar a cabo más pruebas en otras condiciones de humedad.

Se han llevado a cabo un total de cuatro pruebas con un 15% de lodos aceitosos. Los parámetros de operación empleados en cada una de ellas se muestran en la Tabla 6.8.

Tabla 6.8.- Experimento 2. Parámetros del proceso y producción de briquetas en las pruebas realizadas para la aglomeración de la mezcla LGA + LGB + 15%AC (3% humedad).

Prueba	Ligante	H _{mezcla} [%]	Parámetros del proceso				Producción de briquetas
			E _r [mm]	F _r [kN]	V _{ts} [%]	V _r [%]	
LGAC7P1	P	3.59 ^e	0.3	45.0	70	50	SÍ
LGAC7P2		3.59 ^e	0.3	45.0	70	50	SÍ
LGAC7P3		3.59 ^e	0.3	45.0	76	50	SÍ
LGAC8C	C	2.75	0.3	44.9	94	50	SÍ

^e La humedad de la mezcla se calculó en función de la humedad de los lodos que la constituyen por separado, no se midió.

Se puede comprobar que en todas las pruebas realizadas se consiguieron fabricar briquetas. Es importante indicar la diferencia entre las tres pruebas llevadas a cabo con el ligante P. Las briquetas fabricadas en las pruebas LGAC7P1 y LGAC7P2 se obtuvieron utilizando los mismos parámetros de procesado, pero variaciones en el modo de alimentación provocaron que el par ejercido por los rodillos para la compactación del material variara notablemente, por lo que se separaron las briquetas fabricadas en función del par con el que fueron producidas: par alto (LGAC7P1) y par bajo (LGAC7P2).

En cambio, para realizar la prueba LGAC7P3 se reprocesaron los restos de material no aglomerado durante las pruebas LGAC7P1 y LGAC7P2, para comprobar si se conseguían fabricar las briquetas con un par alto y de manera constante. La Figura 6.25 muestra las briquetas fabricadas en cada una de estas pruebas con el ligante P.

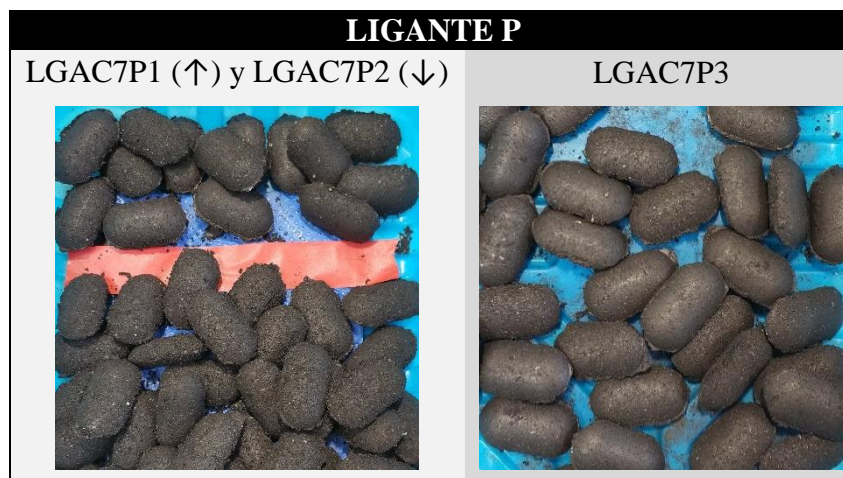


Figura 6.25.- Experimento 2. Briquetas fabricadas a partir de una mezcla LGA + LGB + 15%AC (3% humedad) con el ligante P.

Por último, tan solo se realizó una prueba con el ligante C, en la que se consiguieron fabricar briquetas bajo un par de 40 Nm (Figura 6.26).

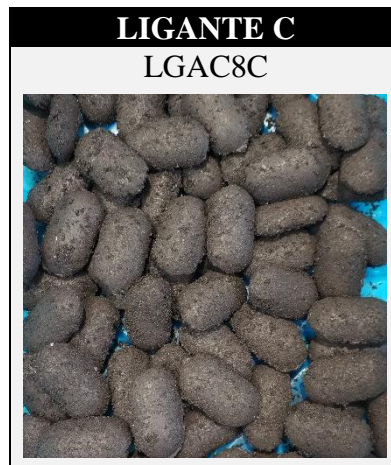


Figura 6.26.- Experimento 2. Briquetas fabricadas a partir de la mezcla LGA + LGB + 15%AC (3% humedad) con el ligante C.

6.2.3.1.- Índice de caída

Los resultados obtenidos en los ensayos de caída realizados con las briquetas fabricadas a partir de una mezcla de lodos gruesos de acería con un 15% de lodos aceitosos, siendo la humedad de la mezcla del 3%, cuando se empleó el ligante P, se muestran en la Figura 6.27.

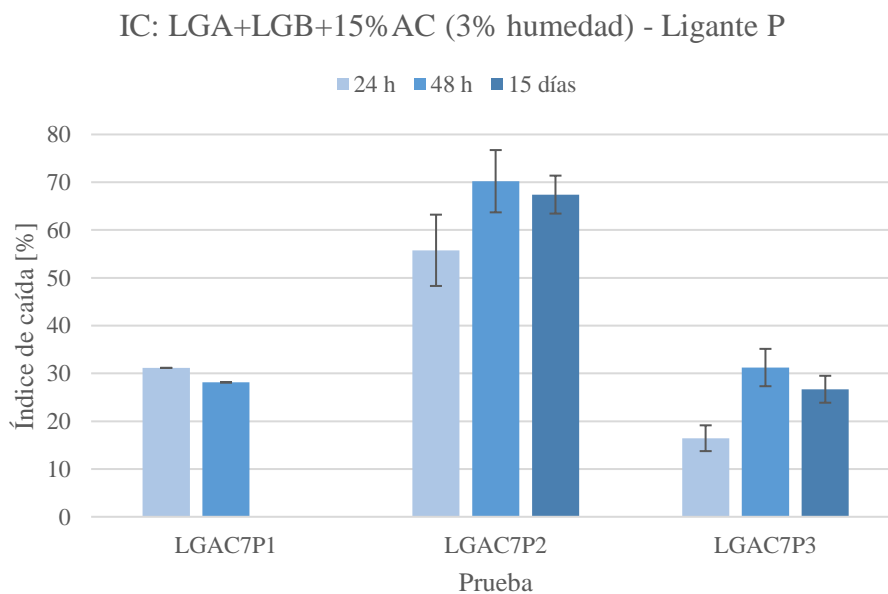


Figura 6.27.- Experimento 2. Índice de caída de las briquetas fabricadas a partir de la mezcla LGA + LGB + 15%AC (3% humedad) con el ligante P.

En primer lugar, los resultados obtenidos en la prueba LGAC7P2, que se llevó a cabo con un par de 20 Nm, superaron el índice de caída máximo permitido del 30%, llegando incluso a alcanzar el 70% a las 48 h de curado. En las otras dos pruebas, LGAC7P1 y la LGAC7P3, llevadas a cabo a cabo con un par situado respectivamente entre 50 y 60 Nm y entre 60 y 70 Nm, se obtuvieron mejores resultados, aunque también sobrepasando en ocasiones el índice de caída máximo permitido.

En la prueba LGAC7P1, a las 24 h el índice de caída medido fue del 31%, reduciéndose a un 28% a las 48 h de curado. No se obtuvieron resultados a los 15 días de curado por falta de briquetas suficientes para realizar los ensayos.

En la prueba LGAC7P3 en cambio, a las 24 h se obtuvieron muy buenos resultados, siendo el índice de caída de un 16.5% y, aunque a las 48 h se incrementó hasta un 31%, a los 15 días volvió a disminuir por debajo del 30% máximo permitido.

En cuanto al empleo del ligante C, la Figura 6.28 muestra los resultados obtenidos en los ensayos de caída realizados con las briquetas fabricadas a partir de la mezcla de lodos al 3% de humedad.

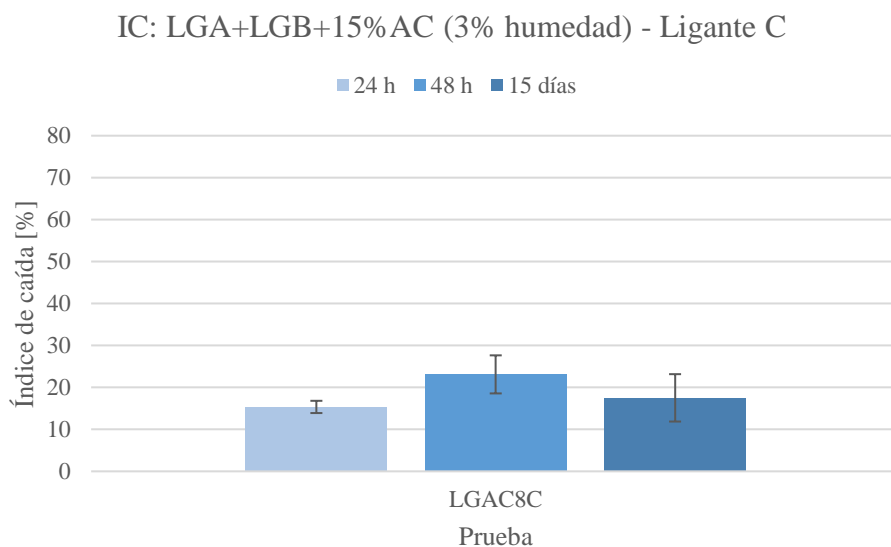


Figura 6.28.- Experimento 2. Índice de caída de las briquetas fabricadas a partir de la mezcla LGA + LGB + 15%AC (3% humedad) con el ligante C.

En la prueba LGAC8C se consiguieron fabricar briquetas con un par de 40 Nm. Los índices de caída obtenidos con las briquetas fabricadas en esta prueba resultaron ser inferiores al

30% para todos los tiempos de curado ensayados, siendo el valor máximo medido del 23% a las 48 h de curado.

6.2.3.2.- Evolución de la humedad

El Figura 6.29 muestra la evolución de la humedad de la mezcla de lodos antes y después de ser briquetada y cómo evoluciona su humedad con el tiempo de curado cuando se empleó el ligante P.

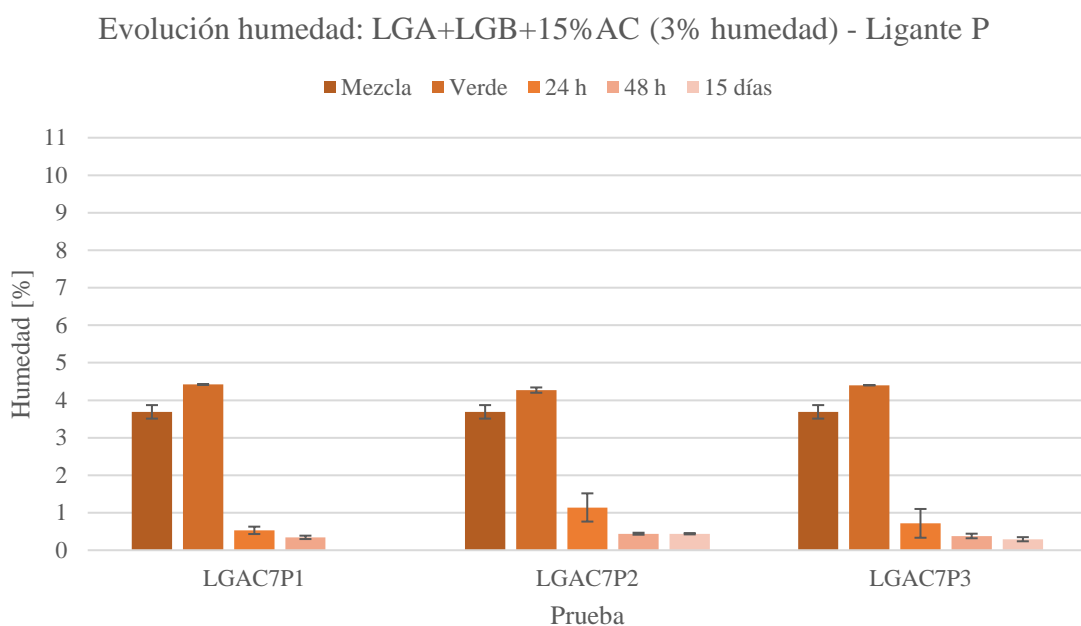


Figura 6.29.- Experimento 2. Evolución de la humedad de la mezcla LGA+LGB+15%AC (3% humedad) antes del briquetado, después del briquetado y en función del tiempo de curado con el ligante P.

En todas las pruebas realizadas con el ligante P la humedad de la briqueta en verde ha sido superior a la humedad de la mezcla de partida. En cuanto al tiempo necesario de curado, a las 24 h, la humedad de la briqueta ha sido ya inferior al 3% en las tres pruebas, siendo incluso menor al 1% en las pruebas LGAC7P1 y LGAC7P3.

En cuanto al ligante C, la Figura 6.30 muestra la evolución de la humedad de la mezcla de lodos antes y después de ser briquetada y cómo evoluciona su humedad con el tiempo de curado.

