

UCH-FC
Q. Ambiental
5414
C.1



FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

**"PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACION DE UN MODELO DE GESTION
DE ESCORIAS DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO EN CHILE"**

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de los requisitos para optar al Título de:

Químico Ambiental

Ingrid Marlene Kristel Schwember Hinojosa

Director de Seminario de Título: Sra. Paola Grandela
Profesor Patrocinante: M. Cs. Ricardo Serrano

Junio de 2011
Santiago – Chile

ESCUELA DE PREGRADO – FACULTAD DE CIENCIAS – UNIVERSIDAD DE CHILE



INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por la candidata:

INGRID MARLENE KRISTEL SCHWEMBER HINOJOSA

“PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACION DE UN MODELO DE GESTION DE ESCORIAS DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO EN CHILE”

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental

COMISIÓN DE EVALUACIÓN

Sra. Paola Grandela
Director Seminario de Título

Una firma manuscrita en azul sobre una línea horizontal.

M. Cs. Ricardo Serrano
Profesor Patrocinante

Una firma manuscrita en azul sobre una línea horizontal.

M. Cs. Ximena Molina
Corrector

Una firma manuscrita en azul sobre una línea horizontal.

Mag. Julio Hidalgo
Corrector

Una firma manuscrita en azul sobre una línea horizontal.

Santiago de Chile, Junio de 2011



Ingrid Schwember Hinojosa nacida en Arica en febrero de 1986. En esta ciudad comencé mis estudios, en el colegio Alemán, para luego cambiarme de ciudad y seguir mis estudios en el Liceo María Auxiliadora de Iquique.

Fue en la educación básica que comencé a desarrollar la capacidad de análisis y el interés por los procesos relacionados con la naturaleza y la ciencia.

Mi primera inquietud estuvo dirigida en el interés deductivo de las matemáticas, luego en la física,

para terminar finalmente en la química. Pero no sólo me interesé en la química como el estudio de la composición de la materia y sus transformaciones, sino que me interesé también en aprender la aplicación de esta ciencia en el estudio de los problemas y la conservación del medio ambiente.

De esta forma es que llegué a estudiar Química Ambiental en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile, para convertir esta inquietud en mi desarrollo profesional y de vida.

AGRADECIMIENTOS



Quiero expresar mis agradecimiento a todas las personas que estuvieron conmigo en este proceso de desarrollo profesional.

A mi familia, en especial a mi madre y mis hermanos por su apoyo incondicional y por enseñarme a enfrentar los obstáculos con alegría.

A mis amigas, Daniela, Catalina, Camila y Rocío, que con su amistad, confianza y su afecto, ayudaron que este camino fuese mucho más fácil de recorrer.

A Rafael por su apoyo y compañía que me ayudaron a seguir siempre adelante.

A la gente de Gerdau AZA, en especial a Cristina, Isabel y Paola, que siempre me brindaron todo lo necesario y con mucha disposición para poder llevar a cabo este trabajo.

Y a los profesores que me ayudaron profesionalmente y me guiaron con amabilidad y disposición.

INDICE DE CONTENIDOS



RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
1. OBJETIVOS	6
1.1. Objetivo General.....	6
1.2. Objetivos Especificos.....	6
II. METODOLOGÍA DE TRABAJO	7
2. Antecedentes Generales	8
2.1. Antecedentes Siderúrgicos.....	8
2.1.1. Escorias Metalúrgicas.....	8
2.1.2. Clasificación Tipos de Escorias.....	8
2.1.3. Características de las escorias generadas en la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico.....	10
2.1.4. Proceso de generación de escorias en la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico.....	11
2.1.5. Descripción y especificaciones químicas de la generación de escoria en los procesos de fusión y afino.....	11
2.1.5.1. Proceso de Fusión.....	11
2.1.5.2. Proceso de Afino.....	14
2.1.6. Empresa Gerdau AZA.....	17
2.2. Desarrollo Histórico del Reciclaje de Escoria.....	18
2.2.1. Contexto Nacional.....	18
2.2.2. Contexto Internacional.....	19

III. RESULTADOS	28
3.1. Experiencias de valorización de escorias de horno de arco eléctrico.....	28
3.2. Alternativas de valorización de las escorias de horno de arco eléctrico.....	30
3.3. Consideraciones técnicas y ambientales de las alternativas de valorización.....	31
3.4. Tipos de ensayos de lixiviación utilizados a nivel internacional.....	35
3.5. Tipos de ensayos de lixiviación utilizados a nivel nacional.....	37
3.6. Normativas y Regulaciones Ambientales.....	38
3.6.1. Normativas aplicables en Chile.....	38
3.6.2. Marco regulatorio y normativas internacionales sobre el uso de escorias EAF.....	41
3.6.3. Criterios Ambientales que permiten regular el uso de las escoria.....	44
3.7. Gestión de Escorias EAF.....	48
3.7.1. Ciclo PHVA.....	49
3.7.2. Planificar.....	50
3.7.3. Hacer.....	51
3.7.3.1. Descripción entradas y salidas del proceso productivo.....	51
3.7.3.2. Descripción características de la escoria mediante información de análisis químicos.....	53
3.7.3.3. Análisis de las alternativas de minimización, prevención y valorización de la escoria.....	59
3.7.3.4. Propuesta de Modelo de Gestión.....	65
3.8. Situación actual Gerdau AZA.....	77
IV. DISCUSIÓN	78
V. CONCLUSIONES	83
VI. BIBLIOGRAFÍA	85
VII. ANEXOS	87
Anexo 1 . Asociaciones Internacionales Comercializadoras de Escorias de Acero.....	88

Anexo 2. Resumen metodologías de análisis de ensayos de lixiviación utilizados en la C.E.E.....	89
Anexo 3. Metodología de análisis test TCLP.....	92
Anexo 4. Metodología ejemplo de aplicación del Criterio Ambiental.....	93
Anexo 5. Resultados obtenidos en el Test TCLP Orgánico - Constituyentes Orgánicos Volátiles y Semi-Volátiles de dos muestras de escoria, negra y blanca, de Gerdau AZA; y sus respectivos métodos de determinación y límites de detección.....	100





INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Usos escoria negra de horno de arco eléctrico, en Australia y NZ. Año 2008.....	25
Tabla 2. Usos comunes de escorias de acero en EEUU.....	26
Tabla 3. Resumen de los mayores usos de la escoria negra.....	30
Tabla 4. Clasificación tipos de ensayos de lixiviación utilizados en C.E.E.....	36
Tabla 5. Regulaciones específicas de la valorización de escorias de acero en España...43	
Tabla 6. Etapa Planificación Ciclo PHVA en la gestión de la escoria.....	50
Tabla 7. Valores obtenidos del Test TCLP inorgánico.	54
Tabla 8. Inflamabilidad de la escoria negra y blanca.....	55
Tabla 9. Corrosividad de la escoria negra y blanca.....	55
Tabla 10. Caracterización química de la escoria negra y blanca.....	56
Tabla 11. Cantidades generadas escoria Gerdau AZA.....	58
Tabla 12. Influencia de la basicidad sobre la cantidad de la escoria generada.....	62
Tabla 13 Opciones de valorización de la escoria.....	64
Tabla 14. Ensayos de caracterización de áridos según Manual de Carreteras.....	72
Tabla 15. Características de Peligrosidad- DS.148.....	74
Tabla 16. Asociaciones internacionales comercializadoras de escoria.....	88
Tabla 17. Clasificación características generales de la serie 12.457.....	91
Tabla 18. Test TCLP Orgánico – Constituyentes orgánicos volátiles.....	100
Tabla 19. Test TCLP Orgánico – Constituyentes orgánicos semi volátiles.....	100
Tabla 20. Métodos de determinación y límites de detección para compuestos inorgánicos.....	101
Tabla 21. Límites de cuantificación para compuestos orgánicos volátiles.....	101
Tabla 22. Límites de cuantificación para compuestos orgánicos semi volátiles.....	102



INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Clasificación de las escorias según procedencia.....	9
Figura 2 Imagen Escoria Negra.....	10
Figura 3 Imagen Escoria Blanca.....	10
Figura 4 Proceso general de fabricación de acero a partir de chatarra.....	16
Figura 5 Usos de escoria de acero en Europa. Año 2004.....	20
Figura 6 Usos actuales de escoria de acero en Europa.....	21
Figura 7 Utilización de escorias de acero en Alemania. Año 1999.....	22
Figura 8 Capa de sub-base hecha con escoria EAF de BSW.....	23
Figura 9 Capa de asfalto hecha con escoria EAF de BSW.....	23
Figura 10. Esquema de las diferentes partes de una carretera.....	24
Figura 11. Utilización de escoria en Australia y Nueva Zelanda.....	25
Figura 12. Utilización de escoria EAF en una carretera de Juiz de Fora.....	27
Figura 13 Factores que influyen la liberación de contaminantes de un material monolítico.....	34
Figura 14 Factores que influyen la liberación de contaminantes de un material granular.....	34
Figura 15. Ciclo PHVA	49
Figura 16. Diagrama de Flujo de las entradas y salidas del proceso productivo.....	52
Figura 17. Estrategia Jerarquizada de Residuos.....	59
Figura 18. Diagrama de flujo clásico de las etapas de un sistema de manejo de residuos.....	65
Figura 19. Esquema de las etapas de un sistema integral de manejo de residuos.....	66
Figura 20. Modelo de Gestión de escoria.....	67
Figura 21. Cargador frontal y túnel de escoria.....	68
Figura 22. Traslado escoria negra a vallas de enfriamiento.....	69
Figura 23. Vallas de enfriamiento.....	69
Figura 24. Metodología test TCLP.....	92

LISTA DE ABREVIATURAS



APL: Acuerdo de Producción Limpia
BFS: Blast Furnace Slag
BMD: Building Material Decree
BOF: Basic Oxygen Furnace
BOS: Basic Oxygen Steelmaking
BSW: Badische Stahlwerke
CAPV: Comunidad Autónoma del País Vasco
CEE: Comisión Económica Europea
CEN: European Committee for Standardization
COV's: Compuestos Orgánicos Volátiles
DIN: Deutsche Industrienorm; Deutsches Institut für Normung
EAF: Electric Arc Furnace
EUROSLAG: The European Association representing metallurgical slags producers and processors
GBFS: Granulate Blast Furnace Slag
ICHA: Instituto Chileno del Acero
IHOBE: Sociedad Publica de Gestión Ambiental, España.
LAGA: Länderarbeitsgruppe Abfall
LF: Ladle Furnace
MTM: Millones de Toneladas Métricas
NEN: Netherlandes Norm
PGIRS: Política de Gestión Integral de Residuos Sólidos
prEN: Pre Norma Europea
SPLP: Synthetic Precipitation Leaching Procedure
TCLP: Toxicity Characteristic Leaching Procedure

RESUMEN

Las experiencias internacionales de valorización de escorias de acero de hornos de arco eléctrico, señalan que la principal escoria reciclada es la escoria negra (escoria EAF); y sus mayores usos son en la industria de la construcción, destacándose principalmente como árido para bases y sub bases, mezclas con asfaltos y cemento. Estos usos se justifican ya que a nivel internacional existe un marco regulador que promueve la gestión integral de los residuos, el cual ha servido a países miembros de la C.E.E para legislar y regular el uso de residuos en la industria de la construcción, considerando para ello un criterio ambiental de protección de suelos y aguas superficiales.

Considerando las experiencias señaladas a nivel internacional y la recopilación de las normativas y las experiencias de usos a nivel nacional; el presente estudio tiene como objetivo proponer la implementación de un modelo de gestión de escorias de horno de arco eléctrico en Chile, que permita la reutilización de este residuo en las industrias tales como la construcción.

Los resultados del análisis realizado señalan que no existen experiencias documentadas a nivel país del reciclaje de escoria EAF, ni normativas específicas que contemplen una estrategia jerarquizada de recuperación, reutilización y reciclaje, como política de gestión integral de residuos sólidos.

El resultado obtenido se presenta a través de un modelo de gestión de escoria, el cual se basa en la información de las experiencias internacionales recopiladas, la estrategia jerarquizada de la gestión de residuos y en la aplicación de una herramienta organizativa llamada ciclo Deming o ciclo PHVA para establecer las etapas que conlleven a que este residuo sea valorizado.

ABSTRACT

The international experience of using slag indicate that the slag mainly recycled in the steel industry electric arc furnaces, is the black slag (EAF slag) and its major uses are in the construction industry, emphasizing primarily as aggregate for base and sub base, asphalt and cement mixes. These uses are justified because in the international scale there is a regulatory framework that promotes integrated waste management, which has served to members countries of the European Community to legislate and regulate the use of waste in the construction industry, considering for this environmental criteria the protection of soils and surface waters.

Taking into account the experiences presented at the international level and the collection of standards and the experiences of national applications, the present study aims to propose the implementation of a management model of slag from electric arc construction.

Thus it was found that there are no documented experiences at the country level of slag recycling (EAF), and no specific normative that contemplate a hierarchical strategy for the recovery, reuse and recycling, as a policy of integrated solid waste management. However this hierarchical strategy was used to create the proposed slag management model.

The slag management model is based on information from international regulatory experiences compiled before, hierarchical strategy for waste management and implementation of an organizational tool called Deming cycle or PDCA cycle to establish the steps that lead to this waste is recovered.

I. INTRODUCCIÓN

Se define como acero al producto de la aleación de hierro y carbono, en diferentes proporciones, que, según su tratamiento adquiere especial elasticidad, dureza o resistencia (RAE).

El acero se puede obtener de dos materias primas que condicionan el proceso de fabricación; del arrabio obtenido a partir de la fundición de mineral de hierro en industrias de altos hornos, y de la chatarra, obtenida de la recolección y reciclaje de materiales con contenido de hierro. A grandes rasgos en la fabricación de acero a partir de arrabio se utiliza un convertidor con oxígeno, mientras que a partir de chatarra se utiliza exclusivamente un horno de arco eléctrico.

En el presente estudio se desarrollarán conceptos relacionados con la fabricación de acero en *Hornos de Arco Eléctrico* y la generación de un residuo de este proceso llamado *Escoria*.

En la fabricación de acero se generan distintos tipos de residuos, uno de los más abundantes son las *escorias*. La escoria es el material fundido formado por las reacciones químicas entre la materia prima, los fundentes añadidos al horno y las impurezas oxidadas durante el refinado; siendo su función principal atrapar las impurezas para separarlas del metal (De Lima L, 1999).

Las escorias del proceso de fabricación de acero en hornos de arco eléctrico son dos, la escoria negra o escoria oxidante y la escoria blanca o escoria reductora; las cuales se obtienen en la fusión y afinado del proceso, respectivamente. Las escorias negras están constituidas mayormente por elementos de hierro, calcio, silicio y aluminio; y las escorias blancas por calcio y silicio mayormente.

La producción de acero en el mundo ha aumentado con la creciente industrialización internacional. Entre los años 2000 y 2006 el consumo mundial de acero aumentó a alta

tasas anuales; teniendo un aumento entre el año 2000 y 2005 de un 6,2% y entre 2006 y 2007 un 8,3% , incremento debido al crecimiento de China, India y el creciente grado de industrialización del sudeste asiático (ICHA¹). Junto a este crecimiento se ha producido también un aumento en la producción de acero en hornos de arco eléctrico. En Europa la fabricación por este proceso llega a un 38%, en Estados Unidos un 45% ; Filipinas 71% , Japón 34% y en países como Indonesia, Malasia, Tailandia y Vietnam la fabricación por este proceso alcanza a un 100% (Business Line, 1998).

En nuestro país, el consumo de acero creció a una tasa promedio anual de 5,5% en los últimos 19 años. En el año 2008 se consumieron 2,568 millones de toneladas métricas (MTM) de acero, cifra 11% mayor al año 2007. Con este nivel, Chile se posiciona como el líder de consumo en Latino América con un consumo de acero per capita de 170 Kg (ICHA²).

El crecimiento económico y en particular el aumento del consumo de acero per capita, tiene asociado un incremento progresivo en la generación de residuos, y en este caso en la generación de las *escorias*. Si bien es cierto que la industria del acero realiza contantes esfuerzos para mejorar la eficiencia de sus procesos con el fin de optimizar su productividad y disminuir la cantidad de residuos generados, en el caso de la escoria no es posible dejar de generarla, ya que es parte fundamental del proceso, por lo que se hace necesario llevar a cabo un buen manejo procurando la máxima reutilización y reciclaje de esta.

En nuestro país las escorias de horno de arco eléctrico son tratadas para recuperar los metales que aún quedan en su composición, para posteriormente poder disponer el material restante (árido) en terrenos autorizados por la autoridad competente para tales fines. Según las normas chilenas, la escoria es clasificada como un residuo no peligroso, sin embargo es importante considerar que su disposición final podría constituir un pasivo ambiental a largo plazo debido a su acumulación en el tiempo. Para evitar que esto llegue a ocurrir, la industria del acero ha visto en la necesidad de buscar soluciones

en la gestión integral de este residuo, con el fin de encontrar una posible aplicación en otros procesos productivos, mediante estudios que avalen su valorización desde un punto de vista técnico y ambiental, así como también buscando el soporte en reglamentos y normativas claras que apoyen estas iniciativas. Es importante considerar que desde el punto de vista ambiental existe una *potencial emisión* de especies químicas desde los residuos o en general de los materiales hacia el suelo, aguas superficiales y aguas subterráneas, por lo que es necesario determinar mediante análisis químicos que este residuo no emite o emite en los niveles permitidos, especies químicas perjudiciales para el medio ambiente y la salud humana.

En el ámbito internacional, los estados miembros de la Unión Europea conscientes del aumento progresivo de los residuos, de su acumulación y de los potenciales problemas al medio ambiente que pueden causar, han implementado medidas preventivas, para minimizar estos efectos. Estas medidas están orientadas en políticas que establecen una jerarquía de gestión consistente en la prevención, reutilización, reciclaje, recuperación y eliminación controlada de los residuos. Desde el punto de vista legislativo la CEE no posee un marco regulador específico de la utilización de escorias, pero si posee un marco legislativo general establecido en una directiva que se puede asociar al uso de un residuo. La Directiva 2006/12/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 5 de abril de 2006 relativa a los residuos; tiene por objeto conseguir una regulación coherente de la “gestión y valorización de los residuos para así alcanzar un alto nivel de protección del medio ambiente”. Se entiende por valorización a cualquier operación cuyo resultado principal es que el residuo sirva a una finalidad útil.

Para llevar a cabo los objetivos de esta directiva, los Estados miembros, deben adoptar medidas encaminadas a limitar la producción de residuos y deben elaborar planes de gestión de residuos para poder alcanzar estos objetivos. De esta forma y bajo este marco normativo, países como Holanda, Bélgica y Alemania han desarrollado sus propias normativas sobre el uso residuos. En particular Holanda posee un decreto llamado BMD o Building Material (Soil and Surface Waters Protection) Decree que estudia la factibilidad de utilización de un residuo por medio de la aplicación de un criterio

ambiental de protección del suelo y aguas superficiales. Este decreto ha servido como referencia, en otros países, para estudiar la viabilidad del uso de residuos como materiales reciclados.

En nuestro país la política del manejo de los residuos se ha intentado desarrollar desde la perspectiva del desarrollo sostenible, enfocándose en el equilibrio entre el crecimiento económico, equidad social y la conservación de recursos. Sin embargo debido a la complejidad de la interacción de estos factores, ha sido difícil en nuestro país llegar a soluciones realmente efectivas. Esto se ha producido por las deficiencias institucionales y reglamentarias (PGIRS,2005) que impiden y entorpecen en gran medida el desarrollo de alternativas para una gestión integral de residuos sólidos, lo que constituye a su vez un desincentivo en la aplicación de mejoras medioambientales para los sectores industriales.

Pese a estas deficiencias existen instrumentos voluntarios como los Acuerdos de Producción Limpia (APL), que permiten mejorar el desempeño ambiental y la competitividad de un sector industrial a través del cumplimiento de objetivos, metas y acciones acordadas entre el Consejo Nacional de Producción Limpia y el sector empresarial. Estas iniciativas concluyen en la elaboración de “Guías Técnicas” sobre determinadas materias que pretenden introducir a las empresas en la jerarquización de prioridades de la gestión de residuos, es decir, sobre la prevención, recuperación, reciclaje y disposición final, además de presentar soluciones respecto de su manejo. En el rubro de Fundiciones se celebró en el año 2004 un acuerdo de producción limpia del sector Metalúrgico y Metalmecánico el cual condujo a la creación, en el año 2005, de una guía técnica llamada “Guía técnica para el manejo de escorias de fundiciones”. En esta guía se entrega una visión amplia de las alternativas de la gestión de escorias, sin embargo, este documento sólo establece una orientación general, por lo que el rubro de las acerías ha tenido que seguir investigando en las soluciones buscadas.

Lo expuesto anteriormente revela que a pesar de los acuerdos de producción limpia y la elaboración de guías técnicas, es complejo en nuestro país obtener de forma clara las

alternativas para la gestión integral de residuos, como para las escorias de horno de arco eléctrico, ya que no existen metodologías definidas ni normativas específicas referentes a la valorización de residuos que consideren a los residuos como materia primas para ser incluidas en otros procesos productivos.

Considerando lo antes dicho es posible realizar una recopilación de las normativa, las experiencias internacionales de la gestión y la valorización de las escorias ferrosas, con el fin de obtener recomendaciones que sirvan para proponer un modelo de gestión de escorias que establezca las etapas para que este residuo sirva a una finalidad útil (valorizado). Este modelo se llevará a cabo aplicando una herramienta organizativa llamada ciclo Deming o más conocido como ciclo PHVA (planear, hacer, verificar y actuar), que permite realizar una gestión orientada al mejoramiento continuo.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo General

- Proponer la implementación de un modelo de gestión de escorias de horno de arco eléctrico en Chile.

1.2. Objetivos Específicos

- Recopilar y sistematizar las experiencias de valorización de escorias ferrosas a nivel nacional e internacional.
- Recopilar y sistematizar las normativas internacionales de valorización de escorias de horno eléctrico, y las normativas aplicables en Chile.
- Recopilar información sobre los criterios ambientales que permiten regular el uso de las escorias de horno de arco eléctrico de acuerdo a ciertos usos específicos.
- Proponer un modelo de gestión de escorias que establezca las etapas y las recomendaciones que conlleven a que este residuo sea valorizado, mediante la utilización la herramienta organizativa llamada ciclo Deming.

II. METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología del desarrollo del presente trabajo se dividió en cuatro etapas.

Durante la primera etapa se realizó la recopilación de información y antecedentes bibliográficos respecto de la industria del acero y la generación de escorias ferrosas; se analizaron las experiencias de reciclaje, valorización y uso asociadas a este residuo, y se estudió el marco legislativo relacionado con su usos, en el ámbito nacional e internacional.

En la segunda etapa se llevó a cabo la recopilación de información de normativas y estudios técnicos realizados en la comunidad europea, sobre la aplicación de criterios ambientales que permiten regular el uso de las escorias de horno de arco eléctrico.

En la tercera etapa se analizaron los resultados obtenidos de los análisis realizados a ambas escorias (escoria negra y blanca) encargados al laboratorio Cesmec.

