



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**PEDRO HENRIQUE ANDRADE BORGES**

**USO DA ESCÓRIA DE ACIARIA COMO AGREGADO SIDERÚRGICO -  
UMA DISCUSSÃO SOBRE OS ASPECTOS AMBIENTAIS E LEGAIS NO  
BRASIL**

**LIMEIRA  
2020**

**PEDRO HENRIQUE ANDRADE BORGES**

**USO DA ESCÓRIA DE ACIARIA COMO AGREGADO SIDERÚRGICO -  
UMA DISCUSSÃO SOBRE OS ASPECTOS AMBIENTAIS E LEGAIS NO  
BRASIL**

Dissertação apresentada à Faculdade de Tecnologia da  
Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos  
exigidos para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia, na  
Área de Ambiente.

Orientadora: Profa. Dra. Carmenlucia Santos Giordano Penteado

Coorientador: Prof. Dr. Rafael Costa Freiria

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA  
DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO PEDRO  
HENRIQUE ANDRADE BORGES, ORIENTADO PELA PROFA.  
DRA. CARMENLUCIA SANTOS GIORDANO PENTEADO E  
PELO PROF. DR. RAFAEL COSTA FREIRIA.

**LIMEIRA  
2020**

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Faculdade de Tecnologia  
Felipe de Souza Bueno - CRB 8/8577

B732u Borges, Pedro Henrique Andrade, 1987-  
Uso da escória de aciaria como agregado siderúrgico : uma discussão sobre os aspectos ambientais e legais no Brasil / Pedro Henrique Andrade Borges. – Limeira, SP : [s.n.], 2020.

Orientador: Carmenlucia Santos Giordano Penteadó.

Coorientador: Rafael Costa Freiria.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia.

1. Resíduos industriais. 2. Escória (Metalurgia). 3. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). I. Penteadó, Carmenlucia Santos Giordano, 1972-. II. Freiria, Rafael Costa, 1976-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Tecnologia. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Use of steel slag as aggregate : a discussion on environmental and legal aspects in Brazil

**Palavras-chave em inglês:**

Factory and trade waste

Slag

Recycling (Waste, etc.)

**Área de concentração:** Ambiente

**Titulação:** Mestre em Tecnologia

**Banca examinadora:**

Rafael Costa Freiria [Coorientador]

Fernando Cardozo Fernandes Rei

Marco Aurélio Soares de Castro

**Data de defesa:** 28-02-2020

**Programa de Pós-Graduação:** Tecnologia

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-9367-241X>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.onpq.br/0377378884310638>

## **COMISSÃO JULGADORA – DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Candidato:** Pedro Henrique Andrade Borges

**Data da Defesa:** 28/02/2020

**Título da Dissertação:** USO DA ESCÓRIA DE ACIARIA COMO AGREGADO SIDERÚRGICO – UMA DISCUSSÃO SOBRE OS ASPECTOS AMBIENTAIS E LEGAIS NO BRASIL

**Banca:**

Prof. Dr. Rafael Costa Freiria (Presidente - FT/UNICAMP)

Prof. Dr. Fernando Cardozo Fernandes Rei (Universidade Católica de Santos)

Prof. Dr. Marco Aurélio Soares de Castro (FT/UNICAMP)

A ata da defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

“Foi o tempo que dedicaste a tua rosa,  
que a fez tão importante.”

**Antoine de Saint-Exupéry**

## AGRADECIMENTOS

À minha estimada orientadora, Professora Dra. Carmenlucia Santos Giordano Penteado, pela oportunidade de desenvolver este trabalho, por ter me recebido de coração e braços abertos na Unicamp e, principalmente, por ter sido a grande responsável pelo meu interesse pela pesquisa acadêmica.

Ao Professor Dr. Rafael Costa Freiria pela valiosa colaboração, indispensável para o desenvolvimento deste trabalho, e pela cordialidade e atenção que sempre me deu.

À ArcelorMittal, em especial ao Gerente Geral de Sustentabilidade Guilherme Abreu e ao Diretor da Unidade de Negócios da Usina de Piracicaba, Luís Augusto de Arruda Penteado, por me incentivarem e possibilitarem a realização desta pesquisa, paralelamente à execução das minhas atividades na empresa.

Às amigas e colegas de trabalho Luciana Corrêa Magalhães e Sandra Nogueira de Souza, por tantos ensinamentos passados e por sempre acreditarem no meu potencial. Vocês são exemplos de competência e ética, por meio dos quais sempre tenho me espelhado.

Àqueles que me inspiraram e contribuíram com a minha formação profissional ao longo destes anos: Wander Borges, Rodrigo Junqueira, Marco Antônio Bosco, Leonardo Ribeiro, Elisabet Williams, Tatiana Finamore e Daniella Batista, obrigado por me impulsionarem a dar sempre o melhor de mim no trabalho.

Aos colegas da Unicamp, pela amizade e companheirismo nestes três anos de Mestrado. Adélia, Beatriz, Laís e Sandro, foi um prazer estudar e conviver com vocês.

A todos os meus amigos e à minha família, em especial aos meus pais, Wander e Rosarina, por me fornecerem as bases e o conforto de uma família, bem como a força, o suporte e o amor em todos os momentos da minha vida.

A todos que, de alguma forma, colaboraram com a elaboração deste trabalho, meu reconhecimento.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## RESUMO

O aumento do consumo de recursos naturais pela sociedade moderna coloca frequentemente em pauta discussões sobre a sustentabilidade dos processos industriais. Dentre estes processos, a siderurgia figura como um setor altamente consumidor de recursos e grande gerador de resíduos sólidos, dentre os quais se destacam as escórias de aciaria, objeto desta pesquisa. O desenvolvimento da pesquisa se deu por meio de análise documental. Foi realizada uma revisão da literatura sobre conceitos, aplicações e requisitos técnicos para o uso das escórias, bem como os principais marcos regulatórios nacionais e dos Estados Unidos e da União Europeia. A partir da análise dos marcos regulatórios, pode-se concluir que não é indicada a criação de uma norma técnica genérica, que englobe todas as possíveis aplicações para o agregado siderúrgico. Como suas características físico-químicas são variáveis, o ideal é que cada empresa geradora estabeleça seus próprios controles de qualidade, a fim de verificar se as escórias atendem ou não a determinados parâmetros de qualidade para aplicação como coprodutos, com base nas normas existentes. Se estas não existirem, as discussões técnicas podem ocorrer junto às entidades responsáveis pela sua normatização, considerando as particularidades de cada aplicação. Os marcos regulatórios internacionais apresentados demonstram os benefícios de distinguir os conceitos de resíduos e coprodutos, sem fugir dos requisitos ambientais a serem cumpridos, tanto pelos geradores quanto pelos consumidores. Verifica-se que a prática de reciclagem e reutilização de coprodutos provenientes dos processos de beneficiamento das escórias de aciaria já é uma realidade no Brasil e no mundo, apresentando impactos ambientais e econômicos positivos para todas as partes envolvidas. Entretanto, o fato de a legislação ambiental brasileira não diferenciar resíduo de coproduto dificulta a ampla disseminação das escórias como coprodutos, representando um retrocesso em relação aos países desenvolvidos e também às diretrizes da própria Política Nacional de Resíduos Sólidos, além de desestimular o desenvolvimento de pesquisas relacionadas a novas aplicações para estes materiais.

**Palavras-chave:** resíduo, coproduto, legislação

## ABSTRACT

The increase in the consumption of natural resources by modern society frequently raises discussions on the sustainability of industrial processes. Among these processes, the steel industry appears as a highly resource-consuming sector and a large generator of solid waste, such as the steelmaking slag, object of this research. The development of the research took place through documentary analysis. A literature review was carried out on concepts, applications and technical requirements for the use of slags, as well as the main national and United States and European Union regulatory frameworks. From the analysis of the regulatory frameworks, it can be concluded that the creation of a generic technical standard which encompasses all possible applications for the steel aggregate is not indicated, as their physical-chemical characteristics are variable. Instead, it is better that each generating company establishes its own quality controls, in order to verify whether or not the slags meet certain quality parameters for application as co-products, based on existing standards. If these do not exist, technical discussions may take place with the entities responsible for their standardization, considering the particularities of each application. The international regulatory frameworks presented demonstrate the benefits of distinguishing the concepts of waste and co-products, without escaping the environmental requirements to be met, both by generators and consumers. It appears that the practice of recycling and reusing co-products from the steel slag processing processes is already a reality in Brazil and in the world, with positive environmental and economic impacts for all parties involved. However, the fact that Brazilian environmental legislation does not differentiate waste from co-products hinders the wide dissemination of slags as co-products, representing a setback in relation to developed countries and also the guidelines of the National Solid Waste Policy itself, in addition to discouraging the development of research related to new applications for these materials.