Evolución humedad: LGA+LGB+15%AC (3% humedad) - Ligante C

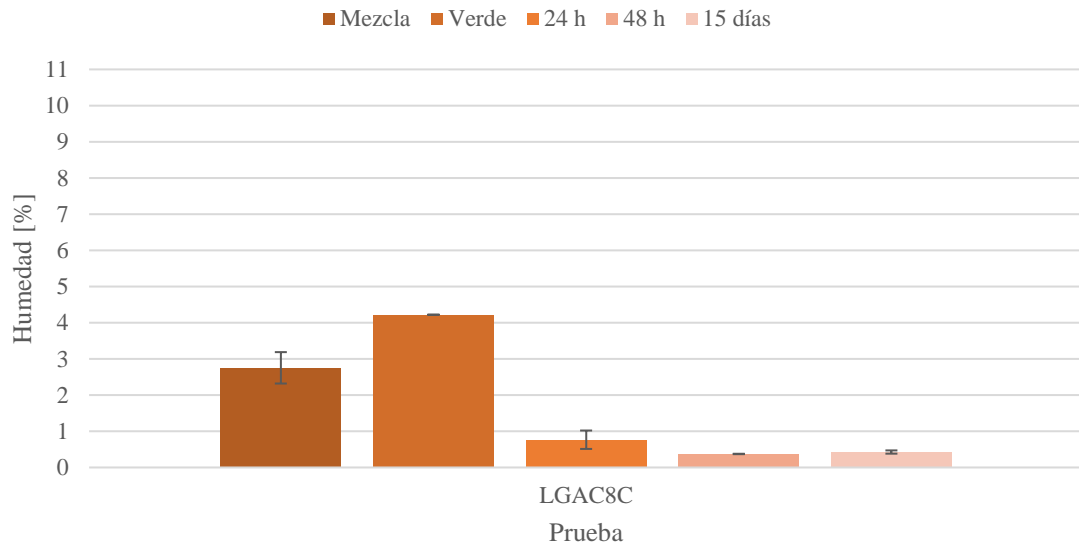


Figura 6.30.- Experimento 2. Evolución de la humedad de la mezcla LGA+LGB+15%AC (3% humedad) antes del briqueteado, después del briqueteado y en función del tiempo de curado con el ligante C.

Al igual que ocurría con el ligante P, la humedad medida en la briqueta en verde fue superior a la de la mezcla de partida, pero se redujo drásticamente con el curado, llegando a alcanzar una humedad inferior al 1% con tan sólo 24 h de curado.

Por último, cabe destacar que, independientemente del ligante empleado, parece que la humedad de la briqueta en verde aumenta aún más que en aquellos casos en los que se observó este fenómeno cuando el contenido en aceitosos era del 10%. Más adelante, en el apartado 6.3.2.2 se estudiará más detalladamente cómo afecta a los resultados el incremento en el porcentaje de lodos aceitosos.

6.3.- FACTORES INFLUYENTES EN EL AGLOMERADO DE LODOS

6.3.1.- Humedad inicial de la mezcla

6.3.1.1.- Briqueteado de lodos gruesos de acería

Con el objetivo de determinar si los ligantes P y C resultaban efectivos en el briqueteado de una mezcla de lodos gruesos de acería independientemente de la humedad de ésta, se llevaron a cabo pruebas a distintas humedades (6-7%, 3%, 5%, y 10%), ya que, como se ha mencionado anteriormente, en la práctica industrial la humedad de los lodos puede variar.

Los resultados obtenidos mostraron que, en primer lugar, tanto con el ligante P como con el ligante C, es posible fabricar briquetas de forma óptima cuando la humedad de la mezcla de lodos se sitúa entre un 6 y un 7% (humedad natural de la mezcla de lodos en el experimento 1).

En cuanto al briqueteado de la mezcla de lodos con una humedad de un 3%, no es posible ni confirmar ni desmentir si se trata de una humedad demasiado baja para el briqueteado, puesto que, aunque no se produjeron briquetas, como ya se ha mencionado anteriormente, fue a causa del desplazamiento del tornillo sin fin hacia la izquierda, que impidió que las pruebas se llevaran a cabo adecuadamente.

En cuanto a las pruebas en las que se ajustó la humedad a un 5%, una vez corregido el desplazamiento del tornillo sin fin, tan sólo se puede confirmar que se trata de una humedad adecuada para el briqueteado mediante el empleo del ligante P, puesto que no se dispuso de material suficiente para realizar la prueba con el ligante C.

Por último, en cuanto al briqueteado de mezclas con una humedad del 10%, al igual que en el caso anterior, debido a la escasez de material, sólo fue posible realizar una prueba con el ligante P. En este caso, aunque se consiguieron fabricar briquetas, tanto el briqueteado, como el manejo y la alimentación del material resultaron muy complicados. Por ello, podría ser que una humedad del 10% resulte demasiado alta para el briqueteado de lodos gruesos de acería, por lo que, en principio, no se recomendaría para la práctica industrial.

6.3.1.2.- Briqueteado de lodos gruesos de acería junto con lodos aceitosos

Con el objetivo de determinar la posibilidad de llevar a cabo el proceso de briqueteado con mezclas de distintas humedades (3%, 5-6%) y distinto contenido en lodos aceitosos (10%, 15%) se han hecho diversas pruebas.

En primer lugar, se han realizado pruebas con mezclas con un contenido de un 10% de lodos aceitosos para humedades del 3% y del 5-6%. Los resultados obtenidos tras el briqueteado de las mezclas con una humedad del 3% (humedad natural de la mezcla de lodos en el experimento 2), mostraron que, aunque fue posible fabricar briquetas con cualquiera de los dos ligantes estudiados, con el ligante P resultó más complicado operar que con el ligante C. En cambio, cuando la humedad de la mezcla estaba entre el 5 y el 6%, aunque, de nuevo, se consiguieron fabricar briquetas con ambos ligantes, se observó que se operaba más fácilmente con el ligante C a una humedad del 3% que cuando se incrementó la humedad hasta un 5-6%.

Por otro lado, en cuanto a las mezclas con un contenido en lodos aceitosos del 15%, tan sólo se llevaron a cabo pruebas con mezclas de un 3% de humedad, en las cuales se consiguió una buena producción de briquetas con ambos ligantes.

6.3.2.- Tipos de lodos a aglomerar

6.3.2.1.- Efecto de la adición de lodos aceitosos a la mezcla de lodos gruesos de acería

Para comprobar los efectos de la adición de lodos aceitosos en las briquetas, se van a comparar los resultados obtenidos en los ensayos de caída y la evolución de la humedad de las briquetas fabricadas con y sin la adición de lodos aceitosos.

Las pruebas seleccionadas para realizar la comparación han sido las pruebas LG5P (ligante P) y LG5C2 (ligante C), en las cuales se emplearon exclusivamente lodos gruesos de acería para la fabricación de las briquetas, y las pruebas LGAC3P (ligante P) y LGAC10C (ligante C), en las que se añadió además un 10% de lodos aceitosos. La razón por la cual se escogieron dichas pruebas fue debido a que su humedad era similar (entre un 5.7 y un 6.6%).

En primer lugar, en cuanto a los resultados de los ensayos de caída, la Figura 6.31 muestra los índices de caída obtenidos con las briquetas fabricadas en las pruebas mencionadas anteriormente.

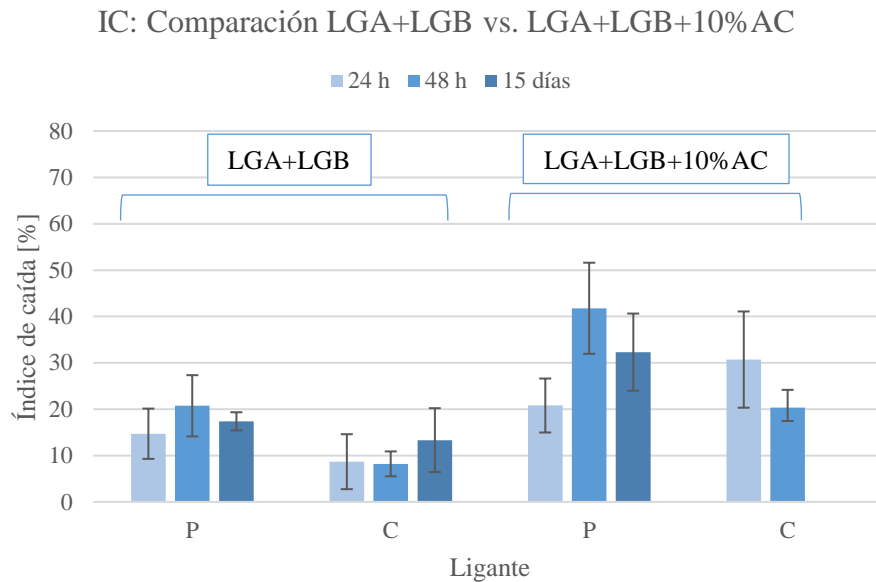


Figura 6.31.- Comparación de los resultados obtenidos en los ensayos de caída realizados con las briquetas fabricadas a partir de las mezclas LGA+LGB o LGA+LGB+10%AC.

Como se puede observar, independientemente del ligante empleado, la adición de un 10% de lodos aceitosos incrementa notablemente la generación de finos, tanto que se alcanza el máximo permitido del 30%, llegándose incluso a superar este valor.

Cuando se emplea el ligante P, en las briquetas fabricadas a partir de lodos gruesos de acería, se obtiene un índice de caída del 14.7% a las 24 h de curado, que se incrementa hasta un 20.7% a las 48 h, y disminuye hasta aproximadamente un 17.4% a los 15 días. Cuando se añade un 10% de lodos aceitosos, aunque a las 24 h de curado se obtiene también un índice de caída de un 20.8%, aumenta hasta más de un 40% a las 48 h y, aunque disminuye tras 15 días, continua siendo superior al 30% permitido.

Ocurre lo mismo con el ligante C. En las briquetas fabricadas a partir de lodos gruesos de acería, se obtienen unos índices de caída a las 24 y 48 h menores al 10%, alcanzándose un índice de caída del 13.3% a los 15 días de curado. En cambio, cuando se añade un 10% de lodos aceitosos, el índice de caída es del 30.7% a las 24 h, disminuyendo a aproximadamente un 20.4% a las 48 h de curado.

Podría ser que la presencia de lodos aceitosos en la mezcla influyera en la correcta cohesión de las partículas, lo que daría lugar a briquetas más débiles y, por lo tanto, con una mayor generación de finos.

Por último, para comprobar si existe alguna variación en la evolución de la humedad de las briquetas al añadir lodos aceitosos, en la Figura 6.32 se han comparado las humedades medidas en las pruebas mencionadas anteriormente.

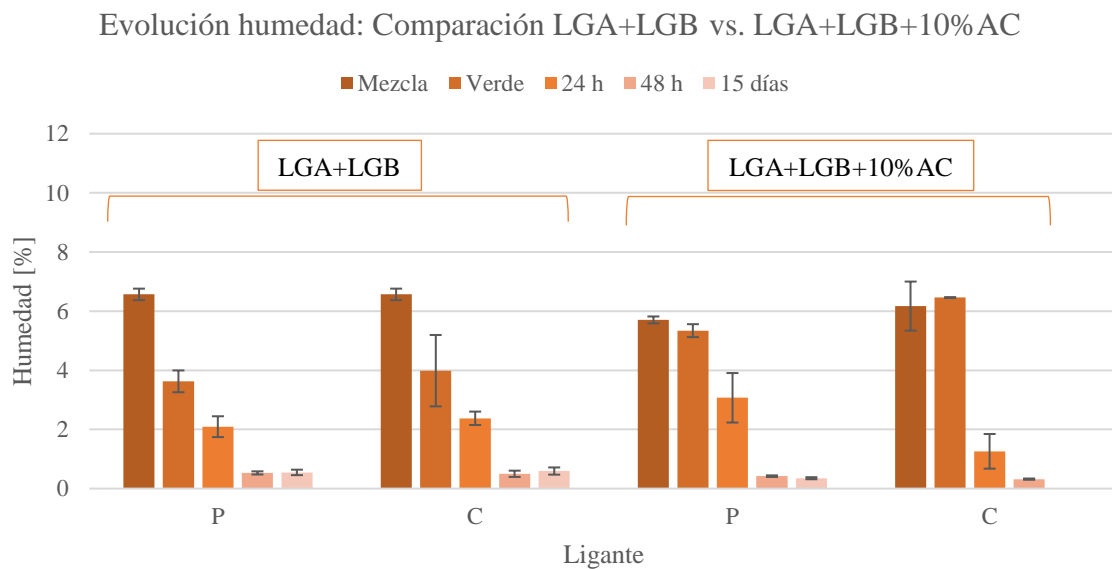


Figura 6.32.- Comparación de la evolución de la humedad de las mezclas LGA+LGB y LGA+LGB+10%AC antes del briqueteado, después del briqueteado y en función del tiempo de curado.

La principal diferencia entre añadir o no a la mezcla un 10% de lodos aceitosos es la humedad en verde de la briketa fabricada. Cuando se emplearon mezclas constituidas por lodos gruesos de acería, sin lodos aceitosos, la humedad de la mezcla disminuye en aproximadamente un 45% cuando se empleó el ligante P y en un 40% cuando se utilizó el ligante C. Como se ha mencionado anteriormente, esto ocurre a causa de la fuerza que ejercen los rodillos sobre el material al compactarlo, que provoca que éste expulse parte del agua que contiene, disminuyendo así su humedad.

En cambio, cuando se emplearon mezclas de lodos gruesos de acería con un 10% de lodos aceitosos, la humedad de la mezcla disminuye tan sólo en un 6% cuando se empleó el ligante P y aumenta en aproximadamente un 7% cuando se utilizó el ligante C.

Para explicar este comportamiento, se propone que, tal y como se ha mencionado tras analizar los resultados de los ensayos de caída, podría ser que los lodos aceitosos afecten a la cohesión de las partículas. Si esto fuera así, podría implicar que la compresión fuera menos efectiva y que, por lo tanto, no se expulse agua durante la compactación al mismo nivel que ocurría cuando se empleaban mezclas formadas tan solo por lodos gruesos de acería. No obstante, es necesario llevar a cabo más experimentos al respecto para poder extraer una conclusión definitiva.