En última etapa se realizó un análisis de los procedimientos y etapas necesarios para llevar a cabo la gestión de un residuo, con el fin de poder proponer un modelo de gestión de escorias que establezca las etapas y las recomendaciones que conlleven a que este residuo sea valorizado

2. ANTECEDENTES GENERALES

2.1. Antecedentes Siderúrgicos

2.1.1. Escorias Metalúrgicas

La escoria es un residuo de la fundición de metales y procede de la parte menos pura de estos. Sus funciones principales son eliminar las impurezas del acero líquido, incrementar la eficiencia energética del proceso, reducir el consumo de energía eléctrica, evitar el ataque químico al refractario y reducir el tiempo total de fusión.

Este residuo se puede generar en distintos procesos metalúrgicos como por ejemplo en la metalurgia del hierro, acero, níquel, manganeso, cromo, cobre, plomo, etc.

2.1.2. Clasificación Tipos de Escorias

Las escorias provenientes de procesos de fundición ferrosos (escorias ferrosas), principalmente en la fabricación de hierro y acero, se pueden clasificar según la materia prima de entrada y según su proceso tecnológico de fabricación. Por ejemplo; en la fabricación de hierro se utiliza mineral de hierro, coque, cal, cal dolomítica como materia prima, y un alto horno como proceso tecnológico. Las escorias que se generan en este proceso se les denominan escorias de alto horno; en inglés llamadas blast furnace slag (BFS).

En la fabricación de acero, a diferencia de la fabricación de hierro, se pueden utilizar distintos hornos, identificando principalmente 3 tipos de procesos; horno básico a oxígeno (LD-convertidor o BOS o BOF), horno Siemens-Martin y horno de Arco Eléctrico, en inglés llamado Electric Arc Furnace (EAF). Las materias primas utilizadas principalmente utilizadas son chatarra, pequeñas cantidades de hierro, ferroaleaciones cal, cal dolomítica y carbón.

Las escorias que se generan en el proceso de fabricación de acero son la escoria negra y la escoria blanca, llamadas también escoria oxidante y escoria reductora respectivamente debido a las dos etapas de escorificación que se producen en el proceso de fusión y afino. Las escorias negras son llamadas también escoria EAF, ya que provienen del horno de arco eléctrico (electric arc furnace); y las escorias blancas son llamadas también escoria LF ya que provienen del horno cuchara (ladle furnace).

En resumen la clasificación general de las escorias se puede realizar según el tipo de fabricación, para este caso de hierro o acero, y según del horno del cual procede (figura 1). Es común también que se clasifiquen las escorias según el tipo de enfriamiento; esto sucede con las escorias de altos hornos que pueden ser enfriadas al aire, de forma expandida (escoria paletizada) o por medio de un enfriamiento rápido, que genera las escorias granuladas (GBFS). Las escorias de acería son enfriadas, generalmente al aire libre (De Lima L, 1999), aunque también se les puede aplicar rociamiento con agua para agilizar su enfriamiento.

El presente trabajo se trabajará sólo con el proceso de fabricación de acero y la generación de escorias a partir del reciclaje de chatarra en hornos de arco eléctrico.



Figura 1. Clasificación de las escorias según procedencia. (Fuente: De Lima L, 1999)

2.1.3. Características de las escorias generadas en la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico

Como ya se mencionó anteriormente las escorias generadas en este proceso son dos, la escoria negra u oxidante y la escoria blanca o reductora, producidas en el proceso de fusión y afino, respectivamente. Estas dos escorias poseen características muy distintas. La escoria oxidantes es de colores muy oscuros (figura 2), de aspecto poroso, morfología irregular, cúbica y de fractura puntiaguda. Presentan elevada masa específica, gran dureza y absorción de agua media (Hernández L.,2007). En cuanto a su composición los elementos mayoritarios de la escoria negra son hierro, calcio, silicio y aluminio.

En cambio la escoria reductora es de color blanquecino, contiene gran cantidad de finos por lo que al tocarla se disgrega estando generalmente como forma de polvo (figura 3). En cuanto a su composición sus elementos mayoritarios son calcio y silicio.

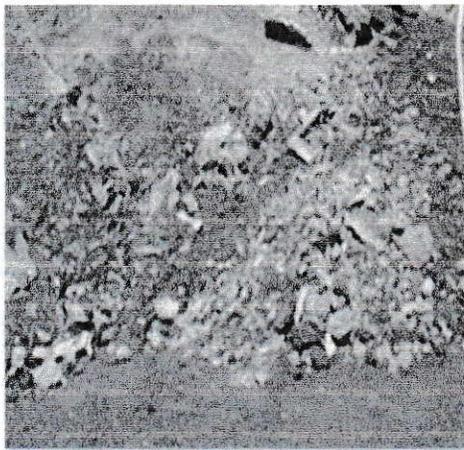


Figura 2. Imagen Escoria Negra

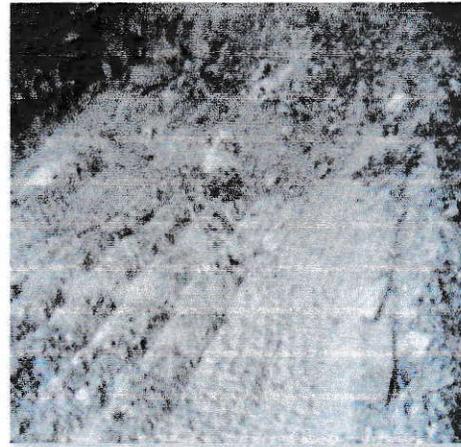


Figura 3. Imagen Escoria Blanca

2.1.4. Proceso de generación de escorias en la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico

Como se mencionó anteriormente, la principal materia prima utilizada en la fabricación de acero en horno de arco eléctrico es la chatarra. Esta materia prima tiene la cualidad de ser reciclable en su totalidad e infinitas veces, y se obtiene de la recolección de materiales con contenido de hierro que pierden su vida útil, o de materiales provenientes de mermas industriales, como por ejemplo, piezas de hierro o acero rechazadas por controles de calidad.

Los procesos de fabricación de acero se pueden clasificar en general en dos etapas: la primera denominada metalurgia primaria o fusión que se inicia en el horno de arco eléctrico donde se funden las chatarras por una corriente eléctrica; y la segunda denominada metalurgia secundaria o afino, que se inicia en el horno de arco eléctrico y finaliza en el horno-cuchara en donde se afina el líquido fundido (figura 4).

2.1.5. Descripción y especificaciones químicas de la generación de escoria en los procesos de fusión y afino

El proceso de fusión comienza en el horno de arco eléctrico. Este horno es cilíndrico y está recubierto por refractario, para protegerlo de las reacciones químicas, dispone de una bóveda por donde se alimentan las materias primas por medio de una cesta, una compuerta para desescoriar y una piqueta que se utiliza para colar el acero.

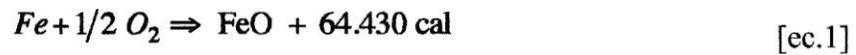
2.1.5.1. Proceso de Fusión

En el proceso de fusión se obtiene el acero líquido y la *escoria negra*, que se presenta de forma líquida sobre la superficie del acero líquido. El proceso de fusión contempla tres fases: oxidación, desfosforación y formación de la escoria negra.

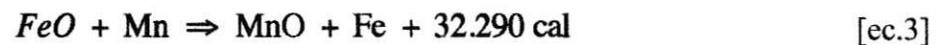
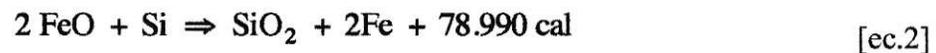
Oxidación

El proceso de fusión comienza cuando se carga la chatarra junto con los fundentes (cal y cal dolomítica) al horno de arco eléctrico. Luego de esto se cierra el horno y se hace saltar el arco eléctrico, que fundirá la chatarra mediante la alimentación de energía eléctrica a los electrodos del horno y oxígeno. Esta fase corresponde a la *fase oxidante*.

La primera oxidación que ocurre es la del hierro ya que se encuentra presente en mayor cantidad en la chatarra. La reacción de oxidación es la siguiente:



Posteriormente el óxido de hierro oxida al silicio y manganeso según las siguientes reacciones:



Las reacciones de oxidación de hierro, manganeso y silicio son fuertemente exotérmicas, por lo que se produce un aumento brusco de la temperatura de fusión (a 1600 °C) y por consiguiente una disminución del consumo de energía eléctrica. Los óxidos de hierro, manganeso y silicio pasan a formar parte de la *escoria negra* que cubre el líquido fundido.

Cuando se ha oxidado prácticamente todo el silicio y la mayoría del manganeso, la escoria tiene gran cantidad de FeO libre. La adición de carbón en polvo permite la reducción del FeO presente en la escoria según la siguiente reacción química:

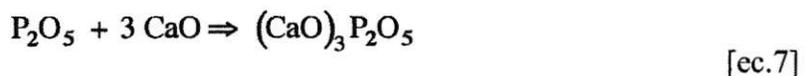
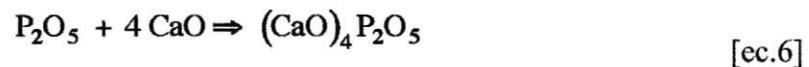
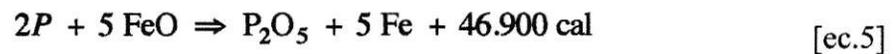


El desprendimiento de monóxido de carbono (CO)_(g), produce lo que se conoce como

hervido del baño, que ayuda a homogeneizar la composición y temperatura del baño, y facilitar la eliminación de gases. Además el paso del monóxido de carbono (CO)_(g) por la escoria a la superficie del baño, produce la escoria espumosa que facilita la penetración de la escoria en los electrodos incrementando también la eficiencia energética (ya que la escoria actúa como puente energético entre los electrodos y el líquido fundido).

Desfosforación

Junto a la oxidación comienza la fase de la desfosforación. La presencia de fósforo es perjudicial porque se presenta disuelto en el líquido fundido y se manifiesta como fragilidad del acero en frío. Esta fase sucede cuando se añade cal al horno, y ocurre según las siguientes reacciones químicas:



El fósforo oxidado pasa del líquido fundido a formar parte de la escoria.

A continuación de las dos fases anteriores, se procede a la extracción de la escoria. Este proceso se realiza sin ninguna dificultad ya que existe gran diferencia de densidades entre la escoria negra (2,9 g/cm³) y el acero líquido fundido (7400 Kg/cm³). La escoria se descarga por una compuerta del horno a un túnel de vaciado, y el acero líquido que queda se alimenta al horno de afino (horno cuchara).

2.1.5.2. Proceso de Afino

El proceso de afino o de metalurgia secundaria contempla las fases de desoxidación y desulfuración.

Desoxidación

En esta fase el acero líquido que viene del proceso de fusión se cubre inmediatamente con una escoria reductora (formada por cal y carbón). Esto se realiza para reducir los óxidos metálicos del líquido fundido; así el líquido fundido oxida la escoria, y ésta reduce al líquido fundido.

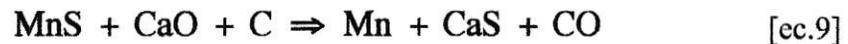
La desoxidación definitiva del acero se consigue cuando se añaden ferroaleaciones de silicio y manganeso, primero óxido de manganeso (MnO) y luego de sílice (SiO_2), que tienen tendencia a cohesionarse entre sí dando lugar a partículas de gran tamaño que suben a la escoria.

Esta fase se realiza con objeto de evitar la efervescencia del líquido fundido y el desprendimiento de gases, que puede dar lugar a porosidades durante el enfriamiento y solidificación del acero.

Desulfuración

Paralelo a la fase anterior ocurre la desulfuración del líquido fundido. La presencia de azufre es perjudicial porque forma sulfuro de hierro (FeS) que funde a $1.190\text{ }^{\circ}C$ y forma con el hierro un eutéctico cuyo punto de fusión es muy bajo ($988^{\circ}C$). El acero resultante si es forjado o laminado a temperaturas comprendidas entre $1.000-1.300\text{ }^{\circ}C$ presenta fragilidad en caliente apareciendo numerosas grietas durante el proceso.

La desulfuración se produce con el simple contacto del líquido fundido con una cantidad suficiente de óxido de calcio (cal) y carbón. Esto ocurre según las siguientes reacciones:



La desulfuración es más eficaz cuanto más básica sea la escoria y menor sea el contenido de óxido de hierro en la misma.

Posterior a esta etapa se realizan análisis al líquido fundido para cerciorarse que el acero obtenido tiene la composición adecuada y que la temperatura del líquido fundido es la correcta. En caso de que el análisis entregue resultados diferentes a los esperados, se ajusta de la composición de la colada, añadiendo las cantidades adecuadas de los elementos que faltan.

Antes de colar el líquido fundido se vuelve a desescoriar, eliminando la *escoria blanca*. En este proceso finaliza la operación de afino y comienza el proceso de colada continua, que posteriormente permite producir palanquillas que son laminadas para producir acero.

Finalmente una vez vaciado el metal líquido, el horno se vuelve a su posición horizontal y comienzan las operaciones para la siguiente operación de fusión.

En general se calcula que aproximadamente por cada tonelada de acero se generan de 110 a 150 Kg de escoria negra y de 20 a 30 Kg de escoria blanca.

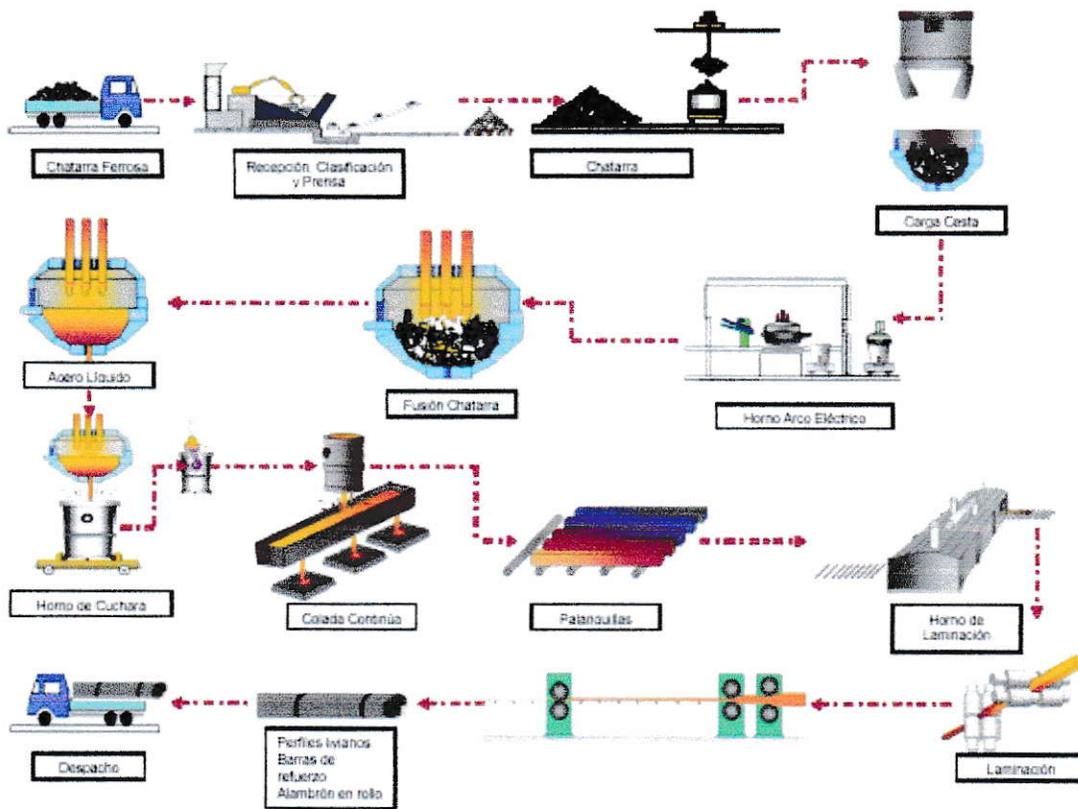


Figura 4. Proceso general de fabricación de acero a partir de chatarra.

2.1.6. Empresa GERDAU AZA

Gerdau AZA S.A. es una siderurgia de clase mundial. Pertenece al Grupo Gerdau, uno de los conglomerados siderúrgicos privado más importante de América. Cuenta con más de cincuenta años de experiencia en el sector siderúrgico chileno desarrollando productos de alta calidad. Su actividad está orientada a la producción de barras y perfiles de acero laminado para abastecer a diversos sectores de la economía como la construcción civil y la industria metalmecánica.

Gerdau AZA posee dos plantas productivas ubicadas en el sector industrial de la zona norte de Santiago, específicamente en las comunas de Renca y Colina. Es el principal reciclador de chatarra en Chile, recolectando en el último año alrededor de 480.000 toneladas distribuidas a lo largo de todo país y se proyecta para el bicentenario con una recolección de 540.000 toneladas de chatarra al año.

Gerdau AZA como productores de acero, no sólo se preocupan de desarrollar productos de calidad, sino también de la protección del medioambiente. Cumple la legislación ambiental vigente en el país y adopta otros compromisos ambientales voluntarios con el fin de mejorar continuamente su desempeño ambiental. Por ello sus esfuerzos en el área medioambiental están enfocados a la gestión integral de sus residuos, procurando siempre minimizar, recuperar y reciclar éstos, teniendo como última alternativa la disposición final de manera responsable en lugares autorizados para ello. Es en este contexto es que surge uno de los objetivos de la empresa; el de estudiar si existe experiencia nacional e internacional respecto de la valoración de las escorias de horno de arco eléctrico para evaluar cuál es la factibilidad de valorizar este residuo en nuestro país.

2.2. Desarrollo Histórico de la Valorización de Escorias

2.2.1. Contexto Nacional

En nuestro país existe poca información documentada de la historia del uso de las escorias. La información existente proviene de ciertos estudios técnicos realizados por empresas del rubro en conjunto con universidades que han querido evaluar la posibilidad de reciclar o valorizar este residuo. Un ejemplo de ello son los siguientes estudios “Escorias de cobre en cementos” (Orizola S, 2006), el que analiza el comportamiento de las principales propiedades de los morteros de cemento con adición de escoria de cobre (fundición Caletones) en reemplazo de cemento Portland; “Análisis Geomecánico de Escorias de Acería. Posibilidades de Usos en Obras Viales (Valenzuela M et al.) que estudia las escorias de alto horno provenientes de la Siderúrgica Huachipato para usos en carreteras. Además de estos estudios existe un acuerdo de producción limpia sector de fundiciones (II APL, fundiciones, 2004) que pretende dar una orientación, mediante una guía técnica, respecto del manejo de las escorias de fundiciones y sobre las posibilidades de reciclaje de este residuo. Sin embargo este documento sólo entrega una visión general sobre el reciclaje de las escorias por lo que no constituye un real apoyo técnico para el estudio del reciclaje de este residuo.

Las única experiencia de reciclaje conocida en nuestro país está relacionada con la escoria de alto horno. La Dirección de Vialidad de la región del Bio Bio utiliza escoria de alto horno (BFS) proveniente de la industria de Huachipato para la construcción y mantenimiento de caminos. Específicamente esta escoria se utiliza como carpeta de rodado, y ha tenido excelentes resultados cuando se aplica con una buena compactación y alto contenido de humedad, sobre todo en zonas de fuertes pendientes, ya que permite un gran adherencia a los neumáticos de vehículos. La empresa que comercializa esta escoria es Harsco Metals Chile S.A. y está clasificada como un material inerte. Desde el punto de vista ambiental esta escoria fue sometida a análisis de test de lixiviación TCLP

realizada por el Servicio de Salud de Talcahuano, cumpliendo con los valores máximos permisibles establecidos en el DS 148 (Solicitud N° 9349, Ley de Transparencia). Es necesario considerar que la composición química de la escoria de alto horno es diferente a la composición química de la escoria de horno eléctrico, por lo que no sería adecuado comparar de forma directa este caso con el de la escoria de horno de arco eléctrico.

Este panorama refleja que en nuestro país sólo existen experiencias de utilización de escoria de alto horno; y que los estudios respecto del uso de escoria de horno de arco eléctrico es un tema en reciente desarrollo impulsado por algunas empresas del rubro de fundiciones interesadas en la gestión integral de sus residuos.

El mayor desarrollo del mercado del reciclaje de residuos, como las escorias de horno de arco eléctrico, depende de la cooperación entre las empresas interesadas, de los estudios técnicos que avalen su utilización y en gran medida de la existencia de una institucionalidad acorde al desafío de valorizar este residuo, incluyendo la labor del Estado para promover su uso adecuado y seguro.

2.2.2. Contexto internacional

Actualmente la necesidad de máxima reutilización y reciclaje de los residuos por razones económicas y medioambientales ha llevado a un rápido desarrollo del reciclaje y la utilización de las escorias. En el contexto internacional este residuo es considerado como un residuo que posee un valor potencial, el cual se puede reciclar para otros procesos productivos, especialmente el de la construcción. Las evidencias del uso de las escorias como árido para la construcción son variadas y se expresan en el amplio mercado internacional que existe actualmente. Un ejemplo de ello se puede apreciar en la creación de distintas asociaciones de escorias a nivel internacional las cuales actúan como medio de difusión de información, una instancia de participación activa de diferentes actores respecto de la generación, procesamiento y uso de este residuo, así

como también un medio para la participación de entidades académicas y gubernamentales que puedan aportar al desarrollo del reciclaje de las escorias (Anexo 1). La participación y cooperación de este tipo de asociaciones es antecedida por la historia de la producción del acero y la generación de este residuo, el cual varía de país en país dependiendo de cada proceso productivo, el tipo de economía y sus legislaciones vigentes, entre otros factores.

A continuación para tener una visión general se dará una breve descripción de la evolución o historia que ha tenido la generación y el uso de las escorias de acero en distintos países del mundo, como Alemania, España, Australia, Nueva Zelanda, Estados Unidos y Brasil.

➤ **Comunidad Económica Europea**

En Europa, en el año 2004, la cantidad de escoria generada fue aproximadamente de 15 millones de toneladas, de las cuales un 62% fue producida en altos Hornos, 29% en horno de arco eléctrico y un 9% en metalúrgica secundaria. En cuanto a su utilización el 72 % de las escorias producidas se utilizan en los campos que se muestran en la figura 5.

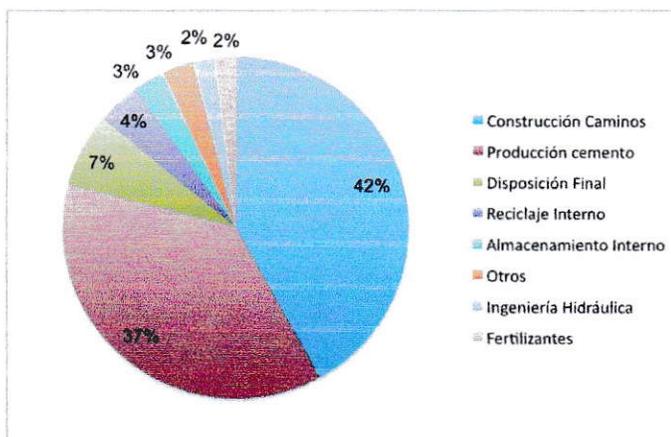


Figura 5. Uso de escorias de acero en Europa. Año 2004.

Actualmente la cantidad de escoria generada alcanza a los 45,5 millones de toneladas, y su utilización en los campos antes señalados varió significativamente, aumentando el

reciclaje de escorias en la producción de cemento, disminuyendo el reciclaje interno, almacenamiento interno y la disposición final. En la figura 6 se pueden apreciar los cambios antes señalados.

