



Estado del arte

Uso de finos de pella en la industria siderúrgica venezolana.Bernardo Leal^{1,2}

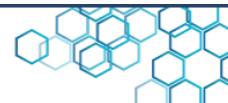
1 Coordinación de Manufactura y Valoración de la Materia Prima, Gerencia de Proyectos I+D+i, Centro Nacional de Tecnología Química (CNTQ), Caracas, Venezuela. **2** Departamento de Ciencias Básicas, Vice-rectorado “Luis Caballero Mejías”, Universidad Nacional Politécnica “Antonio José de Sucre”, Caracas, Venezuela.

Resumen

Recibido: 26 de marzo, 2024
Aceptado: 10 de julio 2024
Publicado: 6 de marzo del 2025
Conflictos de intereses: los autores declaran que no existen conflictos de intereses.
DOI: 10.5281/zenodo.13305736
***Autor para correspondencia:**
Bernardo Leal
e-mail:
bbleal.cntq@gmail.com

Existe una gran variedad de subproductos de la industria siderúrgica, cuando el diámetro de los mismos es menor a 100 mesh, llevan el nombre de finos. Entre los subproductos que presentan esta característica se tiene: finos de pella, escamas, finos de casas de humo, glóbulos férreos, entre otros. Estos finos están compuestos principalmente por hierro. Sin embargo, una gran proporción de ellos no están siendo utilizados, generando pérdidas económicas, al no ser usado el hierro presente en ellos, y problemas ambientales, ya que hay grandes acumulaciones de estos subproductos. El presente estado del arte, tiene como objetivo determinar posibles usos alternativos de los finos generados en la industria siderúrgica. Para ello se realizó una búsqueda bibliográfica en trabajos académicos y patentes. Se identificaron diez (10) usos alternativos de los finos de pellas y otros subproductos de la industria siderúrgica: pellas frías, pellas fundidas, briquetas para aglomerar finos, sinterizado compuesto de pellas, pellas de material reciclado, sinterizado de material reciclado, mezcla con minerales que contengan otros metales distintos al hierro, usos de finos directamente, micrometalurgia y modificadores de escoria. Adicionalmente, se evaluó la factibilidad de aplicar alguna de estas alternativas en la industria siderúrgica venezolana.

Palabras clave: aglomerados, aprovechamiento de subproductos, finos de pella, subproductos tamaño fino, siderúrgica venezolana.



Review

Use of pellet fines in the Venezuelan steel industry: State of the art

Bernardo Leal^{1,2}

1 Coordinación de Manufactura y Valoración de la Materia Prima, Gerencia de Proyectos I+D+i, Centro Nacional de Tecnología Química (CNTQ), Caracas, Venezuela. **2** Departamento de Ciencias Básicas, Vice-rectorado "Luis Caballero Mejías", Universidad Nacional Politécnica "Antonio José de Sucre", Caracas, Venezuela.

**Received:** march 26, 2024**Accepted:** July 10, 2024**Published:** March 6, 2025**Conflict of interest:** the authors declare that there are no conflicts of interest.**DOI:** 10.5281/zenodo.13305736***Corresponding author:**

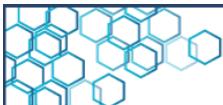
Bernardo Leal

e-mail: bbleal.cntq@gmail.com

Abstract

There is a wide variety of by-products from the steel industry, when their diameter is less than 100 mesh, they are called fines. Among the by-products that present this characteristic are: pellet fines, mill scale, smoke house fines, ferrous globules, among others. These fines are mainly composed of iron. However, a large proportion of them are not being used, generating economic losses, as the iron present in them is not used, and environmental problems, since there are large accumulations of these byproducts. The present state of the art aims to determine possible alternative uses of the fines generated in the steel industry. For this purpose, a bibliographic search was carried out in academic works and patents. Ten (10) alternative uses of pellet fines and other by-products of the steel industry were identified: cold pellets, molten pellets, briquettes to agglomerate fines, sintered composite pellets, pellets of recycled material, sintered of recycled material, mixture with minerals containing metals other than iron, uses of fines directly, micrometallurgy and slag modifiers. Additionally, the feasibility of applying any of these alternatives in the Venezuelan steel industry was evaluated.

Keywords: agglomerates, fine size by-products, pellet fines, use of by-products, Venezuelan steel industries.



1. Introducción

El acero es un material indispensable en nuestra vida diaria, entre sus usos más destacados tenemos vehículos, viviendas, industrias, maquinaria, entre otros. Por lo tanto, el acero se considera el material más importante para la ingeniería y la construcción [1]. Se estima que a nivel mundial se producen anualmente 1.700 millones de toneladas de acero crudo, para ello la industria global del acero utiliza 2.000 millones de toneladas de mineral de hierro [2]. Estos datos implican que para el año 2018 el consumo per cápita de acero crudo a nivel mundial era de 240 kg/año [3]. Venezuela posee más de 4.000 millones de toneladas de reservas de mineral de hierro [4]. Adicionalmente, en el año 2005 la capacidad de producción de acero de la industria siderúrgica era de 10,76 millones de toneladas al año y la producción de acero crudo de Venezuela en el año 2018 fue de 129 mil toneladas [3,5].

La reducción directa de hierro (DRI por sus siglas en inglés) es el proceso mediante el cual se reduce el mineral de hierro en la siderúrgica venezolana. La materia prima fundamental para el proceso de reducción directa son las pellas [5]. Para el año 2021, la capacidad instalada de la planta de pellas propiedad de CVG Ferrominera Orinoco, C.A. era de 3,3 millones de toneladas de pellas al año, y está en construcción una nueva planta para incrementar la producción en 3 millones de toneladas adicionales al año [6].

La peletización o formación de pellas es un proceso que consiste en mezclar partículas muy finas de mineral de hierro de menos de 325 mesh (45 micras) con fundentes como piedra caliza, cal, dolomita, etc., un aglutinante, generalmente bentonita (0,5 – 1 %) y agua, hasta llegar a un nivel de humedad generalmente alrededor del 10 %, con la finalidad de



formar bolas con forma de esfera de 9 a 16 mm de diámetro. Estas pellas verdes, así llamadas, luego se secan y se endurecen al calor a una temperatura de 1.250 a 1.300 °C para producir pellas con una resistencia aceptable [7].

La planta de pellas de Sidor presentaba para el año 2006 un porcentaje de retorno de 30 % aproximadamente (fracción de pellas producidas en los discos peletizadores que no cumplen con las condiciones mínimas de tamaño), lo que limita el aprovechamiento de toda la capacidad de producción de los discos, ya que dicha fracción de pellas pasa a ser reprocesada [8]. Adicionalmente, en el proceso de piroconsolidación de las pellas, durante su transporte y almacenamiento, se generan finos por abrasión y desgaste de las pellas, quienes llevan el nombre de finos de pellas, los cuales normalmente son reutilizados en el proceso de formación de pellas; sin embargo, la proporción que se puede usar en la formación de estos aglomerados está limitada a la dosificación definida. Por ejemplo, para producir una pella de tipo PS6CF se requiere la siguiente mezcla porcentual: mineral de hierro 89 %, finos recuperados 7 %, antracita 2 %, escamas 1 % y caliza 1 % [5]. Por lo tanto, si se genera una cantidad de finos de pellas que sobrepasa los utilizados en la formación de pellas en función a la dosificación, estos se van acumulando progresivamente.

En la industria siderúrgica se generan diferentes materiales reciclados, los cuales son enumerados en la Tabla 1. El uso de estos finos de pellas y materiales reciclados es de vital importancia para el eficiente manejo de los recursos minerales y control de la contaminación ambiental [9].