En cualquier caso, esta teoría no explica que la humedad de la briqueta en verde sea mayor que la humedad de la mezcla antes del briqueteado, ya que, como máximo, sería igual. Este aumento de la humedad de la briqueta en verde sólo se entiende como resultado de la heterogeneidad de los lodos o por desviaciones o por falta de reproducibilidad de las medidas realizadas, ya que a veces no se midieron las humedades al terminar de preparar las mezclas y, al emplear lodos aceitosos, era necesario tener la ventilación activada, lo que podría afectar a la humedad de la mezcla.

6.3.2.2.- Efecto del incremento en el porcentaje de lodos aceitosos en la mezcla de lodos

Con el objetivo de determinar si el incremento en el porcentaje de lodos aceitosos en la mezcla de lodos tiene algún efecto en la calidad de las briquetas, se van a comparar los resultados obtenidos con briquetas fabricadas con 10% y con un 15% de lodos aceitosos.

Para ello, se emplearán las pruebas LGAC2C (10% AC) y LGAC8C (15% AC), puesto que en ambas pruebas la humedad inicial de la mezcla fue del 3% y se empleó el mismo ligante, el ligante C. No se han podido comparar los resultados obtenidos con el ligante P, puesto que en la prueba en la que se trató de briquetear la mezcla con un 10% de lodos aceitosos no se consiguió alcanzar un par de 20 Nm durante la operación, por lo que no se puede comparar esta prueba con las realizadas para un 15% de lodos aceitosos, en las cuales se alcanzó un par mínimo de 20 Nm en una prueba (LGAC7P2) y, en las otras dos (LGAC7P1 y LGAC7P2), pares de entre 50 y 70 Nm.

En primer lugar, la Figura 6.33 compara los índices de caída de las briquetas fabricadas en las dos pruebas mencionadas anteriormente.

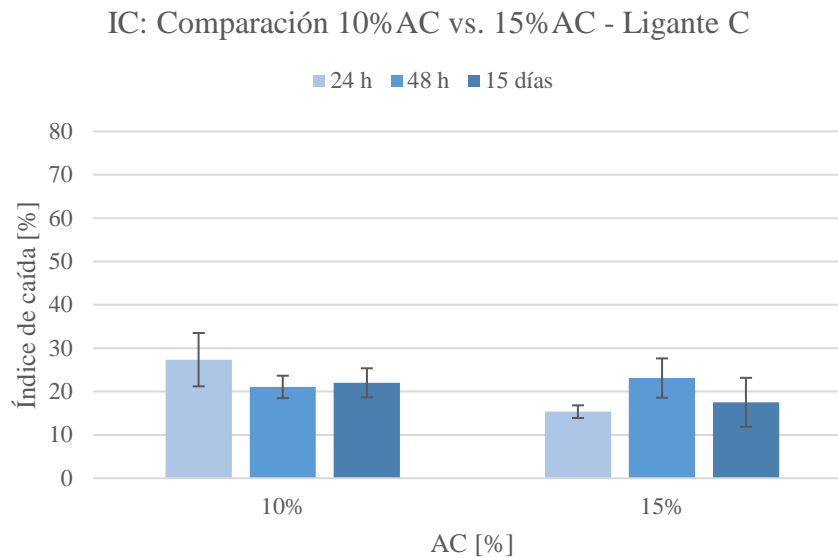


Figura 6.33.- Comparación de los resultados obtenidos en los ensayos de caída realizados con las briquetas fabricadas a partir de las mezclas LGA+LGB+10%AC o LGA+LGB+15%AC con el ligante C.

Si se observa la Figura 6.33, se puede comprobar que, a pesar de que se incrementa el porcentaje de lodos aceitosos, en ambos casos se obtienen resultados más o menos similares en cuanto a índice de caída, especialmente tras 48 h y 15 días de curado.

Por último, para determinar si el incremento del porcentaje de lodos aceitosos suponía algún cambio en la evolución de la humedad, se han comparado las pruebas mencionadas anteriormente en la Figura 6.34.

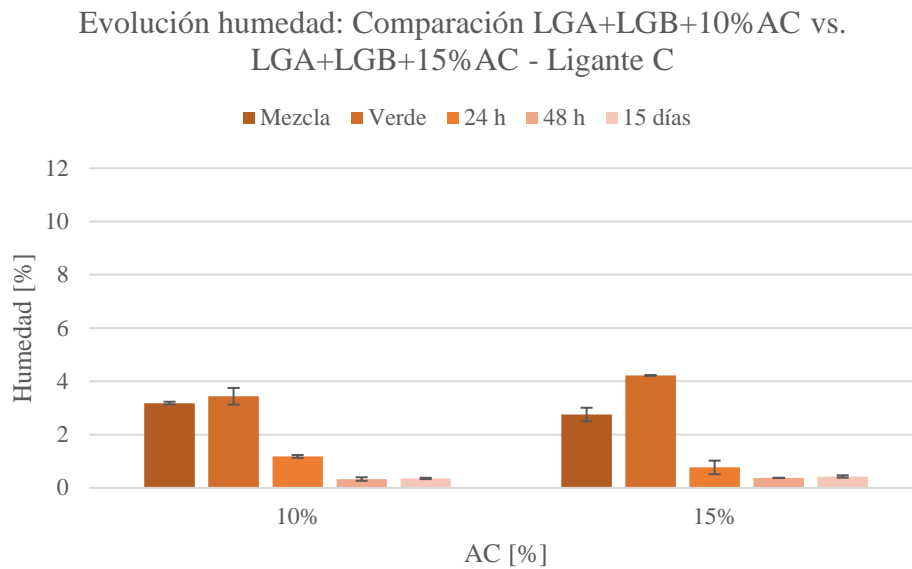


Figura 6.34.- Comparación de la evolución de la humedad de las mezclas LGA+LGB+10%AC y LGA+LGB+15%AC antes del briqueteado, después del briqueteado y en función del tiempo de curado con el ligante C.

Como se puede observar, parece que, al incrementar el porcentaje de lodos aceitosos en la mezcla, aumenta la humedad de la briqueta en verde. En base a la teoría mencionada anteriormente, podría ser que, al aumentar el contenido en lodos aceitosos, se influyera aún más en la cohesividad entre las partículas, lo cual provocaría que la compactación de las briquetas resultase menos efectiva, por lo que la humedad de la briqueta en verde fabricada con un 15% de lodos aceitosos sería mayor a la de la briqueta en verde formada por un 10% de lodos aceitosos.

Como ya se ha explicado, el hecho de que la humedad de la mezcla inicial aumente tras el briqueteado podría ser debido a la heterogeneidad de los lodos o a desviaciones o por falta de reproducibilidad de las medidas realizadas.

6.3.3.- Ligante empleado

6.3.3.1.- Aglomeración de lodos gruesos de acería

Con el objetivo de determinar qué ligante resulta más efectivo para la aglomeración de lodos gruesos de acería, se han comparado las pruebas LG5P (ligante P) y LG5C2 (ligante C), en

las cuales se trataba de briquetear la mezcla de lodos con una humedad de entre el 6 y el 7%. Para el resto de las humedades probadas, no se han obtenidos briquetas mediante el empleo de los dos ligantes estudiados, por lo que no se puede realizar la comparación.

La Figura 6.35 muestra los resultados obtenidos en los ensayos de caída y la evolución de la humedad de las pruebas seleccionadas.

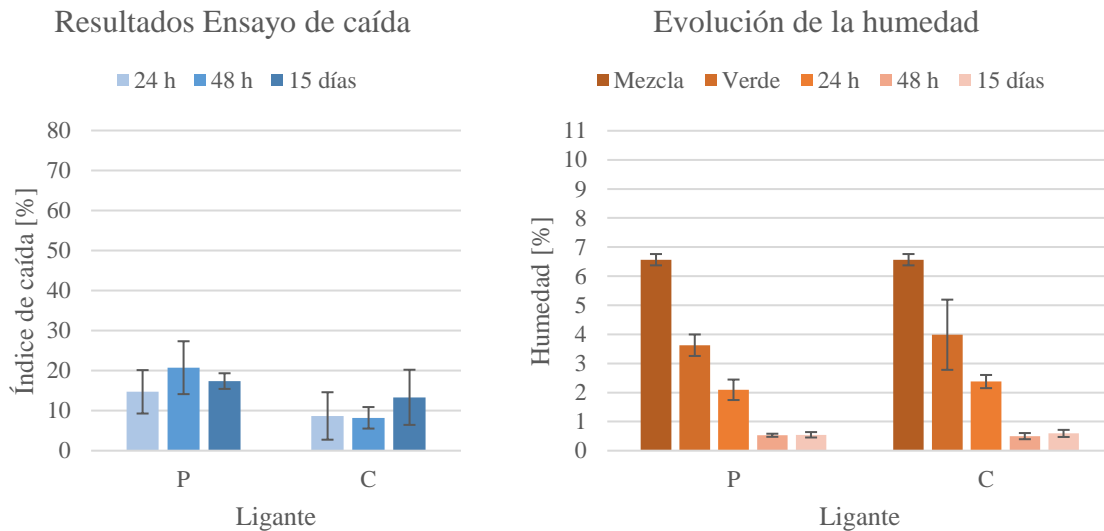


Figura 6.35.- Experimento 1. Comparación de resultados obtenidos con el ligante P y con el ligante C (mezcla LGA +LGB, 6-7% humedad).

En primer lugar, se puede observar que la evolución de la humedad en ambos ligantes ha sido similar. La principal diferencia es que la humedad de la briqueta en verde y tras 24 h de curado fabricada con el ligante P resultó un poco inferior a la de la briqueta fabricada con el ligante C, aunque en ambos casos, tras 24 h de curado, la humedad ya era inferior al 3%.

Podría ser que el mayor índice de caída de las briquetas en verde fabricadas con el ligante P que se observa en la Figura 6.35 se debiera en parte a su menor humedad (al disminuir la humedad, la briqueta es más arenosa y, por lo tanto, se generan más finos) o a la propia efectividad del ligante. En cualquier caso, tras 48 h de curado, las humedades terminan siendo prácticamente iguales independientemente del ligante empleado e inferiores al 1%.

En cuanto a los resultados de los ensayos de caída parece que, si bien mediante el empleo de ambos ligantes se obtienen briquetas con un índice de caída inferior al 30%, la generación de finos es menor cuando se emplea el ligante C para todos los tiempos de curado ensayados.

Por lo tanto, se puede considerar que el ligante C es el más apropiado de los dos para la aglomeración de la mezcla de lodos gruesos de acería con una humedad situada entre el 6 y el 7%, es decir, para la humedad natural de la mezcla de lodos en el experimento 1.

6.3.3.2.- Aglomeración de lodos gruesos de acería con un 10% de lodos aceitosos

En cuanto a la aglomeración de lodos gruesos de acería junto con un 10% de lodos aceitosos, ha resultado posible comparar la efectividad de ambos ligantes para una humedad inicial de la mezcla de entre el 5 y el 6% y para un 3%, la humedad natural de la mezcla de lodos en el experimento 2.

Con el objetivo de realizar la comparación entre ambos ligantes para una humedad de la mezcla inicial situada entre el 5 y el 6%, se han seleccionado las pruebas LGAC3P (ligante P) y LGAC10C (ligante C), ya que, aunque la prueba óptima obtenida con el ligante P fue la prueba LGAC9P, las condiciones de operación eran más parecidas entre las pruebas LGAC3P y LGAC10C (no tendría sentido comparar la prueba LGAC9P en la que se alcanzó un par de 60 Nm con la prueba LGAC10C, en la que se realizó la producción con un par de 20 Nm).

Los resultados óptimos obtenidos con cada ligante se comparan en la Figura 6.36.

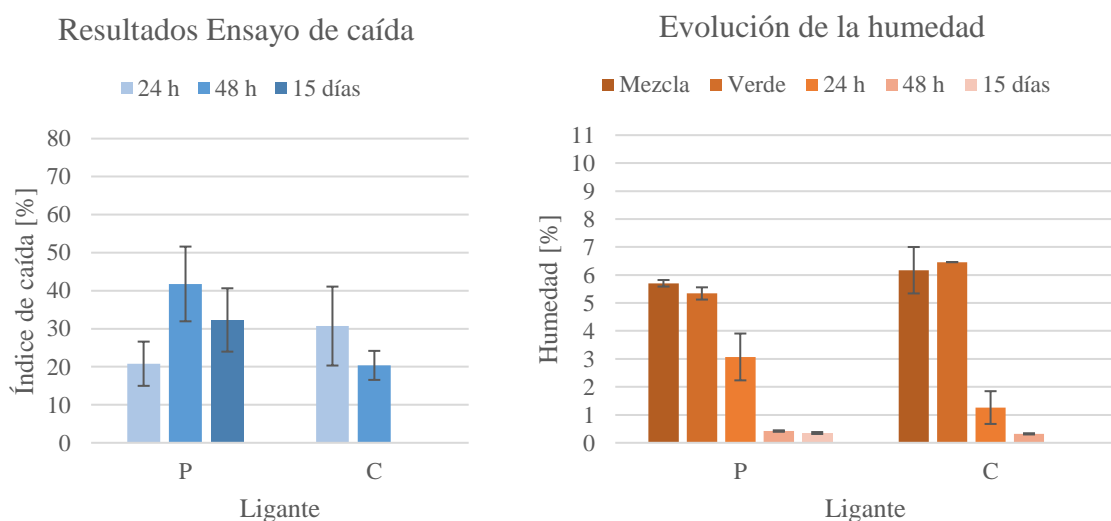


Figura 6.36.- Experimento 2. Comparación de los resultados obtenidos con el ligante P y con el ligante C (mezcla LGA + LGB + 10%AC, 5-6% humedad).