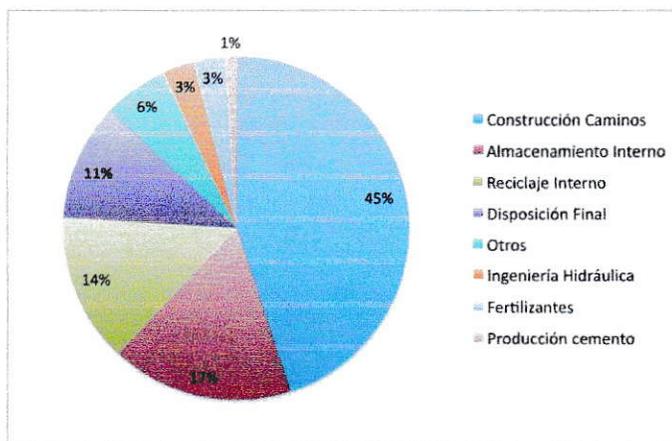


Figura 6. Usos actuales de escoria de acero en Europa.

Cabe destacar que las tasas de utilización mostradas en las figuras anteriores varían de país a país dependiendo de las materias primas que ingresan al proceso productivo y el tipo de tecnología utilizada en fabricación de acero que generan distinto tipo y calidad de escorias, además de las condiciones del mercado de los áridos naturales y reciclados. En el caso de las escorias EAF, las principales aplicaciones son como agregados para la construcción de caminos y para la producción de cemento (EUROSLAG, 2006).

Dentro de la Comunidad Económica Europea, Alemania y España se destacan por poseer grandes avances en materia de reciclaje de escorias de horno de arco eléctrico.

➤ **Alemania**

El uso de la escoria de acero como material de construcción tiene una larga tradición en Alemania. Desde fines de siglo XIX, la escoria de alto horno se utilizó para la producción de cemento. Hoy en día las escorias más utilizadas provienen mayormente de los hornos de arco eléctrico. En la figura 7 se puede apreciar el uso de escoria de acero en Alemania durante el año 1999.

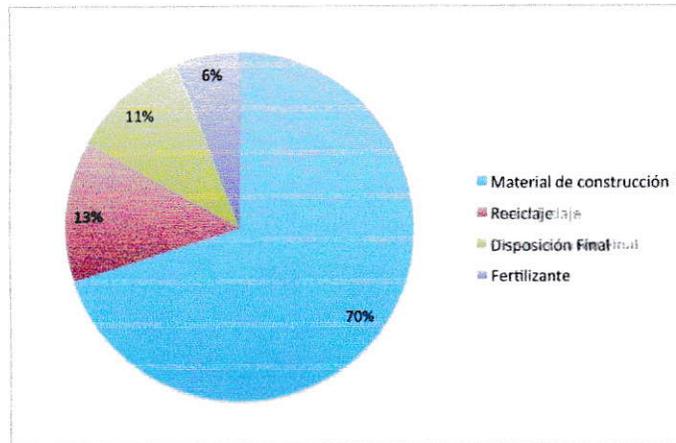


Figura 7. Utilización de escorias de acero en Alemania. Año 1999.

De la figura 7 se puede apreciar que la aplicación más importante (70 %) en la utilización de escorias es como material de construcción, específicamente para construcción de caminos (24,9%), carreteras (22,1%), movimientos de tierra (18,7%) y estructuras hidráulicas (4,3%) (Apfel Jens, 2007).

En una de las principales acerías de Alemania llamada Badische Stahlwerke (BSW) donde se fabrica acero en hornos de arco eléctrico, se producen aproximadamente 280.000 toneladas de escoria negra y 28.000 toneladas de escoria blanca al año. Debido a que la disposición final de las escorias en este país es muy costosa, esta firma decidió estudiar el reciclaje de las escorias para construir una planta de tratamiento con el fin de obtener un producto que pudiese ser valorizado. Para implementar esto determinaron las características químicas y técnicas del residuo para compararlas con los materiales naturales utilizados en la construcción.

Actualmente BSW comercializa la escoria negra (EAF) como capas de sub-bases de carreteras, en mezclas de asfalto, en usos para ingeniería hidráulica y la compactación de caminos rurales. En la figura 8 y 9 se puede apreciar la aplicación de escoria EAF en dos de sus mayores usos (Apfel Jens, 2007).



Figura 8. Capa de sub-base hecha con escoria EAF de BSW.



Figura 9. Capa de asfalto hecha con escoria EAF de BSW.

➤ **España - País Vasco**

La Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV) es una zona representativa por su especialización en el sector siderúrgico la cual ha tenido una gran evolución en la utilización de hornos de arco eléctrico para la fabricación de distintos tipos de acero. A partir del año 1904 la CAPV comenzó a fabricar acero en Hornos de Arco Eléctrico, y en la actualidad la totalidad del acero producido se fabrica en tales hornos.

Un total de 14 acerías fabrican 5,2 millones de toneladas anuales de acero, 660.000 toneladas de escorias negras y 175.000 toneladas de escorias blancas, al año. Considerando que la cantidad total de escorias generadas en la CAPV es de 835.000 ton/año, es necesaria la existencia de grandes superficies de suelo, lo cual, dada la

pequeña superficie 20.664 Km² (36 veces menor que la superficie de Chile) y su elevada densidad de población, hace que el problema sea importante al no encontrar espacios en los que disponer tal cantidad de residuos. Esto impulsó al gobierno y a los privados a realizar estudios sobre las condiciones técnicas y medioambientales del reciclaje de escorias para la promoción del reciclaje de este residuo. Como resultado de esto se obtuvo una normativa que regula el uso de las escorias como material de construcción, específicamente como explanada, bases, sub bases y capa de rodadura (mezcla asfáltica) de carreteras (figura 10), con respecto a ciertos requisitos ambientales. (Libro Blanco para la minimización de residuos y emisiones, Escorias de Acería, 1999).

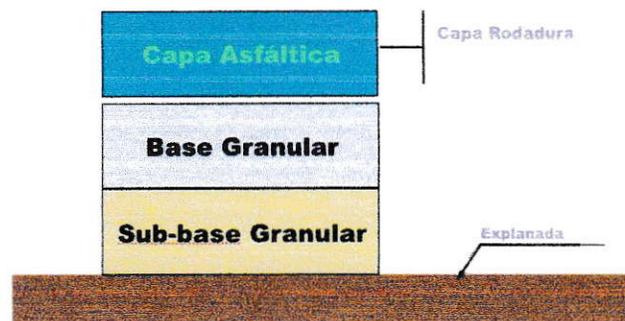


Figura 10. Esquema de las diferentes partes de una carretera.

➤ **Oceanía- Australia y Nueva Zelanda**

En Australia y Nueva Zelanda durante el año 2000 se produjeron aproximadamente 3,1 millones de toneladas de escorias de hierro y acero, reciclándose entre un 70-75 % de ellas. En el año 2008 la producción de escoria de hierro y acero fue aproximadamente 3,4 millones de toneladas, de las cuales el 80 % (2,72 millones de toneladas) fue reciclada para productos de cemento, construcción de carreteras y en construcción civil (figura 11).

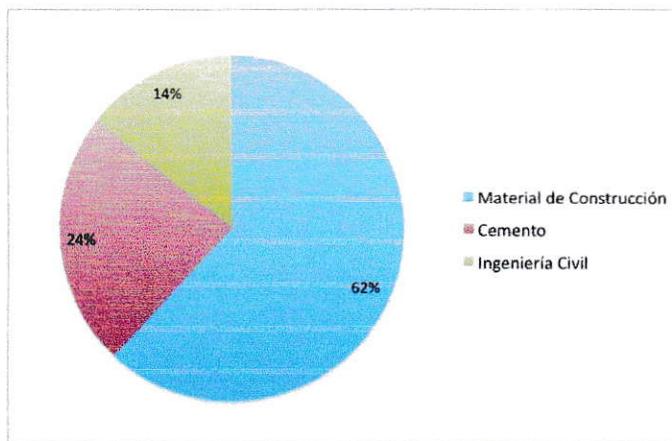


Figura 11. Utilización de escoria en Australia y Nueva Zelanda.

De la producción de acero para el año 2008, la generación y uso de las escorias de horno de arco eléctrico (EAF) se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Usos escoria negra de horno de arco eléctrico, en Australia y NZ. Año 2008.

PRODUCCIÓN ESCORIA 2008	EAF (ton)
Producción total	181.200
No Usado (acumulado)	54.213
Total usado	126.987
USOS ESCORIA	EAF (ton)
Base/Sub-base carreteras	97.987
Aplicación Minería	29.000
Otros	0
USO TOTAL	126.987

➤ Norte América - Estados Unidos

La primera utilización de la escoria en la historia estadounidense fue en el año 1620 cuando era utilizada como lastre de los buques de esa época. Posteriormente ya en el año 1880, la escoria se comenzó a utilizar como bloques para la pavimentación de calles y como balasto para los ferrocarriles.

Dado que la producción de escoria en los EEUU comenzaba a crecer, también creció la necesidad de encontrar nuevas aplicaciones a este árido. Actualmente en el mercado

estadounidense, la escoria es considerada como un residuo valioso y extremadamente versátil para poder utilizarlo como material de construcción. Específicamente, la escoria de horno de arco eléctrico se utiliza como agregado de asfalto, en capas de sub-base y base de carreteras. La clasificación de los usos de las escorias de acero se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Usos comunes de escorias de acero en EEUU.

ESCORIA DE ACERO
Agregado para asfalto
Rellenos
Materia prima para manufactura de cemento
Lastre de ferrocarriles
Base de caminos/carreteras.
Gaviones/escolleras

➤ Sudamérica - Brasil

Desde 1952 que en Brasil se reciclan escorias de acero. Desde ese entonces este mercado se ha ido desarrollando cada vez más aumentando la generación de escorias y su uso en la construcción. En el año 1998 se produjeron 5,3 millones de toneladas (Mt) de escorias de las cuales el 95% correspondían a escoria granulada de alto horno, el 1,2% (700.000 ton) a escorias de horno de arco eléctrico y el 3,8% a otras escorias. De la escoria granulada de alto horno (GBFS) se reciclaron 5 millones de toneladas en la industria del cemento, y de la escoria de horno de arco eléctrico se reciclaron 476.000 toneladas correspondiente al 68% de la generación (GSM,2006). Para el año 2006 las escorias de acero producidas fueron 4,6 millones de toneladas, correspondiente entre 12-15 % del la producción de acero en Brasil.

Como se aprecia la generación mayoritaria de escorias son las provenientes de los altos hornos teniendo una gran participación su reciclaje en la industria del cemento. Aunque

la generación es menor en las escorias de horno de arco eléctrico estas se reciclan mayormente en carreteras, lo que indica que el mercado de ambas escorias es distinto, y por lo tanto el uso de estas escorias (de horno eléctrico) se puede potenciar en su reciclaje en un 100%.

Ejemplos de las aplicaciones antes mencionadas han sido llevadas a cabo por la empresa siderúrgica BMP Siderúrgica S.A donde generan escorias de horno de arco eléctrico y la reciclan como lastre de carreteras o como capa estabilizante de patios industriales. En la figura 10 se puede apreciar la aplicación de escoria EAF en el costado de una carretera en una ciudad cercana a Juiz de Fora en el estado de Minas Gerais, Brasil.

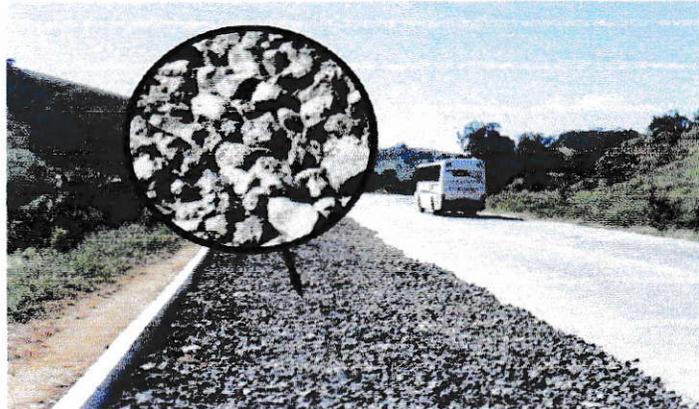


Figura 12. Utilización de escoria EAF en una carretera de Juiz de Fora.

III.RESULTADOS

3.1. Experiencias de valorización de escorias de horno de arco eléctrico

Como se menciona anteriormente la historia del uso de las escoria es vasta y se desarrolla ampliamente en el mercado de la construcción. A continuación se presenta un resumen de investigaciones en relación a las experiencias de utilización de escoria de horno eléctrico.

1. Application of electric arc furnace slag (Rastovčan- Mioč A y col.)

Esta investigación va dirigida a establecer los potenciales usos de la escoria en diferentes actividades. Se examinaron los parámetros más relevantes para clasificar este residuo (material) como mejorador de suelos y se investigó la posibilidad de utilizar la escoria como aditivo para cemento. Los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas concluyen que según las propiedades físico-mecánicas, los potenciales usos de la **escoria negra** serían en la construcción de carreteras como:

- Construcción de presas y camas.
- Capas de Rodamiento (capa de rodadura) y capas de amortiguación.
- Capas de material granular.
- Capas de asfalto para pavimento.

Concluye también que para realizar una evaluación idónea de la mezcla de escoria con cierto tipos de asfaltos es necesario realizar análisis a la mezcla de acuerdo al uso previsto. Se concluye también que la escoria puede ser utilizada en un 15% como aditivo para el cemento.

2. Tipificación de escorias producidas por la siderúrgica de horno de arco eléctrico como material utilizable en la construcción [de Luxán, 1995]

El autor para establecer los posibles usos de las **escorias negras** de horno eléctrico realiza un estudio de las características físicas, químicas y mineralógicas de la escoria, así como también un análisis de su comportamiento y reactividad.

Mediante el análisis de los ensayos realizados se obtuvo que las escorias se podían utilizar como:

- Áridos en bases y sub-bases
 - Áridos en mezclas asfálticas
 - Adición en mezclas con cemento Portland para la fabricación de hormigón.
3. Utilización de escorias de acería como sustitución al cemento Portland. Un análisis a la mejora de la propiedades del hormigón. [Geyer et al, 1997]

En este estudio se investigan las posibilidades de utilización de escorias de acería y los factores limitantes de la utilización de escorias como adición al cemento. Por medio de los ensayos realizados se concluye que un 5% de sustitución de escoria en el cemento disminuye la carbonatación en relación al hormigón convencional, cuando se utiliza una granulometría menor a 0,074 mm, lo que ayudaría a mejorar la durabilidad de estructuras. Concluye también que una adición del 70% de escoria al cemento es inviable producto de la carbonatación.

4. Valorización de escorias procedentes del proceso de fabricación de acero en horno de arco eléctrico (de Urbina et al., 1996).

Se presenta un enfoque de los aspectos técnicos y ambientales de las escorias obtenidas en las acerías de la Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV). La evaluación técnica establece que la mayor angulosidad, resistencia al impacto y pulimiento que

presenta la **escoria negra** estudiada, posee las propiedades idóneas para utilizarla como árido en mezclas bituminosas de capas de carreteras (mezclas asfálticas). La evaluación ambiental se realizó de acuerdo a la normativa sobre valorización de escorias, la que establece los criterios de valoración basados en los resultados de test de lixiviación. Los valores obtenidos de los elementos lixiviables no superaban los valores establecidos en la norma, por lo tanto es aceptable su utilización desde el punto de vista ambiental como material granular para la construcción.

3.2. Alternativas de valorización de las escorias de horno de arco eléctrico.

Según la información antes recopilada las mayores alternativas de valorización de las escorias de horno de arco eléctrico estarían dadas mayormente para la **escoria negra**, ya que por sus características físicas se asemeja mayormente a un árido natural; no así la escoria blanca que posee mayor cantidad de finos, por lo que sus usos son más reducidos.

Los usos de la escoria negra están orientados en su aplicación como áridos en el rubro de la construcción de carreteras, y en su adición a mezclas con cemento para la fabricación de hormigón. En la tabla 3 se resumen las mayores aplicaciones de la escoria negra según la bibliografía consultada.

Tabla 3. Resumen de los mayores usos de la escoria negra.

TIPO ESCORIA	MAYORES USOS	
NEGRA	Árido para	Bases
		Sub.Bases
		Mezclas Asfálticas
	Mezclas con cemento Portland para fabricar hormigón	

En síntesis, y luego de la selección de los mayores usos que podría tener la escoria negra según las experiencias internacionales, es necesario considerar los requisitos técnicos y ambientales que deben ser analizados mediante ensayos de laboratorio y de acuerdo a las normativas aplicables. En la siguiente sección se realizará una recopilación de las propiedades técnicas y ambientales mínimas que se deben considerar al momento de estudiar estas escorias.

3.3. Consideraciones técnicas y ambientales de las alternativas de valoración.

➤ Consideraciones Técnicas

Considerando que la escoria negra es utilizada como árido para construcción de carreteras y en su adición en mezclas con cemento para la fabricación de hormigones, es necesario identificar cuál es la función que cumple el árido en éstas aplicaciones. En general los áridos utilizados para la fabricación de hormigón contribuyen en la estabilidad del volumen, la resistencia y durabilidad del material, por lo que las características de los áridos influyen notablemente en las propiedades de los hormigones (Mehta y Monteiro, 1994). En el caso de los pavimentos, el desempeño de estos depende de su condición estructural y funcional, teniendo mucha importancia las propiedades del árido en la capacidad de soporte del pavimento (MOP).

Para determinar qué tipo de uso se le puede asignar a un árido es necesario hacer primero una caracterización previa para saber sus propiedades. Las principales propiedades a ser evaluadas, de acuerdo a la literatura consultada, son las siguientes:

1. Caracterización Física y Mecánica:

- Forma
- Densidad
- Masa específica
- Análisis Granulométrico
- Absorción de agua

- Resistencia a la fragmentación
- Resistencia a compresión
- Resistencia a los ciclos de hielo-deshielo
- Resistencia al desgaste (test de los Ángeles)
- Capacidad de soporte CBR

Cabe señalar que los ensayos de las propiedades antes descritas se pueden desarrollar en su totalidad o parte de ellos, según el uso que se le desee dar al árido.

2. Caracterización Química y Mineralógica:

- Composición Química
- Composición Mineralógica

➤ **Consideraciones Ambientales**

Considerando que la producción de acero posee distintas materia primas de entrada, especialmente en la fabricación de acero por reciclaje de chatarra, la cantidad de elementos presentes en la composición de la escoria es variada. Por ello es necesario tener en cuenta que este residuo puede contener distintos niveles de concentración de metales solubles que pueden transportarse al suelo debido al contacto con fuentes de agua, como lluvias o aguas superficiales. A este proceso de transporte y disolución de elementos se le denomina lixiviación, y su conocimiento es de real importancia ya que los metales lixiviados presentan un alto tiempo de persistencia en el suelo lo que implica un equilibrio dinámico con la hidrosfera, atmósfera y biósfera, y una alteración por tanto en los ecosistemas (Huang, 1999).

En general el contenido total de un contaminante en un residuo, no es lo más decisivo en la contaminación del suelo, sino su capacidad de ser incorporado a éste por medio de las aguas, es decir por medio del proceso de lixiviación. Cuando un residuo sólido está

en contacto con el agua, algunos de sus constituyentes se disolverán *parcial o totalmente* en ella creándose un lixiviado o extracto. La concentración de contaminantes en este lixiviado o extracto dependerá entonces de la *disponibilidad o cantidad disponible* de un elemento para ser lixiviado. Esta disponibilidad analizada en condiciones extremas permite conocer las concentraciones máximas de un contaminante que lixiviarán a largo plazo (Hidalgo y col, 2005).

Un proceso de lixiviación no sólo puede ocurrir en un residuo, sino que también en cualquier material aplicado en el suelo, en superficie o en contacto con una fuente de agua. Los factores determinantes que controlan este proceso dependen de dos tipos de mecanismos; físicos y químicos, los cuales son comunes para casi todos los materiales como por ejemplo: suelo, lodos, sedimentos, residuos industriales, materiales de la construcción, etc (Hidalgo y col,2005). Si se quiere utilizar entonces un residuo, como la escoria para ser parte de una mezcla asfáltica o en mezcla con cemento para fabricar hormigón, es necesario considerar que este residuo pasaría a formar parte de un material, por lo que sería adecuado considerar estos factores al momento analizar la lixiviación.

En general para la aplicación de la escoria se pueden identificar dos tipos de materiales: monolíticos o granulares. Los materiales monolíticos presentan un mecanismo de liberación controlado por *difusión*, y los materiales granulares un mecanismo controlado por *percolación*. Estos comportamientos se muestran en las siguientes figuras 12 y 13.

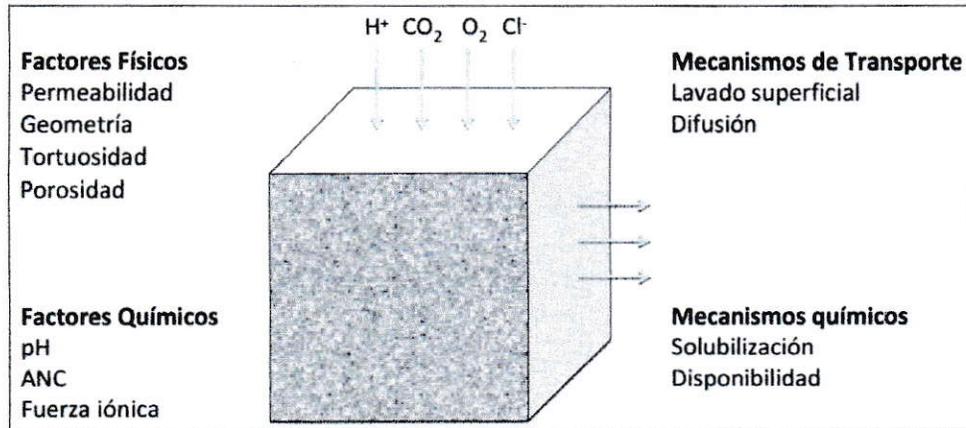


Figura 13. Factores que influyen la liberación de contaminantes en un material monolítico. (Van der Sloot, 2004).

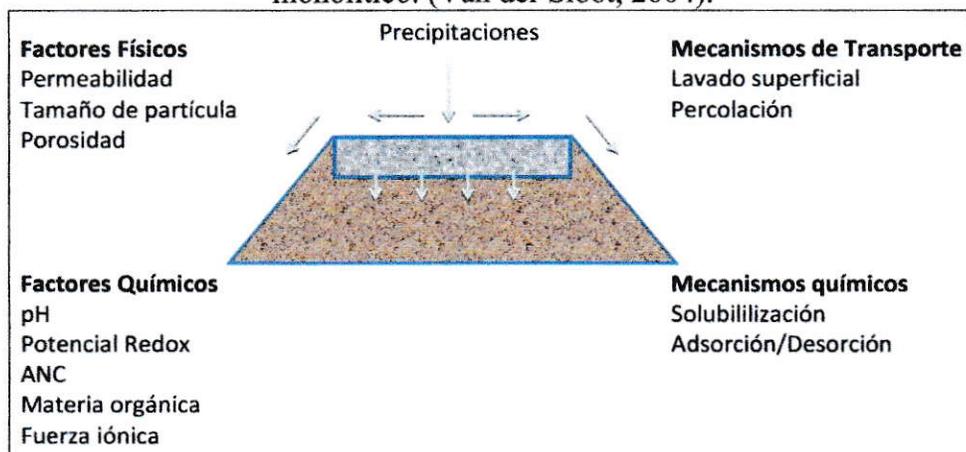


Figura 14. Factores que influyen la liberación de contaminantes en un material granular (Van der Sloot, 2004)

Estos mecanismos de transporte y los factores químicos que afectan el proceso de lixiviación en materiales monolíticos y granulares, se han aplicado para crear análisis como los ensayos o test de lixiviación en condiciones de laboratorio para poder determinar el comportamiento del material y cuantificar la extractibilidad de constituyentes peligrosos como: metales o compuestos orgánicos volátiles (COV's), desde el material al medio en estudio.