**Tabla 1.** Subproductos generados en la industria siderúrgica y su fuente.

Subproducto	Fuente
Finos de pella	Salida del horno de piroconsolidación
Finos de casas de humos	Acerías
Glóbulos férreos	Descapado
Escamas	Acerías, barras y alambrón y laminación en caliente

2. Metodología

La búsqueda inicial de trabajos académicos y patentes se realizó a través de la plataforma <https://www.lens.org/>. La ecuación de búsqueda para trabajos académicos fue: ((fine* OR mill scale OR Blue-Dust) AND (ironmaking OR steelmaking) AND pellet*). La misma fue realizada el 4 de octubre de 2022 y los filtros que se aplicaron fueron: últimos 20 años, restringido a los campos título, resumen, palabras clave y campo de estudio. Esta exploración arrojó 35 trabajos académicos. A partir de las referencias de los trabajos académicos encontrados, se pudo ubicar 24 trabajos académicos adicionales.

La ecuación de búsqueda para patentes fue: ((fine* OR mill scale OR Blue-Dust) AND (ironmaking OR steelmaking) AND pellet*). La misma fue realizada el 15 de diciembre de 2022 y los filtros que se aplicaron fueron: últimos 20 años, restringido a los campos título, resumen y reivindicaciones. Solo se seleccionaron las patentes aprobadas y de aplicación. Solo se tomó un documento por familia, seleccionando el primero que se publicó. Esta pesquisa arrojó 88 patentes.



Después de clasificar los resultados, 26 documentos académicos y 36 patentes presentaron usos alternativos de finos de pellas y otros subproductos de la industria siderúrgica.

3. Usos alternativos de finos de pellas y de finos de subproductos de la industria siderúrgica

La industria siderúrgica venezolana ha reportado que, durante el proceso de almacenaje y transporte de las pellas, se genera una gran cantidad de finos de pella y esta cantidad supera al porcentaje de finos, que con base en la formulación, se pueden reciclar en el proceso de formación de las mismas. Adicionalmente, aguas arriba se generan subproductos de tamaño fino, tal como finos de casas de humos, glóbulos férreos y escamas [5], no se ha encontrado indicios de que los mismos estén siendo aprovechados. Por consiguiente, continuamente se está generando una acumulación de finos de pellas y de subproductos, los cuales generan un pasivo ambiental y una pérdida económica a la industria.

De acuerdo a la bibliografía de los últimos 20 años (artículos, tesis, reportes técnicos y patentes), los posibles usos que se le pueden dar a los finos de pellas y a los subproductos de la industria siderúrgica se clasifican en diez grupos, a saber: pellas frías, pellas fundidas, briquetas para aglomerar finos, sinterizado compuesto de pellas, pellas de material reciclado, sinterizado de material reciclado, mezcla con minerales que contengan otros metales distintos al hierro, usos de finos directamente, micrometalurgia y modificadores de escoria. A continuación, se describen cada uno de estos grupos.



3.1 Pellas Frías

El endurecimiento de las pellas por calor para obtener las propiedades físicas y metalúrgicas requeridas, requiere de enormes cantidades de energía. Cifras reportadas para el consumo de energía durante el endurecimiento por calor de los concentrados de magnetita van desde 300.000 a 700.000 BTU/toneladas de pellas. Para los minerales que no contienen magnetita, el consumo de energía será mayor debido a la ausencia de reacciones de oxidación exotérmicas [10].

La unión en frío es una alternativa de baja temperatura al endurecimiento por calor. Las pellas aglomeradas en frío generalmente se endurecen a temperaturas inferiores a 300 °C. Se pueden utilizar diferentes procesos de unión de pellas en frío, la mayoría de las cuales involucra reacciones químicas que forman nuevas fases entre los granos que contienen hierro dentro de la pella. Algunos ejemplos de unión en frío serían: enlaces de carbonato, enlaces de cemento, enlace hidrotermal, enlace con óxido y aglutinantes orgánicos [10].

3.1.1 Características del proceso de producción de pellas frías

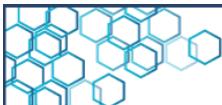
Los procesos de unión en frío generalmente usan altas dosis de aglutinante y largos ciclos de curado, esto conduce a una serie de compensaciones que deben tenerse en cuenta al evaluar cada tipo de proceso de unión en frío, uno de los factores a considerar es la resistencia de las pellas resultantes (Tabla 2) [10].

**Tabla 2.** Comparación general de procesos de unión en frío [10].

Tipo de Enlace	Aditivo / Dosis	Resistencia de Pellas (lb/pella)
Carbonato	Cal apagada/1 a 10%	30 a 450
Cemento	Cemento Porlant/9 a 12%	280 a 400
Tabla 2. Comparación general de procesos de unión en frío [10]		
Tipo de Enlace	Aditivo / Dosis	Resistencia de Pellas (lb/pella)
	Sílice fina/1 a 3%	
Óxido	Polvo de hierro esponja/2 a 8%	20 a 110
	Almidón/3 a 7%	>300
	Almidón/0,5 a 1,5%	20 a 45
Orgánico	Dextrina/3 a 4%	60 a 100
	Lignosulfonato/1%	>5
	Funá/1,5%	60

3.1.1.1 Desventajas

Las pellas adheridas en frío se curan durante largos períodos de tiempo, por lo tanto, requieren un amplio espacio de piso y el equipo necesario para el manejo de grandes cantidades de estas durante el endurecimiento. Altas dosis de aglomerante (en la unión de cemento), aumenta la contaminación de estos aglomerados con sílice. Los procesos hidrotermales generan pellas resistentes, pero son procesos por lotes sujetos a problemas mecánicos que poseen dificultades con la alimentación no uniforme de las mismas. La resistencia de las pellas frías,



generalmente es menor a la de sus contrapartes endurecidas por calentamiento [10].

3.1.1.2 Ventajas

Los procesos de unión en frío pueden ser atractivos por razones económicas. Se reportó que las pellas en frío y los costos de operación resultaron ser 2/3 en comparación al costo de las pellas que se generan de un endurecimiento por calor [10].

3.1.2 Ejemplos de uso de pellas frías

Se ha publicado una gran variedad de documentos académicos y patentes que desarrollan el uso de pellas frías. Entre los ejemplos de documentos académicos tenemos la empresa CANMET, que desarrolló una nueva tecnología de unión en frío para producir pellas compuestas que contienen carbón. Como aglutinante se utilizó cemento de alúmina, lo que confirió una alta resistencia mecánica a la pella, incluso a temperaturas elevadas. Los resultados de las pruebas de laboratorio mostraron que la tasa de metalización de las pellas fue alta, debido al contacto íntimo de las partículas de carbón y el mineral de hierro en las pellas. El proceso de producción de las pellas requiere un tiempo de curado de 16 horas a temperatura ambiente y luego se seca durante 16 horas a 110 °C. Estas pellas presentan una resistencia de 500 N/pellas y se usarán para un proceso de reducción directa de hierro (DRI) por medio de un horno rotatorio [11,12].

Por otro lado, Nikai y Garbers-Craig (2015) estudiaron la factibilidad de producir pellas frías compuestas autoreductoras a partir de lodos, para ser usadas en DRI. Estos autores probaron con cuatro aglutinantes



(dextrina, dextrina+bentonita, carboximetilcelulosa (CMC) y Ca-lignosulfonato) con porcentajes que oscilan entre 1 a 4 %, y a su vez como material reductor añadieron coque metalúrgico entre un 15 a 20 %. El proceso de secado fue realizado en dos etapas, inicialmente se calentó en un horno a 105 °C por dos horas y luego se les permitió seguir secándose a temperatura ambiente por cinco días. La resistencia de las pellas obtenidas varió desde 338 hasta 874 N/pellas con un grado de metalización de hasta 95 % [13,14].

Chokshi y Dutta realizaron un estudio similar para producir briquetas y pellas compuestas, las cuales se endurecieron en frío. Se usaron diversos aglutinantes; como cenizas, cal apagada, dextrina, melaza, alcohol polivinílico (PVA) y poliacrilato de sodio (SPA); solos o combinados, en diferentes proporciones para la fabricación de las briquetas y las pellas compuestas con carbón. Fue posible obtener una resistencia en briquetas de hasta 462 N/briquetas y para pellas de 216 N/pellas [15].