Si se observa la Figura 6.36, se puede comprobar que, mediante el empleo del ligante P, se consigue reducir la humedad a las 24 h de curado hasta aproximadamente un 3%, consiguiéndose un índice de caída del 20%, mientras que cuando se emplea el ligante C, la humedad de la briqueta tras 24 h de curado baja hasta el 1.3 %, pero su índice de caída es ligeramente superior al 30%. Al igual que ocurría en el caso anterior, podría ser que al ser menor la humedad de la briqueta, ésta sea más arenosa y por lo tanto se generen más finos.

En cambio, aunque tras 48 h de curado la humedad de la briqueta resultó muy similar en ambos casos, el índice de caída obtenido con las briquetas fabricadas con el ligante C disminuye hasta un 20%, mientras que, en el caso de emplear el ligante P, el índice aumenta hasta más de un 40% y, aunque se reduce a los 15 días de curado, sigue manteniéndose por encima del 30% permitido.

Además, cabe destacar que, si bien mediante el uso del ligante P se consiguieron alcanzar fácilmente pares altos, de hasta 60 Nm, los resultados obtenidos en estas condiciones tan solo resultaron ser mejores a los obtenidos con el ligante C a 20 Nm de par tras 24 h de curado, ya que aunque a las 48 h de curado el índice de caída resultó inferior al 30% en ambos casos, fue mayor cuando se empleó el ligante P que con el ligante C.

Por ello, se considera que el ligante C es el más adecuado para el briqueteado de una mezcla de humedad entre un 5 y un 6%, de lodos gruesos de acería con un 10% de lodos aceitosos.

Por último, en cuando a la efectividad de los ligantes en la aglomeración de mezclas del 3% de humedad, no ha sido posible realizar la comparación gráfica entre los dos ligantes en esta serie de ensayos, ya que las condiciones en las que se había llevado a cabo la producción de briquetas habían sido muy diferentes en cada caso.

En primer lugar, resultó muy complicado operar con el ligante P, siendo imposible optimizar el par, por lo que las briquetas fabricadas mediante el uso de este ligante, tras ser sometidas al ensayo de caída, dieron lugar a índices de caída muy superiores al 30%, alcanzando prácticamente un 66.2% tras 48 h de curado.

En cambio, con el ligante C se consiguió, además de una buena producción con un par de 50 Nm, un índice de caída inferior al 30% para todos los tiempos de curado ensayados, siendo el índice de caída a las 48 h de aproximadamente un 21.1%.

No obstante, dado que las condiciones de operación de cada prueba fueron muy distintas entre sí, no es posible asegurar que el ligante C resulte más efectivo para el briqueteado de estas mezclas del 3% de humedad que el ligante P.

6.3.3.3.- Aglomeración de lodos gruesos de acería con un 15% de lodos aceitosos

Con el objetivo de determinar cuál de los dos ligantes estudiados resulta más efectivo para la aglomeración de una mezcla de lodos gruesos de acería junto con un 15% de lodos aceitosos, se han comparado los resultados obtenidos en las pruebas óptimas realizadas con cada ligante, siendo la humedad de la mezcla inicial del 3%.

Para ello, la Figura 6.37 realiza una comparación entre las pruebas LGAC7P1 (ligante P) y LGAC8C (ligante C), seleccionadas por ser las más similares en cuanto al par de operación.

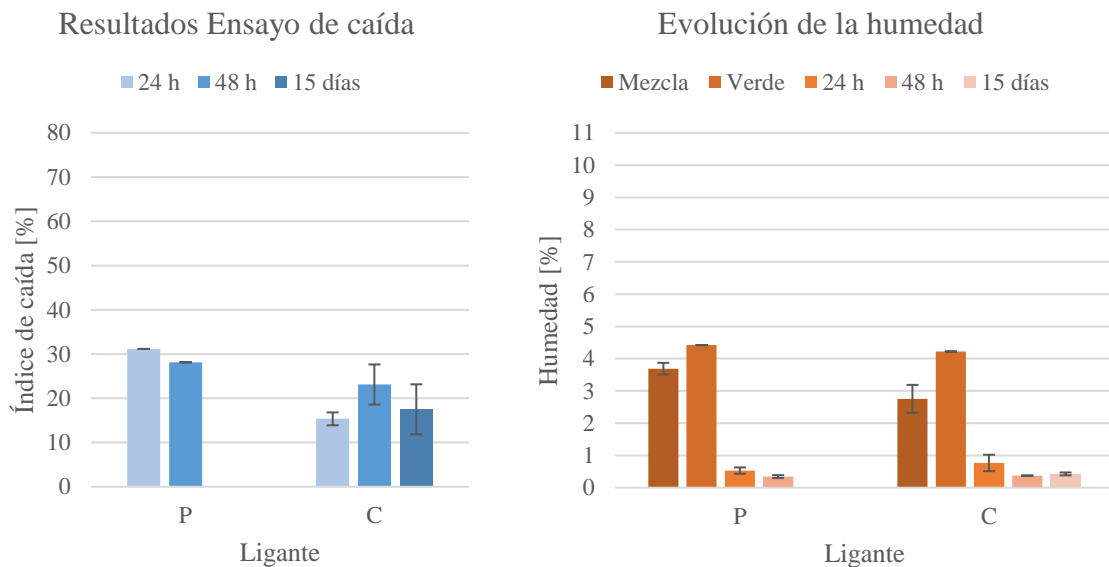


Figura 6.37.- Experimento 2. Comparación resultados obtenidos con el ligante P y con el ligante C (mezcla LGA + LGB + 15%AC, 3% humedad).

Tal y como se puede observar, en ambos casos la humedad de la briqueta en verde disminuye drásticamente a las 24 h de curado hasta valores inferiores al 1%, reduciéndose aún más tras las 48 h de curado hasta menos de un 0.5%.

En cuanto a los resultados obtenidos en los ensayos de caída, con el ligante P, aunque a las 24 h de curado el índice de caída superó ligeramente el 30%, disminuyó hasta aproximadamente un 28% tras 48 h de curado. En cambio, cuando se empleó el ligante C, se obtuvo un índice de caída inferior al 30% para todos los tiempos de curado ensayados, siendo el índice de caída a las 48 h de aproximadamente un 23%.

Puesto que el índice de caída obtenido con el ligante C fue inferior al obtenido con el ligante P para todos los tiempos de curado ensayados, se puede concluir que el ligante C es más adecuado para el briqueteado de una mezcla de lodos gruesos de acería junto con un 15% de lodos aceitosos con una humedad del 3%.

6.3.4.- Parámetros del proceso

6.3.4.1.- Tiempo de curado

Como se ha mencionado en apartados anteriores, para poder introducir las briquetas en el convertidor de la acería es necesario que su humedad sea como máximo del 3% y, preferiblemente, inferior al 1%. Por ello, es preciso que, tras su fabricación, las briquetas sean sometidas a una operación de curado a temperatura ambiente durante un tiempo determinado.

En primer lugar, en cuanto a las briquetas fabricadas a partir de lodos gruesos de acería, los resultados obtenidos mostraron que, tras 24 h de curado, su humedad era inferior al 3% en la mayoría de los casos o ligeramente superior al 3% en el resto. A las 48 h de curado a temperatura ambiente, a excepción de las briquetas obtenidas en la prueba LG1P2, considerada como prueba de puesta en marcha de la máquina, en la cual las briquetas alcanzaron una humedad de un 1.2%, la humedad del resto de las briquetas fabricadas disminuyó hasta alcanzar valores inferiores al 1%.

El comportamiento observado en la humedad de las briquetas fabricadas a partir de lodos gruesos de acería junto con lodos aceitosos resultó ser similar al caso anterior. A las 24 h de curado, todas las briquetas alcanzaron una humedad inferior al 3%, a excepción de las fabricadas en la prueba LGAC3P, en la cual la humedad resultó ser de aproximadamente un

3.1%. Tras 48 h de curado, la humedad de todas las briquetas fabricadas disminuyó hasta valores inferiores el 1%.

Por ello, se puede concluir que el tiempo óptimo de curado sería de 48 h tras la fabricación de las briquetas. De esta manera, se aseguraría que la humedad de todas las briquetas, independientemente de la humedad inicial de la mezcla que se empleó en su fabricación, fuera inferior al 3% e incluso, muy probablemente, inferior al 1%.

6.3.4.2.- Par óptimo de operación

Con el objetivo de reflejar la relación entre el par ejercido por los rodillos en la briketa y los resultados obtenidos, se ha construido la Tabla 6.9. En ella se muestran los resultados de los ensayos de caída y la desviación estándar calculada para cada una de las pruebas clasificados en función del par con el que se llevó a cabo la producción de briquetas.

Tabla 6.9.- Relación entre el par aplicado y los resultados obtenidos (índice de caída y homogeneización de los resultados).

PAR [Nm]	PRUEBA	ÍNDICE DE CAÍDA [%]		DESVIACIÓN ESTÁNDAR [%]	
		24 h curado	48 h curado	24 h curado	48 h curado
Alto (>50 Nm)	LGAC7P3	16,44	31,23	2,70	3,91
	LGAC9P	12,63	23,40	1,04	2,90
	Promedio	14,54	27,31	1,87	3,41
Medio (20 – 50 Nm)	LG5C2	8,68	8,21	5,93	2,69
	LGAC2C	27,35	21,06	6,15	2,59
	LGAC8C	15,35	23,11	1,46	4,53
	LG4P2	18,12	15,12	7,03	3,08
	LGAC3P	20,79	41,78	3,08	9,83
	Promedio	18,06	21,86	4,73	4,54
Bajo (20 Nm)	LG7P	24,65	22,31	0,96	3,01
	LG6P2	10,48	19,97	3,26	6,78
	LGAC7P2	55,76	70,21	7,46	6,52
	LGAC4C	23,64	33,77	3,84	2,97
	LGAC10C	30,70	20,36	10,38	3,82
	Promedio	29,05	33,32	5,18	4,62

Como se puede observar, tras 24 h de curado, el índice de caída es menor cuanto mayor es el par aplicado, es decir, la generación de finos es menor cuanto mayor es el par ejercido por los rodillos para la compactación de las briquetas. Cuando se realiza la producción a par medio se obtienen resultados no muy alejados de los que se obtienen a par alto. No obstante, cuando se trabaja a par bajo, el índice de caída aumenta hasta casi alcanzar el límite máximo permitido. Por otro lado, si se observa la desviación estándar, también se puede comprobar que cuanto mayor es el par aplicado, más homogéneos son los resultados, aunque también se ha de tener en cuenta que con par alto sólo se han computado dos pruebas.

Tras 48 h de curado, el índice de caída de las pruebas realizadas a par bajo supera el 30%, pero no se puede seguir afirmando que a mayor par aplicado menor índice de caída, ya que, como se puede observar, el índice de caída de las briquetas producidas en las pruebas realizadas a par medio, ha sido en este caso algo menor que el de las briquetas fabricadas en las pruebas realizadas a par alto. En cuanto a la homogeneidad, siguen siendo más homogéneos los resultados obtenidos con un par alto, pero se asemejan ya más a los de par medio y bajo.

De cualquier manera, puesto que se ha seleccionado como tiempo óptimo para el curado de las briquetas 48 h, si se tuvieran que recomendar unas condiciones de par para continuar haciendo pruebas, se recomendaría hacerlas a par medio, es decir, entre 20 y 50 Nm. Esto es debido a que, en primer lugar, aunque tras 24 h se obtiene mejor índice de caída y homogeneidad al utilizar un par alto, a las 48 h ya es mejor el índice de caída obtenido con un par medio, pero, además, el uso de un par alto supone una condición extrema para el funcionamiento de la máquina, que podría terminar acarreando problemas ligados al desgaste de componentes o incluso roturas.

7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Con el objetivo de seleccionar un ligante apropiado para el briqueteado de lodos gruesos de acería y lodos aceitosos, se ha llevado a cabo un estudio sobre los distintos tipos de ligantes inorgánicos, orgánicos y combinados, analizando sus puntos fuertes y débiles. Los ligantes orgánicos han sido seleccionados como óptimos para el caso de estudio, puesto que proporcionan buenas propiedades mecánicas al aglomerado sin introducir contaminantes en su estructura, lo cual reduciría el rendimiento del proceso. En concreto, se han escogido los ligantes P (derivado de carboximetilcelulosa de sodio) y C (copolímero de ácido acrílico y acrilamida), al tratarse de los ligantes orgánicos comerciales más utilizados en el mundo.

Una vez seleccionados los ligantes se ha procedido a realizar los ensayos pertinentes en el laboratorio con el fin de, en primer lugar, comprobar si mediante el empleo de dichos ligantes era posible la fabricación de briquetas que cumplieran con los requisitos exigibles para su reintroducción en el convertidor de la acería y, en segundo lugar, determinar cuál de los dos ligantes resultaba más efectivo para distintas condiciones de humedad y contenido en lodos aceitosos en la mezcla de lodos a aglomerar. Esto resultó interesante puesto que, en la práctica industrial, la humedad de los lodos es variable y la gestión de los lodos aceitosos resulta muy complicada, por lo que interesa aumentar el contenido éstos en la mezcla.

Para ello, se han llevado a cabo dos experimentos, uno con el objetivo de briquetear una mezcla de lodos gruesos de acería (sin lodos aceitosos) y otro para el briqueteado de lodos gruesos de acería junto con un 10 y un 15% de lodos aceitosos.

7.1.- BRIQUETEADO DE LODOS GRUESOS DE ACERÍA

Se han llevado a cabo varias pruebas con los dos ligantes seleccionados, P y C, variando la humedad inicial de la mezcla de lodos gruesos de acería (3%, 5%, 6-7% y 10% de humedad inicial). Debido a causas ajenas a la efectividad del ligante (problemas mecánicos del equipo), tan sólo se han fabricado briquetas para una humedad comprendida entre el 6 y el 7%, tanto con el ligante P como con el ligante C, y para una humedad del 5% y del 10% con el ligante P, puesto que no se disponía de suficiente material para realizar estas pruebas con el ligante C.