**Key words: residue, co-product, legislation**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Geração de resíduos siderúrgicos por tipo. ....	23
Figura 2. Fluxo simplificado de produção do aço. ....	25
Figura 3. Caracterização ambiental das escórias de aciaria.....	27
Figura 4. Escória de aciaria (a) e agregado siderúrgico (b).....	28
Figura 5. Planta de beneficiamento de escória de aciaria.....	29
Figura 6. Esquema do processo de beneficiamento de escória de aciaria. ....	30
Figura 7. Destinação das escórias no Brasil. ....	31
Figura 8. Aplicação das escórias de aciaria no Brasil (2017).....	32
Figura 9. Pesquisas desenvolvidas no Brasil relacionadas às escórias de aciaria. ....	39
Figura 10. Localização das indústrias siderúrgicas no Brasil.....	53
Figura 11. Fluxograma para determinação do estado das escórias de aciaria considerando os artigos 5º e 6º da Diretiva Europeia sobre Resíduos 2008/98/EC.....	64
Figura 12. Ruptura em pavimento causada por expansão de escória de aciaria.....	71

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1. Produção mundial de aço bruto (1000t). .....	22
Tabela 2. Composição química aproximada das escórias de aciaria.....	27
Tabela 3. Usos aprovados para Coprodutos Industriais, segundo NR 538 – Wisconsin.....	60
Tabela 4. Registros das Escórias no EINECS. ....	65

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

**ABM** – Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração

**ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas

**BDTD** – Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações

**Ca** – Cálcio

**CaO** – Óxido de Cálcio

**CAPES** – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

**CB** – Comitê Brasileiro

**CBUQ** – Concreto Betuminoso Usinado a Quente

**CCABrasil** – Centro de Coprodutos Aço Brasil

**CETESB** – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

**CONAMA** – Conselho Nacional do Meio Ambiente

**CNI** – Confederação Nacional das Indústrias

**CNT** – Confederação Nacional do Transporte

**CO<sub>2</sub>** – Dióxido de Carbono

**DNIT** – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

**DRN** – Departamento de Recursos Naturais

**ECHA** – European Chemicals Agency

**EFE** – Escória de Forno Elétrico

**EINECS** - European Inventory of Existing Chemical Substances

**ELD** – Escória de Aciaria LD

**EUA** – Estados Unidos da América

**EUROFER** – European Steel Association

**EUROSLAG** – European Slag Association

**EWC** – European Waste Catalogue

**FEA** – Forno Elétrico a Arco

**IBAMA** – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

**ISO** – International Organization for Standardization

**K** – Potássio

**LD** – Linz-Donawitz

**MAPA** – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

**MG** – Minas Gerais

**Mg** – Magnésio

**MgO** – Óxido de Magnésio

**MMA** – Ministério do Meio Ambiente

**mm** – Milímetro

**MPa** – Mega Pascal

**MTR** - Manifesto de Transporte de Resíduos

**NBR** – Norma Brasileira

**P** – Fósforo

**PGRS** – Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos

**PNRS** – Política Nacional de Resíduos Sólidos

**RCC** – Resíduos da Construção Civil

**REACH** – Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals

**S** – Enxofre

**SciELO** - Scientific Electronic Library Online

**SiO<sub>2</sub>** – Dióxido de Silício

**UNICAMP** – Universidade Estadual de Campinas

**WSA** – World Steel Association

## SUMÁRIO

CAPÍTULO I .....	15
1.1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO .....	16
1.2. ESTRUTURA DA PESQUISA.....	18
1.3. METODOLOGIA.....	19
CAPÍTULO II.....	21
2.1 A Indústria Siderúrgica.....	22
2.1.1 Usinas Integradas.....	24
2.1.2 Usinas Semi-integradas.....	25
2.2 As Escórias de Aciaria.....	26
2.3 O Agregado Siderúrgico.....	28
2.4 Possíveis Usos e Aplicações.....	31
2.4.1 Uso como Material para Base e Sub-base em Pavimentação.....	32
2.4.2 Uso na Produção de Massa Asfáltica.....	34
2.4.3 Uso como Agregado na Produção de Concreto.....	35
2.4.4 Uso como Lastro Ferroviário.....	36
2.4.5 Uso na Produção de Cimento.....	36
2.4.6 Uso na Agricultura.....	37
2.4.7 Uso como Material de Nivelamento e Cobertura de Terrenos e Aterros.....	38
2.5 Tendências de Pesquisas no Brasil.....	38
CAPÍTULO III.....	46
3.1. O Contexto Brasileiro.....	47
3.1.1. LEGISLAÇÕES FEDERAIS.....	47
3.1.1.1 Lei 12.305/2010.....	47
3.1.1.2. Resolução CONAMA 313/2002.....	51
3.1.1.3. Instrução Normativa IBAMA n.13/2012.....	52
3.1.2. LEGISLAÇÕES ESTADUAIS.....	52

3.1.2.1 Minas Gerais .....	54
3.1.2.2 São Paulo .....	55
3.1.2.3 Rio de Janeiro .....	55
3.1.3. <i>NORMAS TECNICAS</i> .....	56
3.1.3.1 ABNT NBR 10.004/2004 .....	56
3.1.3.2 ABNT NBR 16.364/2015 .....	57
3.1.3.3 DNIT 406/2017 e DNIT 407/2017 .....	57
4.2 Panorama Internacional .....	57
4.2.2 <i>Estados Unidos</i> .....	58
4.2.3 <i>Europa</i> .....	62
4.2.3.1 A Diretiva Europeia sobre Resíduos 2008/98/EC .....	63
4.2.3.2 Regulamento REACH nº 1907/2006 .....	64
4.2.3.3 Lista Europeia de Resíduos .....	66
CAPÍTULO IV .....	67
4.1 Panorama Atual .....	68
CAPÍTULO V .....	73
5.1 Considerações Finais .....	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	76

**CAPÍTULO I**  
**INTRODUÇÃO, OBJETIVO E METODOLOGIA**

## 1.1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO

É crescente a preocupação das empresas dos setores público e privado em relação às questões ambientais e a todas as suas vertentes ligadas à sustentabilidade, dada a progressiva conscientização da população mundial sobre o tema. Somado a isso, o aumento do consumo de recursos naturais pela sociedade moderna coloca frequentemente em pauta discussões sobre o futuro dos processos industriais, principalmente os associados à extração de recursos naturais não renováveis e à redução da geração de resíduos.

No Brasil, a atuação do setor industrial no âmbito do gerenciamento de resíduos foi impulsionada pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei 12.305 em 02 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010), que estabeleceu as diretrizes para a gestão integrada dos resíduos sólidos, com base em diversos princípios norteadores, dentre os quais se destacam: a prevenção e a precaução, a visão sistêmica, a ecoeficiência, a responsabilidade compartilhada entre poder público, fabricantes e consumidores, e o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania. No contexto desta pesquisa, este último princípio merece destaque, por apresentar, em termos legais, os benefícios que podem ser obtidos por meio do processo de valorização de resíduos.

A indústria siderúrgica é um dos principais exemplos neste contexto, em virtude da grande quantidade de resíduos sólidos que gera diariamente. Dentre estes, as escórias de aciaria se sobressaem, em termos de volume e pela constante busca pela valorização técnica e econômica, que tem permitido a sua comercialização, em detrimento à disposição final em aterros industriais. A inserção de resíduos em outras cadeias produtivas como matérias-primas alternativas permite que eles sejam denominados subprodutos (ou coprodutos<sup>1</sup>, nomenclatura mais utilizada pelo ramo da siderurgia).