Las patentes presentan variedad de metodologías y aglutinantes usados para generar pellas frías, un ejemplo, es el caso que usa un aglutinante generado a partir de cenizas, con lo cual se producen pellas prensadas al frío. El empleo de estas cenizas permite reciclar una sustancia peligrosa para el ambiente. Dichas cenizas presentan adhesivos orgánicos e inorgánicos que cumplen la función de cohesionar, entre ellos se encuentran los óxidos básicos CaO y MgO activos. Por otro lado, las cenizas se digestan previo a su uso para eliminar el S y el P [16].

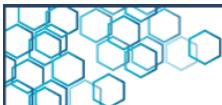
Otra técnica para generar pellas frías a partir de la recolección separada de cenizas, es la eliminación de polvo áspero y cenizas de eliminación de polvo fino del convertidor de acero, los cuales se mezclan uniformemente



y se les añade una solución de cloruro de magnesio. Esta técnica no necesita digestión previa y permite el aprovechamiento de subproductos de la industria siderúrgica, empleando un aglutinante inorgánico débilmente alcalino. Estas pellas tienen la ventaja de poseer bajas impurezas y bajo contenido de SiO_2 [17].

En otras patentes, se usan otros subproductos de la industria siderúrgica (escamas de óxido de hierro, polvo fino de escoria de acero, ceniza de desempolvado de acería y lodo de acería) para generar pellas frías. En este método se usa como agente aglutinante una sal inorgánica, y se añade polvo de cal para ajustar la humedad de la materia cruda. La resistencia de las pellas obtenidas alcanza hasta 800 N/pellas [18]. Otro ejemplo, es el método para producir pellas usando finos de óxido de hierro rojo, el cual es un desecho de los procesos hidrometalúrgicos. Los finos de óxido de hierro rojo se mezclan con un agente desoxidante y un aglutinante, se secan y luego se calientan a baja temperatura para que ocurra la desoxidación. Las pellas producidas se pueden utilizar para las acerías y para los altos hornos [19].

Las pellas autorreductoras también se pueden realizar por el método al frío, un ejemplo es cuando se producen al usar concentrado de mineral de hierro, un material carbonáceo como agente reductor y “clíker” de cemento Portland finamente dividido como aglutinante. Las pellas son endurecidas en un equipo de curado donde son hidratadas y carbonatadas con un flujo de gases calientes que contienen dióxido de carbono a temperaturas entre 100 a 300 °C [20].



3.2 Pellas Metalizadas

Las pellas metalizadas se forman cuando se genera una sinterización, lo que implica una fusión incipiente de las partículas del mineral de hierro a temperaturas cercanas al punto de fusión del metal. El uso de aglomerados formados por medio de una fusión incipiente, mejora el rendimiento del alto horno; sin embargo, se presentan dificultades para producir pellas metalizadas debido a una tendencia a una alta hinchazón de este aglomerado dentro del alto horno, aún mayor que el de las pellas tradicionales [21].

3.2.1 Ejemplos de uso de pellas metalizadas

En el 2009 Pal *et al.* desarrollaron una metodología para producir pellas metalizadas para ser usadas en un horno básico de oxígeno (BOF por sus siglas en inglés). Estos autores diseñaron esta metodología, debido a que deseaban usar como fuente de hierro en el BOF, desechos de óxido de hierro, tales como lodo de BOF y de BF, escamas de laminación, polvo de BF, entre otros [22].

El objetivo de estos autores era desarrollar una pella metalizada con la ventaja del sinterizado y sin los costos y limitaciones de los aglomerados tradicionales. Estas se produjeron usando residuos de finos de óxido de hierro y cal, sin ningún aglutinante costoso ni una calcinación demandante de alta energía. Posteriormente, fueron tratados con dióxido de carbono en una cámara de reacción a temperatura ambiente para transformar el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), en carbonato calcio duro (CaCO_3), para de esta forma mejorar la resistencia [22].

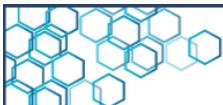


Las pellas luego de formadas, se les permite secar a temperatura ambiente por 1 a 3 días, luego de aplicar CO₂ puro por 15 minutos, obteniendo una fuerza de 30 kg/pella. Por otro lado, se obtuvo que estos aglomerados poseen un bajo punto de reblandecimiento/fusión, lo cual ayudaría a una fácil formación de escoria oxidante y promovería la refinación cuando se usa en BOF. Además, la pella exhibió una resistencia al choque térmico razonable (1.200–1.300 °C), garantizando así, una baja generación de finos en condiciones de funcionamiento del BOF [22].

3.3 Briquetas para aglomerar finos

La briqueta se define como un aglomerado producido y moldeado por unión a presión, las cuales presentan ventajas sobre el proceso de sinterización tanto desde el punto de vista medioambiental como económico. El cierre de una planta de sinterización en Finlandia y la puesta en operación de una planta de briquetas, ha resultado en una reducción del 8 a 11 % en las emisiones de CO₂, alrededor del 70 % en las de SO₂ y un decrecimiento de 7 % en el consumo de energía. En parte, debido a los diversos impactos ambientales del proceso de sinterización, se han establecido regulaciones estrictas, resultando en el cierre de la operación de muchas plantas de este tipo en diversos países [23].

La calidad de la briqueta depende de varios factores, incluida la distribución del tamaño de las partículas, el contenido de humedad, la presión ejercida, el ligante usado, la mezcla, el curado y la composición química [23]. Las propiedades metalúrgicas más importantes de las briquetas son: resistencia al frío, porosidad, reducibilidad, ablandamiento y resistencia en caliente [24].



3.3.1 Ejemplos de uso de Briquetas para aglomerar finos

Las briquetas extruidas (BREX), han sido utilizadas para aglomerar finos de hierro y subproductos de la industria siderúrgica, entre los cuales se encuentran las escamas. Estos brex permiten reciclar material y tienen ciertas ventajas sobre otros aglomerados, que los convierten en un material de carga eficiente para la operación de los altos hornos [25]. Kumar *et al.* (2016), desarrollaron un proceso para formar briquetas a partir de los subproductos: escamas, polvos de CRM y polvos proveniente de horno básico de oxígeno, estos autores modificaron las proporciones de los subproductos y los aglutinantes usados, las briquetas generadas se utilizaron con éxito como refrigerantes secundarios en reemplazo del mineral de hierro [26].

Se ha investigado el posible uso de residuos de la industria siderúrgica del tamaño de finos, para producir briquetas de hierro en caliente (HBI) y las ventajas que presenta este tipo de briquetas sobre el uso de pellas en la reducción directa de hierro (DRI) [27,28]. En patentes, también se han presentado metodologías para formar briquetas a partir de subproductos (escamas, polvos de filtros y otros subproductos) aglomeradas con celulosa [29–31].

3.4 Sinterizado compuesto de pellas

La peletización permite aglomerar finos de muy pequeño tamaño, estas fracciones no son aptas para ser aglomeradas por sinterización, debido a que la permeabilidad del lecho disminuye significativamente cuando se incorpora una mayor cantidad de ultrafinos en la mezcla sinterizada, lo que reduce la productividad. Sin embargo, los finos de menos de 0,15 mm de tamaño se aglomeran por medio de la peletización, y luego estas pellas



se pueden utilizar como parte de la alimentación de la sinterización, al micropeletizar primero los finos a temperatura ambiente [7,21].

Cuando las micropellas producidas se incorporan en la mezcla sinterizada, la permeabilidad del lecho mejora significativamente, como consecuencia a la granulación favorecida, aumentando la producción de este aglomerado. De esta manera, se puede incorporar una mayor cantidad de ultrafinos en la mezcla de sinterización, manteniendo su productividad. Este proceso presenta una serie de ventajas frente a la sinterización tradicional o a la peletización, como la capacidad de utilizar diversos materiales que contienen hierro, mejora significativa en la permeabilidad y productividad del lecho de material de la máquina para producir este aglomerado, bajo consumo de energía y capacidad para preparar una carga de baja basicidad con buen rendimiento metalúrgico[7].