Desde el punto de vista económico, sería ideal contar con un test estandarizado de lixiviación y único para caracterizar la peligrosidad o toxicidad de los materiales, pero en la realidad esto no es posible ya que el test debe simular las condiciones locales, las cuales pueden ser muy variadas tanto por las propiedades del residuo, el medio físico en

que es manejado o utilizado, la localización, etc (Rihm A. y col,1998). Es por este motivo que existen distintos test de lixiviación que simulan diferentes escenarios para evaluar el comportamiento de los residuos y los materiales compuestos por el reciclaje de residuos.

Para tener una visión general, a continuación se describirán los principales test de lixiviación que se utilizan a nivel internacional y los utilizados a nivel nacional.

3.4. Tipos de ensayos de lixiviación utilizados a nivel internacional

A nivel internacional existe una gran cantidad de test de lixiviación que evalúan el comportamiento ambiental de un residuo o un material. Cada uno posee distintas características en relación a los factores físicos y químicos que se desean analizar y de acuerdo a los objetivos buscados. Los ensayos de lixiviación se pueden clasificar de forma general según sus características principales en ensayos de equilibrio, semi-equilibrio, ensayos dinámicos, específicos, etc. Otra forma de clasificación fue elaborada por el comité europeo para la normalización (CEN) dónde clasifican los test de lixiviación en tres niveles según el objetivo final buscado.

1. Ensayos de Caracterización básicos: evalúan las propiedades características y el comportamiento ambiental, a corto y largo plazo, de un residuo o material.
2. Ensayos de Conformidad: evalúan el cumplimiento de los valores de referencia especificados en las normativas. Estos ensayos se basan en el comportamiento de lixiviación identificado en los ensayos de caracterización.
3. Ensayos de Verificación in-situ: se utilizan para obtener un resultado rápido y para confirmar si el residuo es el mismo que ha sido sometido al ensayo de conformidad.
4. A continuación, en la tabla 4 se muestra una clasificación de los tipos de ensayos descritos en distintas normas, de acuerdo a sus características principales y a la clasificación realizada por CEN.

Tabla 4. Clasificación tipos de ensayo de lixiviación utilizados en CEE.

Tipo de Ensayo			Proviene de la Norma	Principales Características*
Nº	Según Características	Según clasificación CEN		
1	Percolación	Caracterización	NEN 7343	Lixiviación para materiales <i>granulares</i> . Relación L/S (total) =10 l/Kg. Tiempo de ensayo 21 días.
2	Difusión	Caracterización	NEN 7345	Lixiviación para materiales <i>monolíticos</i> . Tiempo de ensayo 64 días. pH del líquido lixiviable 4.
3	Disponibilidad	Caracterización	NEN 7341	Relación L/S (total)= 100 l/Kg. Tiempo de contacto 6 horas en total.
4	Disponibilidad oxidativa y no oxidativa	Caracterización	---	Variación del ensayo de disponibilidad. Se evalúa la disponibilidad en condiciones oxidativas (añadiendo un agente oxidante) y en condiciones no oxidativas (sin agente oxidante).
5	Dependencia del pH	Caracterización	---	Evalúa comportamiento químico del contaminante a 8 valores de pH (entre 4 y 12). Tiempo de ensayo 48 horas. Relación L/S (total)= 10 l/Kg
6	Lixiviación	Conformidad	DIN 38.414-S4	Caracterización del material Se realiza en 24 hrs. Relación L/S =10 ml/g
7	Lixiviación	Conformidad	prEN 12.457	Caracterización del material Se realizan en 24. Distintas relaciones L/S

* En el Anexo 2. Se describirán brevemente los procedimientos de análisis de cada test de lixiviación. L/S = relación líquido /sólido

3.5. Tipos de ensayos de lixiviación utilizados a nivel nacional

En nuestro país se utilizan dos test de lixiviación para conocer el comportamiento de elementos potencialmente lixiviables de los residuos, los cuales se aplican de acuerdo a lo establecido en el “Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos” (DS 148). El primero test se conoce como test TCLP o Toxicity Characteristic Leaching Procedure (Anexo 3) y el segundo como SPLP o Synthetic Precipitation Leaching Procedure, ambos fueron diseñados en Estados Unidos por la US EPA en los años ochenta. La función de éstos test es determinar la movilidad de contaminantes, tanto orgánicos como inorgánicos, contenidos en los residuos cuando son dispuestos en el suelo (disposición final), asumiendo escenarios de mal manejo, co-disposición de residuos industriales y domésticos en el mismo sitio, transporte de contaminantes y atenuación natural, percolación de lixiviados en régimen estable, explotación de pozo para agua potable a 500 pies aguas abajo del sitio de disposición del residuo en estudio (Rihm A. y col,1998).

Sin embargo estos test no evalúan el comportamiento ambiental de un residuo cuando éste es reutilizado como subproducto para ser incluido en un uso determinado. Si bien es cierto que el test SPLP o el test TCLP evalúan el comportamiento de un residuo en las peores condiciones de manejo, cuantificando la máxima cantidad de contaminantes que pudiesen lixiviar; sería apropiado que se adopten en nuestro país los test de lixiviación que evalúan el comportamiento ambiental de un residuo cuando es reciclado para formar parte de un nuevo material.

3.6. Normativas y Regulaciones Ambientales

3.6.1. Normativas aplicables en Chile

En el contexto nacional las legislaciones aplicables en materia de residuos se muestran a continuación.

- **Constitución Política Nacional, 1980:** en el artículo 19, numeral 8, se establece el derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación.
- **Ley de Bases Generales para el Medio Ambiente (Ley 19.300):** marco regulador para asegurar las garantías constitucionales relacionadas con el medio ambiente. Esta ley regula los proyectos o actividades que son susceptibles de causar impacto ambiental en cualquiera de sus fases, los cuales deben someterse al sistema de evaluación de impacto ambiental (SEIA).
- **Código Sanitario, Decreto con Fuerza de Ley N° 725 (1967):** constituye un marco regulador desde el ámbito de la salud ambiental. Establece las condiciones de saneamiento y seguridad relativas a la acumulación, selección, industrialización, comercio o disposición final de residuos.

Normas que regulan el manejo de los residuos sólidos industriales:

- **Decreto Supremo N° 594 del Ministerio de Salud:** Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo.
- **Resolución N° 5081 de Servicio de Salud Metropolitano del Ambiente:** Establece Sistema de Declaración y Seguimiento de desechos sólidos industriales.

- **Decreto Supremo N° 148 del Ministerio de Salud, Reglamento Sanitario sobre manejo de Residuos Peligrosos:** Establece como determinar si un residuo es peligroso o no peligroso, considerando los parámetros de toxicidad (aguda, crónica y extrínseca), inflamabilidad, reactividad y corrosividad.

► **Identificación de peligrosidad de la escoria de acuerdo a clasificación establecida por DS 148.**

En el artículo 90 del DS 148 se establecen dos listas de clasificación de residuos; lista A sobre residuos peligrosos y lista B sobre residuos no peligrosos. En la lista B de residuos no peligrosos se encuentran clasificadas:

- Escorias granuladas resultantes de la fabricación de hierro y acero (B1200)
- Escorias resultantes de la fabricación de hierro y acero, con la inclusión de escorias que sean una fuente de TiO_2 y vanadio (B1210).

Por lo tanto según esta clasificación las escorias generadas en el proceso de fabricación de acero en hornos de arco eléctrico, *son residuos no peligrosos*.

Pese a esta clasificación las empresas productoras de acero tienden a caracterizar este residuo como una forma de comprobar mediante análisis cuantitativo que sus residuos no son peligrosos. Esta caracterización se realiza según lo establecido en el artículo 14 del decreto, que establece que un residuo tiene característica de toxicidad extrínseca cuando su eliminación pueden dar origen a una o más sustancias tóxicas agudas o tóxicas crónicas, en concentraciones que pongan en riesgo a la salud de la población. Para comprobar esto, se realiza el test de Toxicidad por Lixiviación, test TCLP (Anexo 3) y se corrobora que las sustancias mencionadas en la tabla del artículo 14, no sobrepasan las concentraciones máximas permisibles.

En párrafo II artículo 52 al 54, del mismo decreto, se regulan las actividades industriales que realizan operaciones de reuso y/o reciclaje. En estos artículos se establece que, el uso de residuos como insumos en cualquier actividad deberá ser informado previamente a la autoridad sanitaria; que la autoridad sanitaria autorizará el reciclaje de residuos siempre y cuando no se produzcan riesgos en la salud humana o el medio ambiente y que, el ministerio emitirá guías técnicas de orientación e información para el manejo de aquellos residuos cuyo reuso y/o reciclaje sea una práctica común.

De acuerdo a lo descrito en estos artículos si se desea realiza reuso y/o reciclaje de un residuo se deberá demostrar que este no es peligroso, según lo establecido en este decreto y pedir los permisos necesarios para llevar a cabo el reuso y/o reciclaje. En el caso de la escoria según la clasificación antes mencionada (la lista B) se tiene que es un residuo no peligroso por lo que no constituiría un riesgo para la salud humana o el medio ambiente , sin embargo para confirmar esto se puede realizar el test de Toxicidad por Lixiviación (test TCLP) y corroborar los resultados de este análisis con los valores establecidos en el artículo 14.

Lo mencionado en los artículos 52 al 54 sobre la emisión de guías técnicas de orientación e información de los residuos cuyo reuso y/o reciclaje es común; en la práctica se dirige en su gran mayoría a los residuos sólidos domiciliarios, por lo que cualquier forma de valorización (reuso y/o reciclaje) de residuos sólidos industriales, puede constituir una práctica poco factible o muy engorrosa de llevar a cabo. Esto se produce también debido a que no contamos con una normativa específica que promueva el reuso o la valoración de residuos (Lira J.,2010).

En la actualidad se está elaborando un borrador de ley que intenta suplir los vacíos del reciclaje y generar las directrices sobre los residuos. Esta ley corresponde a la “Ley General de Residuos y Responsabilidad extendida del productor”, la cual tiene por objeto “establecer un marco jurídico para la gestión integral de residuos, orientado a la implementación de la estrategia jerarquizada, la cual promueva la prevención de su

generación y, si su prevención no es posible, fomenta, en este orden, la reutilización, reciclaje, valorización energética, tratamiento y disposición final, todo ello para efectos de proteger la salud humana y el medio ambiente” (Ley Transparencia.Carta_102.335.). En el artículo 8 de la citada ley se menciona que para aplicar la gestión integral de los residuos, los órganos de la administración del Estado competentes deberán, en el ámbito de sus funciones, proveer la aplicación de la estrategia jerarquizada, así como organizar y promover actividades de comunicación, educación, capacitación, *investigación y desarrollo tecnológico*. Además de ello, establece que un reglamento definirá las especificaciones y normas técnicas para la gestión integral de residuos.

3.6.2. Marco regulatorio y normativas internacionales sobre el uso de escorias

EAF

En el ámbito internacional, los estados miembros de la Unión Europea conscientes del aumento progresivo de los residuos, de su acumulación y de los potenciales problemas que pueden causar al medio ambiente y a la salud humana, desarrollaron medidas para minimizar estos efectos. Sus esfuerzos se han orientado al control del ciclo de vida de los residuos, desde su producción hasta su eliminación, centrándose para ello en la valorización ; así como también en medidas para minimizar la generación de residuos como una forma de prevenir mayores impactos finales.

La evolución de estos esfuerzos se resume actualmente en una política dónde los objetivos se centran en el establecimiento de una jerarquía de gestión consistente en la prevención, reutilización, reciclaje, recuperación y eliminación controlada de los residuos, permitiendo así que cada residuo se considere no sólo como una fuente de contaminación que es necesaria reducir, sino también como un recurso que puede explotarse.

La estructura legislativa de la CEE posee instrumentos legislativos en donde se

establecen los alineamientos generales que los estados miembros pueden adoptar, en el caso de las directivas; o cumplir obligatoriamente en el caso de los reglamentos, respecto de la gestión de los residuos. En relación al reciclaje de residuos para productos de la construcción, la CEE no posee una normativa específica que puedan adoptar los estados miembros. Sin embargo, existen ciertos estados miembros que han desarrollado sus propias normativas sobre el reciclaje de residuos para ser utilizados como materiales para productos de la construcción; como Holanda, Bélgica y Alemania.

En la actualidad el marco normativo establecido por la CEE que se puede asociar a la reutilización de un residuo como producto o material de la construcción, se describe en la siguiente directiva vigente:

- *Directiva 2006/12/CE* del Parlamento Europeo y del Consejo de 5 de abril de 2006 relativa a los residuos. Su principal objetivo es conseguir una regulación coherente de la “gestión y valorización de los residuos y alcanzar así un alto nivel de protección del medio ambiente”. Para ello, los Estados miembros, deben adoptar medidas encaminadas a limitar la producción de residuos y deben elaborar planes de gestión de residuos para poder alcanzar estos objetivos.

Se puede decir entonces que la directiva 2006/12/CE establece un marco general el que promueve el reciclaje de residuos pudiendo considerarse así como una normativa aplicable al caso de la gestión y valorización de la escoria como material para la construcción.

Como se mencionó anteriormente estados miembros como Holanda, Bélgica, y Alemania poseen regulaciones en relación al uso de materiales reciclados en la construcción. Holanda posee un decreto llamado BMD o Building Material, Soil and Surface Waters Protection, Decree (Decreto de Materiales de Construcción, Protección de Suelos y Aguas Superficiales), Bélgica posee un decreto llamado Construction Material Decree y Alemania posee una normativa llamada Requisitos del Reciclado de

Residuos Minerales (LAGA). En éstas tres regulaciones se establecen criterios ambientales para estudiar el comportamiento ambiental del residuo, cuando éste es reutilizado o reciclado en la industria de la construcción.

De forma particular el decreto Holandés (BMD) considera la protección de suelos y aguas superficiales como eje principal para regular el uso de residuos en el área de la construcción. A grandes rasgos, el decreto Holandés analiza la factibilidad de utilización de un residuo por medio de una metodología de estudio, la que se basa en la aceptación de cambios admisibles en la composición del suelo y las aguas superficiales, debido a la dispersión de los contaminantes presentes en el residuo o material. Este decreto (BMD) ha servido para otros países como ejemplo y referencia metodológica para estudiar la viabilidad de la utilización de residuos. Un ejemplo de ello, es el caso de la Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV) en España. La CAPV por medio de los criterios y las metodologías establecidas en el BMD regularon el uso específico de la escoria de horno de arco eléctrico (EAF) como material para la construcción, estableciendo de esta forma una normativa para la valorización de este residuo. Posteriormente, y basados en la normativa de la CAPV, el gobierno de Cantabria y de Cataluña promulgaron sus respectivos decretos respecto de la valorización de escorias (tabla 5).

Tabla 5. Regulaciones específicas de la valorización de escorias de acero en España.

España	Nombre del Decreto	Nº y Año de promulgación
Comunidades Autónomas		
País Vasco	“Por el que regula la valorización y posterior reutilización de escorias procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico (EAF)”.	34/2003
Cantabria	“De valorización de escorias.”	104/2006
Cataluña	“Sobre la valorización de escorias siderúrgicas.”	32/2009

En general el objetivo de los tres decretos es regular la valorización de las escorias para su posterior uso, sin embargo, el decreto del país Vasco regula específicamente la valorización y reutilización de las escorias de horno de arco eléctrico de la fabricación de acero.

Si se desea utilizar la norma del país vasco como referencia para la valorización de la escoria de Gerdau AZA, en relación a los parámetros y valores límites definidos en función del uso, habría que caracterizar la escoria según el ensayo de lixiviación propuesto por la norma europea EN_12.457-C y comparar los valores obtenidos con los valores límites establecidos en el decreto del país vasco. En nuestro país no existen laboratorios que tengan certificación para realizar este ensayo de lixiviación, por lo que habría que gestionar el análisis del residuo en laboratorios de España (ejemplo: ADIRONDACK S.L.) u otros laboratorios internacionales que realicen este ensayo. Es importante considerar también que este decreto fue creado mediante el estudio de test de lixiviación a distintas escorias generadas en las acerías de la CAPV y adaptado a las condiciones locales, por lo que las condiciones ambientales en que se creó este decreto son muy específicas. Si la empresa de forma optativa desea tener como referencia la experiencia internacional, tendría que realizar la caracterización de la escoria según el ensayo de lixiviación propuesto por la norma europea EN_12.457-C en un laboratorio que realice este análisis, en virtud de los costos que esto signifique. Sin embargo a su vez es posible gestionar la escoria apoyándose en las normas existentes en nuestro país, ya que como se menciona anteriormente la escoria no es un residuo peligroso, por lo que no constituiría un riesgo para la salud humana o el medio ambiente. Además, como se verá en el capítulo 5, los resultados del test de lixiviación (test TCLP) para la escoria de Gerdau AZA, muestra que los elementos analizados se encuentran bajo los límites de detección del método, lo que demuestra que la concentración de los elementos lixiviados está muy por debajo de las concentraciones máximas permisibles (CMP).

En la siguiente sección se describirá en forma general los criterios ambientales utilizados para conocer cómo se creó la norma antes citada.

3.6.3. Criterios Ambientales que permiten regular el uso de las escorias.

De forma general los criterios que se utilizan para evaluar la reutilización de las escorias son:

- a. **Niveles de Protección para el suelo y las aguas.**
- b. **El Estudio del Comportamiento Ambiental del Residuo.**

A modo de ejemplo en el Decreto BMD, se utiliza como criterio ambiental el “Nivel de protección para el suelo y las aguas” (criterio nº 1), debido a la necesidad de protección que requiere el medio ambiente cuando, por la utilización de residuos o materiales, existe un posible contacto con el suelo y una posible lixiviación de contaminantes a este. Este criterio se aplica considerando que la contaminación no puede superar el 1% de la composición de la superficie del suelo, el cual supondría un riesgo aceptable para el medio ambiente. Este es el criterio que fue adaptado por la CAPV para establecer los valores límites permitidos que regulan la valorización y el uso de las escoria de horno de arco eléctrico a largo plazo (Libro Blanco, escorias de acería IHOBE).

El criterio adaptado es el siguiente:

“Para cada elemento de interés, se debe determinar el aporte al suelo, en un periodo de 100 años, de contaminantes presentes en la escoria, y se compara con el aporte que produciría un cambio en la composición del suelo de referencia igual a 1% ”

Es decir, el aporte de cada elemento presente en la escoria que podría llegar al suelo producto de la lixiviación, en un periodo de 100 años, no debe producir un cambio superior al 1% en la composición del suelo de referencia. Este cambio en la composición del suelo implicaría un riesgo aceptable para el medio ambiente.

Mediante este criterio se considera un estudio del comportamiento del residuo a largo plazo estableciendo el nivel de protección para el suelo y las aguas. El estudio se realiza entonces aplicando el criterio con respecto a ciertos usos, como los antes

descritos para la industria de la construcción (tabla 3); determinando además las concentraciones de elementos lixiviables del residuo según ciertos análisis de test de lixiviación (tabla 4) y el cambio en la composición del suelo en que se va a aplicar el uso, por ejemplo: el suelo en donde se fabricará una carretera con áridos de escoria. En el caso que algún parámetro supere el criterio del 1% en el cambio de la composición del suelo, se estudia su caso en forma particular y se analiza el riesgo que implicaría para el medioambiente y la salud humana un cambio superior al 1% en la composición del suelo. El riesgo se estudia mediante un análisis de riesgo, el cuál es una evaluación de la probabilidad de ocurrencia de un evento adverso y de la magnitud de su impacto, si ocurriera.

En forma resumida, los pasos de la metodología utilizada para aplicar el criterio y obtener una regulación es la siguiente :

- 1°. Se establece el criterio ambiental
- 2°. Se establecen los escenarios de estudio en relación a algún uso definido.
- 3°. Se establecen los parámetros de estudio y los test de lixiviación a realizar.
- 4°. Se determinan las concentraciones de los elementos lixiviables del residuo
- 5°. Se determina el cambio en la composición del suelo en que se va aplicar el uso
- 6°. Si algún parámetro supera el criterio del 1%, se realiza un análisis de riesgo (estudio del caso en particular)
- 7°. Según los resultados obtenidos se determina si el uso definido constituye o no un riesgo aceptable para el medioambiente.
- 8°. Se definen los niveles máximos permisibles para cada elemento lixiviable según el uso.

En el Anexo 4 se muestra un ejemplo de la metodología del criterio ambiental antes descrito y una referencia de cómo se realiza un análisis de riesgo.

La aplicación del criterio antes descrito, según la bibliografía consultada, es una de las opciones de estudio del comportamiento ambiental de la escoria a largo plazo para obtener una normativa que regule su uso. Este criterio fue adaptado a las condiciones ambientales específicas de la CAPV para regular el uso de las escorias de acero de hornos de arco eléctrico dado que generaban grandes cantidades de este residuo, 660.000 toneladas de escoria negra anuales. Sin embargo en nuestro país las condiciones ambientales y las cantidades de generación de escoria son muy distintas, Gerdau AZA sólo genera aproximadamente 90.000 toneladas de escoria al año, por lo que promover un estudio que considere el criterio ambiental antes descrito, para crear una normativa que regule el uso de las escorias en Chile, no constituye una motivación económica. Por lo tanto esta metodología quedará como referencia metodológica para posteriores estudios.

3.7. Gestión de Escorias EAF

Además de establecer cuáles son las opciones de valorización, las consideraciones técnicas y ambientales del estudio del reciclaje de las escorias, la normativa nacional e internacional relacionada a su gestión; se busca proponer un modelo de gestión que establezca las etapas y las recomendaciones que conlleven a que este residuo sea valorizado, mediante la aplicación de una herramienta organizativa llamada ciclo Deming o más conocido como ciclo PHVA (planear, hacer, verificar y actuar), que permite realizar una gestión orientada al mejoramiento continuo.

Para proponer un modelo es necesario definir qué se entenderá por modelo en este trabajo. Se entiende por modelo como el esquema teórico de un sistema, el cual es creado por el observador de acuerdo a su experiencia y se utiliza para simplificar un sistema o realidad. Su objetivo es entender cómo trabajan estos sistemas y proponer opciones que apunten al mejoramiento. En el sistema uno define los límites. Por lo tanto para definir el modelo de gestión de escorias, es necesario identificar los sistemas y sus límites. Se puede definir sistema como un conjunto de cosas que relacionadas entre sí ordenadamente contribuyen a determinado objetivo; en este contexto en la gestión de la escoria se puede identificar dos sistemas:

Sistema 1: Sistema de manejo del residuo; considera la generación de la escoria y las etapas de manejo que ocurren dentro de las instalaciones de la empresa hasta cuando es trasladada para su valorización.