As escórias de aciaria geradas pela indústria siderúrgica se diferenciam, majoritariamente, pela rota tecnológica em que são originadas: por meio de fornos elétricos a arco (FEA), ou em fornos à injeção de oxigênio (LD), sendo denominadas Escórias de Forno Elétrico (EFE), e Escórias de Aciaria LD (ELD), respectivamente. Ambas, em razão de suas propriedades químicas

---

<sup>1</sup> Segundo a ISO 14040:2006, coproduto é qualquer um de dois ou mais produtos provenientes do mesmo processo de unidade ou sistema de produto (ISO 14040, p.3.2006).

e físicas, apresentam potencial elevado para aplicação na construção civil, em substituição aos materiais de construção convencionais (agregados naturais miúdos e graúdos), além da similaridade visual atribuída aos produtos finais. Estudos publicados na literatura técnico-científica nacional e internacional comprovam que a adição das escórias em substituição a estes materiais, além de atender as especificações técnicas, em muitos casos ainda melhoram as propriedades mecânicas dos materiais de construção (FARIA, 2007).

Entretanto, o fato da legislação ambiental vigente no Brasil não diferenciar resíduo de coproduto (ou subproduto), faz com que cada Estado da Federação aborde a questão de forma distinta. Assim, para cada uso proposto para um determinado tipo de escória, é necessária a autorização do órgão ambiental estadual para a sua comercialização e utilização, tornando o processo excessivamente moroso e burocrático.

Neste contexto, a Cetesb (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) é o órgão ambiental mais conservador, pois limita a utilização das escórias de aciaria apenas para a pavimentação de forma confinada, isto é, com cobertura de uma superfície impermeável (como concreto ou asfalto).

Nos demais estados brasileiros, não há restrições de uso por parte dos órgãos ambientais. Porém, tampouco existem autorizações formais para uma determinada aplicação, como ocorre no Estado de São Paulo. Apesar de tal fato representar um cenário aparentemente favorável para as indústrias, a situação, na verdade, configura riscos a todos os envolvidos: aos geradores, por estarem expostos a possíveis mudanças repentinas e mais restritivas na legislação; aos consumidores, por desconhecerem os critérios ambientais para utilização do coproduto; e até mesmo aos órgãos fiscalizadores, por não estabelecerem, de maneira precisa, quais as condições adequadas de gerenciamento e aplicação das escórias de aciaria, dificultando a garantia de que suas aplicações, de fato, são ambientalmente seguras.

Toda essa falta de amparo legal dificulta a ampla disseminação do uso das escórias como coprodutos, impactando negativamente o atendimento à própria PNRS, e desestimulando o desenvolvimento de pesquisas relacionadas a novas aplicações para estes materiais. As escórias de aciaria são catalogadas como resíduos sólidos industriais não perigosos pela legislação ambiental vigente (“Escórias de produção de ferro e aço”, sob o Código A013 do Anexo II da Resolução Conama nº 313, de 29 de outubro de 2002). Entretanto, o conceito de resíduo sólido industrial da

mesma resolução, apresentado a seguir, não condiz com a realidade atual das escórias de aciaria no Brasil:

“Todo resíduo que resulte de atividades industriais e que se encontre nos estados sólido, semissólido, gasoso - quando contido, e líquido - cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível” (BRASIL, 2002, p. 85-91).

Após passarem por processos de beneficiamento mundialmente conhecidos, consolidados e viáveis tanto tecnicamente quanto economicamente, as escórias de aciaria passam a ser chamadas de agregado siderúrgico pelas empresas geradoras com o intuito de valorizá-las, pois se transformaram em um coproduto passível de comercialização, com diversos usos econômicos ambientalmente seguros.

Desta forma, esta pesquisa tem por objetivo apresentar e discutir possíveis formas de valorização e aplicação das escórias de aciaria, bem como os marcos regulatórios nacionais e internacionais.

## **1.2. ESTRUTURA DA PESQUISA**

De forma a atender o objetivo proposto nesta pesquisa, foi realizado o levantamento de dados e informações referentes à geração e ao gerenciamento das escórias de aciaria no Brasil, levando em consideração também a realização de um inventário acadêmico com as tendências de pesquisas sobre o tema, considerando uma abordagem crítica acerca dos objetivos e conclusões de cada uma das alternativas de reutilização, reciclagem e destinação final das escórias de aciaria.

No que se refere aos marcos regulatórios, foram analisadas as regulamentações nacionais e estaduais pertinentes. Em relação ao contexto internacional, foram adotadas como referência, as regulamentações dos Estados Unidos da América (EUA) e Europa – de forma a prover subsídios que possam contribuir para a proposição de políticas públicas voltadas para a classificação das escórias de aciaria como coprodutos no Brasil. Outros países também são referência nesse sentido (tais como o Japão, ou até mesmo a China), mas houve grande dificuldade em acessar as regulamentações destes países.

No Capítulo II, é apresentada a fundamentação teórica sobre as escórias de aciaria, incluindo rotas de geração, tipos de escórias e suas características, bem como sobre o beneficiamento da escória para uso como agregado siderúrgico, e os seus principais usos e aplicações. Ainda, é apresentado um item sobre as tendências de pesquisas nesta área, no contexto brasileiro.

No Capítulo III são expostos alguns dos principais marcos regulatórios nacionais e internacionais, para fundamentar a posterior discussão a respeito do enquadramento das escórias de aciaria perante a legislação, no capítulo IV. No que se refere à legislação nacional, destaca-se a discussão sobre os princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos e sua relação com o enquadramento legal das escórias como um coproduto. As considerações finais se encontram no capítulo V.

### **1.3. METODOLOGIA**

A abordagem metodológica desta pesquisa está pautada na revisão de literatura e na análise documental, onde se buscou levantar os principais referenciais teóricos sobre a geração e processamento das escórias de aciaria, as aplicações mais consagradas dos agregados siderúrgicos (material granular resultante do beneficiamento das escórias), e os marcos regulatórios nacionais e internacionais (Estados Unidos e União Europeia).

Na análise dos marcos regulatórios do contexto brasileiro, foram analisados os conteúdos das principais legislações nacionais e estaduais e normas técnicas relacionadas com os objetivos da pesquisa. A escolha dos marcos regulatórios internacionais foi feita em função da representatividade dos países, no que se refere à geração de escórias, e aos avanços realizados no sentido de viabilizar o uso das mesmas em diferentes aplicações.

De forma a identificar as pesquisas relacionadas com escória de aciaria no Brasil, foram realizados levantamentos, ao longo de 2018, 2019 e 2020, na Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD) e na plataforma Scientific Electronic Library Online (SciELO). Os termos utilizados na busca foram: “escória de aciaria”, “agregado siderúrgico” e “legislação”. De modo a refiná-la, foi predeterminado que os termos deveriam estar contidos no título ou no resumo.

A busca na BDTD retornou 50 resultados com o termo “escória de aciaria” e 5 resultados com o termo “agregado siderúrgico”, mas que já constavam nos 50 resultados anteriores. Destas pesquisas, 36 são dissertações de mestrado e 14 são teses de doutorado. Ao pesquisar pelos termos

“escória de aciaria” em conjunto com “legislação”, não foi encontrado nenhum resultado, assim como os termos “agregado siderúrgico” e “legislação”.

As buscas por periódicos brasileiros na plataforma SciELO, por sua vez, encontraram apenas 11 resultados com o termo “escória de aciaria”, e nenhum resultado com o termo “agregado siderúrgico”. Também não foram encontrados resultados com o termo “legislação” em conjunto com “escória de aciaria” ou “agregado siderúrgico”.

**CAPÍTULO II**  
**FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

## 2.1 A Indústria Siderúrgica

A Siderurgia é o ramo da metalurgia que estuda principalmente a fabricação do aço, que é uma liga metálica que consiste essencialmente de ferro (pelo menos 98%) e carbono (até 2%), além de outros compostos, tais como o fósforo e o enxofre (CARVALHO et al., 2015). Por ser considerado um produto bastante resistente e versátil, além de infinitamente reciclável, o aço é amplamente empregado em diversos segmentos em todo o mundo, tais como a construção civil, o setor automotivo e o setor de eletrodomésticos da linha branca. A siderurgia brasileira foi responsável, nos anos de 2016 e 2017, por 2,1% da produção mundial de aço, sendo considerada a nona maior do mundo (Tabela 1). Só em 2017, a produção de aço bruto no Brasil foi de aproximadamente 34 milhões de toneladas, sendo o maior produtor da América Latina (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018).