3.4.1 Ejemplos de uso de sinterizado compuesto de pellas

Pal (2019), propone dos nuevos procesos, en los cuales se puede aumentar el uso de microfinos de 20-30 % a 60 % en comparación a las prácticas normales de sinterización. Adicionalmente, estos procesos presentan una reducción de aproximadamente 20 % en el uso de energía y de 30-40 % del coque metalúrgico usado. Los procesos evaluados por este autor llevan el nombre de: micropeletización y sinterización de microfinos de mineral de hierro y desarrollo de aglomerado compuesto de pella-sinter (P-SCA, por sus siglas en inglés) [32].

El proceso de micropeletización y sinterización de microfinos de mineral de hierro, consiste en producir micropellas compuestas de óxido de hierro y carbón (2 a 6 mm), donde se usan como materiales aglutinantes cal y melaza. Estos microaglomerados posteriormente se tratan con CO₂ o gas



residual industrial para formar enlace químico. A un nivel muy alto de carbono del 22 % en peso (38 % en peso de carbón), la resistencia al aplastamiento en frío de las mismas fue de 2,5 – 3 kg/cm² y el índice de abrasión fue de 5 a 9 % en peso, valores que permiten la manipulación en frío. Dado que las micropellas contienen carbono y tienen muy buena resistencia a la manipulación, se pueden utilizar en la cama de sinterización reduciendo el consumo de coque metalúrgico; así como también, mejorando el uso de finos. Las propiedades del sinter producido, se encuentran entre muy buenas y aceptable, siendo el rendimiento de sinterización 65 %, el índice de rotura 91 % y el índice de abrasión 5 % [32].

En el desarrollo de aglomerado compuesto de pella-sinter (P-SCA) se aglutinan formando una pella verde compuesta utilizando hematita, para generar así, una pella con capacidad de producir calor *in situ*. Se ensayó con diferentes materiales, tales como carbón, lodos y escamas. Se utilizan micro-finos de 100 mesh y luego se combina con una mezcla de finos de procesos previos de sinterización. La formación de calor *in situ* en la pella, se produce por la oxidación del hierro metálico y sus óxidos inferiores (Fe, FeO y Fe₃O₄) [32].

En la etapa inicial, las pellas pueden absorber el calor del gas de sinterización para llegar a temperaturas elevadas, a continuación, las reacciones de oxidación se vuelven más rápidas y significativas generando una gran cantidad de calor (0,236 kJ/g de pella) en el interior de la pella. El calor *in situ* en la pella genera la formación de enlaces [32].

El proceso para generar sinter a partir de micropellas, con la finalidad de usar subproductos de la industria siderúrgica, también ha sido presentado en múltiples patentes, encontrando entre los subproductos usados por



estas patentes: polvo generado del alto horno, escamas, polvo generado en el proceso de sinterización y polvo obtenido de los filtros de las chimeneas [33–35].

3.5 Pellas de material reciclado

Durante el proceso de fabricación de hierro y acero, se generan muchos subproductos, tales como polvos, lodos, escorias y escamas; aproximadamente, se generan de 2 a 4 toneladas de desechos por tonelada de acero producido [23]. Estos desechos tienen muchos productos valiosos que pueden ser reutilizados, si se recuperan de manera económica, reduciendo de esta manera el costo de la disposición de los residuos y la contaminación ambiental asociada. Adicionalmente, aportan una cantidad sustancial de mineral de hierro, materiales fundentes y combustibles, conservando así, cantidades equivalentes de materias primas [9].

3.5.1 Ejemplo de uso de pellas de material reciclado

Las escamas tienden a ser reutilizadas en los sinter, sin embargo, el uso de las escamas en las plantas de sinterización es muy limitado debido a la caída de la productividad y al deterioro de la calidad del sinterizado. Umadevi *et al.* (2009), evaluaron las propiedades de las pellas verdes y calcinadas en función a la variación de la proporción de escamas usadas en las pellas. Compararon pellas con 0, 10, 20, 30 y 40 % de escamas, encontrando que las pellas con 10 % de escamas proveen el óptimo balance químico, físico y metalúrgico [36].



Rajshekar *et al.* (2018), también evaluaron el uso de escamas en pellas, obteniendo que este subproducto proporciona calor que facilita la formación del enlace por difusión y por recristalización, mejorando de esta manera la resistencia de las pellas. Estos autores consiguen un resultado mucho mejor en pellas ácidas en comparación a las pellas básicas, lo cual es una ventaja porque las pellas ácidas y los sinterizados altamente básicos son una buena combinación como materia prima en el alto horno. Adicionalmente, encontraron que la adición de 15 % de escamas a las pellas puede reducir la temperatura del endurecimiento de la pella en 15 °C [37].

Otro ejemplo donde se usan escamas y otros subproductos, es el de Zhunusov *et al.* (2021). Estos autores producen una pella usando 40 % de aspiración de polvo, 20 % de escoria blanca, 20 % de arena ferrosa mezclada, 10 % escamas y 10 % de coque metalúrgico. El endurecimiento se realiza a 600 °C y se obtiene una resistencia después del endurecimiento de 80 kg/pella [38].

Básicamente, la escoria generada del convertidor de acero también se usa para producir pellas, la cual es molida y mezclada con concentrado de hierro. Se forma en condiciones de alta temperatura, a su vez contiene una cierta cantidad de componentes de silicato y tiene una buena propiedad de gelificación, por lo tanto, puede reemplazar a la bentonita, la cual posee un costo monetario más elevado. Además, la escoria del convertidor de acero se modifica, de modo que el micro polvo de escoria tiene una buena actividad hidráulica; el tipo de gelificación específica de esta escoria se puede utilizar completamente, por lo que el rendimiento de unión de las pellas se puede mejorar de manera efectiva [39].



Principalmente, las cenizas son usadas para producir un aglutinante, con la cual se producen pellas prensadas al frío. El uso de estas cenizas permite reciclar una sustancia peligrosa para el ambiente. Este subproducto presenta adhesivos orgánicos e inorgánicos que cumplen la función de aglutinar, entre los inorgánicos están los óxidos básicos CaO y MgO activos. Finalmente, las cenizas se digestan previo a su uso para eliminar el S y el P [16].

Hay patentes que usan mezclas de subproductos, los cuales se agregan en proporciones definidas. Tal es el caso, del método para producir pellas prensadas en frío para la fabricación de acero, a partir de la mezcla de cenizas, lodo del convertidor y óxidos de escamas en proporciones 20 - 23: 55 - 65: 10 - 20. Emplean como aglutinante carboximetilcelulosa de sodio, al cual se le agrega un efluente industrial y cloruro de magnesio. Las pellas prensadas en frío fabricadas a través de este método tienen la ventaja de que la tasa de formación de pellas es alta, la fuerza de unión es grande, el tiempo de secado es corto después de la formación de la pella y el uso para la fabricación de acero es conveniente [40]. Otra alternativa, es el método para producir pellas de alta dureza usando polvo de escoria de acero, lodo deshidratado de acería, lodos de aceite de las laminadoras y almidón vegetal en la proporción 65: 20: 10: 5. Esta mezcla es calentada por 15 minutos por medio de vapor a alta temperatura y peletizada, una vez se forman las pellas se hornean entre 6 a 8 horas [41].

Existen otras patentes donde se proponen métodos para obtener pellas a partir de subproductos siderúrgicos y presenta la lista de subproductos que se pueden utilizar: escoria de acería, polvo fino de escoria de acero, escamas, escamas de óxido de hierro, ceniza de desempolvado de acería, finos de chatarra, finos de óxidos, polvos y lodos [18,42].