7.1.1.- Mezclas con una humedad de entre el 6 y el 7%

En las pruebas realizadas para una humedad de la mezcla del 6-7%, es decir, la humedad natural de la mezcla de lodos en este experimento, se comprobó que, aunque con ambos ligantes se conseguía fabricar briquetas con índices de caída inferiores al máximo permitido, el ligante C fue el que proporcionó mejores resultados para todos los tiempos de curado analizados. Además, se observó que una velocidad del tornillo sin fin situada entre el 54 y el 55% y una velocidad de los rodillos del 20% podría ser el ajuste óptimo, a escala de laboratorio, para el briqueteado de mezclas con esta humedad, aunque resultaría interesante llevar a cabo más pruebas con el objetivo de comprobarlo.

7.1.2.- Mezclas con una humedad del 3%

A causa de un desajuste en la posición del tornillo sin fin, no ha sido posible fabricar briquetas a partir de mezclas con una humedad del 3%. Sería conveniente repetir estas pruebas para comprobar si se trata o no de una humedad apropiada para el briqueteado de mezclas de lodos gruesos de acería.

7.1.3.- Mezclas con una humedad del 5%

En cuanto al briqueteado de la mezcla de lodos con un 5% de humedad inicial mediante el empleo del ligante P, si bien se han fabricado briquetas con índices de caída inferiores al máximo permitido, no se ha conseguido optimizar el par de operación. Se recomendaría realizar nuevas pruebas con el ligante P para tratar de optimizarlo, además de realizar pruebas en condiciones similares con el ligante C con el objetivo de comparar ambos ligantes y determinar cuál resulta más efectivo a la hora de trabajar con esta humedad.

7.1.4.- Mezclas con una humedad del 10%

Por último, en cuanto a las briquetas fabricadas a partir de una mezcla del 10% de humedad con el ligante P, se ha comprobado que, bajo una humedad tan alta, resulta complicado alimentar, manejar y briquetear el material, llegando incluso a producir atascos en la máquina, por lo que en principio no se recomendaría para la práctica industrial. En cualquier caso, sería conveniente repetir las pruebas con el ligante P y realizar nuevas pruebas con el

ligante C, para poder afirmar que una humedad del 10% es demasiado alta para el briqueteado de estas mezclas de lodos.

7.2.- BRIQUETEADO DE LODOS GRUESOS DE ACERÍA Y LODOS ACEITOSOS

Se han llevado a cabo varias pruebas para el briqueteado de lodos gruesos de acería junto con lodos aceitosos, variando la humedad de la mezcla inicial (3% y 5-6%) y el contenido en lodos aceitosos (10% y 15%). En este caso, ha sido posible obtener briquetas en todas las condiciones estudiadas.

7.2.1.- Mezclas con un 10% de lodos aceitosos y entre un 5 y un 6% de humedad

En cuanto a las briquetas fabricadas a partir de mezclas con un 5-6% de humedad y un 10% de lodos aceitosos, mediante el uso del ligante P se han fabricado briquetas con buenas propiedades a las 24 h de curado, pero que han ido empeorando con el tiempo, llegando incluso a sobrepasar el máximo índice de caída permitido. En cambio, con el ligante C, tras 24 h de curado el índice de caída resultó ser superior al máximo, pero tras 48 h de curado disminuyó notablemente, mostrando una mejoría en las propiedades mecánicas de las briquetas con el tiempo de curado. Cabe destacar además que, mientras que con el ligante P resultó muy fácil alcanzar un par de hasta 60 Nm durante la operación, con el ligante C tan sólo se consiguió un par de 20 Nm. Por ello, sería conveniente realizar nuevas pruebas con el ligante C, para tratar de conseguir producir a un par mayor y poder comparar los resultados con los obtenidos con el ligante P a pares más altos.

Al comparar estos resultados con los obtenidos con las briquetas fabricadas a partir de mezclas de lodos gruesos de acería para una humedad inicial de la mezcla similar, se comprobó que la adición de lodos aceitosos resultaba en un aumento en los índices de caída obtenidos, es decir, un aumento en la generación de finos para todos los tiempos de curado probados. Además, cabe destacar que la adición de lodos aceitosos hace que la disminución en la humedad de la briqueta tras el briqueteado sea menor.

7.2.2.- Mezclas con un 10% de lodos aceitosos y un 3% de humedad

En cuanto a las briquetas fabricadas a partir de mezclas con un 3% de humedad, humedad natural de la mezcla de lodos en este experimento y un 10% de lodos aceitosos, mediante el empleo del ligante P no se han obtenido buenos resultados. La operación resultó muy complicada, no fue posible optimizar el par y los índices de caída obtenidos fueron mayores al límite permitido. Por otro lado, con el ligante C se consiguió producir a un par de 50 Nm, obteniéndose briquetas con índices de caída inferiores al 30% para todos los tiempos de curado probados. Aunque en principio, parece que el ligante C resulta más efectivo para la aglomeración de la mezcla de lodos a esta humedad, resultaría necesario repetir las pruebas con el ligante P con el objetivo de fabricar briquetas en condiciones similares y poder comparar los resultados a los obtenidos con el ligante C.

7.2.3.- Mezclas con un 15% de lodos aceitosos y un 3% de humedad

Para un contenido en lodos aceitosos del 15%, como ya se ha mencionado anteriormente, tan solo se han realizado pruebas para una humedad inicial de la mezcla del 3%. El índice de caída obtenido con las briquetas fabricadas con el ligante P, ha superado el límite máximo a las 24 h de curado. No obstante, ha disminuido por debajo del límite tras 48 h de curado. En cualquier caso, con el ligante C se han obtenido índices de caída inferiores al límite permitido e inferiores a los obtenidos con el ligante P para todos los tiempos de curado, por lo que se puede concluir que el ligante C resulta más efectivo para el briqueteado de la mezcla de lodos a un 3% de humedad. Se recomendaría realizar nuevas pruebas de briqueteado de mezclas con una humedad del 5-6%, con el objetivo de comprobar la efectividad del ligante a una mayor humedad.

Se han comparado estos resultados con los obtenidos con las briquetas fabricadas con un 10% de lodos aceitosos para un 3% de humedad. Se comprobó que los índices de caída no variaban significativamente al incrementar el contenido en lodos aceitosos. El único cambio que se observó fue que la humedad en verde de las briquetas fabricadas con un 15% de lodos aceitosos resultó mayor que la de las briquetas fabricadas con un 10% de lodos aceitosos, con lo que se concluyó que, al aumentar el contenido en lodos aceitosos, se afectaría en mayor grado a la correcta cohesión entre las partículas, lo que provocaría que la compresión resultara aún menos efectiva y, por tanto, se expulsase menos agua durante la compactación.

Resultaría muy interesante realizar más pruebas para comprobar por qué en algunos casos, tanto en las mezclas con un 10% como con un 15% de lodos aceitosos, la humedad de la briqueta en verde resultaba mayor a la de la mezcla inicial. Al repetirse las pruebas se podría comprobar si fue debido a desviaciones o por falta de reproducibilidad de las medidas de las humedades o simplemente debido a la heterogeneidad de los lodos.

A la vista de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en todo este trabajo, se puede concluir que, en principio, el ligante C parece más efectivo para el briqueteado de las mezclas de lodos estudiadas. No obstante, sería conveniente realizar un estudio más profundo centrado en estos dos ligantes, así como llevar a cabo más pruebas con el objetivo de confirmar la mayor efectividad del ligante C.

7.3.- TIEMPO DE CURADO Y PAR DE OPERACIÓN

Finalmente, es importante mencionar que, a través del análisis de los resultados obtenidos en todas las pruebas realizadas en todo este trabajo, ha sido posible determinar un tiempo de curado y un par de operación óptimos.

En cuanto al tiempo de curado, se ha comprobado que con 48 h de curado se asegura una humedad inferior al 3% en todos los casos estudiados e incluso inferior al 1% en la mayoría de ellos. Por esta razón, después de 48 h de curado a temperatura ambiente, las briquetas ya tendrían la humedad adecuada para su reutilización en el convertidor de la acería.

Por último, se ha encontrado que al alcanzar un par durante la operación de briqueteado situado entre 20 y 50 Nm, se obtienen resultados similares o incluso mejores en cuanto a índices de caída y homogeneidad de los lodos tras 48 h de curado que cuando se utiliza un par mayor. Además, el trabajo con un par demasiado alto podría suponer una condición extrema de trabajo para la máquina, que podría llegar incluso a causar el desgaste o la rotura de sus componentes. Por esta razón, se aconseja que, a la hora de llevar a cabo nuevas pruebas como las utilizadas en este trabajo, se opere con un par comprendido entre 20 y 50 Nm.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ArcelorMittal, El Proceso Siderúrgico - Factorías de Avilés y Gijón, 2006.
- [2] ArcelorMittal, El Proceso Siderúrgico, 2007.
- [3] R. S. Molla, A study on Manufacturing of Deformed Bar (G 60-400W) at Elite Iron and Steel, 2018.
- [4] N. C. Candian Lobato, E. Auza Villegas y M. Borges Mansur, «Management of solid wastes from steelmaking and galvanizing processes: A brief review,» *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 102, pp. 49 - 57, 2015.
- [5] P. S. R. Reddy, «An Overview of Utilization of Slag and Sludge from Steel Industries,» *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 50, pp. 40 - 57, 2007.
- [6] ITP Steel, Steel Industry Technology Roadmap - Chapter 3: Iron Unit Recycling, 2000.
- [7] Real Academia de Ingeniería, «Diccionario de la Real Academia de Ingeniería - Aglomeración (Técnicas Geomineras),» [En línea]. Available: <http://diccionario.raing.es/es/lema/aglomeraci%C3%B3n-1>. [Último acceso: 02 05 2019].
- [8] J. Halt y S. K. Kawatra, «Review of Organic Binders for Iron Ore Agglomeration,» *Michigan Technological University - Department of Chemical Engineering*, 2013.
- [9] «Sri Guruvayurappan Agro Minerals Pvt. Ltd.,» [En línea]. Available: <http://www.sgampl.com/433664837>. [Último acceso: 01 04 2019].

- [10] M. Hepworth, «Is There a Looming Raw Materials Shortage in the Steel Industry?», 11 10 2012. [En línea]. Available: <http://northernironcorp.blogspot.com/>. [Último acceso: 01 04 2019].
- [11] STEELE, «Stiff extrusion for agglomeration and pelletizing or cold bonded briquetting.» [En línea]. Available: <https://www.jcsteele.com/industries/iron-steel/>. [Último acceso: 01 04 2019].
- [12] S. L. de Moraes, J. R. B. de Lima y T. Ramos Ribeiro, «Iron Ore Pelletizing Process - An Overview,» *Institute for Technological Research of Sao Paulo and School of Engineering of the University of Sao Paulo*, 2018.
- [13] G. Qiu, T. Jiang, H. Li y D. Wang, «Functions and Molecular Structure of Organic Binders for Iron Ore Pelletization,» *Colloids and Surfaces*, vol. 224, pp. 11 - 22, 2003.
- [14] L. Casey, «Organic Binders for Iron Ore Pelletization,» *Aalto University School of Chemical Technology*, 2015.
- [15] FEECO International, «FEECO International - Equipment,» [En línea]. Available: <https://feeco.com/>. [Último acceso: 04 04 2019].
- [16] FEECO International, *The Agglomeration Handbook*, 2015.
- [17] L. Ortíz, A. Tejada, A. Vázquez y G. Piñeiro Veiras, «Aprovechamiento de la Biomasa Forestal producida por la Cadena Monte-Industria,» *CIS - Madera*, pp. 17 - 32, 2003.
- [18] International Organization for Standardization, «ISO 556-1980,» *Coke (greater than 20mm in size) - Determination of mechanical strength*.
- [19] AENOR, «UNE 32018,» *Coque - Determinación de la resistencia mecánica. Índices MICUM e IRSID*, 2010.

- [20] International Organization for Standardization, «ISO 3271:2007,» *Iron ores for blast furnace and direct reduction feedstocks - Determination of the tumble and abrasion indices.*
- [21] Japanese Industrial Standard, «JIS M8711-1987,» *Test Method for Determination of Shatter Strength of Iron Ore Sinter.*
- [22] ISPAT, «Sulphur in Steels,» 23 09 2014. [En línea]. Available: <http://ispatguru.com/sulphur-in-steels/>. [Último acceso: 16 04 2019].
- [23] P. M. Ferrín, *Materias primas en la fabricación de acero. Mineral de hierro y carbón*, 2018.
- [24] J. Clout y J. Manuel, «Mineralogical, Chemical and Physical Characteristics of Iron Ore,» *Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability*, pp. 45 - 84, 2015.
- [25] P. Besta, A. Samolejová, K. Janovská, R. Lenort y J. Haverland, «The Effect of Harmful Elements in Production of Iron in Relation to Input and Output Material Balance,» *Metalurgija*, vol. 51, pp. 325 - 328, 2012.
- [26] K. Drobíková, S. Vallová, O. Motyka, K. M. Kutláková, D. Plachá y J. Seidlerová, «Effects of Binder Choice in Converter and Blast Furnace Sludge Briquette Preparation: Environmental and Practical Implications,» *Waste Management*, vol. 79, pp. 30 - 37, 2018.
- [27] N. Güngör y S. Karaoglan, «Interactions of Polyacrylamide Polymer with Bentonite in Aqueous Systems,» *Materials Letters*, vol. 48, pp. 168 - 175, 2001.
- [28] T. Eisele y S. Kawatra, «A Review of Binders in Iron Ore Pelletization,» *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal*, vol. 24, pp. 1 - 90, 2003.