**Tabela 1.** Produção mundial de aço bruto (1000t).

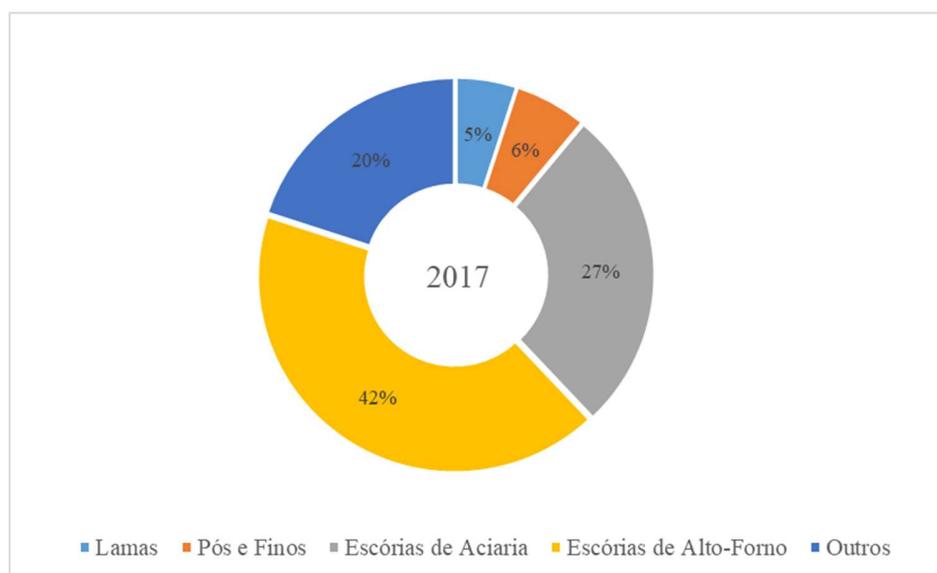
Posição Relativa	Países	2016	2017
1	China	786,9	831,7
2	Japão	104,8	104,7
3	Índia	95,5	101,4
4	Estados Unidos	78,5	81,6
5	Rússia	70,5	71,3
6	Coreia do Sul	68,6	71,0
7	Alemanha	42,1	43,3
8	Turquia	33,2	37,5
<b>9</b>	<b>Brasil</b>	<b>31,3</b>	<b>34,4</b>
10	Itália	23,4	24,1

**Fonte:** adaptado de Instituto Aço Brasil (2018)

Por outro lado, os processos siderúrgicos são ambientalmente agressivos, com alto potencial poluidor em termos de consumo de energia, emissões atmosféricas e geração de resíduos. Para cada tonelada de aço produzida no Brasil, são gerados aproximadamente 607 quilos de resíduos sólidos (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018). As escórias de aciaria, objetos de estudo da presente pesquisa,

estão entre os principais resíduos de tais processos, representando cerca de 25 a 30% da geração total de resíduos sólidos na siderurgia (Figura 1). No mundo, cerca de 70% das escórias são oriundas de usinas integradas, sendo o percentual restante produzido pelas usinas semi-integradas. No Brasil, esta proporção é de 77% e 23%, respectivamente (CNI, 2012).

**Figura 1.** Geração de resíduos siderúrgicos por tipo.



**Fonte:** Adaptado de Instituto Aço Brasil (2018).

As aciarias contribuem com a maior parte do total de resíduos gerados em uma indústria siderúrgica, ficando atrás apenas dos altos fornos, responsáveis pela geração da escória mais valorizada no mercado atualmente: a escória de alto forno, amplamente utilizada na produção de diversos tipos de cimento, inclusive com a regulamentação da NBR 5754 (ABNT, 1992). Os pós de aciaria e os finos de minério aparecem em seguida, podendo ser injetados em diferentes processos de acordo com as suas características físico-químicas: altos fornos, fornos rotativos para recuperação de metais nobres (como o zinco), processos de sinterização, dentre outros. As lamas de alto forno podem ser utilizadas pela indústria de cerâmica vermelha ou, assim como as lamas da aciaria, serem misturadas aos pós e finos para posterior consumo na sinterização. Enquadram-se como “outros” as carepas geradas na aciaria e na laminação e os resíduos provenientes dos processos de beneficiamento da sucata (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018).

As indústrias siderúrgicas se diferenciam pelas técnicas e tecnologias empregadas em seu processo produtivo, podendo ser integradas, semi-integradas ou não integradas; estas últimas não produzem o aço propriamente dito, apenas operam uma das etapas do seu processo de fabricação: a redução ou a conformação mecânica (laminação). As usinas integradas e semi-integradas são detalhadas a seguir.

### ***2.1.1 Usinas Integradas***

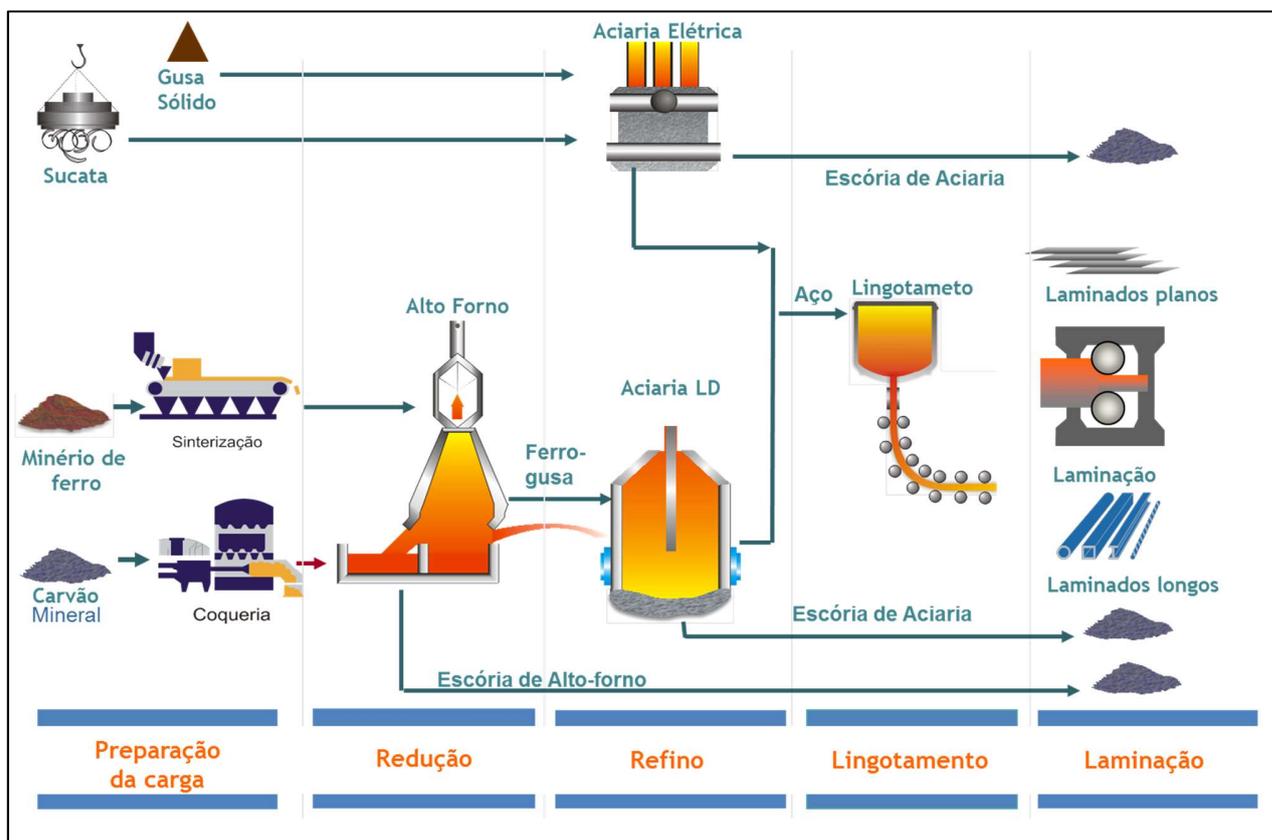
As usinas integradas executam as três etapas básicas do processo de fabricação do aço: redução, refino e conformação mecânica (subdividida nas etapas de lingotamento e laminação), conforme ilustra a Figura 2.

A etapa de redução ocorre em altos-fornos, onde o ferro gusa é produzido a partir do minério de ferro (pelotizado na forma de sinter) com o auxílio de um agente redutor – o carbono, obtido por meio do carvão vegetal ou do coque (produzido a partir do carvão mineral). A fase de refino ocorre na aciaria propriamente dita, quando o ferro gusa líquido é transformado em aço dentro de fornos conversores à injeção de oxigênio, também conhecidos como conversores LD<sup>2</sup>. Em ambas as etapas, as impurezas presentes nas matérias-primas formam as escórias de alto-forno e de aciaria, respectivamente. A conformação mecânica, por sua vez, acontece após a solidificação do aço semiacabado (lingotamento), e consiste em sua laminação objetivando a formação dos produtos acabados, tais como vergalhões, tubos, chapas, entre outros (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018).