3.6 Sinterizado de material reciclado

Durante la deformación del acero a un producto largo o plano, se forman las escamas, que representan alrededor del 2 % de acero producido (aproximadamente 1,9 Mt en el año 2016), y está disponible como un material secundario debido a su riqueza en hierro (alrededor del 72 % de Fe total). Cuando el acero se somete a atmósferas oxidantes a alta temperatura, lo que se promueve es el crecimiento de la capa de óxidos de hierro en la superficie del acero [43]. Las escamas han sido reutilizadas por medio de aglomerandos con material carbonoso y aglutinantes para formar pellas [44]. Sin embargo, hacen falta instalaciones con mayor capacidad para el reciclaje de todas las escamas producidas, y a esto se le suma que no todas las unidades ofrecen margen para el reciclaje interno de las escamas [43].

3.6.1 Ejemplo de uso de sinterizado de material reciclado

Con la finalidad de hacer un mayor uso de las escamas generadas como subproductos de la industria siderúrgica, se produjeron tortas sinterizadas no aglomeradas formadas con escamas, cal y finos de carbón, para ser usadas como alimentación de hornos de inducción para producir acero. Al ser tortas sinterizadas no aglomeradas, anulan el consumo de energía por la operación de aglomeración. El mejor valor del grado de reducción ($\alpha=47,84\%$), se obtuvo en la torta de sinterización con 10 % de exceso de carbón estequiométrico y 20 % cal, mientras que la mejor resistencia a la compresión (195 kg/muestra) se logró en la torta de sinterización de 10 % de exceso de carbón estequiométrico y 30 % cal [43].



3.7 Mezcla con minerales que contengan otros metales distintos al hierro

El mineral de hierro de alta calidad está disminuyendo gradualmente y los precios del mismo están aumentando, lo que obliga a las empresas siderúrgicas a tratar de utilizar otros recursos minerales con menor porcentaje de hierro y con contenido de otros metales distintos al hierro, estos a su vez son recursos con bajo precio y alto valor de uso integral [45]. Estas medidas reducen el costo de la producción y expanden las fuentes de mineral de hierro usado para aglomerar [46]. Otras ventajas de usar otros minerales que contengan metales distintos al hierro, es que se puede optimizar el proceso de producción de estos conglomerados, se mejoran las propiedades metalúrgicas de los aglomerados, se pueden obtener aleaciones con contenido de estos elementos o se pueden recuperar los otros elementos contenidos en los minerales [46–49].

3.7.1 Ejemplos de uso de mezcla con minerales que contengan otros metales distintos al hierro

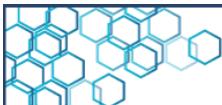
En la bibliografía, se consiguen variados ejemplos del uso de otros elementos metálicos distintos al hierro para realizar aglomerados donde los más usados son titanio y vanadio, los cuales están presente en la titanomagnetita de vanadio. Un ejemplo de este caso, es el uso de arenas de mar con este mineral para hacer pellas al mezclar estas arenas con mineral de hierro en polvo. Las pellas con mejores propiedades metalúrgicas, se obtuvieron cuando el porcentaje de las arenas con titanomagnetita de vanadio era de 40 % [45]. Este mismo mineral es empleado por Tang *et al.* (2013), quienes usan un mineral de



titanomagnetita de vanadio con alto contenido de cromo para formar pellas. Se debe usar menos del 20 % de este mineral con alto contenido de cromo, para que las pellas tengan la resistencia adecuada y puedan ser usadas en el alto horno. Para ello se usa bentonita como aglutinante y se somete luego a un proceso de endurecimiento por temperaturas, empleando diferentes rampas de temperatura hasta un máximo de 1.135 °C [49]. Un caso, en el que solo se usa minerales con titanio, es el planteado por Zhang *et al.* (2021), quienes producen pellas formadas de mineral de titanio y mineral de hierro sinterizado con las cuales se pueden obtener buenas propiedades metalúrgicas y alta resistencia a la compresión utilizando minerales de titanio de molienda fina [46].

En las patentes también se consiguen métodos para usar minerales con contenido de elementos metálicos distintos al hierro. El primer caso que se presenta a continuación, tiene como finalidad disminuir los costos de producción de acero con alto manganeso, evitar la pérdida de este elemento en las escorias y hacer uso de los minerales que contengan este metal. Para ello, generan micropellas autoreductoras a partir de finos de mineral con manganeso, las cuales tienen un costo mucho más bajo que los ferromagnesianos usados tradicionalmente. Para formar estas micropellas, también se propone reciclar este elemento perdido en la escoria al moler esta última, y obtener el Mn por separación magnética. La fuente de hierro para estos aglomerados es el mineral de hierro, la fuente de carbono es el “char” o el coque metalúrgico y el agente fundente puede ser cal y/o óxido de bario. El agente aglutinante usado es la bentonita [47].

Otra opción, es la técnica para producir pellas frías a partir de minerales de titanio con contenido de magnetita, a estas pellas también se les agrega antracita la cual se usa como aglutinante. El mineral debe estar finamente



molido y purificado por separación magnética, finalmente estas pellas son usadas para reducción directa. Las ventajas que presenta esta técnica son un menor costo, debido al mineral utilizado y es más amigable con el ambiente, al usar antracita en vez de coque metalúrgico [50]. En cuanto al vanadio, se propone un método para producir pellas a partir de polvo fino de hierro y vanadio, usando como aglutinante un compuesto orgánico. Este método tiene como ventajas que mejora el rendimiento en la producción de la aleación a partir de acero de vanadio líquido, utiliza suficientemente los recursos de vanadio y reduce el costo de producción del proceso de fabricación de acero [51].

3.8 Usos de finos directamente

En total, la industria del acero es responsable de alrededor del 8 % de las emisiones globales de CO₂[52].

Las ventajas de usar los finos directamente:

- Eliminación de muchos de los intermediarios que se usan actualmente para producir acero.
- No harían falta los siguientes procesos en la fabricación de acero: coquización, sinterización de las pellas, fabricación de hierro en altos hornos (BF) y fabricación de acero en horno de oxígeno (BOF).
- Permitir el ahorro de la energía consumida.
- Reducción drástica de la emisión de CO₂, SO₂, NO_x, compuestos orgánicos volátiles, partículas finas y sustancias tóxicas del aire.
- Estas nuevas tecnologías representan un costo de capital significativamente menor.
- Considerable reducción de los costos de producción del acero [53].



3.8.1 Ejemplos de uso de finos directamente

En este sentido se han evaluado nuevas tecnologías para la producción de acero, donde los procesos novedosos sean más eficientes y ambientalmente más amigables. Tal es el caso, del proceso planteado por Huang y Hwang (2005), quienes evaluaron el uso de una nueva tecnología siderúrgica, que tenga el potencial para lograr una mejor eficiencia energética general, minimizando los contaminantes y los desechos, reduciendo costos de capital y operativos, y aumentando la competitividad de la industria siderúrgica. La tecnología seleccionada fue un modelo combinando microondas, arco eléctrico y calentamiento exotérmico, para ello evaluaron múltiples condiciones de calentamiento y materia prima [53].

La tecnología Metso Outotec Circored, es un proceso para reducir el mineral de hierro basado en 100 % de hidrógeno, ha demostrado su funcionalidad y el rendimiento en una planta de demostración a escala industrial. Circored se basa en un lecho fluidizado circulante (CFB), con absorción inherente de SO₂ y calcinación de alúmina. Las principales ventajas de los procesos de lecho fluidizado son las excelentes condiciones de transferencia de calor y masa, control preciso de la temperatura y tiempos cortos de retención de sólidos, que conducen a mayores capacidades de planta y menores costos de inversión y operación [52].

El tamaño de grano preferido para el proceso es de 0,1 a 2,0 mm, aunque, según el comportamiento de decrepitación, también puede ser aceptable un tamaño de grano de hasta 6 mm. Para el tratamiento de minerales ultrafinos (<50 µm) o polvo de lavado, Metso Outotec tiene un procedimiento de microgranulación patentado muy simple. En este



proceso, las partículas ultrafinas se aglomeran en microgránulos de un tamaño medio de aproximadamente 350 μm , con la adición de un aglutinante. El mismo no requiere ningún equipo adicional de endurecimiento por calor, ya que el endurecimiento de los gránulos se realiza en la sección de precalentamiento de la planta de Circored [52].