- [29] S. J. Ripke y S. K. Kawatra, «Can Fly-ash extend Bentonite Binder for Iron Ore Agglomeration?,» *International Journal of Mineral Processing*, vol. 60, pp. 181 - 198, 2000.
- [30] Y. Bai, R. Ren, G. Liu, J. Zhao y C. Li, «Study of the mechanism for improving green pellet performance with compound binders,» *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, vol. 55, pp. 153 - 162, 2019.
- [31] D. K. Dutta, D. Bordoloi y P. C. Borthakur, «Investigation on Reduction of Cement Binder in Cold Bonded Pelletization of Iron Ore Fines,» *International Journal of Mineral Processing*, vol. 49, pp. 97 - 105, 1997.
- [32] A. Pillihuaman Zambrano, C. Takano, M. Breda Mourao y S. Y. Tagusagawa, «Binder Behaviour on Chromite-Carbon Composite Pellets,» *Materials Research*, vol. 19, pp. 1344 - 1350, 2016.
- [33] F. d. C. Dutra, V. G. de Resende y A. Dias, «Use of Carbon-based Nanomaterials on the Cold Agglomeration of Iron Ore Fines,» *ISIJ International*, vol. 59, pp. 660 - 664, 2019.
- [34] D. Zhu, J. Pan, L. Lu y R. Holmes, «Iron Ore Pelletization,» *Minerology, Processing and Environmental Sustainability*, pp. 435 - 473, 2015.
- [35] H. Han, D. Duan y P. Yuan, «Binders and Bonding Mechanism for RHF Briquette Made from Blast Furnace Dust,» *ISIJ International*, vol. 45, pp. 1781 - 1789, 2014.
- [36] Wikipedia, «Celulosa,» 18 12 2018. [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Celulosa>. [Último acceso: 07 05 2019].
- [37] AkzoNobel, *Peridur® Organic Binder for Pelletization*, 2016.

- [38] J. Schmitt, «Binder Composition and Process for Agglomerating Particulate Material». Patente US 006071325 A, 06 06 2000.
- [39] B. E. Banyai, D. E. LaSota y D. L. Strunk, «Binder for Metal-containing Ores». Patente 4863512, 05 09 1989.
- [40] BASF, «Product Information - Mining Chemicals,» 2016. [En línea]. Available: https://worldaccount.basf.com/wa/NAFTA~en_US/Catalog/MiningChemicals/pi/BASF/product/alcotac. [Último acceso: 05 03 2019].
- [41] J. A. Halt., «Controlling Properties of Agglomerates for Chemical Processes,» *Michigan Technological University*, 2017.
- [42] Wikipedia, «Dextrina,» 01 10 2017. [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Dextrina>. [Último acceso: 25 04 2019].
- [43] M. Schnitzer y S. Khan, *Humic Substances in the Environment*, 1972.
- [44] Wikipedia, «Guar gum,» 21 03 2019. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Guar_gum. [Último acceso: 26 04 2019].
- [45] B. Young, *Using Binders to Briquette Carbonaceous Materials and Steel Wastes*, 2015.
- [46] A. Babu Kotta, S. Kumar Karak y M. Kumar, «Effect of Molasses Addition on the Compressive Strength and Wear behaviour of Iron Ore Pellets for Production of Sponge Iron,» *Indian Institute of Metals*, 2017.
- [47] P. Mosen Asadi, *Beet-Sugar Handbook*, Wiley, 2007.
- [48] S. De Gisi, L. Romaniello, M. Dalessandro, F. Todaro y M. Notarnicola, «Recovery of iron rich residues from integrated steelmaking process by hydrated lime/molasses

pressurised cold agglomeration,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 233, pp. 830-840, 2019.

- [49] O. Sivrikaya y A. Arol, *Alternative Binders to Bentonite for Iron Ore Pelletizing - Part I: Effects on Physical and Mechanical Properties*, 2014.
- [50] Wikipedia, «Agente Quelante,» 23 01 2019. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Agente_quelante. [Último acceso: 30 04 2019].
- [51] J. J. Schmitt y R. G. Smeink, «Process for Producing Iron Ore Agglomerates with use of Sodium Silicate Containing Binder». Patente US 2007/0119563 A1, 31 05 2007.
- [52] BASF, «BASF TechNews - Novel Iron Ore Binder Technology: Study of Bentonite Modification,» 2017.
- [53] J. J. Schmitt y A. Basdag, «Binder Composition for Agglomerating Particulate Material». Patente US 2005/0223937 A1, 13 10 2005.
- [54] B. Langlotz, S. Hoff, A. M. Villanueva Berindoague, A. Michailovski y F. Dierschke, «Use of Copolymers as Binders for Pelletizing Metal Containing Ores». Patente WO 2018/153995 A1, 30 08 2018.
- [55] A. M. Villanueva Berindoague, A. Michailovski, G. Brodt, S. Von Krog, D. R. Bechen, R. Packe-wirth y S. Hoff, «Use of Hydrophobically Associating Copolymers as Binders for Pelletizing Metal Containing Ores». Patente US 2019/0010577 A1, 10 01 2019.
- [56] F. Wending, «Binder Composition for Pelletizing Iron Ore». Patente WO 2009/109024 A1, 11 09 2009.
- [57] H. R. Steeghs, «Method for Producing Reducible Iron-Containing Material having less Clustering during Direct Reduction and Products Thereof». Patente US 005476532 A, 19 12 1995.

- [58] A. Michailovski, W. Cilengi, J. Mortimer y K. B. Bisaka, «Coal binder composition». United States Patente US 2018/0179461 A1, 28 Junio 2018.
- [59] AkzoNobel, *Product Specification - Peridur 300*, 2014.
- [60] Kern, «RS Components - Analizador de humedad Kern (Manual de Instrucciones),» [En línea]. Available: https://es.rs-online.com/web/p/products/1363442/?grossPrice=Y&cm_mmc=ES-PLA-DS3A-_-google-_-PLA_ES_ES_CatchAll-_-Ad+Group+Catch+All-_-PRODUCT_GROUP&matchtype=&pla-293946777986&gclid=Cj0KCQjwrjdnBRDXARIsAEcE5YmJXMVYMcwNIBb4ygtfp0V2NMQgyDg_dbIBudKYCPtdOLugS. [Último acceso: 05 06 2019].
- [61] K. Drobíková, D. Plachá, O. Motyka, R. Gabor, K. M. Kutláková, S. Vallová y J. Seidlerová, «Recycling of Blast Furnace Sludge by Briquetting with Starch Binder: Waste Gas from Thermal Treatment Utilizable as a Fuel,» *Waste Management*, vol. 48, pp. 471 - 477, 2016.
- [62] J. A. de Araújo y V. Schalch, «Recycling of Electric Arc Furnace (EAF) Dust for use in Steelmaking Process,» *Journal of Materials Research and Technology*, 2014.

ANEXOS

A1.- HUMEDAD DE INICIAL LAS MEZCLAS

A1.1.- Mezclas formadas exclusivamente por lodos gruesos de acería

En la Tabla A1.1 se pueden consultar las humedades de los lodos, tal y como fueron recibidos (humedad natural) y tras mezclarlos y realizar las operaciones de secado o aumento de la humedad, en su caso (humedad final de la mezcla).

Tabla A1.1.- Humedad natural de cada tipo de lodo y humedad final de cada muestra formada exclusivamente por lodos gruesos de acería (continua en la página siguiente).

Mezcla	Humedad natural [%]		Humedad final de la mezcla [%]
	LGA	LGB	
LG1	6.44	8.56	6.98
	6.33	7.94	7.02
	6.65	8.88	6.98
Promedio	6.47	8.46	6.99
Desviación Típica	0.16	0.48	0.02
LG2	6.69	8.24	3.05
	6.49	7.87	2.89
	6.68	8.40	2.77
Promedio	6.62	8.17	2.90
Desviación Típica	0.11	0.27	0.14
LG3	6.36	8.95	5.02
	6.26	8.29	4.89
	5.84	7.87	4.87
Promedio	6.15	8.37	4.93
Desviación Típica	0.28	0.54	0.08
LG4	6.42	7.07	6.40
	6.18	6.98	6.32
	6.23	7.11	6.53
Promedio	6.28	7.05	6.42
Desviación Típica	0.13	0.07	0.11
LG5	6.21	7.24	6.78
	6.38	8.28	6.40
	6.62	7.87	6.52
Promedio	6.40	7.80	6.57
Desviación Típica	0.21	0.52	0.19

LG6	6.89	8.70	9.54
	7.48	8.02	9.94
	5.27	8.42	-
Promedio	6.55	8.38	9.74
Desviación Típica	1.14	0.34	0.28
LG7	6.89	8.70	5.06
	7.48	8.02	5.05
	5.27	8.42	5.11
Promedio	6.55	8.38	5.07
Desviación Típica	1.14	0.34	0.03

A1.2.- Mezclas formadas por lodos gruesos de acería y lodos aceitosos

Las humedades de los diferentes tipos de lodos, tal y como fueron recibidos (humedad natural), así como la humedad de su mezcla, tras realizar las operaciones de adición de agua, en su caso (humedad final de la mezcla), se exponen en la Tabla A1.2.

Tabla A1.2.- Humedad natural de cada tipo de lodo y humedad final de cada muestra formada por lodos gruesos de acería y lodos aceitosos (continua en la página siguiente).

Mezcla	Humedad natural [%]			Humedad final de la mezcla [%]
	LGA	LGB	AC	
LGAC1	1.69	8.83	9.25	3.50
	1.66	8.96	9.92	3.02
	1.68	9.30	7.93	3.02
Promedio	1.68	9.03	9.03	3.18
Desviación Típica	0.02	0.24	1.01	0.28
LGAC2	1.69	8.83	9.25	3.50
	1.66	8.96	9.92	3.02
	1.68	9.30	7.93	3.02
Promedio	1.68	9.03	9.03	3.18
Desviación Típica	0.02	0.24	1.01	0.28
LGAC3	3.31	7.84	10.98	5.75
	1.86	7.88	6.31	5.57
	4.51	8.06	9.09	5.79
Promedio	3.23	7.93	8.79	5.70
Desviación Típica	1.33	0.12	2.35	0.12
LGAC4	3.31	7.84	8.36	5.20
	1.86	7.88	9.17	5.28
	4.51	8.06	8.48	6.36
Promedio	3.23	7.93	8.67	5.61
Desviación Típica	1.33	0.12	0.44	0.65
LGAC5	0.26	7.79	8.68	5.94

	0.32	7.27	8.43	5.27
	0.31	7.01	8.27	5.90
Promedio	0.30	7.36	8.46	5.70
Desviación Típica	0.03	0.40	0.21	0.38
LGAC6	0.26	7.79	8.35	5.95
	0.32	7.27	9.07	5.93
	0.31	7.01	9.31	4.37
Promedio	0.30	7.36	8.91	5.42
Desviación Típica	0.03	0.40	0.50	0.91
LGAC7	1.31	7.27	9.03	3.73
	1.33	8.20	8.43	3.85
	1.12	6.87	8.79	3.49
Promedio	1.25	7.45	8.75	3.69
Desviación Típica	0.12	0.68	0.30	0.18
LGAC8	1.31	7.27	9.79	2.82
	1.33	8.20	7.40	3.15
	1.12	6.87	7.83	2.29
Promedio	1.25	7.45	8.34	2.75
Desviación Típica	0.12	0.68	1.27	0.43
LGAC9	0.52	7.52	6.86	5.40
	0.63	8.23	6.54	5.37
	0.25	7.60	7.03	5.50
Promedio	0.47	7.78	6.81	5.42
Desviación Típica	0.20	0.39	0.25	0.07
LGAC10	0.52	7.52	8.71	7.04
	0.63	8.23	7.75	6.10
	0.25	7.60	8.49	5.38
Promedio	0.47	7.78	8.32	6.17
Desviación Típica	0.20	0.39	0.50	0.83

Es importante mencionar que la humedad final de la mezcla LGAC7 no ha sido medida, sino que se ha calculado en función de la humedad y el contenido de cada lodo en la misma.

A2.- RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

A2.1.- Índice de caída

A2.1.1.- Briquetas fabricadas a partir de lodos gruesos de acería

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en los ensayos realizados tras 24 horas de curado (Tabla A2.1), 48 horas de curado (Tabla A2.2) y 15 días de curado (Tabla A2.3) con las briquetas producidas con lodos gruesos de acería.

Tabla A2.1.- Experimento 1. Resultados del ensayo de caída tras 24 horas de curado a temperatura ambiente (continua en la página siguiente).