---

<sup>2</sup> Linz e Donawitz são os nomes de duas cidades austríacas onde foram introduzidos os primeiros conversores a sopro de oxigênio.

Figura 2. Fluxo simplificado de produção do aço.



Fonte: Instituto Aço Brasil (2010).

### 2.1.2 Usinas Semi-integradas

As usinas semi-integradas, por sua vez, executam apenas duas etapas do processo: o refino e a conformação mecânica, ou seja, sem a incorporação da etapa de redução. Desta forma, as matérias primas utilizadas, principalmente a sucata ferrosa e o ferro gusa, são adquiridas externamente para posterior consumo no FEA, geralmente em proporções que variam de 70 a 80% de sucata para 20 a 30% de gusa.

O princípio de operação de uma aciaria elétrica é a utilização de energia elétrica para promover curtos circuitos em eletrodos de grafite inseridos no forno que, em contato com a carga metálica, produzem calor suficiente para fundi-la (CARVALHO et al., 2015). Queimadores a gás natural ou injetoras de oxigênio também são utilizados para acelerar o processo. Após este procedimento, e antes da conformação mecânica, pode haver ainda um refino secundário do aço, tanto nas usinas integradas quanto nas semi-integradas. Esta etapa é denominada metalurgia

secundária, e consiste na adição de ligas dentro de um forno panela, com o objetivo de enriquecer a qualidade final do produto desejado.

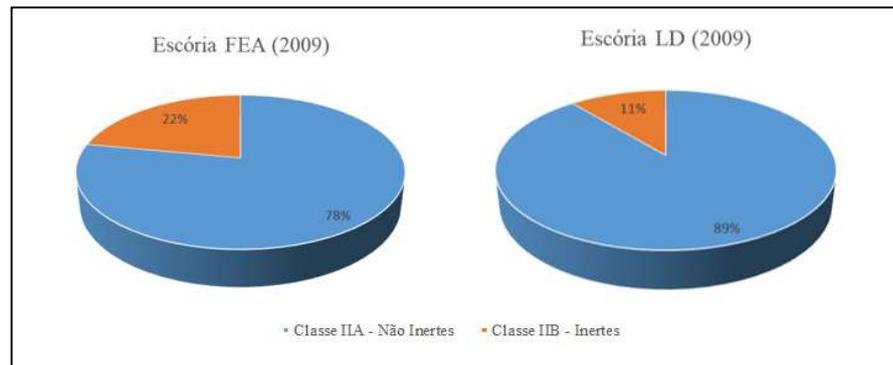
## 2.2 As Escórias de Aciaria

Na revisão de literatura realizada, não foi encontrada uma definição de escória em normas técnicas ou legislações atuais vigentes no Brasil. Kiessling e Lange (1978, p. 55-56) definem escória como “*soluções formadas por óxidos de metais, sulfetos e fluoretos parcialmente ou completamente líquidos, menos densos e insolúveis que o aço líquido nas temperaturas de fabricação*”.

Em outros termos, as escórias são os compostos formados pela fusão de fundentes de metais, minérios e impurezas durante processos metalúrgicos, consistindo principalmente de óxidos de ferro, cálcio, magnésio e outros elementos traço (FERRARO, 2014). As escórias são inerentes aos processos siderúrgicos, sendo geradas tanto em usinas integradas como semi-integradas, e desempenham funções fundamentais, como:

- Separar as impurezas do aço produzido;
- Conservar o calor do aço durante a sua produção;
- Proteger o aço do superaquecimento, por possuírem baixa condutibilidade térmica.

As escórias de aciaria são classificadas mundialmente como resíduos não perigosos e, em sua maioria, não inertes (Figura 3). Entretanto, os parâmetros que as classificam como resíduos classe IIA (não perigosos e não inertes), conforme NBR 10.004/2004, não são críticos, por também estarem presentes em solos argilosos, na areia lavada e na brita de gnaiss (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2010).

**Figura 3.** Caracterização ambiental das escórias de aciaria.

Fonte: Adaptado de Instituto Aço Brasil (2010).

As principais diferenças entre as escórias de aciaria são o teor dos seus elementos e a sua basicidade (calculada pela relação  $\text{CaO} + \text{MgO} / \text{SiO}_2$ ). A Tabela 2 mostra os dados de composição química média de escórias FEA e LD de usinas brasileiras, e dados médios de composição de escórias de outros países. Tal heterogeneidade está relacionada aos tipos de fundentes (cal virgem ou dolomita, por exemplo) ou à qualidade da sucata utilizada, fatores que incidem diretamente na quantidade de óxidos de magnésio presentes nas escórias de aciaria (MOTZ e GEISELER, 2001).

**Tabela 2.** Composição química aproximada das escórias de aciaria.

Composição	Escória (% massa)		
	FEA	LD	Média de 8 outros países* (FEA+LD)
CaO	28-50	36-46	24-60
MgO	4-17	5-12	1-15
SiO <sub>2</sub>	8-25	11-16	10-20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2-13	1-4	1-13
FeO <sub>x</sub>	10-28	14-22	14-30
S	0,1-0,3	0,1-0,3	0,1-0,2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,2-0,7	1-2,5	ND
Basicidade	~3	>3	>3

\* Estados Unidos, Canadá, Reino Unido, França, Alemanha, Itália, Japão e Coréia do Sul

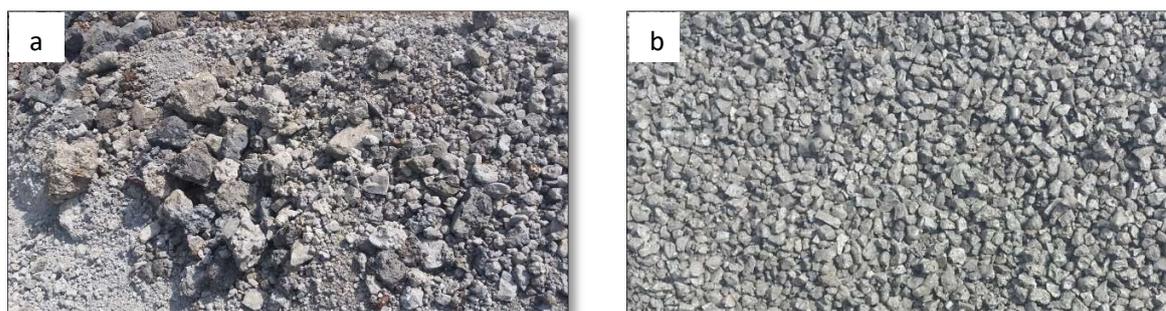
Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Instituto Aço Brasil (2010)

Em sua forma bruta, as escórias de aciaria não apresentam características atrativas para utilização imediata em outros processos. Entretanto, sua composição físico-química permite o seu aproveitamento após um processo de beneficiamento, atuando como substitutas dos agregados naturais não renováveis (areia e brita), devido à sua grande similaridade visual e técnica, como a alta resistência ao desgaste.

### 2.3 O Agregado Siderúrgico

O tratamento adequado da escória de aciaria a transforma em um coproduto, denominado agregado siderúrgico. A Figura 4 evidencia as diferenças visuais entre a escória de aciaria (a) e o agregado siderúrgico (b), respectivamente.

**Figura 4.** Escória de aciaria (a) e agregado siderúrgico (b).



Fonte: O autor (2017).

O beneficiamento da escória de aciaria é um processo mecânico, em que a matéria-prima (escória de aciaria) passa por uma série de operações em plantas bastante semelhantes às de processamento de minérios ou mesmo de resíduos da construção civil (Figura 5), até se tornar um produto, o agregado siderúrgico. O processo ocorre de forma integrada, e tem como objetivo principal separar as frações metálicas da escória para posterior reciclagem na própria aciaria, além de condicionar as frações não metálicas em faixas granulométricas específicas para atendimento ao mercado de agregados.

**Figura 5.** Planta de beneficiamento de escória de aciaria.



Fonte: O autor (2017).