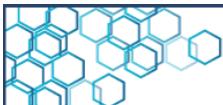
La tecnología de fabricación de hierro flash también propone al hidrógeno como agente reductor, esta tecnología usa mineral de hierro concentrado como materia prima, sin un tratamiento previo. Las partículas finas del concentrado, permiten una velocidad de reacción muy rápida, por lo que requiere tiempos de residencia medidos en segundos, en lugar de minutos y horas que se requieren para reducir las pellas e incluso los finos de mineral de hierro [54].

3.9 Micrometalurgia

La creación de plantas micrometalúrgicas con menor capacidad de producción trae la posibilidad de un control flexible de los materiales, de carga de líquidos y sólidos procesados, lo cual es una ventaja importante de las microacerías, teniendo en cuenta la variación de los precios de las materias primas y la energía [55].

3.9.1 Ejemplos de uso de micrometalurgia

Eron'ko *et al.* (2019), plantearon un modelo de micrometalúrgicas donde se aprovechan subproductos de la siderúrgica, tales como, lodos, escorias, escamas y virutas de laminación. Este modelo debe contar con al menos un sitio para la aglomeración por briqueteados de desechos de grano fino;



departamentos de fundición con hornos o unidades que permitan la fundición de hierro y acero; colada, en los que se pueden obtener piezas coladas, así como, piezas brutas para el proceso final de laminación. Para evitar la variación de la composición y propiedades de los ingredientes que forman la estructura de las briquetas, es preferible utilizar un método de fabricación de briquetas en frío, caracterizado por la facilidad de implementación y el bajo consumo de energía.

Estas pequeñas empresas requerirán inversiones significativamente menores para su lanzamiento, así como, la posibilidad de una solución más flexible al problema del suministro de pequeños volúmenes de productos metálicos, a plantas de construcción de maquinaria especializadas en la producción y reparación de equipos tecnológicos auxiliares para diversos sectores de la economía. Además, para garantizar un buen funcionamiento no hay necesidad de recurrir a los servicios de transporte ferroviario, ya que la logística y los volúmenes de transporte de carga en este caso pueden ser proporcionados por el transporte por carretera a un menor costo.

Por otro lado, las estimaciones de costos sugieren que, para obtener 1 tonelada de productos en condiciones de procesamiento de residuos metálicos industriales utilizando un convertidor de oxígeno con cuerpo giratorio, mostró que el costo del acero se reduce en aproximadamente un 10 % y esto se debe al bajo costo de la carga inicial [55].

3.10 Modificadores de escoria

En los procesos de fabricación de acero, la escoria se forma al comienzo de la fusión, cambiando su constitución química y sus propiedades, que es lo que determina en gran medida la calidad del acero producido. Las



funciones más importantes de la escoria son: proteger el baño de metal contra el contacto con el oxígeno atmosférico, absorber los productos de oxidación de las impurezas del baño de metal, incluidos el fósforo y el azufre y asimilar inclusiones no metálicas [56].

La escoria espumosa, es un método que se aplica en la producción de aceros, para mejorar el coeficiente de uso de la energía. El objetivo básico de esta técnica, es aumentar el espesor de la capa de escoria en la superficie del baño de metal, para así, evitar aumentar la masa de la misma, es importante señalar que el espesor de esta capa se incrementa por la generación de espuma [56].

3.10.1 Ejemplos de uso de modificadores de escoria

Entre las patentes publicadas donde se generan modificadores de escoria, está el método que usa relaves y los residuos de la colada en cuchara de acero para preparar pellas modificadoras de escoria con alto contenido de aluminio, los cuales permiten optimizar el proceso de refinación del acero. Este método no solo presenta la ventaja de utilizar residuos, también permite disminuir los costos de producción y optimizar la refinación del mismo. Las pellas modificadoras de escoria de alto aluminio están compuestas de 50 a 60 % de relaves y de polvo fino de residuos de la colada en cuchara de acero, 8 a 15 % de polvo de alúmina, 30 a 40 % de partícula de aluminio o polvo de aluminio, y aglutinante en un porcentaje en peso de 1 a 3 %. Estas pellas son aplicadas en la producción de acero bajo en carbón y aluminio y de acero de ultra bajo carbón. Su uso permite bajar el punto de fundición, aumentar la velocidad de fundición, a su vez presenta buena movilidad de la escoria, buena habilidad de absorber



impurezas y un buen efecto modificador de la escoria removiendo el oxígeno [57].

Las pellas frías también se usan como modificadores de escoria, en el método para producir pellas prensadas al frío, las cuales sirven como agente espumante de escoria. Las pellas se forman a partir de 30 a 40 % de polvo fino de residuos de colada, 50 a 60 % de polvo de piedra caliza y de 6 a 12 % de polvo de fluorita. Para formar las pellas estos componentes se mezclan con agua y un agente aglutinante [58].

4. Factibilidad de aplicar los usos finos de pellas y otros subproductos en Venezuela

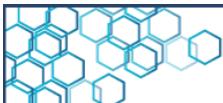
Para poder definir la factibilidad de usar en Venezuela, algunas de las opciones presentadas en este documento, se empezará describiendo la industria siderúrgica venezolana, donde el uso de la tecnología instalada facilitará su implementación al disminuir costos y tiempo de ejecución, porque solo debería necesitar su adecuación. La industria siderúrgica venezolana cuenta con: una (1) planta de pellas, una (1) planta de pellas en construcción, siete (7) plantas de briquetas de hierro en caliente (dos (2) de estas plantas, generan briquetas a partir finos de mineral de hierro, mientras que, las otras cinco (5) lo hacen a partir de una mezcla de mineral de hierro y pellas), tres (3) plantas para realizar reducción directa de hierro, para el proceso de acería se tiene horno de arco eléctrico, plantas para semielaborados (planchones, palanquillas y lingotes) y plantas para terminados (laminados en caliente, laminados en frío, recubiertos, barras y alambrón) [5,28].



En Venezuela, no se dispone de alto horno, por lo tanto, las alternativas: pellas metalizadas, sinterizado compuesto de pella y sinterizado de material reciclado no son factibles de aplicar, ya que estos aglomerados son diseñados para este tipo de horno. Los aglomerados producidos en el país son pellas y briquetas de hierro en caliente (HBI), las pellas se usan para producir hierro esponja, a través de la reducción directa de hierro, o como alimentación en la generación de la HBI. Por lo tanto, la aplicación de alguna de las opciones descritas, se debería realizar en cualquiera de estos dos métodos de aglomeración.

La producción de pellas tiene una formulación definida, que admite solo 7 % de reciclado de finos de pella y 1 % de escamas, sin embargo, el retorno de finos llega a ser de 30 % [5,8]. Por lo tanto, se debería trabajar en nuevas formulaciones que permitan incluir mayor cantidad de finos de pella o la inclusión de otro subproducto de la industria siderúrgica. Esta nueva formulación, podría ser para pellas frías o para pellas endurecidas por calor. En las instalaciones de Sidor existe un laboratorio a escala planta piloto que permite evaluar diferentes formulaciones para pellas.

Adicionalmente, se podrían incluir otras materias primas nacionales, como el coque de petróleo, el cual puede servir como fuente energética, agente reductor y aportaría metales como vanadio y níquel, que se pueden utilizar para realizar ferroaleaciones o ser recuperados en la escoria cuando se pase a la fase de acería en el horno de arco eléctrico. Existen experiencias que usan coque de petróleo y finos de mineral de hierro para generar hierro esponja a través de la reducción directa de hierro, este hierro esponja es usado como suministro de hornos de arco eléctrico o en hornos básico de oxígeno [59].