Sistema 2: Sistema de manejo y valorización, considera las etapas y actividades relacionadas con las opciones de valorización hasta que se determina una aplicación.

Estos dos sistemas formarían el modelo de gestión de escoria y su desarrollo en detalle se realizará aplicando la herramienta del ciclo PHVA.

3.7.1. Ciclo PHVA

El ciclo PHVA es una herramienta que permite el desarrollo integral una situación específica y la implementación de procesos de mejoramiento continuo. Consiste en una secuencia lógica de cuatro pasos que se deben llevar a cabo consecutivamente; planear, hacer, verificar y actuar, para lograr los resultados buscados (figura 14).

El mejoramiento continuo puede lograrse aplicando el concepto de PHVA en todos los niveles dentro de una organización, como por ejemplo en las actividades operacionales simples llevadas a cabo como una parte del proceso obtención del (los) producto (s).

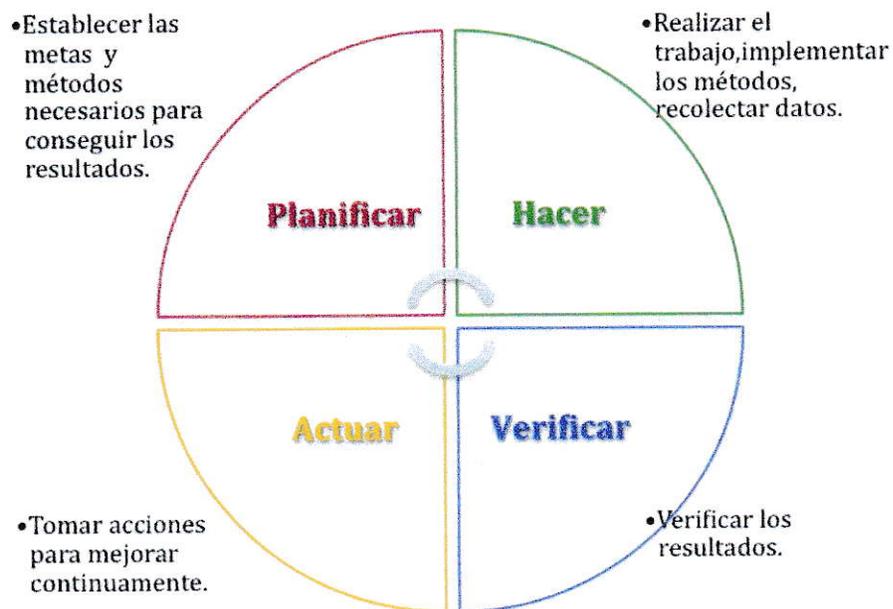


Figura 15. Ciclo PHVA. (Fuente:

<http://www.estrucplan.com.ar/articulos/verarticulo.asp?idarticulo=180>)

3.7.2. Planificar

Utilizando la herramienta organizativa del ciclo PHVA se buscará proponer la gestión integral de la escoria centrándose en las recomendaciones que conlleven a la valorización este residuo, y en procesos de mejoramiento continuo de esta gestión.

Tabla 6. Etapa Planificación Ciclo PHVA en la gestión de la escoria.

N°	Objetivos	Métodos para abordar los objetivos
1	Describir las entradas y las salidas del proceso productivo, para identificar dónde se genera la escoria.	Mediante la realización de un diagrama de flujo, con información obtenida de la investigación del proceso productivo.
2	Describir las características de la escoria y las cantidades mensuales y anuales generadas.	Mediante información obtenida de análisis químicos realizados por la empresa, en laboratorios autorizados por la Autoridad Sanitaria; y por medio de información obtenida del balance de masa del proceso.
3	Analizar las alternativas de minimización, prevención y valorización de la escoria.	Mediante la aplicación de las opciones de gestión, según los conceptos de la estrategia jerarquizada y la información recopilada de las experiencias de valorización de la escoria.
4	Propuesta de Modelo de Gestión. Definir las etapas del manejo de las escorias, incluyendo las opciones de valorización analizadas anteriormente y recomendaciones para su valorización.	Mediante la realización de un diagrama de flujo que incluya los sistemas 1 y 2; sus descripciones y recomendaciones para llevar a cabo la valorización de la escoria.

3.7.3. Hacer

En esta etapa se desarrollaran los métodos antes descritos para abordar los objetivos. La función de esta etapa es lograr recolectar los datos y la información necesaria para la gestión de la escoria

3.7.3.1. Descripción de las entradas y las salidas del proceso productivo, enfocándose específicamente en la salida de la escoria, mediante la realización de un diagrama de flujo, con información obtenida de la investigación del proceso productivo.

Este diagrama de flujo (figura 16) representa de forma simplificada las entradas y las salidas de la Generación de Acero.

- Las materias primas de entrada son: chatarras, hierro, cal, cal dolomítica y carbón.
- Los productos de salida son: perfiles livianos, barras de refuerzo y alambón en rollo.
- Los residuos de salida se dividen por unidad:
 - Patio de Chatarra: baterías de plomo, bobinas de cobre, polvos, gomas y maderas
 - Horno eléctrico: polvo filtro de manga, polvo cámara de combustión, polvo ciclones y escoria negra.
 - Horno Cuchara: refractarios y escoria blanca (finos)

En este caso la unidad de interés es el horno eléctrico, y el residuo que se desea gestionar es la escoria negra.

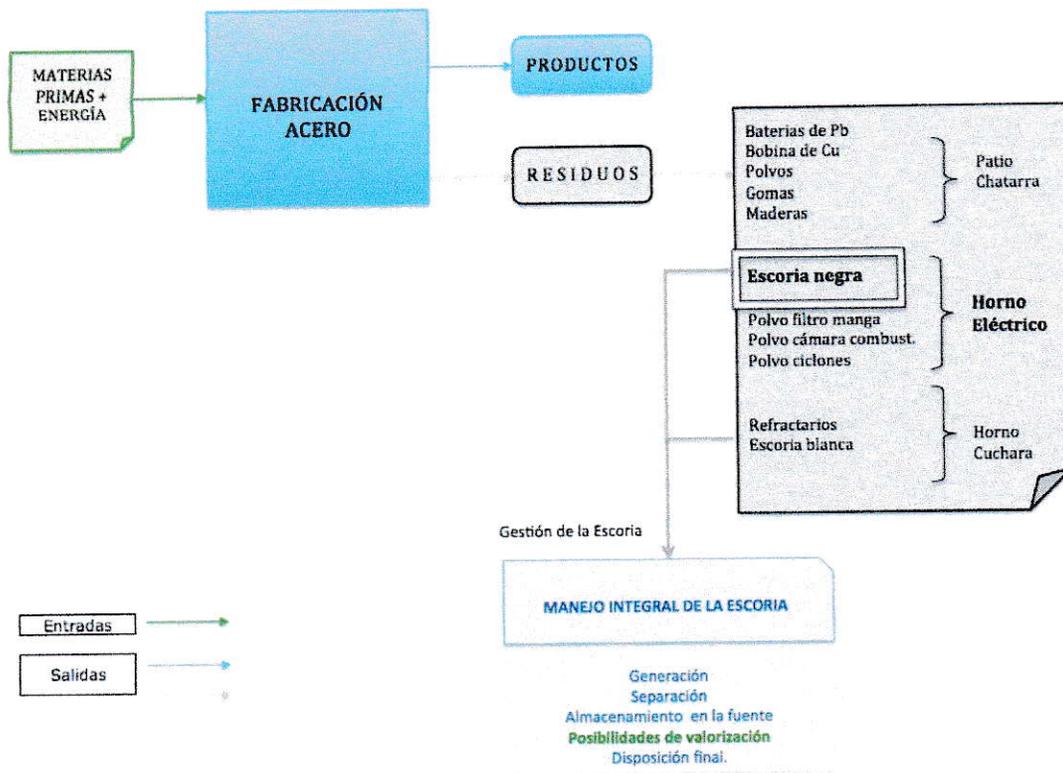


Figura 16. Diagrama de flujo de las entradas y salidas del proceso productivo.

3.7.3.2. Descripción de las características de la escoria negra y las cantidades generadas, mediante información obtenida de análisis químicos realizados por la empresa, en el laboratorio CESMEC; y mediante la información recopilada del balance de masas del proceso.

Características de la Escoria

La escoria procedente del horno de arco eléctrico, se puede clasificar según lo especificado en el DS N°148 como no peligrosa ya que aparece en la Lista B de residuos no peligrosos de este decreto (ver capítulo 5.2). A pesar de ello, la empresa ha realizado constantes caracterizaciones del residuo, según lo establecido en éste decreto y en laboratorios autorizados por la autoridad sanitaria, como CENMA y CESMEC, para corroborar que su residuo no es peligroso.

Los parámetros que se han analizado a las escorias de Gerdu AZA para determinar peligrosidad son: toxicidad extrínseca, para constituyentes inorgánicos y orgánicos; inflamabilidad, corrosividad; y alternativamente caracterización química de constituyentes inorgánicos para determinar los elementos mayoritarios presentes en la escoria. Las especificaciones y los resultados de los análisis realizados son:

a. Toxicidad Extrínseca: se determina que un residuo tiene características de toxicidad extrínseca cuando en su eliminación se puede dar origen a una o más sustancias tóxicas, en concentraciones que ponen en riesgo la salud de la población. Esto se realiza mediante el test de lixiviación, test TCLP, según la NCh 2754 of 2003 (Test TCLP-EPA 1311), y se determinan constituyentes inorgánicos y orgánicos. Para cada determinación existen elementos a analizar que poseen una concentración máxima permisible (CMP), que corresponde a la mayor concentración, del elemento analizado, que se considera como no peligrosa para la salud de la población.

Para definir las características de la escoria se utiliza mayormente la información de los constituyentes inorgánicos presente en ella, por lo que los valores de la determinación

de constituyentes orgánicos se mostrarán en el Anexo 5, así como también se mostrarán los métodos de análisis, con sus respectivos límites de detección de cada elemento.

a.1 Resultados: Toxicidad Extrínseca-Test TCLP para constituyentes Inorgánicos:

Los resultados obtenidos en la aplicación del test TCLP para la escoria se muestran en la tabla 7. En el desarrollo de este capítulo se mostrarán resultados de ambas escorias, la escoria negra y la escoria blanca, con el fin de realizar comparaciones, sin embargo la gestión de la escoria estará centrada mayormente en la escoria negra.

Tabla 7. Valores obtenidos del Test TCLP inorgánico . FUENTE: Informe Análisis Químico SQC-19495; 25/09/2009 – CESMEC.

	Plomo	Cadmio	Mercurio	Cromo	Bario	Selenio	Arsénico	Plata
Muestra	mg/L							
Escoria negra	<0,2*	<0,05*	<0,01*	<0,1*	<5,0*	<0,05*	<0,2*	<0,2*
Escoria blanca	<0,2*	<0,05*	<0,01*	<0,1*	<5,0*	<0,05*	<0,2*	<0,2*
CMP DS 148	5,0	1,0	0,2	5,0	100,0	1,0	5,0	5,0

(*) Valor bajo el Límite de detección. CMP: Concentración Máxima Permisible.

En la tabla 7 se puede apreciar que para ambas muestras, escoria negra y blanca, los valores de los elementos plomo, cadmio, mercurio, cromo, bario, selenio, arsénico y plata, se encuentran bajo los límites de detección, y por lo tanto bajo las CMP. Esto indica que la escoria negra y la escoria blanca, no presentan elementos lixiviables en las concentraciones establecidas y por lo tanto no posee características de toxicidad extrínseca.

b. Inflamabilidad: Si la muestra corresponde a un sólido, la inflamabilidad se mide determinando la velocidad de desplazamiento de una llama, según el método EPA 1030.

Los resultados obtenidos para inflamabilidad de las dos muestras, escoria negra y escoria blanca, se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Inflamabilidad de la escoria negra y blanca. FUENTE: Informe Análisis Químico SQC-19495; 25/09/2009– CESMEC.

Ensayo	Velocidad de propagación llama (mm/s)		
	Escoria negra	Escoria blanca	Tasa máxima EPA 1030.
Inflamabilidad	No inflama	No inflama	2,2

Según la tabla se puede apreciar que ambas muestras no poseen características de inflamabilidad.

c. Corrosividad: se mide para determinar la corrosividad que es capaz de producir un residuo bajo determinadas condiciones. Se determina sobre una muestra de acero, según método EPA 1110 A.

Los resultados obtenidos para corrosividad de las dos muestras, escoria negra y escoria blanca, se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Corrosividad de la escoria negra y blanca. FUENTE: Informe Análisis Químico SQC-19495; 25/09/2009 – CESMEC.

Ensayo	Tasa de Corrosión (mm/año)		
	Escoria negra	Escoria blanca	Tasa máxima EPA
Corrosividad	0,23	<0,05	6,35

Según la tabla se puede apreciar que ambas muestras no poseen características de corrosividad.

d. Caracterización química de constituyentes inorgánicos: esta caracterización permite determinar la composición del material, mediante un barrido de la muestra con la técnica de Fluorescencia de Rayos X . Esta técnica permite detectar todos los elementos de número atómico mayor a 10, contenidos en la muestra. El límite de detección es 0,005%, a excepción del sodio y magnesio, cuyos límites de detección son 0.01%.

Tabla 10. Caracterización química de la escoria negra y blanca. Resultados expresado en % en peso, base seca. FUENTE: Informe Análisis Químico SQC-19495; 25/09/2009 – CESMEC.

Elemento	Expresado como	Escoria negra % en peso	Escoria blanca % en peso
Sodio	Na ₂ O	0,70	<0,01
Calcio	CaO	17,4	45,6
Silicio	SiO ₂	8,50	23,4
Manganeso	MnO	2,90	1,07
Fósforo	P ₂ O ₅	0,47	>0,01
Cloruro	Cl	0,17	0,37
Hierro	Fe ₂ O ₃	51,5	3,90
Aluminio	Al ₂ O ₃	10,4	13,4
Titanio	TiO ₂	0,55	0,70
Magnesio	MgO	2,50	4,20
Potasio	K ₂ O	<0,01	<0,01
Cobre	CuO	<0,01	<0,01
Azufre	SO ₃	0,44	1,84
Cromo	Cr ₂ O ₃	1,39	<0,01
PPC	2 hora 1000°C	3,0	5,5

Según la tabla se puede apreciar que los elementos mayoritarios en ambas muestras son calcio, silicio, manganeso, hierro, aluminio y magnesio; y azufre sólo en la muestra de escoria blanca.

Ordenando los elementos de forma descendente en relación a su contenido se tiene:

Escoria negra $Fe > Ca > Al > Si > Mn > Mg$

Escoria blanca $Ca > Si > Al > Mg > Fe > S > Mn$

Observando el orden del contenido de elementos de la escoria, se puede explicar la diferencia de color de ambas escorias. El color negro se puede atribuir al mayor contenido de hierro y manganeso, y el color blanco se puede atribuir al mayor contenido de calcio y silicio.

Se puede observar también que la escoria negra posee un alto contenido de hierro, 51,5%; esto se puede atribuir al FeO libre no reducido en la etapa de fusión. Como se menciona en el capítulo 4.1.4 cuando se produce el proceso fusión los elementos presentes en el horno se oxidan formando óxidos de hierro, de manganeso y de silicio, los que pasan a formar parte de la escoria; a mayor grado de oxidación del acero mayor cantidad de óxido ferroso en la escoria. Para obtener el hierro contenido en la escoria se reduce el óxido ferroso adicionando carbón en polvo. Si la cantidad de carbón añadido no se oxida completamente o si la eficiencia energética del proceso disminuye, la obtención del hierro es menor quedando por lo tanto mayor cantidad de óxido ferroso (FeO) en la escoria.

Se puede observar también que la escoria blanca posee un alto contenido de calcio 45,6%, esto se puede atribuir a que en el proceso de afino, el acero líquido se cubre mayormente por cal, la cual reduce al líquido fundido y por lo tanto al contenido de óxidos presentes en la escoria, por lo que se eliminan los componentes que poseen colores oscuros (óxido de hierro). Además en el proceso de afino se añaden ferroaleaciones de silicio, lo que explicaría el alto contenido de SiO₂ (o de fases minerales compuestas por silicatos), y por ende el color blanquecino.

Cantidad de escoria generadas en el proceso de fabricación de Acero en Horno de Arco Eléctrico.

Tipo Escoria	Promedio mensual	total anual
Escoria Negra [ton]	6.739	80.865
Escoria Blanca [ton]	0,5	6

Tabla 11. Cantidades generadas escoria Gerdau AZA. FUENTE: Documento Balance de Masas año 2009, Gerdau AZA ; Ficha Técnica Escoria Horno Cuchara; Gerdau AZA.

En la tabla 11 se puede apreciar que la generación de la escoria blanca es muy inferior en comparación con la escoria negra, por lo que su valorización es menos probable debido a la poca cantidad generada. En cambio la escoria negra representa más del 90% de la escoria generada.

Resumen de las características de la Escoria

- La escoria negra y blanca no posee características de toxicidad extrínseca, es decir no presentan elementos lixiviables que pongan en riesgo la salud de la población.
- No poseen características de inflamabilidad.
- Los niveles de corrosividad se encuentran bajo las tasas máximas.
- La escoria negra y blanca son por lo tanto *residuos no peligrosos*.
- Los elementos mayoritarios en ambas escorias son calcio, silicio, manganeso, hierro, aluminio y magnesio; y azufre sólo en la escoria blanca.
- En relación a su contenido se pueden ordenar los elementos mayoritarios de la escoria negra de la siguiente forma: Fe > Ca > Al > Si > Mn > Mg.
- En relación a su contenido se pueden ordenar los elementos mayoritarios de la escoria blanca de la siguiente forma Ca > Si > Al > Mg > Fe > S > Mn.
- La escoria negra posee un alto contenido de hierro (51,5 %)
- La escoria blanca posee un alto contenido de calcio (45,6%)

- En relación a la diferencia de colores de las escorias; el color negro se puede atribuir al mayor contenido de hierro y manganeso; y el color blanco se puede atribuir al mayor contenido de calcio y silicio.
- La escoria negra representa más del 90% de la escoria generada, generando en total 80.865 ton en el año 2009.

3.7.3.3. Análisis de las alternativas de minimización, prevención y valorización de la escoria, por medio de la aplicación de las opciones de gestión, según los conceptos de la estrategia jerarquizada y la información recopilada de las experiencias de valorización de la escoria.

Según las opciones de gestión de la estrategia jerarquizada de residuos, el orden de prioridad comienza con la prevención de los residuos, siendo siempre la opción más favorecedora; luego la minimización (reducción), posteriormente las opciones de valorización (reutilización, reciclaje y recuperación), luego el tratamiento de los residuos y finalmente la disposición final

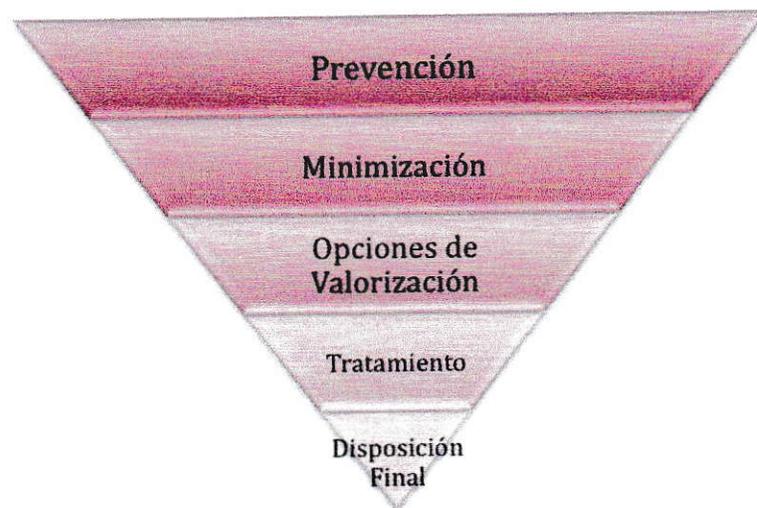


Figura 17. Estrategia jerarquizada de residuos

1. Prevención

La prevención de generación de residuos involucra cambios en el proceso productivo, en las materias primas y/o en su modo de utilización, entre otras opciones. Para aplicarlo al caso de la prevención en la generación de la escoria, cabe preguntarse si es posible cambiar el proceso donde se genera, es decir en el proceso de fusión de la chatarra, entonces:

¿Es posible evitar la generación de la escoria en el proceso de fusión?

En el proceso de fusión de la chatarra, la escoria es *formada* cuando el horno es alimentado con oxígeno, cal y cal dolomítica. Esto es parte fundamental del proceso ya que se realiza para eliminar principalmente las impurezas de manganeso y silicio contenidas en el acero fundido, además de otras impurezas. A su vez la formación de la escoria favorece las reacciones químicas de los procesos de fusión y afinado, aumentando la eficiencia energética del proceso, y evitando el ataque químico al refractario (ver capítulo 4.1.4). Por lo tanto la formación de la escoria es parte fundamental del proceso y proporciona beneficios para la fabricación del acero.

En resumen los principales beneficios de la formación de la escoria son:

- Eliminar las impurezas del acero líquido.
- Incrementar la eficiencia energética del proceso, reduciendo por ello el consumo de energía eléctrica.
- Evitar el ataque químico del acero fundido al refractario que cubre al horno eléctrico.
- Reducir el tiempo total de fusión.

De acuerdo a esto se descarta la opción de prevención ya que la generación de escoria es beneficiosa para el proceso.

2. Minimización o reducción:

Esta medida puede involucrar entre sus opciones la optimización de los procesos, una mejor mantención de los equipos y/o maquinarias, con el fin de minimizar en lo posible la generación de residuos.

En el caso de la escoria las opciones de reducción son escasas principalmente porque no se puede evitar la generación de ésta. Sin embargo existen recomendaciones en la literatura relacionadas con los factores que determinan la **cantidad** del residuo generado que las industrias pueden adoptar para evaluar ciertas opciones de reducción (IHOBE).

Algunos de los factores más importantes que determinan la cantidad de escoria producida son:

a. **Contenido de FeO en la escoria negra:** como ya se ha mencionado anteriormente la concentración de óxido ferroso aumenta en la escoria a medida que aumenta la oxidación del acero líquido, producto de añadir oxígeno al proceso. Esto supone una pérdida de materia prima ya que una mayor concentración de FeO en la escoria es pérdida de acero en la colada. Para equilibrar este proceso se adiciona carbón en polvo permitiendo la reducción del FeO presente en la escoria según la reacción química [ec 4].

b. **Basicidad de la escoria:** La basicidad es fundamental para evitar el ataque químico al refractario y la correcta espumación de la escoria. Además la basicidad de la escoria está relacionada con la cantidad de sustancias indeseables que desean eliminar; así a mayor basicidad mayor cantidad de escoria generada. Esto se puede apreciar en la tabla 12, donde para 45 kg de sustancias indeseables que se desean eliminar por tonelada de acero, se forma mayor cantidad de escoria debido al aumento en la basicidad y, por lo tanto, al aumento de consumo de cal.

Tabla 12. Influencia de la basicidad sobre la cantidad de la escoria generada. Fuente: Libro Blanco para la minimización de residuos y emisiones; pag. 53. IHOBE.