As seguintes operações compõem uma planta típica de processamento de escória de aciaria:

- Resfriamento → O resfriamento da escória de aciaria ocorre ao ar, em pátios apropriados. Por ser um processo lento, pode ser acelerado com a utilização de água, por aspersão ou jateamento. Fundamental para possibilitar a entrada da escória de aciaria na planta de processamento, geralmente com o auxílio de máquinas pesadas, como pás carregadeiras, garras ou escavadeiras hidráulicas.
- Britagem → Processo de moagem da escória de aciaria em equipamentos britadores, concebidos para atingir elevados graus de redução das partículas inseridas.
- Separação de metais → Retirada da fração metálica por meio de imantação, com o objetivo de possibilitar o seu retorno à aciaria como matéria-prima, reduzindo custos com a aquisição de sucata no mercado.
- Classificação granulométrica → Adequação da escória de aciaria em faixas granulométricas específicas, conforme as aplicações pretendidas para o agregado siderúrgico.
- Cura → Processo de estabilização da escória de aciaria por meio da hidratação e do revolvimento das pilhas de estocagem, com o intuito de reduzir o seu potencial expansivo e, assim, torná-las seguras para o uso como agregado siderúrgico. A maioria das normas técnicas estabelece o índice de expansibilidade máxima de 3%. De forma geral, quanto menor a quantidade de óxidos de cálcio e de magnésio livres na escória, menor será o seu

grau de expansibilidade (BALTAZAR, 2001). De acordo com Machado et al. (2002), as granulometrias da escória de aciaria também têm influência direta sobre a sua expansibilidade, sendo que, quanto menores as suas partículas, menor o seu potencial de expansão.

- Empilhamento → Armazenamento temporário do agregado siderúrgico, organizado em forma de pilhas e pronto para ser comercializado.

A figura 6 apresenta um esquema resumido das etapas do processo de beneficiamento da escória de aciaria.

**Figura 6.** Esquema do processo de beneficiamento de escória de aciaria.



Fonte: O autor (2017)

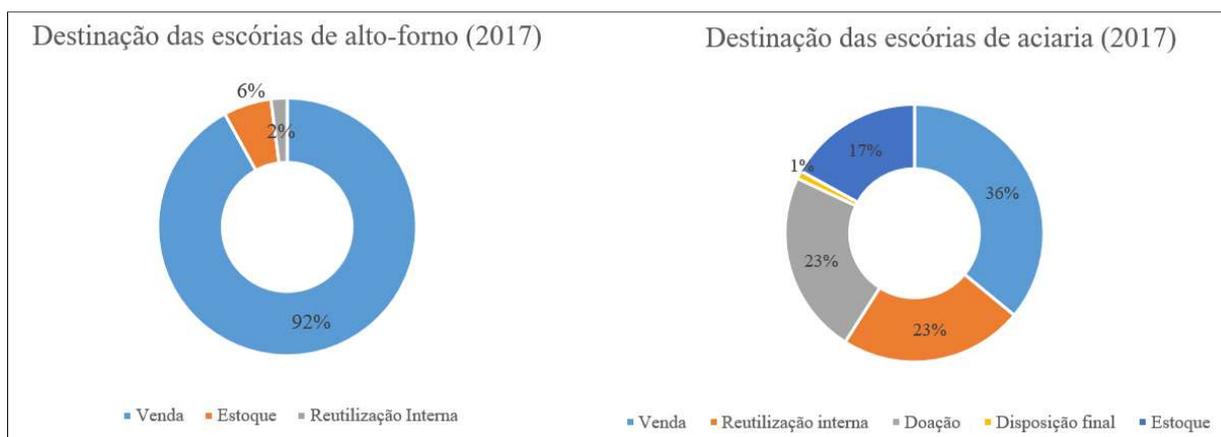
## 2.4 Possíveis Usos e Aplicações

De um modo geral, a utilização das escórias de aciaria no Brasil ainda é bastante restrita. A aplicação dos agregados siderúrgicos em obras ferroviárias ou em indústrias de concreto, por exemplo, ainda acontece de maneira não sistêmica, usualmente a partir de iniciativas isoladas de algumas indústrias siderúrgicas, buscando o apoio de órgãos e setores da construção civil em âmbito local (FERNANDES, 2010).

A utilização dos agregados derivados das escórias de aciaria como matérias-primas alternativas em outros processos apresenta diversos benefícios ambientais, relacionados principalmente à preservação de recursos naturais não renováveis e dos aterros existentes. Além disso, representam reduções de custo consideráveis tanto para os geradores quanto para os consumidores, uma vez que as indústrias, na grande maioria dos casos, não têm a intenção de obter lucros por meio da comercialização dos agregados siderúrgicos, justamente por não serem o seu produto principal.

Apesar de sua maior variedade de aplicações possíveis, as escórias de aciaria ainda não alcançaram o mesmo grau de valorização das escórias de alto-forno, cuja produção é quase integralmente comercializada para fabricantes de cimento (Figura 7).

**Figura 7.** Destinação das escórias no Brasil.

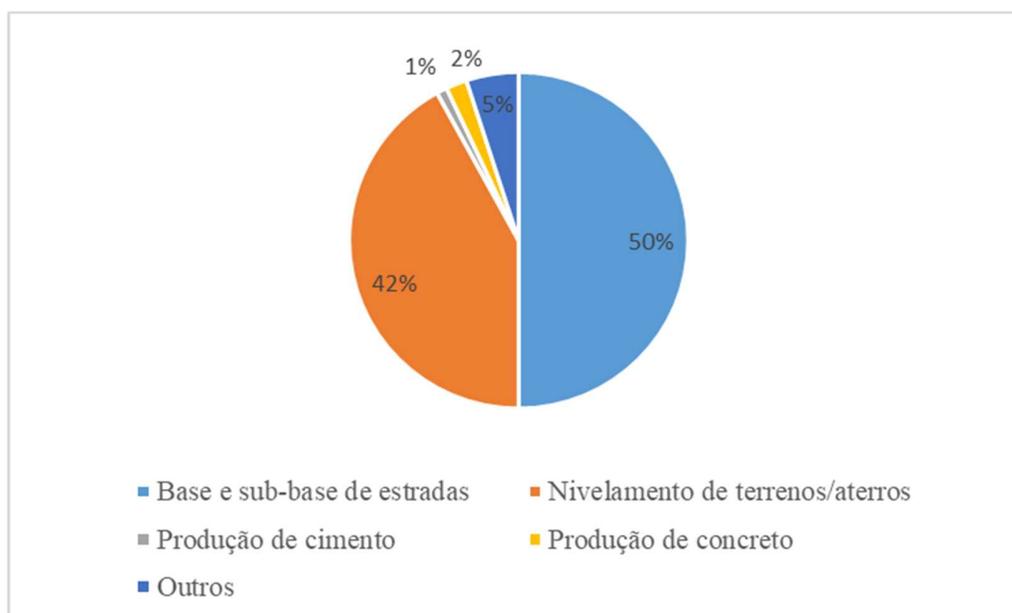


Fonte: Adaptado de Instituto Aço Brasil (2018).

No Brasil, as aplicações mais comuns para as escórias de aciaria são em bases e sub-bases de estradas e no nivelamento de terrenos e aterros, representando quase 90% da sua destinação

(Figura 8), fato que evidencia a dificuldade de expandir o seu uso como um produto para outras aplicações no país. Em outros países, as escórias de aciaria também são utilizadas na fabricação de massa asfáltica, cimento Portland, concreto, fertilizantes e corretivos de solo (RAMOS et al., 2007). De qualquer forma, para qualquer uso pretendido, é fundamental conhecer as propriedades das escórias para garantir que seu desempenho e qualidade serão similares aos dos seus concorrentes, os agregados naturais. Em todos os casos, para a produção de agregados de qualidade, o tratamento das escórias se faz necessário, incluindo a remoção de impurezas, a britagem e a estabilização (SKAF et al., 2017).

**Figura 8.** Aplicação das escórias de aciaria no Brasil (2017).



Fonte: Adaptado de Instituto Aço Brasil (2018).

#### ***2.4.1 Uso como Material para Base e Sub-base em Pavimentação***

As escórias ferrosas são utilizadas como base em rodovias há mais de 2000 anos, quando eram geradas por meio do processamento de ferro bruto. No Brasil, na Argentina e na Venezuela, o seu uso como material de sub-base existe desde 1974. Na Inglaterra, as primeiras estradas construídas com a escória ferrosa surgiram em 1813, e seu uso vem se tornando cada vez mais popular na Europa (KAMBOLE et al., 2017).