Varios autores proponen formulaciones de pellas frías para ser usadas en procesos de reducción directa de hierro (DRI) [11-14], de las cuales las formulaciones de Nikai (2015) y Nikai & Garbers-Craig (2015), realizan dichas pellas a partir de lodos. Otros autores utilizan subproductos de la industria siderúrgica para realizar pellas calcinadas y para realizarlas proponen diferentes proporciones de estos subproductos [36,38,41].

La opción de briquetas para aglomerar finos ya se aplica parcialmente en Venezuela, debido a que parte de las plantas de producción de briquetas de hierro en caliente, las generan a partir de finos de mineral de hierro. Otra posible aplicación, de una nueva formulación de pella que contenga mayor cantidad de finos de pella, sería en las plantas para producir HBI que requieren pellas y mineral de hierro como suministro. Una opción a largo plazo pudiera ser invertir en nuevas plantas para producir HBI a partir de finos.

Realizar pellas mezclando otros minerales que contengan elementos distintos al hierro, es otro de los usos que se podría evaluar su aplicación en Venezuela, ya que en el país se presenta un intercrecimiento de ilmenita-hematita en San Quíntin, Estado Yaracuy [4], el cual es un mineral que presenta Ti y Fe, por lo que se podría trabajar en ferroaleaciones o recuperar el Ti en la escoria. Adicionalmente, hay presencia de magnetitas vanadíferas en Villa de Cura, Estado Aragua [4], las cuales podrían ser útiles para producir ferroaleaciones con V o recuperar este elemento en la escoria.

Las pellas propuestas como modificadores de escorias, es una opción que también se pudiera evaluar para su aplicación en Venezuela debido a que es una pella fría que se forma a partir de 30 a 40 % de polvo fino de



residuos de colada, 50 a 60 % de polvo de piedra caliza y de 6 a 12 % de polvo de fluorita [58].

La micrometalúrgia, es un modelo de negocio del cual se pudiera evaluar la factibilidad de aplicarlo en Venezuela a mediano o largo plazo. Aplicar este modelo de negocios tendría como ventajas: facilitar el uso de finos de pella y de otros subproductos de la industria siderúrgica, inversiones pequeñas, emplear plantas de menor tamaño, con mayor facilidad de instalación y con menor mantenimiento, y el proceso de diversificación de la producción de productos terminados se facilitaría. Debido a que sería más sencillo planificar la fabricación de una gran variedad de productos terminados, motivado a que la cantidad total de productos que se deben realizar para hacer rentable la producción sería menor, de esta manera se facilitaría la comercialización, la cual podría concentrarse a nivel nacional y latinoamericano. Entre las ventajas de aplicar este modelo en Venezuela, estaría la generación de abundante variedad de productos terminados realizados en el país.

5. Conclusiones

- Se clasificaron los usos de finos de mineral de hierro, presentes en los documentos académicos y patentes seleccionadas, en los cuales se encontraron diez (10) diferentes usos: pellas frías, pellas metalizadas, briquetas para aglomerar, sinterizado compuesto de pellas, pellas de material reciclado, sinterizado de material reciclado, mezcla con minerales que contengan otro elemento distinto al hierro, usos de finos directamente, micrometalúrgia y modificadores de escoria.



- El uso que se le puede dar a los finos de pella y otros subproductos, dependerá de las propiedades del subproducto siderúrgico, de la tecnología usada para producir acero, de los combustibles disponibles (coque metalúrgico, gas, carbón, coque de petróleo, finos de material carbonoso, etc) y de los otros componentes disponibles con que se mezclan los subproductos siderúrgicos, entre otros factores.
- Hacer uso de finos de pellas y otros subproductos siderúrgicos, conlleva a las siguientes ventajas: menor cantidad de mineral de hierro, por lo que disminuye el costo de producción y preserva por mayor tiempo los recursos naturales; disminución de la cantidad de desechos que se generan, disminución de los costos de eliminación de los mismos minimizando el impacto ambiental; los subproductos generalmente contienen alto contenido de hierro, por lo que su uso optimiza los procesos metalúrgicos y disminuye la cantidad de escoria producida.
- Entre los usos alternativos de finos de pella más factibles para ser aplicados en Venezuela, en función de la infraestructura siderúrgica del país, se proponen: pellas frías, pellas de material reciclado, briquetas para aglomerar, mezcla con minerales que contengan otro elemento distinto al hierro y modificadores de escoria.



6. Bibliografía

- [1]. World Steel Association. The White Book of Steel. Bruselas: World Steel Association; 2012. 53 p.
- [2]. World Steel Assotiation. Steel and raw materials. Bruselas: World Steel Assotiation; 2021 p. 2.
- [3]. World Steel Association. Steel Statistical Yearbook 2019. Vol. 1, Steel statistical yearbook 2019. Bruselas: World Steel Association; 2019 p. 42.
- [4]. Valery I, Garcia V, Flores E. Elementos Químicos y sus Recursos Minerales. Núñez O, editor. Caracas: Instituto Nacional de Geología y Minería / INGEOMIN; 2002. 198 p.
- [5]. Ternium. Procesos y Productos. Introducción a los Procesos y Productos de Sidor. Ternium; 2005 p. 184.
- [6]. Ferrominera C. Planta de Pellas “Hernán Quívera” Incrementa la Producción en Tiempos de Pandemia. Revista Mundo Ferrosiderúrgico. abril de 2021;4-13.
- [7]. Bhagat R (CSIR NML. Agglomeration of iron ores. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis; 2019. 416 p.
- [8]. Bellera Sosa B del M. Control del tamaño de las Pellas en la Planta de Pellas de Sidor , C.A. con Técnicas de Visión Artificial. Universidad de Los Andes Mérida; 2006.
- [9]. Dutta SK. Utilization of Iron & Steel Plant Wastes by Briquetting/Pelletization. IRON STEEL Rev. 2016;60(7):158–166.
- [10]. Halt JA, Roache SC, Kawatra SK. Cold bonding of iron ore concentrate pellets. Miner Process Extr Metall Rev. 2015;36(3):192–7.



- [11]. Aota J, Morin L, Zhuang Q, Clements B. Direct reduced iron production using cold bonded carbon bearing pellets Part 1 – Laboratory metallisation. 2006;33(5):426–428.
- [12]. Zhuang Q, Clements B, Aota J, Morin L. DRI production using cold bonded carbon bearing pellets Part 2 - Rotary kiln process modelling. Ironmak Steelmak. 2006;33(5):429–432.
- [13]. Nikai I. The use of iron ore fines in cold-bonded self-reducing composite pellets. University of Pretoria; 2015.
- [14]. Nikai I, Garbers-Craig AM. Use of Iron Ore Fines in Cold-Bonded Self-Reducing Composite Pellets. Miner Process Extr Metall Rev [Internet]. 2015;37(1). Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1080/08827508.2015.1104506>
- [15]. Chokshi Y (University of B, Dutta SK (University of B. Production of Iron Ore-Coal Composite Briquette/Pellet by Using Fly-Ash and Other Binders. En: Proceeding of the international conference on science and technology of ironmaking and steelmaking [Internet]. Jamshedpur: CSIR-NML; 2013. p. 16–8. Disponible en: <http://eprints.nmlindia.org/7040>
- [16]. Jin C, Wang Z, Wu W, Liu S, Chen X, Liang K, et al. Special binder for converter fly ash cold-pressed pellets. China; 2021.
- [17]. Shuai L, Li H, Wu J. Technique for producing cold-bonded pellets from steel converter dust removal ash. China; 2016.
- [18]. Zhou W, Zang J, Jiang G. Production method of cold-bound pellets. China; 2021.
- [19]. Wang L, Guo P, Kong L, Lin W, Zhou Q. Utilization method of fine iron oxide red generated in hydrometallurgy process. China; 2022.