Sustancias Indeseables que se desean eliminar (A) (kg/Tm acero)	Basicidad	Consumo de cal (B) (kg/Tm acero)	Escoria formada (A+B) (kg/Tm acero)
45	1,5	68	113
	1,6	72	117
	1,7	77	122
	1,8	81	126
	1,9	86	131
	2,0	90	135

La basicidad de la escoria se puede medir según la relación CaO/SiO_2 [ec.10]. Para la escoria negra de Gerdau AZA, según análisis de composición (tabla 10) se puede calcular:

$$\frac{CaO}{SiO_2} = \frac{17,4}{8,5} = 2,05 \quad [ec.10]$$

Según la ecuación 10 la escoria negra (muestreada) de Gerdau AZA tiene un pH de 2,05.

c. **Tipo de carbón utilizado:** lo más importante del tipo de carbón que se utiliza, es su composición en relación al contenido de materias volátiles. Éstas afectan su capacidad de reacción, ya que recubren al carbón sólido formando una película de gas disminuyendo su superficie de reacción.

Resumiendo la información expuesta en a, b y c, se puede decir:

- Que a mayor oxidación del hierro, mayor concentración de FeO en la escoria y por lo tanto se genera una mayor cantidad de escoria y pérdida de hierro en el proceso.
- La basicidad es un factor relevante, ya que a mayor basicidad mayor generación de escoria.
- En relación al tipo de carbón, es necesario considerar el contenido de volátiles ya que a mayor cantidad de materia volátil menor superficie de reacción del carbón sólido, y por lo tanto menor capacidad para reducir al FeO presente en la escoria.

La literatura recomienda, que si se desea aprovechar el contenido de Fe y disminuir la cantidad de escoria generada; la empresa deberá evaluar los costos de prolongar los tiempos de operación del proceso y del mayor consumo de carbón en polvo, ya que de esta forma existe una mayor reducción del óxido ferroso presente en la escoria. Además se recomienda controlar la basicidad de la escoria por colada.

Gerdau AZA ya realiza esfuerzos al respecto manteniendo en su proceso de fabricación registros diarios de la basicidad y el contenido de óxido ferroso de la escoria, por colada realizada, con el fin de mantener un control e ir mejorando la operación del proceso. Por ello es que Gerdau AZA, además de mantener una constante preocupación por mejorar el proceso y disminuir la cantidad de escoria generada, ha decidido investigar cuáles son las opciones existentes de valorización de la escoria .

3. Opciones de Valorización

Se entiende por valorización a cualquier operación cuyo resultado principal es que el residuo sirva a una finalidad útil. Las opciones de valorización son tres, y se describen a continuación.

- **Reutilización o reuso:** es el aprovechamiento del residuo sin cambiar su forma o naturaleza, convirtiéndolo así en un insumo.
- **Recuperación:** extracción de las sustancias o recursos valiosos contenidos en los residuos, normalmente con un tratamiento previo para su utilización con otro fin.
- **Reciclaje:** transformación de ciertos materiales en materias primas para procesos productivos. Se puede realizar en la misma industria o bien en otra exterior.

Según éstas definiciones y la información recopilada, se podría decir que las mayores opciones de valorización que podría experimentar la escoria son, el *Reciclaje* y la *Recuperación*:

- **Recuperación:** en esta opción se realiza tratamiento físico con el fin de recuperar los metálicos que aún están contenidos en la escoria. En la actualidad Gerdau AZA realiza recuperación metálica de la escoria en una empresa externa (ESTIN), dónde se realiza la separación del metal por medios físicos.
- **Reciclaje:** según la bibliografía consultada, la escoria en general es sometida a tratamientos físicos para obtener la granulometría necesaria para ser reciclada como árido en la industria de la construcción (ver capítulo 5.1.1).

Por lo tanto las opciones de valorización de la escoria, serían:

Tabla 13 Opciones de valorización de la escoria

Opción de Valorización	Descripción de la (s) valorización (es)
Recuperación	Recuperación del contenido metálico presente en las escorias.
Reciclaje	Reciclaje de la escoria como árido para carreteras, en la construcción de bases, sub-bases y/o mezclas asfálticas.
	Reciclaje de la escoria como árido en mezclas con cemento Portland para la fabricación de hormigón.

3.7.3.4. Propuesta de Modelo de Gestión. Definir las etapas del manejo de las escorias, incluyendo las opciones de valorización analizadas anteriormente, mediante la proposición de un modelo de gestión compuesto por un diagrama de flujo que incluya los sistemas 1 y 2, sus descripciones y recomendaciones para llevar a cabo la valorización de la escoria.

El manejo integral de los residuos permite una gestión ambiental adecuada de éstos. La secuencia clásica de un sistema de manejo es la siguiente:

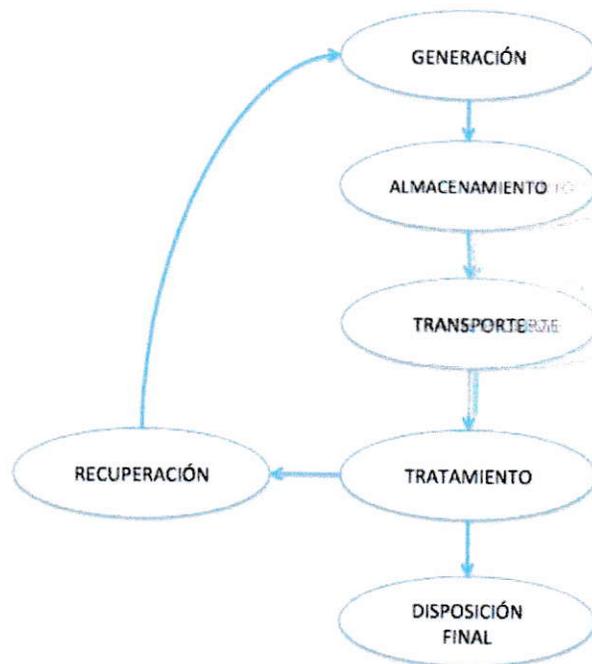


Figura 18. Diagrama de flujo clásico de las etapas de un sistema de manejo de residuos. (Fuente: CONAMA-GTZ)

En este esquema se muestra la secuencia de las etapas por la que pasa un residuo, desde que es generado hasta que es dispuesto en un lugar autorizado por la autoridad sanitaria. Complementario a este esquema se encuentra estrategia jerarquizada de la gestión de los residuos, que ya se mencionó anteriormente, la que considera como prioridad prevenir y si no es posible minimizar, valorizar (reutilizar, reciclar y recuperar), tratar y disponer. Uniendo estos dos sistemas, el esquema del sistema de manejo de residuos quedaría de

la siguiente forma (figura 19):

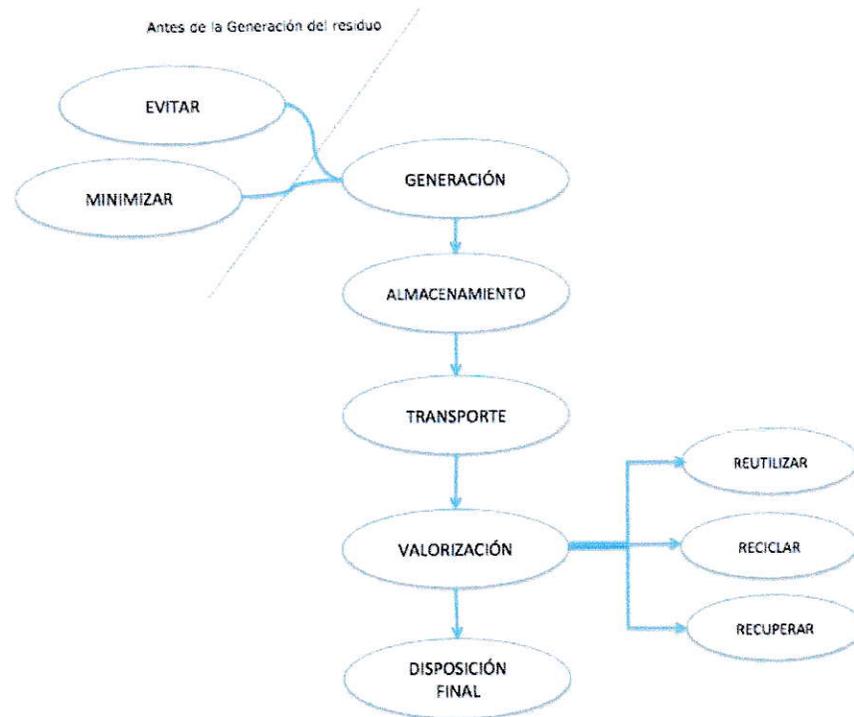


Figura 19. Esquema de las etapas de un sistema integral de manejo de residuos.
(Fuente: CONAMA-GTZ)

Como ya se mencionó en el punto 3 de este capítulo, la prevención de la escoria no es posible ya que su generación es parte fundamental del proceso de fabricación del acero; y las opciones de minimización seguirán siendo evaluadas por la empresa, en virtud de los costos que signifiquen estas medidas. Por lo tanto, en este caso, la gestión de la escoria está centrada en las opciones de valorización. Considerando esto y las opciones de valorización para la escoria ya analizadas, el modelo de gestión de escoria propuesto quedaría según se muestra en la figura 20.

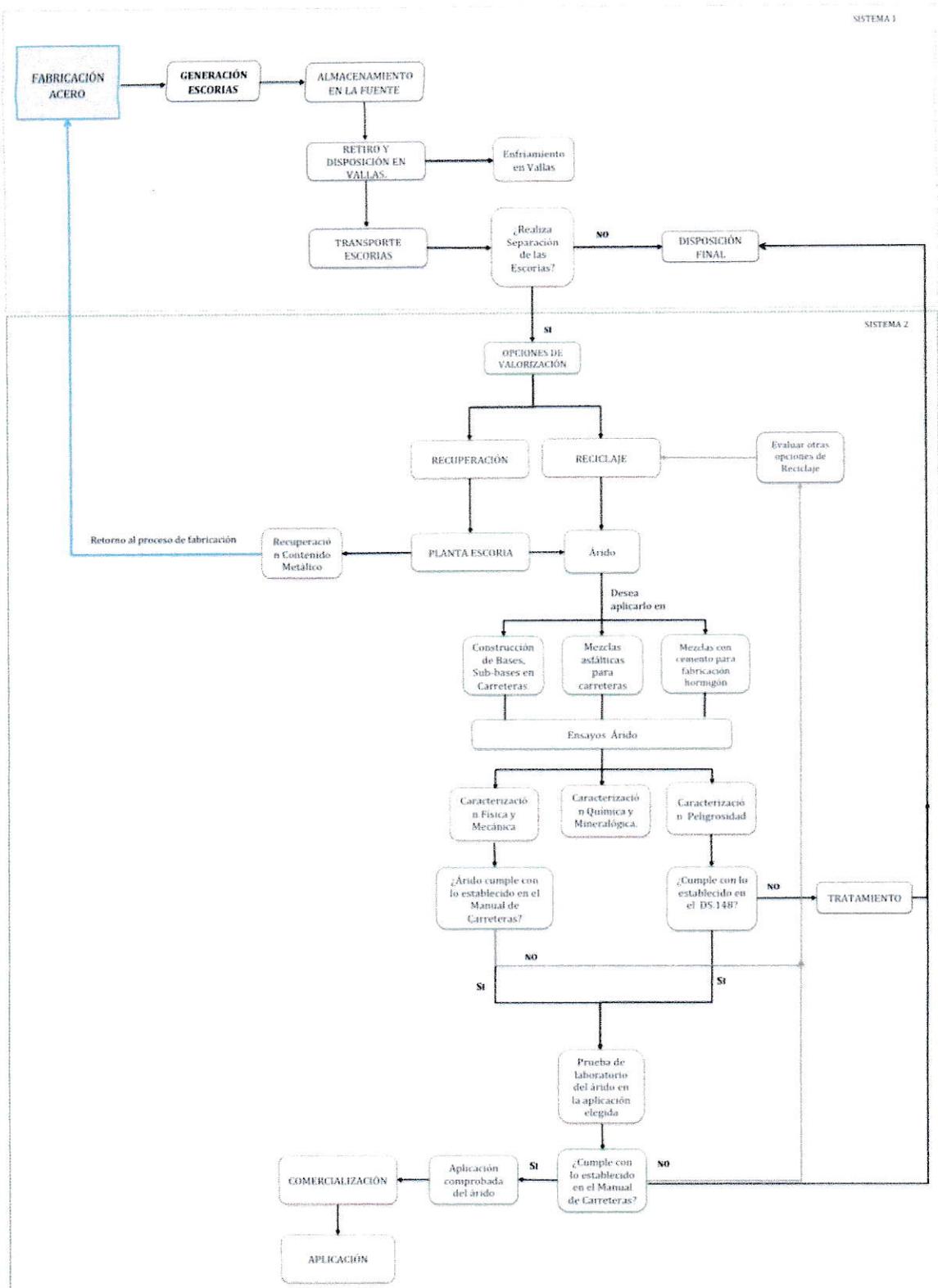


Figura 20. Modelo de Gestión de escoria. (Fuente: elaboración propia)

Descripción del Modelo

El modelo se desarrollará principalmente para la escoria negra, ya que según la bibliografía consultada la escoria negra posee mayores usos debido a su gran similitud con los áridos naturales y a las cantidades de generación. No así, la escoria blanca, que en relación a la escoria negra, se genera en menor medida y su composición no posee similitud con los áridos naturales (por su gran cantidad de finos).

El modelo de gestión está compuesto por dos sistemas: sistema 1; manejo del residuo y el sistema 2; manejo y valorización del residuo. Ambos sistemas se describirán a continuación:

Sistema 1: Sistema de manejo del residuo; considera la generación de la escoria y las etapas de manejo que ocurren dentro de las instalaciones de la empresa hasta cuando es trasladada para su valorización.

1. **Generación de la escoria:** una vez generada la escoria negra en el horno eléctrico ésta se descarga por una compuerta a la valla de la nave de acería.
2. **Almacenamiento en la fuente:** corresponde al almacenamiento temporal en el túnel de escoria hasta que ésta se retira por un cargador frontal con cadenas en sus ruedas delanteras para protegerlas del calor.

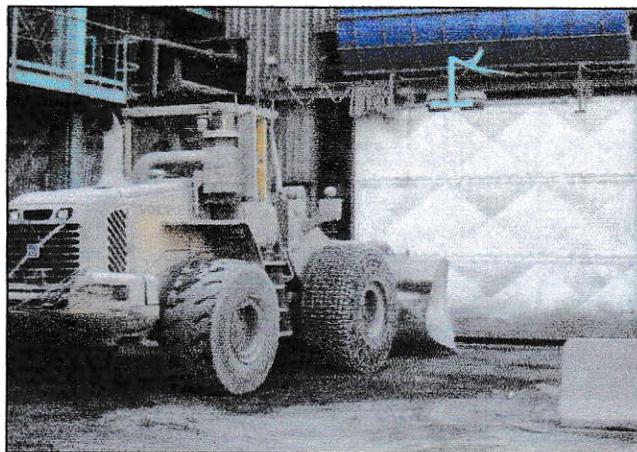


Figura 21. Cargador frontal y túnel de escoria.
Fuente: Gerdau AZA.

3. **Retiro y Disposición en Vallas:** la escoria es retirada en caliente desde el túnel con un cargador frontal y es trasladada al patio de enfriamiento dónde se encuentran las vallas de acopio.



Figura 22. Traslado escoria negra a vallas de enfriamiento. Fuente: Gerdau AZA.

4. **Enfriamiento en vallas:** el enfriamiento de las escorias ocurre en el patio de enfriamiento, específicamente en las vallas de enfriamiento. Las vallas de enfriamiento son sitios de disposición temporal de la escoria cuando esta es retirada del túnel del horno eléctrico. En estas vallas de disposición se enfría la escoria mediante un sistema de rociamiento de agua, y mediante el movimiento de éstas con el cargador frontal. El enfriamiento de la escoria se realiza con el fin de tener un manejo seguro de ésta, ya que cuando es retirada del horno sale a altas temperaturas; y también para provocar reacciones de hidratación que originan la expansión de la escoria y a su vez su estabilización.

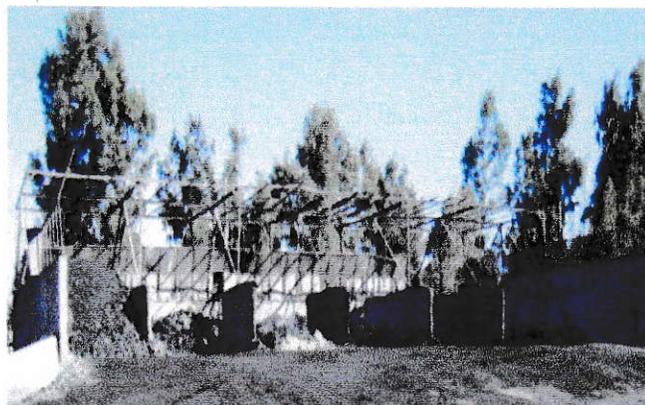


Figura 23. Vallas de enfriamiento. Fuente: Gerdau AZA.

5. **Transporte Escorias:** la escoria una vez que llega a temperatura ambiente se transporta por medio de camiones, que deben mantener una cubierta para proteger la carga, desde las vallas de enfriamiento a la planta dónde se realizará su valorización o al lugar donde se dispondrán. Esto dependerá si se realiza o no la separación de las escorias. Si se realiza separación de las escorias se puede optar a la valorización trasladando las escorias a una Planta de Valorización (Planta de Escoria), en caso contrario la escoria se transporta para ser dispuesta en un sitio autorizado por la autoridad sanitaria.

Como la generación de la escoria negra se produce en el horno de arco eléctrico y la escoria blanca en el horno cuchara, la separación de las escorias se realiza en el origen; además el retiro y la disposición en vallas se realiza por separado para ambas escorias, por lo que Gerdau AZA puede optar por las opciones de valorización.

Sistema 2: Sistema de manejo y valorización; considera las etapas y actividades relacionadas con las opciones de valorización de Recuperación y Reciclaje, hasta que se determina una aplicación.

6. **Opciones de Valorización:** Recuperación Metálica y Reciclaje del Árido (estas valorizaciones se describen más adelante)

7. **Planta Escoria:** constituida por una planta de chancado. El proceso de chancado se realiza para obtener la recuperación metálica y las reducciones de tamaño necesarias (granulometría) para realizar el reciclaje de la escoria una vez que se ha comprobado por medio de ensayos de laboratorio su uso.

Principalmente una planta de chancado se compone de un cargador frontal, tolva de alimentación, cinta transportadora de material, vibrador, harnero o parrilla separadora y un chancador de cono.

8. **Opción de Valorización - Recuperación:** ocurre en la planta de chancado. La escoria es dispuesta sobre la cinta transportadora de material para ser transportada hacia la tolva de alimentación. La tolva de alimentación dirige de forma eficiente el material dentro del chancador, el cuál muele el material y lo conduce a un harnero vibratorio que lo clasifica de acuerdo a la granulometría de salida y a sus características metálicas o pétreas. Si el material es clasificado como metálico retorna al proceso de fundición de chatarra (*recuperación del contenido metálico*), y el resto del material pétreo (árido) se destina a la valorización para ser reciclado.

9. **Opción de Valorización - Reciclaje:** a la escoria en esta etapa, se le llamará árido ya que se considera como escoria ya tratada en la opción de valorización anterior (recuperación metálica). El reciclaje del árido se puede realizar según la aplicación o uso que se le desee dar. Según las opciones ya seleccionadas se puede reciclar como árido para:

- Árido para la construcción de bases y/o sub-bases de carreteras
- Árido en mezclas asfálticas para carreteras
- Árido en mezclas con cemento portland para la fabricación de hormigón.

Estas opciones se pueden realizar en conjunto o cada una por separado, según las características físicas, mecánicas y químicas del árido.

10. **Ensayos del Árido:** para determinar la idoneidad del árido en el o los usos elegidos es necesario realizar análisis del árido para comprobar que cumple con los requisitos técnicos y ambientales. Los ensayos que se deben realizar son:

a. **Caracterización Física y Mecánica:** esta caracterización se realiza según lo dispuesto en la normativa actual referentes a áridos para la construcción de carreteras que se encuentra en el Manual de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas MOP. Un resumen de los ensayos que se realizan para cada aplicación se ve en la tabla 14.

Tabla 14. Ensayos de caracterización de áridos según Manual de Carreteras.

Especificación del manual	Capítulo 5.300. Capas Granulares	Capítulo 5.300. Capas Granulares	Capítulo 5.400. Revestimientos y Pavimentos	Capítulo 5.400. Revestimientos y Pavimentos
Tipo de Ensayo	Sub-base	Base	Mezcla con Asfalto	Mezcla con Hormigón
Análisis Granulométrico	x	x	x	x
%Lajas			x	
%Chancado	x	x	x	x
Índice de Lajas			x	
Índice de Plasticidad	x	x	x	
Índice de trituración			x	x
Límite líquido	x	x		
Desintegración por sulfatos (resistencia a la desintegración).			x	x
Desgaste de los Ángeles	x	x	x	x
Contenido de Sales	x	x	x	x
Equivalente de arena	x	x	x	
Densidad real	x	x	x	x
Densidad efectiva	x	x	x	x
CBR (soporte)	x	x		
Impurezas orgánicas (contenido de arcillas)			x	x
Reactividad potencial				x
Coefficiente volumétrico medio				x

Los ensayos de caracterización del árido deben realizarse con una entidad que tenga las competencias necesarias, y que esté certificada para realizar informes que le entreguen validez al uso del árido o que estén capacitadas para entregar un certificado que acredite que el árido posee los requisitos técnicos según un uso determinado. En Chile las instituciones más reconocidas en esta materia son el Instituto de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales (IDIEM), de la Universidad de Chile y el Departamento de Investigaciones Científicas de la Universidad Católica de Chile (DICTUC); ambas instituciones están certificadas por el Instituto Nacional de Normalización (INN) para realizar ensayos de materiales en las áreas de construcción específicamente en áridos, asfaltos-mezclas asfálticas y hormigones.

b. **Caracterización Química y Mineralógica:** La composición química se determina para identificar los elementos mayoritarios presentes en el árido y para mantener un control en la composición del árido. La composición mineralógica se determina para identificar la distribución de los elementos en la matriz y saber cuales son las fases principales. Esto debido a que cuando se enfría bruscamente o se hidrata la escoria se producen reacciones de hidratación y aumento del volumen. La normativa actual no establece que se deben realizar estos ensayos, sólo se pueden realizar para tener una caracterización más detallada del residuo y para mantener un control en su composición en relación a las materias primas utilizadas en la fabricación del acero.

c. **Determinación Características de peligrosidad:** esta caracterización se realiza según lo dispuesto en el Reglamento Sanitario Sobre Manejo de Residuos Peligrosos, DS 148. Para establecer características de peligrosidad se debe:

1º Determinar si el residuo se encuentra en alguna de las listas de clasificación de residuos del artículo 90: lista A sobre residuos peligrosos o lista B sobre residuos no peligrosos. Como ya se había mencionado (capítulo 5.2.1) la escoria se encuentra en

la lista B de residuos no peligrosos, específicamente en: B1- Residuos de metales y residuos que contengan metales: B1200-Escorias granuladas resultantes de la fabricación de hierro y acero; y B1210-Escorias resultantes de la fabricación de hierro y acero, con la inclusión de escorias que sean una fuente de TiO_2 y vanadio.

Por lo tanto según esta clasificación la escoria de Gerdau AZA no es peligrosa.