Dados da Associação Europeia das Escórias comprovam essa afirmação, visto que em 2014 foram utilizadas 11,6 milhões de toneladas de escórias do aço em estradas, o que representa 54,4% do total de escórias de aço geradas na Europa, e um aumento de 15,4% em relação ao ano de 2000, quando foram utilizadas 6,6 milhões de toneladas do material. Estes valores se referem ao uso da escória na Alemanha, Áustria, Bélgica, Bulgária, Eslováquia, Espanha, Finlândia, França, Grécia, Holanda, Itália, Luxemburgo, Polônia, Reino Unido, Romênia e Suécia (EUROSLAG, 2014).

Motz e Geiseler (2001) realizaram pesquisas envolvendo testes práticos, que incluíram o acompanhamento de diversos trechos de estradas construídas com agregados naturais e siderúrgicos em diferentes seções por mais de 25 anos, seguindo normas alemãs. Os principais resultados mostraram que: superfícies com misturas de agregados siderúrgicos apresentam maior capacidade de carga diretamente após a compactação; chuvas fortes não influenciam a capacidade de suporte das camadas; camadas de superfícies asfálticas com misturas de agregados siderúrgicos permanecem lisas, mesmo sob tráfego intenso e não alteram o meio ambiente por lixiviação.

As escórias de aciaria possuem propriedades mecânicas que as tornam materiais interessantes para a substituição dos agregados naturais (areia e brita) na pavimentação. Entre elas, a resistência à abrasão, o peso específico, a trabalhabilidade, a durabilidade, dentre outras (ROHDE, 2002). Agregados derivados de EFE, particularmente, são utilizados com mais frequência porque melhoram a resistência do pavimento e reduzem o risco de aquaplanagem, devido à sua maior permeabilidade (LIAPIS e LIKOYDIS, 2012). Além disso, seu potencial de expansão é menor do que o das ELD (BICALHO et al., 2006). Em termos econômicos, os custos da construção de estradas com materiais fabricados a partir de escória são, em geral, duas vezes menores quando comparados com produtos similares fabricados de materiais rochosos naturais (KRAYUSHKINA et al., 2012).

Em 2016, existiam no Brasil 1.713.885 quilômetros de rodovias, das quais apenas 202.589 são pavimentadas, representando apenas 11,8% da malha. A baixa qualidade do pavimento de várias delas impacta diretamente no desempenho do transporte rodoviário e na economia do país, tendo em vista que rodovias com más condições de pavimento aumentam o custo operacional do transporte, reduzem o conforto e a segurança dos passageiros e das cargas, e causam prejuízos ambientais (CNT, 2017a). Também segundo dados da Confederação Nacional de Transportes, o transporte rodoviário é responsável pelo tráfego de cerca de 90% dos passageiros e de mais de 60% das cargas que circulam no Brasil. Assim, é inquestionável a necessidade do incentivo ao uso das

escórias de aciaria na construção de estradas, pois além de consumirem matérias-primas em escala considerável, detêm potencial para a redução de custos com implantação e manutenção.

#### ***2.4.2 Uso na Produção de Massa Asfáltica***

A estrutura mineralógica e as propriedades físico-químicas das escórias de aciaria também as tornam valiosas matérias-primas para a preparação de misturas betuminosas e de emulsões de cimento, produtos amplamente utilizados na pavimentação (KRAYUSHKINA et al., 2012).

De acordo com Skaf et al. (2017), a EFE, em particular, se destaca como substituta parcial a agregados graúdos na fabricação de misturas betuminosas, por possuir características como: rugosidade, forma, angularidade, dureza, polimento, resistência à derrapagem, permeabilidade, absorção de ruído, dentre outras. A ELD, por sua vez, foi testada na Alemanha como substituta de 100% dos agregados naturais, e apresentou desempenho tão bom quanto (ou, em alguns parâmetros, ainda melhor) as misturas asfálticas convencionais, preparadas com agregados naturais (GROENNIGER et al., 2017).

Na Espanha, experimentos também demonstraram que o comportamento mecânico de misturas com agregados de escória (como estabilidade, resistência à tração indireta, fluência, fissuração, fadiga, abrasão, etc.) foi superior ao das amostras com agregados naturais, além de não identificarem nenhum problema em testes de expansividade ou lixiviação nas misturas betuminosas (SKAF et al., 2017).

Experimentos realizados na Índia comprovaram que as escórias de aciaria estão em total conformidade com as especificações dos agregados naturais triturados, demonstrando aumento da rigidez, da estabilidade e da resistência à coesão, além de possibilitarem a redução do teor ideal de betume na mistura, devido à maior densidade e menor quantidade de vazios dos agregados siderúrgicos (MAGADI et al., 2016).

No Brasil, estudos semelhantes apresentaram resultados positivos com o uso de escórias de aciaria em revestimentos asfálticos, acarretando aumento em propriedades como a resistência à tração estática e módulo de resiliência (CASTELO BRANCO, 2004).

### **2.4.3 Uso como Agregado na Produção de Concreto**

Assim como o aço, o concreto é um material de construção extremamente versátil, amplamente utilizado em estruturas como pisos, paredes, vigas e colunas, podendo também ser aplicado na pavimentação, como por exemplo, em estacionamentos e estradas. O concreto é utilizado ainda na fabricação de artefatos, que são peças independentes, como tubos, caixas, blocos, bloquetes, lajes, postes, dentre outros.

O concreto é composto de agregados finos e graúdos, que se diferem basicamente pela dimensão de suas partículas, e que representam de 60 a 70% da sua estrutura, sendo a água e o cimento os demais componentes principais (FRONEK, 2012). Com uma proporção tão alta de agregados em sua composição, naturalmente, a demanda por sua disponibilidade segue a mesma proporção. Neste contexto, a utilização de agregados siderúrgicos, provenientes do tratamento de escórias de aciaria, passa a ser uma alternativa sustentável para evitar ou reduzir a extração de agregados da natureza, os quais são considerados matérias-primas não renováveis. Para isso, é fundamental que eles atendam aos requisitos técnicos necessários para utilização no concreto com qualidade e segurança.

Propriedades como densidade, absorção, expansibilidade e resistência à abrasão são alguns dos fatores críticos, e que, portanto, devem ser controlados pelas empresas geradoras das escórias de aciaria. De acordo com Fronek (2012), concretos que contenham agregados que não atendam aos requisitos mínimos de qualidade podem aumentar a quantidade de cimento e água necessária durante o seu processo de fabricação, ter a sua vida útil reduzida ou mesmo causar problemas mais graves, causados pelo aparecimento de trincas e rachaduras em sua estrutura.

Resultados satisfatórios foram observados em concretos após a realização de experimentos com a utilização de agregados siderúrgicos em diferentes proporções de substituição aos agregados naturais. Blocos produzidos com EFE atingiram resistência à compressão acima do esperado (GIOCONDO, 2008); peças de concreto para pavimentação (*pavers*) fabricadas com até 50% de EFE se mostraram perfeitamente viáveis tecnicamente (EVANGELISTA, 2017); concretos com funções não-estruturais produzidos com substituição total dos agregados naturais pelos siderúrgicos obtiveram resultados positivos (NASCIMENTO, 2007); a incorporação de escória de aciaria ao concreto melhorou, de maneira geral, as suas propriedades, tais como: resistência à compressão e à flexão (ROSLAN et al., 2016), propriedades mecânicas e resistência ao fogo (YU

et al., 2016); resistência ao ácido clorídrico e à soda cáustica e resistência à deflexão e à deformação vertical (DEVI e GNANAVEL, 2014), dentre outros.

#### ***2.4.4 Uso como Lastro Ferroviário***

De acordo com Fernandes (2010), as escórias de aciaria são utilizadas desde 1979 na infraestrutura de ferrovias, em países como Japão, Inglaterra, Estados Unidos e Canadá. No Brasil, a aplicação não se encontra entre as mais relevantes (Figura 8), o que pode estar associado a dois aspectos básicos: a inexistência de legislações ou normas técnicas abrangendo requisitos para o uso das escórias de aciaria em linhas férreas; e o fato do Brasil ter descontinuado sua malha ferroviária ao longo dos anos, priorizando e direcionando seus investimentos para o transporte rodoviário.