Prueba	24 h de curado a temperatura ambiente					
	P ₀ [g]	P ₊₁₀ [g]	P ₋₁₀ [g]	P ₀ – P ₊₁₀ [g]	Error [g]	Índice de caída [%]
LG1P1	63.82	54.61	9.13	9.21	0.08	14.43
	61.92	48.75	13.02	13.17	0.15	21.27
	66.04	55.94	9.95	10.10	0.15	15.29
Promedio	63.93	53.10	10.70	10.83	0.13	17.00
Desviación Típica	2.06	3.83	2.05	2.08	0.04	3.72
LG1P2	76.96	73.97	2.88	2.99	0.11	3.89
	72.98	69.91	2.95	3.07	0.12	4.21
	77.37	71.71	5.49	5.66	0.17	7.32
Promedio	75.77	71.86	3.77	3.91	0.13	5.14
Desviación Típica	2.43	2.03	1.49	1.52	0.03	1.90
LG4P1	63.88	42.86	20.59	21.02	0.43	32.91
	No había suficiente material para repetir el ensayo.					
Promedio	63.88	42.86	20.59	21.02	0.43	32.91
Desviación Típica	-	-	-	-	-	-
LG4P2	74.35	55.15	18.89	19.20	0.31	25.82
	70.41	58.81	11.38	11.60	0.22	16.47
	75.34	66.25	8.83	9.09	0.26	12.07
Promedio	73.37	60.07	13.03	13.30	0.26	18.12
Desviación Típica	2.61	5.66	5.23	5.26	0.05	7.03
LG4C	68.16	52.78	15.00	15.38	0.38	22.56
	66.77	49.36	17.20	17.41	0.21	26.07
	69.15	59.90	9.05	9.25	0.20	13.38
Promedio	68.03	54.01	13.75	14.01	0.26	20.67
Desviación Típica	1.20	5.38	4.22	4.25	0.10	6.56
LG5P	67.40	53.37	13.76	14.03	0.27	20.82

	70.98	63.56	7.07	7.42	0.35	10.45
	68.30	59.52	8.64	8.78	0.14	12.86
Promedio	68.89	58.82	9.82	10.08	0.25	14.71
Desviación Típica	1.86	5.13	3.50	3.49	0.11	5.42
LG5C1	69.80	59.69	9.78	10.11	0.33	14.48
	70.07	59.50	9.95	10.57	0.62	15.08
	70.21	52.70	17.37	17.51	0.14	24.94
Promedio	70.03	57.30	12.37	12.73	0.36	18.17
Desviación Típica	0.21	3.98	4.33	4.15	0.24	5.87
LG5C2	76.18	66.28	9.57	9.90	0.33	13.00
	74.40	66.13	7.98	8.27	0.29	11.12
	75.61	74.16	1.24	1.45	0.21	1.92
Promedio	75.40	68.86	6.26	6.54	0.28	8.68
Desviación Típica	0.91	4.59	4.42	4.48	0.06	5.93
LG6P2	64.99	56.03	8.63	8.96	0.33	13.79
	69.16	64.13	4.70	5.03	0.33	7.27
	68.29	61.20	6.85	7.09	0.24	10.38
Promedio	67.48	60.45	6.73	7.03	0.30	10.48
Desviación Típica	2.20	4.10	1.97	1.97	0.05	3.26
LG7P	69.09	52.73	16.01	16.36	0.35	23.68
	69.57	52.40	16.91	17.17	0.26	24.68
	68.31	50.83	17.00	17.48	0.48	25.59
Promedio	68.99	51.99	16.64	17.00	0.36	24.65
Desviación Típica	0.64	1.02	0.55	0.58	0.11	0.96

Tabla A2.2.-Experimento 1. Resultados del ensayo de caída tras 48 horas de curado a temperatura ambiente (continua en la página siguiente).

Prueba	48 h de curado a temperatura ambiente					
	P ₀ [g]	P ₊₁₀ [g]	P ₋₁₀ [g]	P ₀ – P ₊₁₀ [g]	Error [g]	Índice de caída [%]
LG1P1	61.41	54.15	7.14	7.26	0.12	11.82
	64.46	52.67	11.69	11.79	0.10	18.29
	63.79	50.73	13.06	13.06	0.00	20.47
Promedio	63.22	52.52	10.63	10.70	0.07	16.86
Desviación Típica	1.60	1.72	3.10	3.05	0.05	4.50
LG1P2	70.77	52.20	18.22	18.57	0.35	26.24
	70.86	59.56	10.95	11.30	0.35	15.95
	71.15	59.33	11.49	11.82	0.33	16.61
Promedio	70.93	57.03	13.55	13.90	0.34	19.60
Desviación Típica	0.20	4.18	4.05	4.06	0.01	5.76
LG4P1	64.37	40.07	23.99	24.30	0.31	37.75
	No había suficiente material para repetir el ensayo.					

Promedio	64.37	40.07	23.99	24.30	0.31	37.75
Desviación Típica	-	-	-	-	-	-
LG4P2	71.52	58.65	12.60	12.87	0.27	17.99
	66.42	56.13	9.95	10.29	0.34	15.49
	71.07	62.63	8.03	8.44	0.41	11.88
Promedio	69.67	59.14	10.19	10.53	0.34	15.12
Desviación Típica	2.82	3.28	2.29	2.23	0.07	3.08
LG4C	67.92	58.12	9.51	9.80	0.29	14.43
	72.09	60.47	11.14	11.62	0.48	16.12
	68.80	54.95	13.40	13.85	0.45	20.13
Promedio	69.60	57.85	11.35	11.76	0.41	16.89
Desviación Típica	2.20	2.77	1.95	2.03	0.10	2.93
LG5P	69.63	59.52	9.90	10.11	0.21	14.52
	65.95	47.70	17.96	18.25	0.29	27.67
	68.16	54.52	13.18	13.64	0.46	20.01
Promedio	67.91	53.91	13.68	14.00	0.32	20.73
Desviación Típica	1.85	5.93	4.05	4.08	0.13	6.61
LG5C1	70.04	49.50	20.31	20.54	0.23	29.33
	67.74	54.04	13.16	13.70	0.54	20.22
	No había suficiente material para repetir el ensayo.					
Promedio	68.89	51.77	16.74	17.12	0.39	24.78
Desviación Típica	1.63	3.21	5.06	4.84	0.22	6.44
LG5C2	75.66	71.61	3.88	4.05	0.17	5.35
	74.29	66.35	7.47	7.94	0.47	10.69
	72.77	66.52	6.10	6.25	0.15	8.59
Promedio	74.24	68.16	5.82	6.08	0.26	8.21
Desviación Típica	1.45	2.99	1.81	1.95	0.18	2.69
LG6P2	63.99	46.21	17.48	17.78	0.30	27.79
	60.97	51.45	9.26	9.52	0.26	15.61
	63.25	52.81	10.17	10.44	0.27	16.51
Promedio	62.74	50.16	12.30	12.58	0.28	19.97
Desviación Típica	1.57	3.48	4.51	4.53	0.02	6.78
LG7P	68.92	55.93	12.82	12.99	0.17	18.85
	67.53	51.14	16.18	16.39	0.21	24.27
	66.50	50.66	15.38	15.84	0.46	23.82
Promedio	67.65	52.58	14.79	15.07	0.28	22.31
Desviación Típica	1.21	2.91	1.76	1.83	0.16	3.01

Tabla A2.3.- Experimento 1. Resultados del ensayo de caída tras 15 días de curado a temperatura ambiente (continua en la página siguiente).

Prueba	15 días de curado a temperatura ambiente					
	P ₀ [g]	P ₊₁₀ [g]	P ₋₁₀ [g]	P ₀ – P ₊₁₀ [g]	Error [g]	Índice de caída [%]
LG1P1	No había material suficiente para realizar el ensayo.					
Promedio	-	-	-	-	-	-
Desviación Típica	-	-	-	-	-	-
LG1P2	73.64	64.89	8.50	8.75	0.25	11.88
	No había material suficiente para repetir el ensayo.					
Promedio	73.64	64.89	8.50	8.75	0.25	11.88
Desviación Típica	-	-	-	-	-	-
LG4P1	No había material suficiente para realizar el ensayo.					
Promedio	-	-	-	-	-	-
Desviación Típica	-	-	-	-	-	-
LG4P2	No había material suficiente para realizar el ensayo.					
Promedio	-	-	-	-	-	-
Desviación Típica	-	-	-	-	-	-
LG4C	69.75	53.13	16.61	16.62	0.01	23.83
	67.39	54.59	12.63	12.80	0.17	18.99
	67.21	59.71	7.44	7.50	0.06	11.16
Promedio	68.12	55.81	12.23	12.31	0.08	17.99
Desviación Típica	1.42	3.46	4.60	4.58	0.08	6.39
LG5P	66.75	54.22	12.35	12.53	0.18	18.77
	65.09	54.67	10.30	10.42	0.12	16.01
	No había material suficiente para repetir el ensayo.					
Promedio	65.92	54.45	11.33	11.48	0.15	17.39
Desviación Típica	1.17	0.32	1.45	1.49	0.04	1.95
LG5C1	No había material suficiente para realizar el ensayo.					
Promedio	-	-	-	-	-	-
Desviación Típica	-	-	-	-	-	-
LG5C2	73.59	58.36	15.15	15.23	0.08	20.70
	76.05	70.69	5.29	5.36	0.07	7.05
	71.33	62.59	8.57	8.74	0.17	12.25
Promedio	73.66	63.88	9.67	9.78	0.11	13.33

Desviación Típica	2.36	6.27	5.02	5.02	0.06	6.89
LG6P2	No había material suficiente para realizar el ensayo.					
Promedio	-	-	-	-	-	-
Desviación Típica	-	-	-	-	-	-
LG7P	65.64	46.20	19.12	19.44	0.32	29.62
	67.93	51.25	14.87	16.68	1.81	24.55
	66.51	56.93	9.54	9.58	0.04	14.40
Promedio	66.69	51.46	14.51	15.23	0.72	22.86
Desviación Típica	1.16	5.37	4.80	5.09	0.95	7.75

A2.1.2.- Briquetas fabricadas a partir de lodos gruesos de acería y lodos aceitosos

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en los ensayos realizados tras 24 horas de curado (Tabla A2.4), 48 horas de curado (Tabla A2.5) y 15 días de curado (Tabla A2.6) con las briquetas producidas con lodos gruesos de acería.

Tabla A2.4.- Experimento 2. Resultados del ensayo de caída tras 24 h de curado a temperatura ambiente (continua en la página siguiente).

Prueba	24 h de curado a temperatura ambiente					
	P ₀ [g]	P ₊₁₀ [g]	P ₋₁₀ [g]	P ₀ – P ₊₁₀ [g]	Error [g]	Índice de caída [%]
LGAC1P2	70.87	35.80	34.47	35.07	060	49.48
	68.37	41.85	26.52	26.52	0.00	38.79
	72.62	38.68	33.42	33.94	0.52	46.74
Promedio	70.62	38.78	31.47	31.84	0.37	45.00
Desviación Típica	2.14	3.03	4.32	4.64	0.33	5.55
LGAC2C	70.81	46.47	23.79	24.34	0.55	34.37
	68.68	51.69	16.12	16.99	0.87	24.74
	75.03	57.82	16.78	17.21	0.43	22.94
Promedio	71.51	51.99	18.90	19.51	0.62	27.35
Desviación Típica	3.23	5.68	4.25	4.18	0.23	6.15
LGAC3P	78.39	67.34	10.75	11.05	0.30	14.10
	71.74	54.09	17.05	17.65	0.60	24.60
	73.55	56.13	17.14	17.42	0.28	23.68
Promedio	74.56	59.19	14.98	15.37	0.39	20.79
Desviación Típica	3.44	7.13	3.66	3.75	0.18	5.82
LGAC4C	74.27	56.05	17.88	18.22	0.34	24.53
	74.18	59.76	14.02	14.42	0.40	19.44
	75.57	55.20	19.92	20.37	0.45	26.96

Promedio	74.67	57.00	17.27	17.67	0.40	23.64
Desviación Típica	0.78	2.42	3.00	3.01	0.06	3.84
LGAC5C	67.49	33.46	33.28	34.03	0.75	49.31
	66.85	44.03	22.49	22.82	0.33	33.64
	68.85	35.94	32.36	32.91	0.55	47.00
Promedio	67.73	37.81	29.38	29.92	0.54	43.32
Desviación Típica	1.02	5.53	5.98	6.17	0.21	8.46
LGAC7P1	74.14	51.04	22.51	23.10	0.59	31.16
	No había material suficiente para realizar el ensayo.					
Promedio	74.14	51.04	22.51	23.10	0.59	31.16
Desviación Típica	-	-	-	-	-	-
LGAC7P2	65.07	23.25	41.28	41.82	0.54	64.27
	65.92	31.20	32.45	34.72	2.27	52.67
	69.05	34.29	33.80	34.76	0.96	50.34
Promedio	66.68	29.58	35.84	37.10	1.26	55.76
Desviación Típica	2.10	5.70	4.76	4.09	0.90	7.46
LGAC7P3	81.04	70.22	10.26	10.82	0.56	13.35
	75.68	61.79	13.14	13.89	0.75	18.35
	78.33	64.53	13.53	13.80	0.27	17.62
Promedio	78.35	65.51	12.31	12.84	0.53	16.44
Desviación Típica	2.68	4.30	1.79	1.75	0.24	2.70
LGAC8C	76.44	63.67	12.34	12.77	0.43	16.71
	75.99	65.50	9.71	10.49	0.78	13.80
	73.60	62.16	11.04	11.44	0.40	15.54
Promedio	75.34	63.78	11.03	11.57	0.54	15.35
Desviación Típica	1.53	1.67	1.32	1.15	0.21	1.46
LGAC9P	79.03	67.78	10.74	11.25	0.51	14.24
	77.03	67.30	9.27	9.73	0.46	12.63
	74.84	65.65	8.70	9.19	0.49	12.28
Promedio	76.97	66.91	9.57	10.06	0.49	13.05
Desviación Típica	2.10	1.12	1.05	1.07	0.03	1.04
LGAC10C	70.50	35.45	34.71	35.05	0.34	49.72
	66.45	46.05	20.10	20.40	0.30	30.70
	66.74	35.09	31.30	31.65	0.35	47.42
Promedio	67.90	38.86	28.70	29.03	0.33	42.61
Desviación Típica	2.26	6.23	7.64	7.67	0.03	10.38

Tabla A2.5.- Experimento 2. Resultados del ensayo de caída tras 48 h de curado a temperatura ambiente (continua en la página siguiente).