2° Si el generador lo desea, adicionalmente puede caracterizar su residuo según lo establecido en los artículos 14, 15, 16 y 17; para comprobar que éste no contiene ninguna de las siguientes características mostradas en la tabla 15.

Artículo del DS 148	Clasificación
14	Toxicidad Extrínseca
15	Inflamabilidad
16	Reactividad
17	Corrosividad

Tabla 15. Características de Peligrosidad- DS.148

Una vez realizadas las caracterizaciones Físicas y Mecánicas, y de Peligrosidad, del residuo según la aplicación elegida, se determina si éstas cumplen con lo establecido en el Manual de Carreteras y en el Decreto Supremo 148, respectivamente. Los posibles resultados serían:

- Si el árido **cumple** con especificaciones técnicas del Manual de Carreteras, pasa a la etapa siguiente que corresponde a las *pruebas de laboratorio del árido en la aplicación elegida*. Si el árido no cumple con las especificaciones técnicas del Manual de Carreteras se seguirán evaluando otras opciones de reciclaje, si la empresa así lo estima conveniente, y se deberá seguir con el mismo ciclo de análisis del árido.
- Si el árido **no cumple** con lo establecido en el DS 148, éste deberá ser sometido a tratamiento (físico, biológico, térmico) con el fin de eliminar sus

características de peligrosidad. Sin embargo, los análisis actuales establecen que la *escoria de Gerdau AZA no es un residuo peligroso*, por lo tanto no es necesario realizar un tratamiento ya que no posee características de peligrosidad. Por lo tanto, si técnicamente no se puede reciclar el árido de la escoria, ésta será dispuesta, después de su recuperación metálica, en un lugar autorizado por la autoridad sanitaria.

11. **Pruebas de laboratorio del árido en la aplicación elegida:** esta etapa corresponde al **diseño** de la aplicación elegida para el árido; por ejemplo el diseño de una mezcla asfáltica con el árido proveniente de la escoria negra, comparada con una muestra patrón de árido convencional y asfalto. Estos ensayos se realizan para determinar si existen diferencias entre las propiedades mecánicas de cada muestra. Estas propiedades mecánicas y sus especificaciones también se encuentran establecidas en el Manual de Carreteras. Los posibles resultados serían:
 - Si el diseño de la aplicación elegida **cumple** con lo establecido en el Manual de Carreteras, se comprueba que el árido se puede reciclar. Es importante que la entidad que realiza los análisis entregue un informe o un certificado que exprese que el árido es idóneo en la aplicación elegida.
 - Si el diseño de la aplicación elegida **no cumple** con lo establecido en el Manual de Carreteras, se seguirán evaluando otras opciones de reciclaje, si la empresa así lo estima conveniente, y se deberá seguir con el mismo ciclo de análisis del árido. Por lo tanto, el árido será dispuesto, después de su recuperación metálica, en un lugar autorizado por la autoridad sanitaria.
12. **Comercialización:** una vez que se comprueba el uso del árido se debe gestionar su comercialización con potenciales usuarios como empresas constructoras que desarrollen proyectos viales. También se pueden desarrollar proyectos entre la empresa y la (s) municipalidad (es). Gerdau AZA puede entregar el árido que desea

reciclar a la municipalidad para que éstos ejecuten proyectos de pavimentación en calles; así Gerdau AZA se evita los costos de disponer el árido (si no tuviesen potenciales compradores) contribuyendo de forma activa y voluntaria al mejoramiento de la comuna. Otra opción es que el árido se utilice para la construcción de calles o repavimentación de éstas dentro de la misma planta de Gerdau AZA, así se evitarían los costos de comprar áridos naturales.

13. **Aplicación:** la aplicación dependerá de del tipo de comercialización que realice Gerdau AZA después de comprobar el uso del árido.

3.8. Situación Actual Gerdau AZA

Actualmente Gerdau AZA se encuentra en la etapa del ensayo del árido para determinar si cumple con los requisitos establecidos en el Manual de Carreteras. Estos ensayos los está realizando con el Instituto de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales (IDIEM), de la Universidad de Chile, por medio de un proyecto de Innovación y Desarrollo (I+D).

La determinación de características de peligrosidad ha sido realizada continuamente por la empresa en laboratorios certificados como CIMM T&S, CENMA y CESMEC desde el año 2000. Todos los análisis realizados para test TCLP muestran que los valores se encuentran bajos los niveles máximos establecidos, por lo tanto ya se ha determinado que la escoria no es un residuo peligroso.

Para continuar con el ciclo de PHVA es necesario que se obtengan los resultados de los ensayos del árido y la documentación (informes) que entregue la validez del uso para así poder establecer metas en relación a los resultados y poder continuar posteriormente con el proceso de comercialización del árido y su posterior aplicación. Por lo tanto la continuación de este trabajo lo realizará la empresa, y una vez que se entreguen los resultados se podrá continuar con la etapa de VERIFICACIÓN y posteriormente la etapa de corrección (ACTUAR).

IV. DISCUSIÓN

Existe una gran diferencia entre las experiencias de valorización de las escorias provenientes de la fabricación de acero en horno de arco eléctrico a nivel nacional e internacional. A nivel internacional la experiencia del uso de las escorias provenientes de la fabricación de acero en horno de arco eléctrico es vasta. Países como EE.UU, Alemania, Australia, Nueva Zelanda, entre otros, ya reciclan este residuo considerándolo en la actualidad como un insumo valioso para la industria de la construcción, por lo tanto esto puede servir a modo de ejemplo para el desarrollo del mercado de la escoria en nuestro país. Las experiencias apuntan mayormente a la valorización de la escoria negra para su reciclaje como árido en la construcción de carreteras (proyectos viales en general) y en mezclas con cemento para la fabricación de hormigón. Esto porque la escoria negra posee gran similitud con los áridos naturales que se utilizan para tales fines, y además dado que se genera en grandes cantidades es posible su comercialización. Esto no ocurre de igual forma para la escoria blanca, que en relación a la escoria negra, se genera en menor cantidad y su composición no posee similitud con los áridos naturales debido a su gran cantidad de finos.

A nivel nacional se encontró sólo una experiencia documentada del uso de escoria, pero de escoria de alto horno (escoria BFS), proveniente de la Compañía Siderúrgica de Huachipato; la cuál ha sido utilizada por la Dirección de Vialidad de la región del BíoBío para la construcción y manutención de caminos. Desde el punto de vista ambiental esta escoria fue sometida a análisis de test de lixiviación TCLP realizada por el Servicio de Salud de Talcahuano, cumpliendo con los valores máximos permisibles establecidos en el DS 148.

No se encontraron experiencias documentadas del uso de escorias provenientes de la fabricación de acero en horno de arco eléctrico por lo que se deduce que es un tema en reciente desarrollo el cual ha sido impulsado por las empresas del rubro de la fundición interesadas en la gestión integral de sus residuos.

En cuanto a las normativas aplicables, a nivel nacional no existe una normativa específica que promueva el reuso, reciclaje y/o valorización de residuos **no peligrosos**. Esta deficiencia se supliría en los próximos años con la nueva “Ley General de Residuos y Responsabilidad Extendida del productor” que actualmente está siendo elaborada. Esta ley tiene por objetivo establecer un marco jurídico para la gestión integral de residuos, orientada a la implementación de la estrategia jerarquizada, que promueva la prevención de su generación y, si su prevención no es posible, fomenta, la reutilización, reciclaje, valorización energética, tratamiento y disposición final, todo ello para efectos de proteger la salud humana y el medio ambiente”.

La normativa actual que se puede asociar al reciclaje o valorización de residuos se encuentra en el D.S 148, Reglamento Sanitario sobre manejo de Residuos Peligrosos. En este decreto (párrafo II art 52 al 54) se establece que las actividades industriales que deseen llevar a cabo operaciones de reuso y/ o reciclaje de sus residuos como insumos en otras actividades deberán informarlo a la autoridad sanitaria; la autoridad sanitaria autorizará este reciclaje siempre y cuando no se produzcan riesgos en la salud humana o el medio ambiente. Por lo tanto si se desea realiza reuso y/o reciclaje de este residuo se deberá demostrar que este no es peligroso, según lo establecido en este decreto y solicitar los permisos necesarios para llevar a cabo el reuso y/o reciclaje. En el caso de la escoria de Gerdau AZA según la clasificación del DS 148, lista B, se tiene que es un residuo no peligroso y los análisis de test TCLP realizados por la empresa corroboran que los valores obtenidos no sobrepasan las CMP por lo que no constituiría un riesgo para la salud humana o el medio ambiente su utilización. Por lo tanto el reciclaje de este residuo dependerá de los resultados obtenidos de las características mecánicas y físicas del árido para ver si cumple con lo establecido en el manual de carreteras.

En comparación con Chile, en la CEE, la gestión de residuos ya se realiza de acuerdo a la estrategia jerarquizada (prevención, reutilización, reciclaje, recuperación y eliminación controlada de los residuos), por lo que algunos de sus estados miembros ya han legislado respecto a la valorización de residuos. En el ámbito de la escoria existen normas que regulan el reciclaje de productos para la industria de la construcción (ejemplo BMD) y en particular la Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV) tiene un decreto que regula la valorización y posterior utilización de escorias procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico. Si se desea utilizar este decreto para gestionar la valorización de la escoria de Gerdau AZA, habría que caracterizar la escoria según el ensayo de lixiviación propuesto por la norma europea EN_12.457-C y comparar los valores obtenidos con los valores límites establecidos en el decreto del país vasco. Para ello hay que considerar que este decreto fue creado mediante el estudio de test de lixiviación a distintas escorias generadas en las acerías de la CAPV y adaptado a las condiciones locales, por lo que las condiciones ambientales en que se creó este decreto son muy específicas, y pueden no representar las condiciones de uso de nuestro país. Por lo tanto se recomienda gestionar la escoria apoyándose en las normas existentes en nuestro país, ya que como se menciona anteriormente la escoria no es un residuo peligroso, por lo que su utilización no constituiría un riesgo para la salud humana o el medio ambiente.

Cabe preguntarse también si fue posible crear una normativa con criterios ambientales para regular el uso de las escorias en España, sería posible adaptar el criterio ambiental y la metodología que utilizaron para crear esta norma a las condiciones ambientales de nuestro país y promover la creación de una norma similar en Chile. Es posible, pero no se justifica económicamente ya que las condiciones en que fue creada la norma del país vasco fue para una generación aproximada de 660.000 toneladas de escoria negra al año que eran necesarias de reciclar producto de la poca superficie disponible para disponerlas; en cambio en nuestro país la generación de escoria negra de Gerdau AZA es sólo de 90.000 toneladas al año. Bajo este contexto se recomienda entonces gestionar la escoria de forma particular, apoyándose en las normas existentes en nuestro país.

Se propone entonces la gestión de la escoria mediante un modelo de gestión que establezca las etapas y las recomendaciones que conlleven a que este residuo sea valorizado, mediante la aplicación de una herramienta organizativa llamada ciclo PHVA (planear, hacer, verificar y actuar), que permite realizar una gestión orientada al mejoramiento continuo.

Se utiliza el concepto de modelo para delimitar las etapas del proceso de fabricación de acero que tienen relación con la generación de escorias y definir también cuáles son las etapas en dónde se puede incluir la valoración de la escoria. El modelo entonces queda compuesto por dos sistemas, el sistema 1 que corresponde al sistema de manejo del residuo dentro de la empresa y el sistema 2, que considera el sistema de manejo y la valoración de la escoria.

En el desarrollo del ciclo PHVA, durante la etapa de Planificación se determina que la escoria no es un residuo peligroso según los análisis químicos realizados y el DS 148; se evalúan las opciones de Prevención, Minimización y Valorización como aplicación de las opciones de gestión de la estrategia jerarquizada. Encontrándose que la escoria no se puede prevenir porque su formación es beneficiosa para la producción del acero; que las opciones de minimización deben ser evaluadas por la empresa en virtud de los costos económicos que ello implique, y que el paso siguiente después de esas opciones es la valoración del residuo. Según las opciones de valoración (reutilización, recuperación y reciclaje) y la experiencia internacional ya consultada la escoria puede ser sometida a recuperación del contenido metálico y al reciclaje como árido para la industria de la construcción. Con las opciones de valoración ya definidas se desarrolla el Modelo de Gestión de Escoria que muestra las etapas y recomendaciones para que este residuo sea valorizado. En la práctica hay una parte del modelo que está siendo aplicado, que corresponde al manejo de la escoria hasta su etapa de Recuperación del contenido metálico y disposición del árido restante en un lugar autorizado por la autoridad sanitaria. Esto es realizado por una empresa externa a Gerdau AZA y se realiza desde el

año 2000. La etapa del reciclaje del árido, se encuentra en la etapa de Ensayos del Árido con el Instituto de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales (IDIEM), de la Universidad de Chile, por medio de un proyecto de Innovación y Desarrollo (I+D), por lo que las etapas posteriores a los ensayos de árido deberán ser realizadas por la empresa, y una vez que obtengan los resultados se podrá continuar con la etapa de VERIFICACIÓN y posteriormente la etapa de corrección (ACTUAR) para obtener un proceso con mejoramiento continuo.

V. CONCLUSIONES

1. Según la información recopilada en nuestro país no existen experiencias documentadas de valorización de escorias de horno de arco eléctrico.
2. Existe sólo una experiencia documentada de utilización, pero de escoria de alto horno proveniente de la Compañía Siderúrgica de Huachipato, para la construcción y manutención de caminos.
3. Según las experiencias internacionales la escoria mayormente reciclada es la escoria negra, y sus mayores usos son en la industria de la construcción, destacándose los siguientes:
 - 3.1. Como árido para capas granulares de carreteras: bases y sub bases.
 - 3.2. Como árido para mezclas asfálticas
 - 3.3. Como árido para mezclas con cemento para fabricar hormigón.
4. Nuestra legislación ambiental no posee una normativa específica que contemple la estrategia jerarquizada de reutilización, recuperación y reciclaje, como una política de gestión integral de residuos sólidos, que contribuya a que los residuos sean valorizados y no dispuestos. Sin embargo, dado que la escoria no es un residuo peligroso, se puede utilizar el DS 148 para comprobar mediante test de lixiviación que la escoria no lixivia elementos por sobre los límites establecidos, y el Manual de Carreteras para determinar que el árido cumple con los requisitos para ser utilizado en construcción de carreteras; y así promover la valorización de la escoria
5. A nivel internacional existen marcos reguladores que promueven la gestión integral de residuos. En particular en la C.E.E existen decretos como el Building Material, Soil and Surface Waters Protection Decree, que regulan el uso de materiales reciclados en la industria de la construcción y el Decreto del País Vasco

que regula la valorización y posterior reutilización de escorias procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico.

6. Estas regulaciones han sido creadas para las condiciones ambientales específicas de tales países, por lo que pueden no necesariamente representar las condiciones de uso de nuestro país

7. Estudiar la aplicación de la metodología y el criterio ambiental que utilizan en el País Vasco para promover un decreto que regule las escorias no se justificaría económicamente.

8. En la práctica Gerdau AZA ya realiza una de las etapas del modelo, que corresponde a una de las opciones de valorización, específicamente la recuperación metálica. Esta recuperación la realiza una empresa externa que separa el contenido metálico de la escoria, el cual es incorporado nuevamente al proceso productivo y el árido resultante es dispuesto finalmente en un lugar autorizado para ello.

9. La segunda opción de valorización, esto es, el reciclaje del árido está en la etapa de ensayos del árido. Una vez que se obtengan los resultados de esta etapa es posible definir si el árido se puede reciclar para aplicarlo en la industria de la construcción.

VI. BIBLIOGRAFÍA

Apfel J. 2007 Electric Arc Furnace Slag – a product not waste: saving or earning money by using slag as a building material. Pp 1-2

Business Line. 1998 Tempering profits with green logic. Business Line, India.

CONAMA-GTZ. Proyecto de Gestión de Residuos Peligrosos, Cooperación Técnica Chileno-Alemana. Unidad III. Etapas de Manejo/Introducción al Riesgo Ambiental/EIA. Curso de Capacitación: Residuos Peligrosos para Evaluadores del SEIA.

De Luxán. 1995 Tipificación de escorias producidas por la siderurgia de horno eléctrico, como material utilizable en la construcción. I Caracterización previa de las escorias.

De Lima L. 1999 Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: Propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental. pp 4-5

De Urbina G.O , San Martín R, De Castro M y Elias X. 1996 Valorización de escorias procedentes del proceso de fabricación de acero en hornos de arco eléctrico. Residuos. pp 66-69

EUROSLAG. 2006 Legal Status of Slags. pp 1-4

García, I., Dorronsoro, C. 2005. Contaminación por metales pesados. En tecnología de suelos. Universidad de Granada. Departamento de Edafología y Química Agrícola. <http://edafologia.ugr.es/conta/tema15/introd.htm>

Geyer T, Dal Molin D y Vileda A. 1997 Uso das escórias de aciaria como adição ao concreto. IV Congreso iberoamericano de patología de las construcciones, Porto alegre, Brasil.

Huang, C.P. 1999. Environmental soil chemistry and human welfare. 14° Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Temuco. Chile.

Hidalgo A, Alonso C. 2005 Evaluación del impacto ambiental debido a la lixiviación de productos de base cemento. I Jornadas de Investigación en Construcción: Actas de las Jornadas. T. I, pp. 571-574.

Hernandez J. 2007 Estudio de la estabilidad volumétrica, propiedades físicas y químicas de la escoria negra de acero de horno de arco eléctrico, pp. 8-10.

IHOBE.2000. Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones. Escorias de Acería.

ICHA¹ <http://www.icha.cl/icha/informacion-de-mercado>. Visitada en el mes de julio de 2010.

ICHA² <http://www.icha.cl/icha/informacion-de-mercado>. Visitada en julio de 2010.

MOP <http://www.mop.cl> . Visitada en agosto de 2010.

Lira J. 2010 Fundamentos y Avances Ley General de Residuos; Ministerio de Medio Ambiente.

P, Monteiro P. 1994. Concreto: estructura, propiedades e materiais. Editora Pini, Sao Paulo, 1º ed.

Orizola S. 2006 Uso de escoria de cobre en cementos. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento Ingeniería Civil. Universidad de Chile.

PGIRS. 2005 Política de Gestión Integral de Residuos Sólidos, CONAMA. pp 14-24

Rastovcan- Mioc A, Sofilić T, Mioc B. Application of Electric Arc Furnace Slag

Rihm A, Arellano J, Sancha A.M. 1998 Uso de test de lixiviación para caracterización de residuos del área minera y reflexiones sobre gestión de residuos en América Latina.

Troncoso C. 2008 Valoración de Escoria Proveniente de Fundición de Chatarra.

Valenzuela M, Toledo P, Hermosilla M, Saffirio A. Análisis geomecánico de escorias de Acería. Posibilidades de uso en obras viales.

Van der Sloot, Dijkstra, J.J. 2004. Development of horizontally standardized leaching tests for construction materials: a material based or release based approach?.

II APL Fundiciones, 2004. Guía técnica para el manejo de escorias de fundiciones.

VII. ANEXOS

ANEXO 1 . Asociaciones Internacionales Comercializadoras de Escorias de Acero

Existen diversas asociaciones a nivel internacional que se han creado con el fin de proporcionar información técnica y colaborar en el reciclaje de la escoria como material de construcción. En la tabla 16 se muestra una clasificación de las principales asociaciones internacionales comercializadoras de escoria de acero.

Tabla 16. Asociaciones internacionales comercializadoras de escoria.

Nombre Asociación	País (es) Representantes	Tipo de Información
Uroslag Association	Países de la Comunidad Económica Europea	Usos Escoria de acero en Europa
Australasian Association (ASA)	Australia- Nueva Zelanda	Intercambio de información entre países interesados. Publicaciones de investigaciones sobre usos de escoria de acero.
Slag Cement Association	Compañías productoras de cemento de Estados Unidos.	Usos de cemento con escoria para productos de hormigón. Publicaciones sobre el mejoramiento del rendimiento del hormigón debido al cemento de escoria.
Nippon Slag Association	Japón	Recopilación y difusión de información sobre usos y tecnologías de productos escoria de acero

ANEXO 2. Resumen metodologías de análisis de ensayos de lixiviación utilizados en la C.E.E.

Ensayo de Disponibilidad. Descrito por norma Holandesa NEN 7341.

Este ensayo es utilizado para evaluar la concentración máxima de un elemento o componente bajo condiciones de ensayo que maximicen la emisión, con el fin de representar los peores escenarios de disposición y manejo de residuos o materiales.

Se utilizan muestras de tamaños de partícula pequeños, altas relaciones de L/S, agitación constante para asegurar un alto contacto del líquido con el sólido, ajustes de pH del líquido lixiviable, y en algunos casos, se utilizan reactivos acomplejantes como EDTA.

El procedimiento de ensayo se resume a continuación:

- Se realizan dos etapas consecutivas de extracción con adición de ácido:
- Primera extracción pH = 4
- Segunda extracción pH = 7
- Tamaño de partícula menor a 125 μm
- Peso de la muestra = 16 g
- Relación L/S total = 100 mL/g

Ensayo de Percolación. Descrito por Norma Holandesa NEN 7343.

Ensayo utilizado para caracterizar la lixiviación en un material granular. Se hace pasar un flujo ascendente de agua desionizada (pH 5-7,5) por un material granular empaquetado en una columna.

El procedimiento del ensayo se resume a continuación:

- Realizado en 7 etapas a relaciones de L/S acumuladas = 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 2 ; 5 ; 10 .
- Tamaño de partícula menor a 4 μm .
- Peso de la muestra depende de su densidad
- Tiempo de ensayo = 21 días
- Relación L/S (total) = 10 L/Kg

Ensayo de difusión. Descrito en la norma Holandesa NEN 7345

Ensayo utilizado para caracterizar la lixiviación en un material monolítico. Se sumerge el material monolítico en el líquido lixivante, y a intervalos específicos de tiempo se remueve y analiza el líquido.

El procedimiento de ensayo se resume a continuación:

- Realizado en 8 etapas con cambio de lixiviante en los siguientes tiempos: 0,25 ; 1 , 2,25; 4 ; 9 ; 16; 36 y 64 días.
- Volumen del liquido lixiviante = 5 veces el volumen de la muestra.
- Tiempo de ensayo total = 64 días.
- pH del liquido lixiviante = 4

Ensayo de dependencia del pH

Ensayo utilizado para evaluar el comportamiento químico de un contaminante en condiciones de exposición distintas. Este ensayo permite la determinar la capacidad neutralizadora del material.

El procedimiento de ensayo se resume a continuación:

- Se analizan 8 muestras en forma paralela a 8 valores de pH entre 4 y 12.
- Tamaño de partícula menor a 1 mm
- Peso de muestra = 15, 30 ó 60 g
- Tiempo de contacto 48 hrs
- Relación L/S (total) = 10 L/Kg
- Agitación constante.
- Calculo de la capacidad neutralizadora del material (ANC): se realiza una valorización previa de la cantidad de ácido (HNO₃) o base (NaOH) necesario para alcanzar un pH determinado.

Ensayos de Lixiviación

Ensayo utilizado para comprobar si un material cumple con la regulación ambiental correspondiente. Se caracterizan por su simplicidad y rapidez, y se realizan con agua desionizada y sin ajuste de pH.