- [20]. Liu H. Self-reducing, cold-bonded pellets. EEUU; 2011. p. 9.
- [21]. Ghosh A, Chatterjee A. Ironmaking and Steelmaking: Theory and practice. PHI Learning Private Limited. Nueva Delhi; 2008. 481 p.
- [22]. Pal J, Ghorai S, Goswami MC, Ghosh S, Ghosh D, Bandyopadhyay D. Development of fluxed iron oxide pellets strengthened by CO₂ treatment for use in basic oxygen steel making. ISIJ Int. 2009;49(2):210–219.
- [23]. Abdelrahim A. Recycling of steel plant by-products by cold bonded briquetting. University of Oulu; 2018.
- [24]. Bizhanov A, Chizhikova V. Agglomeration in Metallurgy [Internet]. Gewerbestrasse: Springer; 2020. 454 p. Disponible en: <http://www.springer.com/series/11054>
- [25]. Kishore Das B, Mallick D. Briquetting of Iron Bearing Materials. National Institute of Technology Rourkela; 2015.
- [26]. Kumar DS, Sah R, Sekhar VR, Vishwanath SC, Sah R, Sekhar VR, et al. Development and use of mill scale briquettes in BOF. 2016;(April):1–6.
- [27]. Lohmeier L, Wollenberg R, Schröder HW. Investigation into the Hot Briquetting of Fine-Grained Residual Materials from Iron and Steel Production. Steel Res Int. 2020;91(12):1–10.
- [28]. Schütze WR. HBI - Hot Briquetting of Direct Reduced Iron. Technology and Status of Industrial Application. Köeppern. Hattingen; 2014 p. 15.
- [29]. Hoffman GE, M MJ. Method of producing a metallized briquette. EEUU; 2004.
- [30]. Meynerts U, Maurer M, Freitas Seabra Da Rocha SH, Wirtgen C. Briquetting of mill scale [Internet]. EEUU; 2013. p. 5. Disponible en:



<https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/8444746>

[31]. Meynerts U, Freitas Seabra Da Rocha SH, Maurer M. Walzenzunderbrikettierung. Alemania; 2012. p. 6.

[32]. Pal J. Innovative Development on Agglomeration of Iron Ore Fines and Iron Oxide Wastes. Miner Process Extr Metall Rev. 2019; 40(4): 248–264.

[33]. Bang YH, Son Chang I. Mini-pellet manufacturing for reduced sulfur oxide and nitrogen oxide. Corea del Sur; 2007.

[34]. Bodino G, Bodino D. Procedimento Di Trattamento Delle Polveri Contenute Nei Fumi Di Acciaieria Con Produzione Di Ghisa. Italia; 2001. p. 12.

[35]. Son Chang I. Optimum granulation method of fine inplant by-product. Corea del Sur; 2006.

[36]. Umadevi T, Kumar MGS, Mahapatra PC, Babu TM, Ranjan M. Recycling of steel plant mill scale via iron ore pelletisation process. Ironmak Steelmak. 2009;36(6):409–415.

[37]. Rajshekhar Y, Pal J, Venugopalan T. Mill scale as a potential additive to improve the quality of hematite ore pellet. Miner Process Extr Metall Rev. 2018;39(3):202–210.

[38]. Zhunusov A (Toraighyrov U, Kenzhebekova A (Toraighyrov U, Zhunusova A (Toraighyrov U. RECYCLING OF METALLURGICAL WASTES. Sci Technol Kazakhstan. 2021;4:59–66.

[39]. Fan Z, Qian Q, Zhang R, Song W. Preparation method of pellet adhesive. China; 2020.



- [40]. Ren T, Yang Q, Zhang W, Tang Z, Pan W, Zhang D, et al. Manufacturing method for cold-pressed pellets for steelmaking. China; 2017.
- [41]. Liu W, Yu H, Liu R. Method for producing high-strength pellets by using steel slag fine powder. China; 2022.
- [42]. Strüber G, Nouaille-Degorce G. Method of operating a pelletizing plant. Luxenburgo; 2018. p. 7.
- [43]. Dutta SK, Chokshi Y, Sompura N. Utilization of steel plants waste. Mater Sci Eng Int J. 2018;2(5):144–147.
- [44]. Kotraba NL, Holley CA. Direct reduction process and apparatus. Europa; 2003. p. 17.
- [45]. Xing ZX, Liu JS, Huang Z, Cheng GJ, Yang H, Xue XX. Research on the Enhanced Preparation Process for Pellets with Sea Sand Vanadium Titanomagnetite Smelting in the Blast Furnace. J Phys Conf Ser. 2022;2300(1):1–5.
- [46]. Zhang Y, Wu X, Niu H, Zhao M, Qing G, Zhao Z, et al. Study on Sinter Iron Ores and Titanium Ores Used in Pelletizing BT - Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2021. En: Li J, Zhang M, Li B, Monteiro SN, Ikhmayies S, Kalay YE, et al., editores. Cham: Springer International Publishing; 2021. p. 155–163.
- [47]. Mostaghel S, Cramer MH, Hernandez-Avila VH. Process and Apparatus for Producing High-Manganese Steels. Mundial; 2016. p. 29.
- [48]. Sun H, Wang J, Dong X, Xue Q. A Literature Review Of Titanium Slag Metallurgical Processes. Metal Int. 2012;37(7):49–56.



- [49]. Tang J, Zhang Y, Chu MS, Xue XX. Preparation of oxidized pellets with high chromium vanadium-titanium magnetite. Dongbei Daxue Xuebao Journal Northeast Univ. 2013;34(4):545–550
- [50]. Baogui G. Coke-free ironmaking process for titanium-containing magnet placer. China; 2010.
- [51]. Longkui J, Wensun G, Wenchao C, Qingchun L, Yong C, Guijun L, et al. Method for carrying out liquid steel vanadium alloying by pelletizing by using vanadium iron fine powder. China; 2012.
- [52]. Lang S (Metso O, Haimi T (Metso O, Köpf M (Metso O. Circored Fine Ore Direct Reduction Plus DRI Smelting: Proven Technologies for the Transition Towards Green Steel. En: Fiseha Tesfaye, Lei Zhang, Donna Post Guillen, Ziqi Sun, Alafara Abdullahi Baba, Neale R. Neelameggham, Mingming Zhang DEV and SA, editor. REWAS 2022: Energy Technologies and CO₂ Management (Volume II) [Internet]. Turku: Springer; 2022. p. 176. Disponible en: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-92559-8>
- [53]. Huang X, Hwang JY. Novel Direct Steelmaking By Combining Microwave, Electric Arc, and Exothermal Heating Technologies. Vol. Final Tech, United StatesDepartmente of Energy. Steel is a basic material broadly used by perhaps every industry and individual. It is critical to our nation's economy and national security. Unfortunately, the American steel industry is losing competitiveness in the world steel production field. There: Michigan Technological University; 2005 p. 158.
- [54]. Cavaliere P. Flash Ironmaking. En: Cavaliere P, editor. Hydrogen Assisted Direct Reduction of Iron Oxides [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2022. p. 339–57. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-030-98056-6_9



- [55]. Eron'ko SP, Gorbatyuk SM, Oshovskaya EV, Starodubtsev BI. A concept of micro-mill elaboration and development for low-quality burden and metal-containing wastes recycling. *Ferr Metall Bull Sci Tech Econ Inf.* 2019;75(9):1029–1036.
- [56]. Karbowniczek M. Electric Arc Furnace Steelmaking. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis; 2022. 250 p.
- [57]. Huang G, Huang T, Mao P, Hu Z, Chen C, Chen G. Method adopting steel ladle casting residues and tailings for preparing high-aluminum slag modifier pellets and application thereof. China; 2016.
- [58]. Chen C, Huang G, Zhang H, Deng X, Hu Z. Slag foaming agent pellet and preparation and using method thereof. China; 2017.
- [59]. Schneider JC, Chorbajian E. LS-RIOR, a new ironmaking process utilizing low cost, high sulfur petroleum coke as reductant and energy source. *Ironmak Proc Met Soc AIME U S* [Internet]. el 1 de enero de 1984;43. Disponible en: <https://www.osti.gov/biblio/6319014>