Prueba	48 h de curado a temperatura ambiente					
	P ₀ [g]	P ₊₁₀ [g]	P ₋₁₀ [g]	P ₀ – P ₊₁₀ [g]	Error [g]	Índice de caída [%]
LGAC1P2	71.02	28.05	42.32	42.97	0.65	60.50
	70.41	27.53	41.76	42.88	1.12	60.90
	69.22	15.89	52.66	53.33	0.67	77.04
Promedio	70.22	23.82	45.58	46.39	0.81	66.15
Desviación Típica	0.92	6.88	6.14	6.01	0.27	9.44
LGAC2C	70.30	54.72	15.13	15.58	0.45	22.16
	72.47	59.35	12.61	13.12	0.51	18.10
	72.53	55.91	15.76	16.62	0.86	22.91
Promedio	71.77	56.66	14.50	15.11	0.61	21.06
Desviación Típica	1.27	2.40	1.67	1.80	0.22	2.59
LGAC3P	75.89	41.50	33.60	34.39	0.79	45.32
	75.15	38.07	36.63	37.08	0.45	49.34
	72.97	50.59	22.10	22.38	0.28	30.67
Promedio	74.67	43.39	30.78	31.28	0.51	41.78
Desviación Típica	1.52	6.47	7.67	7.83	0.26	9.83
LGAC4C	74.42	47.50	22.28	26.92	4.64	36.17
	70.34	45.95	24.04	24.39	0.35	34.67
	74.68	51.94	22.34	22.74	0.40	30.45
Promedio	73.15	48.46	22.89	24.68	1.80	33.77
Desviación Típica	2.43	3.11	1.00	2.11	2.46	2.97
LGAC5C	67.99	59.21	8.34	8.78	0.44	12.91
	66.60	50.63	15.52	15.97	0.45	23.98
	69.47	53.22	15.99	16.25	0.26	23.39
Promedio	68.02	54.35	13.28	13.67	0.38	20.09
Desviación Típica	1.44	4.40	4.29	4.23	0.11	6.23
LGAC7P1	73.33	52.70	20.20	20.63	0.43	28.13
	No había material suficiente para realizar el ensayo.					
Promedio	73.33	52.70	20.20	20.63	0.43	28.13
Desviación Típica	-	-	-	-	-	-
LGAC7P2	69.20	22.32	46.06	46.88	0.82	67.75
	65.95	22.89	42.53	43.06	0.53	65.29
	63.59	14.24	48.83	49.35	0.52	77.61
Promedio	66.25	19.82	45.81	46.43	0.62	70.21
Desviación Típica	2.82	4.84	3.16	3.17	0.17	6.52
LGAC7P3	73.71	51.76	21.57	21.95	0.38	29.78
	78.21	56.11	21.86	22.10	0.24	28.26
	76.18	49.02	26.85	27.16	0.31	35.65
Promedio	76.03	52.30	23.43	23.74	0.31	31.23

Desviación Típica	2.25	3.58	2.97	2.97	0.07	3.91
LGAC8C	73.46	60.26	12.87	13.20	0.33	17.97
	74.15	54.47	19.31	19.68	0.37	26.54
	74.38	55.92	18.07	18.46	0.9	24.82
Promedio	74.00	56.88	16.75	17.11	0.36	23.11
Desviación Típica	0.48	3.01	3.42	3.44	0.03	4.53
LGAC9P	73.66	55.01	18.25	18.65	0.40	25.32
	76.55	58.64	17.39	17.91	0.52	23.40
	75.54	60.72	14.49	14.82	0.33	19.62
Promedio	75.25	58.12	16.71	17.13	0.42	22.78
Desviación Típica	1.47	2.89	1.97	2.03	0.10	2.90
LGAC10C	66.31	56.39	9.55	9.92	0.37	14.96
	66.56	53.01	13.38	13.55	0.17	20.36
	No había material suficiente para realizar el ensayo.					
Promedio	66.44	54.70	11.47	11.74	0.27	17.66
Desviación Típica	0.18	2.39	2.71	2.57	0.14	3.82

Tabla A2.6.- Experimento 2. Resultados del ensayo de caída tras 15 días de curado a temperatura ambiente (continua en la página siguiente).

Prueba	15 días de curado a temperatura ambiente					
	P ₀ [g]	P ₊₁₀ [g]	P ₋₁₀ [g]	P ₀ – P ₊₁₀ [g]	Error [g]	Índice de caída [%]
LGAC1P2	No había material suficiente para realizar el ensayo.					
Promedio	-	-	-	-	-	-
Desviación Típica	-	-	-	-	-	-
LGAC2C	74.02	56.19	17.36	17.83	0.47	24.09
	73.02	59.77	13.02	13.25	0.23	18.15
	70.51	53.73	16.44	16.78	0.34	23.80
Promedio	72.52	56.56	15.61	15.95	0.35	22.01
Desviación Típica	1.81	3.04	2.29	2.40	0.12	3.35
LGAC3P	71.37	44.11	26.98	27.26	0.28	38.20
	71.97	52.96	18.67	19.01	0.34	26.41
	No había material suficiente para realizar el ensayo.					
Promedio	71.67	48.54	22.83	23.14	0.31	32.30
Desviación Típica	0.42	6.26	5.88	5.83	0.04	8.33
LGAC4C	No había material suficiente para realizar el ensayo.					

Promedio	-	-	-	-	-	-
Desviación Típica	-	-	-	-	-	-
LGAC5C	64.55	50.55	13.69	14.00	0.31	21.69
	No había material suficiente para realizar el ensayo.					
Promedio	64.55	50.55	13.69	14.00	0.31	21.69
Desviación Típica	-	-	-	-	-	-
LGAC7P1	No había material suficiente para realizar el ensayo.					
	No había material suficiente para realizar el ensayo.					
Promedio	-	-	-	-	-	-
Desviación Típica	-	-	-	-	-	-
LGAC7P2	68.90	20.86	47.69	48,04	0,35	69,72
	68.86	20.87	47.60	47,99	0,39	69,69
	66.42	24.69	41.38	41,73	0,35	62,83
Promedio	68.06	22.14	45.56	45,92	0,36	67,41
Desviación Típica	1.42	2.21	3.62	3,63	0,02	3,97
LGAC7P3	71.27	53.67	17.32	17,60	0,28	24,69
	75.59	53.91	21.47	21,68	0,21	28,68
	No había material suficiente para realizar el ensayo.					
Promedio	73.43	53.79	19.40	19.64	0.25	26.69
Desviación Típica	3.05	0.17	2.93	2.88	0.05	2.82
LGAC8C	70.92	60.14	10.50	10.78	0.28	15.20
	73.98	64.07	9.67	9.91	0.24	13.40
	73.23	55.69	17.27	17.54	0.27	23.95
Promedio	72.71	59.97	12.48	12.74	0.26	17.52
Desviación Típica	1.59	4.19	4.17	4.18	0.02	5.65
LGAC9P	84.37	58.60	25.49	25.77	0.28	30.54
	No había material suficiente para realizar el ensayo.					
Promedio	84.37	58.60	25.49	25.77	0.28	30.54
Desviación Típica	-	-	-	-	-	-
LGAC10C	No había material suficiente para realizar el ensayo.					
	No había material suficiente para realizar el ensayo.					
Promedio	-	-	-	-	-	-
Desviación Típica	-	-	-	-	-	-

A2.2.- Evolución de la humedad

A2.2.1- Briquetas fabricadas a partir de lodos gruesos de acería

La Tabla A2.7 muestra la humedad de las briquetas en verde fabricadas a lo largo del experimento 1 y la evolución de su humedad en función del tiempo de curado, 24 h, 48 h y 15 días).

Tabla A2.7.- Experimento 1. Humedad de las briquetas fabricadas en verde y en función del tiempo de curado, 24 h, 48 h y 15 días (continua en la página siguiente).

Prueba	Humedad de la briqueta en verde [%]	Humedad briqueta en función del tiempo de curado [%]		
		24h	48 h	15 días
LG1P1	6.68	3.77	0.58	No se midió por falta de material.
	6.68	3.37	0.52	
	-	2.82	0.55	
Promedio	6.68	3.32	0.55	-
Desviación Típica	0.00	0.48	0.03	-
LG1P2	6.26	1.69	1.16	0.45
	6.22	3.85	1.27	0.45
	-	4.72	1.18	0.43
Promedio	6.24	3.42	1.20	0.44
Desviación Típica	0.03	1.56	0.06	0.01
LG4P1	No se ha medido.	1.65	0.56	No se midió por falta de material.
		1.40	0.44	
		1.65	0.51	
Promedio	-	1.57	0.50	-
Desviación Típica	-	0.14	0.06	-
LG4P2	No se ha medido.	0.95	0.72	No se midió por falta de material.
		0.77	0.68	
		0.77	0.44	
Promedio	-	0.83	0.61	-
Desviación Típica	-	0.10	0.15	-
LG4C	3.86	1.78	0.83	0.54
	3.76	1.52	0.66	0.41
	3.84	1.02	0.89	0.51
Promedio	3.82	1.44	0.79	0.49
Desviación Típica	0.05	0.39	0.12	0.07
LG5P	3.20	2.48	0.57	0.60
	3.85	1.79	0.47	0.60
	3.83	2.01	0.55	0.44
Promedio	3.63	2.09	0.53	0.55

Desviación Típica	0.37	0.35	0.05	0.09
LG5C1	5.00	3.02	0.56	No se midió por falta de material.
	5.01	3.29	0.40	
	4.38	3.18	0.64	
Promedio	4.80	3.16	0.48	-
Desviación Típica	0.36	0.14	0.11	-
LG5C2	5.28	2.46	0.62	0.46
	3.79	2.12	0.42	0.62
	2.89	2.55	0.46	0.70
Promedio	3.99	2.38	0.50	0.59
Desviación Típica	1.21	0.23	0.11	0.12
LG6P2	8.33	2.17	0.35	No se midió por falta de material.
	8.45	2.34	0.46	
	7.70	1.43	0.37	
Promedio	8.16	1.98	0.39	-
Desviación Típica	0.40	0.48	0.06	-
LG7P	5.26	2.17	0.59	0.65
	5.15	2.12	0.50	0.67
	4.81	1.75	0.48	0.72
Promedio	5.07	2.01	0.52	0.68
Desviación Típica	0.23	0.23	0.06	0.04

A2.2.2.- Briquetas fabricadas a partir de lodos gruesos de acería y lodos aceitosos

La Tabla A2.8 muestra la humedad de las briquetas en verde fabricadas a lo largo del experimento 2 y la evolución de su humedad en función del tiempo de curado, 24 h, 48 h y 15 días).

Tabla A2.8.- Experimento 2. Humedad de las briquetas fabricadas en verde y en función del tiempo de curado, 24 h, 48 h y 15 días (continua en la página siguiente).

Prueba	Humedad de la briketa en verde [%]	Humedad briketa en función del tiempo de curado [%]		
		24h	48 h	15 días
LGAC1P2	3.98	1.01	0.50	No se midió por falta de material.
	3.75	0.98	0.49	
	3.46	1.23	0.17	
Promedio	3.73	1.07	0.39	-
Desviación Típica	0.26	0.14	0.19	-
LGAC2C	3.72	1.24	0.26	0.35
	3.10	1.16	0.39	0.38
	3.49	1.14	0.34	0.33
Promedio	3.44	1.18	0.33	0.35
Desviación Típica	0.31	0.05	0.07	0.03
LGAC3P	5.09	3.14	0.44	0.37
	5.43	2.20	0.43	0.31
	5.50	3.87	0.39	0.37
Promedio	5.34	3.07	0.42	0.35
Desviación Típica	0.22	0.84	0.03	0.03
LGAC4C	5.43	2.18	0.50	No se midió por falta de material.
	5.57	3.20	0.70	
	5.38	3.06	0.51	
Promedio	5.46	2.81	0.57	-
Desviación Típica	0.10	0.55	0.11	-
LGAC5C	-	1.70	0.23	0.33
	-	1.08	0.22	0.40
	-	1.81	0.27	0.35
Promedio	-	1.53	0.24	0.36
Desviación Típica	-	0.39	0.03	0.04
LGAC7P1	4.42	0.61	0.30	No se midió por falta de material.
	4.42	0.42	0.39	
	-	0.56	0.34	
Promedio	4.42	0.53	0.34	-
Desviación Típica	0.00	0.10	0.05	-
LGAC7P2	4.22	1.47	0.43	0.43
	4.32	0.73	0.42	0.43
	-	1.22	0.47	0.46
Promedio	4.27	1.14	0.44	0.44
Desviación Típica	0.07	0.38	0.03	0.02
LGAC7P3	4.4	1.16	0.45	0.23
	La briketa se secaba muy rápido, por lo que se comenzó a realizar tan sólo una medida.	0.50	0.34	0.33
		0.49	0.35	0.32

Promedio	-	0.72	0.38	0.29
Desviación Típica	-	0.38	0.06	0.06
LGAC8C	4.22	1.06	0.38	0.38
	La briqueta se secaba muy rápido, por lo que se realizó tan sólo una medida.	0.61	0.37	0.43
		0.63	0.37	0.47
Promedio	-	0.77	0.37	0.43
Desviación Típica	-	0.25	0.01	0.05
LGAC9P	6.11	0.42	0.33	0.32
	La briqueta se secaba muy rápido, por lo que se realizó tan sólo una medida.	0.50	0.33	0.27
		0.31	0.34	0.37
Promedio	-	0.41	0.33	0.32
Desviación Típica	-	0.10	0.01	0.05
LGAC10C	6.46	2.41	0.29	No se midió por falta de material.
	La briqueta se secaba muy rápido, por lo que se realizó tan sólo una medida.	1.26	0.32	
		1.64	0.35	
Promedio	-	1.77	0.31	-
Desviación Típica	-	0.59	0.02	-