Serie EN 12 457/ A-D

Las características generales de la serie se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 17: Clasificación características generales de la serie 12.457

Nº serie EN	Peso muestra (g)	Tamaño partícula (mm)	L/S (L/Kg)	Tiempo de contacto (hr)
12.457/A	175	<4	2	24
12.457/B	90	<4	10	24
12.457/C	175	<4	2/8	6 + 18
12.457/D	90	<10	10	24

Norma DIN 38.414-S4

Las características principales del ensayo se resume a continuación:

- Granulometría de la muestra menor a 10 mm
- Peso muestra = 50g
- Tiempo de contacto = 24 h
- Relación L/S = 10 mL/g

ANEXO 3. Metodología de análisis test TCLP

El ensayo consiste en tomar el pH de la muestra, cuando este valor es < 5 , se mezcla la muestra en proporción 1:20 con una solución lixivadora n°1; si el pH > 5 , se mezcla la muestra en la misma proporción anterior con una solución lixivadora n°2. La mezcla residuo y el lixivante se somete por 18 horas a agitación, luego es filtrado y el producto de la filtración es llamado “extracto TCLP”. Obtenido el extracto TCLP se puede leer directamente la muestra por un método instrumental.

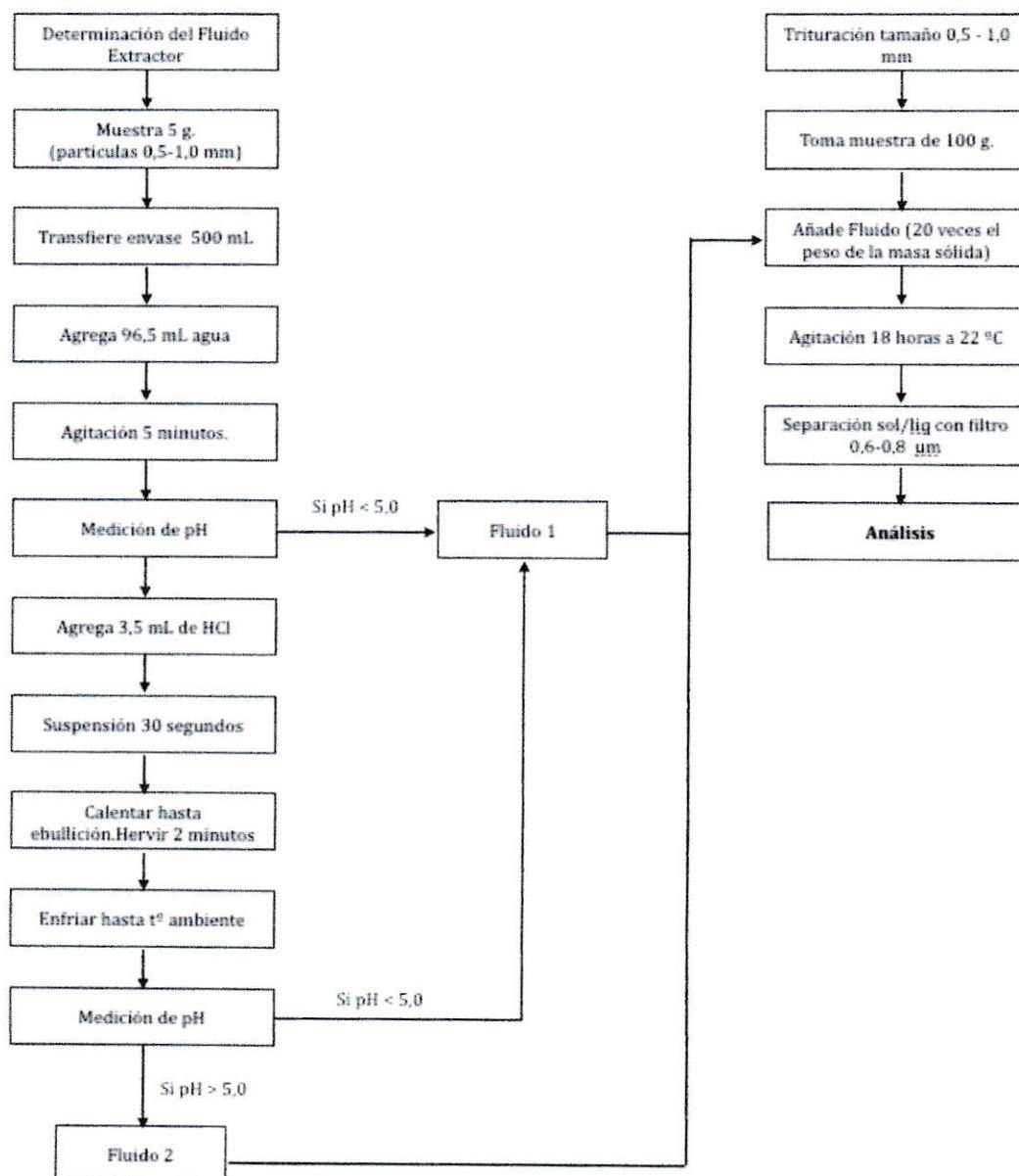
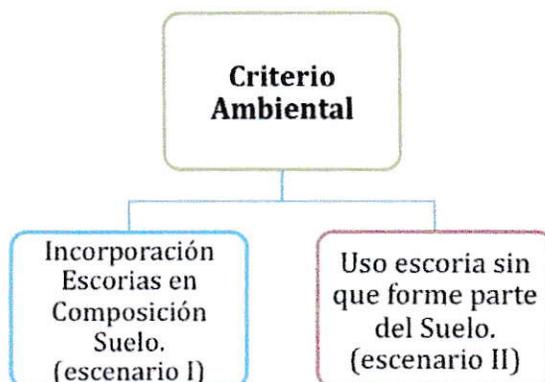


Figura 24. Metodología test TCLP

ANEXO 4. Metodología ejemplo de aplicación del Criterio Ambiental.

Para aplicar el criterio descrito en el punto 5.2.3 se presumen dos escenarios de estudio como se puede apreciar a continuación:



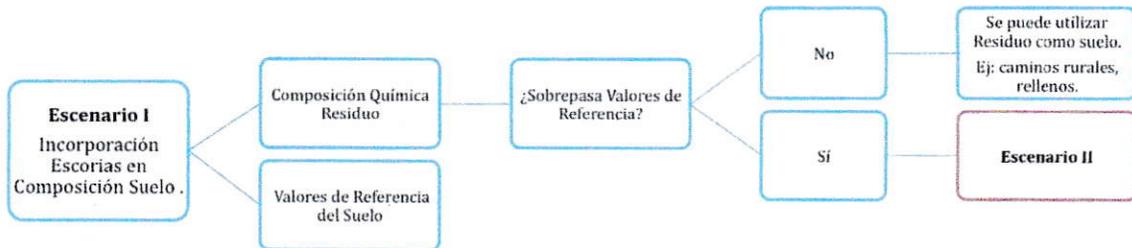
Escenarios del estudio de la viabilidad de utilización de la escoria según criterio ambiental.

I. ESCENARIOS:

Escenario I: Incorporación de escorias a la composición del suelo

Se estudia composición de las escorias y la composición de un suelo de referencia. Los valores de un suelo de referencia corresponden a valores de concentración de elementos mayoritarios presentes en un suelo cercano a la zona de estudio que no haya sufrido intervención humana. Una vez determinada la composición de las escorias y del suelo de referencia, se comparan ambos valores y se determina si su composición es similar. En el caso que el suelo y las escorias tengan la misma composición o composiciones muy similares, no existiría riesgo de incorporar la escoria en el suelo.

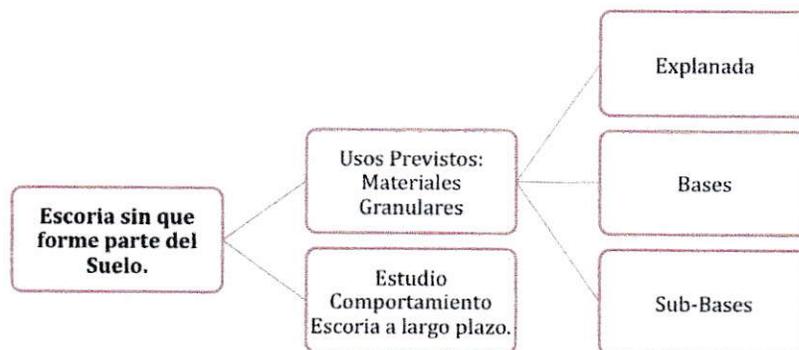
En ambos casos se analizan los siguientes parámetros: metales pesados, aniones, aceites minerales y compuestos EOX (Extractable Organic Halogens o compuestos orgánicos halogenados extraíbles con disolvente orgánico).



Esquemmatización escenario I.

Escenario II: Uso de la Escoria sin que llegue a formar parte del suelo.

Este escenario implica el uso de la escoria como material para la construcción o material granular en capas de rodadura, explanadas, bases y sub-bases de carreteras (figura 10). Sobre estos usos se realiza un estudio del comportamiento de la escoria a largo plazo (100 años) considerando el criterio ambiental del cambio de la composición del suelo (1%).



Esquemmatización escenario II.

Para realizar el estudio del comportamiento de la escoria a largo plazo, en los usos mostrados en la figura 15, se calculan los valores de *inmision* presentes en la escoria, en un periodo de 100 años. La inmision (mg/m^2) corresponde a la recepción de contaminantes de un medio, en este caso el suelo, procedentes de una fuente emisora, como la escoria dispuesta en los distintos usos.

La inmisión se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$I_{\text{escorias}} = E_{\text{escorias}} \cdot d_{\text{escorias}} \cdot h_{\text{capa}} \quad [\text{ec.11}]$$

Donde:

- I_{escorias} : inmisión [mg/m^2]
- E_{escorias} : emisión en el plazo de tiempo dado, [mg/kg]
- d_{escorias} : densidad aparente de las escorias, en [kg/m^3]
- h_{capa} : altura de la capa de escorias depositada en contacto con el suelo, en [m].

El valor de densidad es característico de la escoria analizada y el valor de la altura de la capa depende del uso que se le quiera dar. Por ejemplo para un material granular destinado a la construcción de carreteras se considera una altura de 0,7 m, que corresponde al valor de la altura representativa de los espesores utilizados para las diferentes capas que componen una carretera.

El cálculo del valor de emisión de las escorias se realiza considerando un test de columna bajo una relación líquido-sólido de laboratorio; el cálculo de la relación líquido-sólido real en un tiempo de 100 años y un factor de corrección de unidades. Es así como:

Los valores de emisión de columna se determinan por el ensayo de percolación para materiales granulares (NEN 7343; $L/S = 10 \text{ mg}/\text{L}$).

La determinación de la relación L/S real de las escorias en 100 años se determina con la infiltración del suelo en estudio ($\text{mm}/\text{año}$), la densidad de la escoria analizada (d_{escorias}), la altura de la capa (h_{capa}) y el tiempo antes señalado (100 años).

El factor de corrección, corresponde a una función de ajuste, que corrige las unidades de los valores obtenidos en el ensayo de percolación y en la relación L/S real de las escorias en 100 años.

Luego de obtener los valores de emisión para calcular los valores de inmisión [ec.11] se pueden calcular los valores de inmisión máxima [ec. 12]. Esto se realiza aplicando el cambio admisible de 1% a los valores de referencia del suelo.

El valor de inmisión máxima representa los valores límites con que contrastar los resultados obtenidos para la inmisión. Éstos se calculan de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$I_{m\acute{a}x} = \frac{\%}{100} \cdot V_{ref} \cdot d_{suelo} \cdot h_{prot.} \quad [ec\ 12]$$

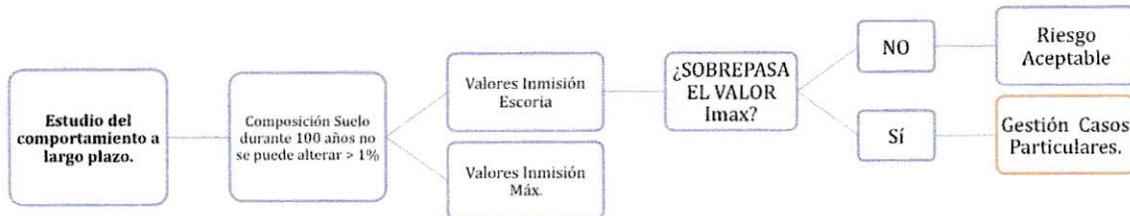
Donde:

- I_{max} : inmisión máx [mg/m²]
- % : porcentaje de cambio admisible, en este caso 1%
- V_{ref} : valor de referencia para el suelo en estudio [mg/ Kg]
- d_{suelo} : densidad del suelo [kg/m³]
- h_{prot} : altura del suelo que se desea proteger, [m].

Obtenidos los valores de inmisión máxima [ec.12] se pueden contrastar estos valores con los valores obtenidos para la inmisión de las escorias [ec.11]. Los posibles resultados de esta comparación son:

1. Valores que **NO** sobrepasen el cambio mayor a 1% de la composición del suelo durante 100 años.
2. Valores que **SI** sobrepasan un cambio mayor a 1% en la composición del suelo durante 100 años. En este caso se realiza un estudio (análisis de riesgos) del cambio que provoca en la composición del suelo un aumento mayor al 1% y el riesgo que supone para el medio ambiente.

A continuación se puede observar la esquematización de la metodología descrita.



Estudio del comportamiento a largo plazo.

Como se muestra en la figura anterior podría existir un caso en que para ciertos parámetros los valores de inmisión de las escorias sobrepasen a los valores de inmisión máxima. En este punto se realiza un análisis de los riesgos que implica aceptar un cambio de la composición del suelo mayor al 1% para los parámetros que superan los valores de inmisión máxima. Para los parámetros que no sobrepasan el criterio éste se mantiene.

Un análisis de riesgo es una evaluación de la probabilidad de ocurrencia de un evento adverso y de la magnitud de su impacto, si ocurriera. A este proceso de evaluación se le puede llamar gestión de casos particulares, ya que se analizan sólo los parámetros que sobrepasan el criterio.

La gestión de casos particulares se realiza calculando el porcentaje de cambio del parámetro que sobrepasa el criterio, para calcular nuevamente el valor de inmisión máxima [ec.12] de ese parámetro.

Si se analiza la metodología de estudio antes descrita, se puede apreciar que los procedimientos para establecer valores de inmisión máxima requieren una gran cantidad de tiempo y muchos análisis, por lo que su realización puede resultar demasiado

costosa. Por este motivo es que en el estudio ejemplo (realizado por la CAPV) se recurrió a un test de una norma europea de referencia para poder establecer la relación existente entre la lixiviación de contaminantes del test de percolación (NEN 7343), los valores de inmisión máxima (I_{max}) del suelo en estudio y el test de conformidad de referencia propuesto (pr EN 12.457/C); con el fin de simplificar la obtención de los valores límites que regularan las escorias. De esta forma, estableciendo la relación entre la emisión de contaminantes desde un *material monolítico* al suelo; los *valores máximos de inmisión* específicos del suelo en estudio y el *test de emisión propuesto* como test de referencia, se considera la mejor relación para establecer la emisión de las escorias, según los usos propuestos y condiciones ambientales del lugar donde se aplicarán.



Gestión de casos particulares.

Por lo tanto, para establecer las relaciones antes descritas se desarrollan dos determinaciones:

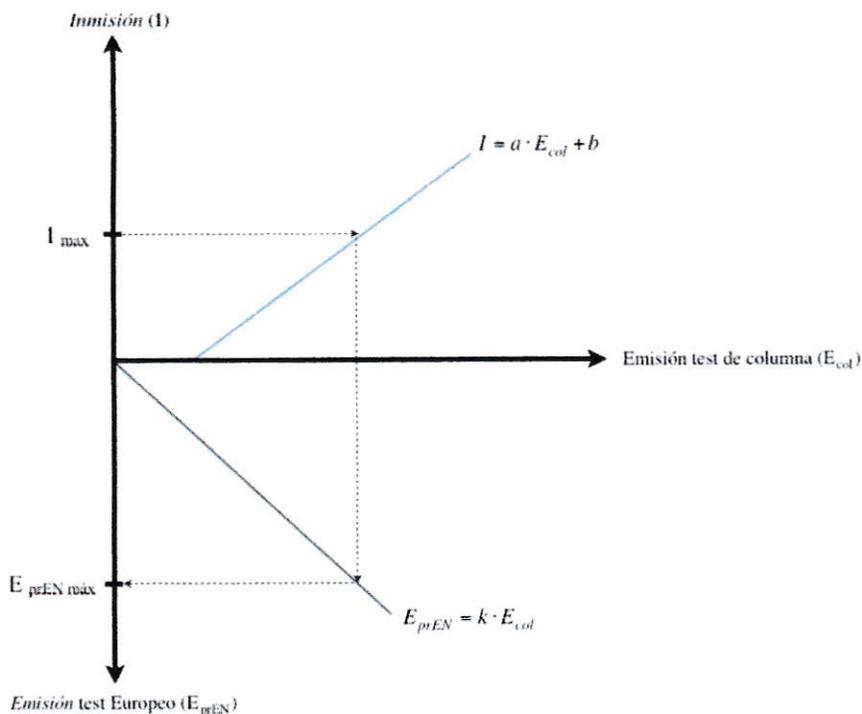
1. El estudio de la *relación* entre los Valores Máximos de Inmisión (I_{max}) y los resultados del ensayo de columna de percolación NEN 7343; el cual se obtiene del cálculo de la inmisión mediante la ecuación:

$$I = a \cdot E_{col} + b \quad [\text{ec. 13}]$$

2. Determinación de la correlación entre el ensayo de columna de percolación NEN 7343 y el test de la pre norma europea 12.457 procedimiento C.

$$E_{prEN} = k \cdot E_{col} \quad [\text{ec. 14}]$$

Estas determinaciones se relacionan por medio del siguiente gráfico:



Correlaciones entre la emisión del test de columna, emisión del test europeo e inmisión máx.

El objetivo de este anexo, es mostrar a modo de ejemplo, cómo se puede realizar el estudio del comportamiento ambiental del residuo, según un criterio ambiental definido, cuando se le quiere designar algún uso. Por lo tanto no se especifica de mayor forma los detalles de la obtención de los valores límites. Para mayores especificaciones, consultar: Libro Blanco, escorias de acería IHOBE, New trends on EAF slags management in the Basque Country, y el Building Material, Soil and Surface Waters Protection, Decree ; descritos en la bibliografía del presente seminario de título.

ANEXO 5. Resultados obtenidos en el Test TCLP Orgánico - Constituyentes Orgánicos Volátiles y Semi-Volátiles de dos muestras de escoria, negra y blanca de Gerdau AZA; y sus respectivos métodos de determinación y límites de detección.

Tabla 18. Test TCLP Orgánico – Constituyentes Orgánicos Volátiles

Compuesto	Escoria negra	Escoria blanca	CMP (D.S 148)
	mg/L		
Benceno	<0,5*	<0,5*	0,5
Tetracloruro de carbono	<0,1*	<0,1*	0,5
Clorobenceno	<5,0*	<5,0*	100
Cloroformo	<2,0*	<2,0*	6,0
1,2-dicloroetano	<0,5*	<0,5*	0,5
1,1-dicloroetileno	<0,5*	<0,5*	0,7
Metil etil cetona	<5,0*	<5,0*	200
Tetracloroetileno	<0,5*	<0,5*	0,7
Tricloroetileno	<0,5*	<0,5*	0,5
Cloruro de vinilo	<0,1*	<0,1*	0,2

(*) Valor bajo el Límite de detección. CMP: Concentración Máxima Permissible.

Tabla 19. Test TCLP Orgánico – Constituyentes Orgánicos Semi-Volátiles

Compuesto	Escoria negra	Escoria blanca	CMP (D.S 148)
	mg/L		
Clordano	<0,007*	<0,007*	0,03
o-cresol	<0,004*	<0,004*	200
m-cresol	<0,004*	<0,004*	200
p-cresol	<0,004*	<0,004*	200
Cresol	<5,0*	<5,0*	200
Endrin	<0,004*	<0,004*	0,02
Heptaclor (y su epóxido)	<0,004*	<0,004*	0,008
Lindano	<0,0008*	<0,0008*	0,4
Metoxiclor	<0,04*	<0,04*	10,0
Pentaclorofenol	<0,06*	<0,06*	100
2,4,5-triclorofenol	<0,004*	<0,004*	400
2,4,6-triclorofenol	<0,002*	<0,002*	2,0
2,4-D	<1,0*	<1,0*	10,0
1,4-diclorobenceno	<5,0*	<5,0*	7,5
2,4-dinitrotolueno	<0,13*	<0,13*	0,13
Hexaclorobenceno	<0,1*	<0,1*	0,13
Hexaclorobutadieno	<0,5*	<0,5*	0,5
Hexacloroetano	<1,0*	<1,0*	3,0
Piridina	<5,0*	<5,0*	5,0
2,4,5-Tp (silvex)	<1,0*	<1,0*	1,0
Toxafeno	<0,5*	<0,5*	0,5
Nitrobenceno	<2,0*	<2,0*	2,0

(*) Valor bajo el Límite de detección. CMP: Concentración Máxima Permissible.

Métodos de determinación y Límites de Detección de Compuestos Inorgánicos y Orgánicos.

El procedimiento de lixiviación para determinar movilidad de analitos tóxicos inorgánicos (NCh 2754. Of. 2003; Test TCLP - EPA 1311) establece que los métodos de determinación y sus límites de detección, para cada elemento, son:

Tabla 20. Métodos de determinación y límites de detección para compuestos inorgánicos.

Ensayo	Método	Límite de Detección
Preparación y Extracción	NCh 2754	---
Plomo	Abs. Atómica	0,2
Cadmio	Abs. Atómica	0,05
Mercurio	A.A/Vapor Frío	0,01
Cromo	Abs. Atómica	0,1
Bario	Abs. Atómica	5,0
Selenio	Abs. Atómica/Generación de Hidruros	0,05
Arsénico	Abs. Atómica	0,2
Plata	Abs. Atómica	0,2

Para determinar analitos orgánicos se utiliza la técnica de Cromatografía Gaseosa con detector FID y detector de Captura de Electrónica.

Tabla 21. Límites de cuantificación para compuestos orgánicos volátiles.

Constituyentes Volátiles	Límite de Cuantificación mg/l
Benceno	0,5
Tetracloruro de carbono	0,1
Clorobenceno	5,0
Cloroformo	2,0
1,2-dicloroetano	0,5
1,1-dicloroetileno	0,5
Metil etil cetona	5,0
Tetracloroetileno	0,5
Tricloroetileno	0,5
Cloruro de vinilo	0,1

Tabla 22. Límites de cuantificación para compuestos orgánicos semi volátiles.

Constituyentes Semi-Volátiles	Límite de Cuantificación mg/l
Clordano	0,007
o-cresol	0,004
m-cresol	0,004
p-cresol	0,004
Cresol	5,0
Endrin	0,004
Heptaclor (y su epóxido)	0,004
Lindano	0,0008
Metoxiclor	0,04
Pentaclorofenol	0,06
2,4,5-triclorofenol	0,004
2,4,6-triclorofenol	0,002
2,4-D	1,0
1,4-diclorobenceno	5,0
2,4-dinitrotolueno	0,13
Hexaclorobenceno	0,1
Hexaclorobutadieno	0,5
Hexacloroetano	1,0
Piridina	5,0
2,4,5-Tp (silvex)	1,0
Toxafeno	0,5
Nitrobenceno	2,0