Assim como no concreto, as escórias de aciaria requerem cuidados especiais para a aplicação como lastros de ferrovias. Além da expansibilidade, deve ser observada também a sua condutividade elétrica, que, ainda segundo Fernandes (2010), pode ocasionar paralisações do tráfego ferroviário em períodos de chuva, devido à falsa ocupação proveniente do uso das escórias de aciaria.

Testes realizados na China com a utilização de diferentes proporções de substituição do cascalho natural pelas escórias de aciaria demonstraram que estas conseguiram manter estáveis suas propriedades térmicas e mecânicas, obtendo assim a segurança e a estabilidade da operação ferroviária de alta velocidade (LI et al., 2016). Amostras de escórias de aciaria provenientes de siderúrgicas indianas também obtiveram resultados satisfatórios em experimentos realizados em ferrovias do país (DAS et al., 2007). No Brasil, estudos concluíram que as escórias de aciaria são viáveis para uso como lastro ferroviário, tanto em termos ambientais quanto de comportamento mecânico, incluindo as propriedades elétricas (FERNANDES, 2010).

#### ***2.4.5 Uso na Produção de Cimento***

Segundo Jiang et al. (2018), a alta demanda pela produção de cimento, em escala mundial, impulsiona as indústrias de cimento, continuamente, pela busca de materiais alternativos para substituir o uso de recursos naturais. A escória de alto forno é um bom exemplo do resultado de anos de estudos extensivos nesse sentido, até o seu uso se tornar uma prática consolidada no

presente. Dentre outros benefícios já mencionados nesta pesquisa, foi demonstrado que o uso de escórias na produção de clínquer de cimento está ligado à redução das emissões de CO<sub>2</sub> e do custo total dos materiais utilizados (REDDY et al., 2006).

Na China, onde a geração de ELD representa 70% da produção anual de escórias (CHENG e YANG, 2010), a sua presença nos processos de fabricação de clínquer permitiu uma menor temperatura de queima, podendo ser utilizada como matéria-prima junto com a escória de alto forno (JIANG et al., 2018). Outros testes demonstraram que o cimento misturado com 6% de ELD apresentou desempenho satisfatório, quando comparado com o cimento Portland (MONSHI e ASGARANI, 1999). A EFE, por sua vez, predomina nas indústrias norte-americanas, onde as usinas semi-integradas são responsáveis por 55% da produção de aço nos EUA (JIANG et al., 2018). Nenhum efeito negativo foi observado na qualidade do cimento produzido com até 10,5% de EFE na produção de clínquer (TSAKIRIDIS et al., 2008).

No Brasil, experimentos conduzidos com a substituição parcial da escória de alto forno pelas escórias de aciaria comprovaram ser uma alternativa viável para a indústria do cimento nas esferas técnica, ambiental e econômica (CARVALHO et al., 2017).

#### ***2.4.6 Uso na Agricultura***

Entre os usos agronômicos conhecidos para utilização das escórias de aciaria, estão a fabricação de fertilizantes e o uso como corretivos de solo. Na Europa, tais usos representam 3% do total de aplicações das escórias de aciaria e, no Japão, 3,9% (GUO et al., 2018). No Brasil, o número sequer aparece entre as principais aplicações (Figura 8), o que pode ser explicado pelas restrições legais existentes no país. Testes realizados com o uso de ELD pulverizada no solo para o cultivo de trigo, tomate, cebola, batata e espinafre mostraram que foi possível aumentar o pH do solo, melhorando assim a sua produtividade (DAS et al., 2007).

Além disso, as escórias de aciaria apresentam, em sua composição, o silício, um dos elementos benéficos ligados ao acréscimo de produção (SOBRAL et al., 2011). No Japão, um fertilizante fabricado com escória de aciaria foi aplicado em um campo de arroz danificado por um tsunami, o que levou a um aumento de aproximadamente 8% do rendimento do arroz plantado, em comparação com o arroz plantado sem a aplicação do mesmo fertilizante. A taxa subiu para 12%, ao dobrar a quantidade de escória utilizada (GAO et al., 2015). Um estudo brasileiro constatou que

a escória de aciaria possui a capacidade de corrigir a acidez do solo com mais eficácia do que o calcário, corretivo que é mais utilizado atualmente (OLIVEIRA, 2012).

Em especial para aplicações na agricultura, as propriedades ambientais das escórias de aciaria devem ser avaliadas, devido a possível presença de traços de elementos potencialmente tóxicos em sua composição, como o Cromo, o Vanádio e o Arsênio (GUO et al., 2018). Contudo, os resultados de um estudo norte-americano a respeito da lixiviação das escórias de aciaria indicaram que nenhum dos tipos de escória excedeu as concentrações limite de lixiviação definidas pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, concluindo que elas não devem ser consideradas um resíduo perigoso (PROCTOR et al., 2000). Estudos conduzidos no Brasil também demonstraram que a aplicação de escória de aciaria não causa problemas de poluição ambiental relacionados à presença de metais pesados no solo ou nas plantas (SOBRAL et al., 2011).

#### ***2.4.7 Uso como Material de Nivelamento e Cobertura de Terrenos e Aterros***

A estabilização, nivelamento e cobertura de solos, terrenos e aterros são outras aplicações potencialmente atraentes para as escórias de aciaria, considerando-se as suas propriedades físicas e mecânicas favoráveis para tais usos, como alta resistência e durabilidade. Conforme avaliado por Andreas et al. (2014), as EFE podem ser comparadas ao granito, devido à sua alta resistência à compressão e à abrasão. A aplicação de escórias de aciaria como cobertura final de aterros sanitários também é uma alternativa viável para reduzir custos e impactos ambientais negativos com o uso de materiais virgens não renováveis, trazendo benefícios como a redução da geração de chorume e de gás (ANDREAS et al., 2014). Tendo em vista que muitos aterros serão encerrados ao longo dos anos em todo o mundo, e que a cobertura final de um aterro sanitário demanda grandes quantidades de materiais, o reuso de coprodutos como as escórias de aciaria surge como uma oportunidade apropriada para aproveitar as suas propriedades químicas e físicas positivamente (DIENER et al., 2010).

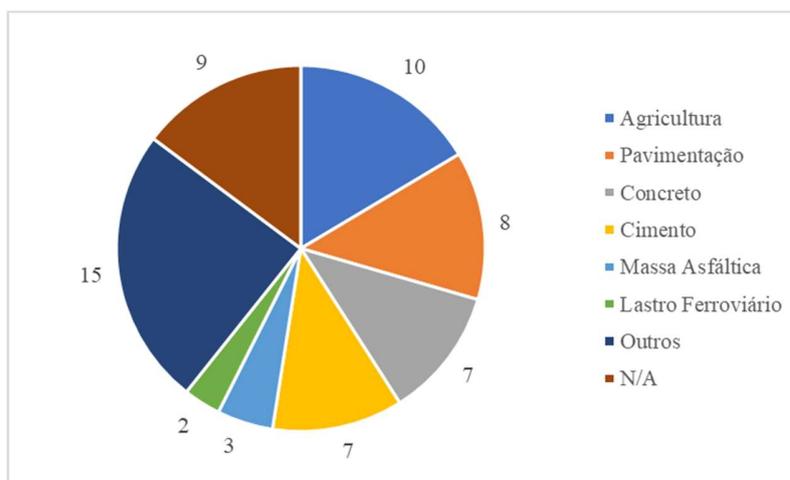
## **2.5 Tendências de Pesquisas no Brasil**

Conforme mencionado anteriormente, foi realizada uma pesquisa na Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD) e na plataforma *Scientific Electronic Library Online*

(SciELO), utilizando-se os termos “escória de aciaria”, “agregado siderúrgico” e “legislação”, de forma a avaliar o desenvolvimento de pesquisas na área no Brasil.

O gráfico da Figura 9 mostra as pesquisas separadas por tipo de aplicação estudada, considerando o total de 61 resultados encontrados.

**Figura 9.** Pesquisas desenvolvidas no Brasil relacionadas às escórias de aciaria.



Fonte: O autor (2019).

Teses, dissertações e periódicos marcados como “N/A” são referentes a temas técnicos do processo de produção do aço, que apenas mencionaram a formação das escórias, não estando relacionados a nenhuma das aplicações em si. Os trabalhos marcados como “Outros” se referem a aplicações menos comuns para as escórias de aciaria, listadas a seguir: Produção de materiais vitrocerâmicos, fabricação de argamassas, uso na neutralização de drenagem ácida de rochas e minas, produção de lâ mineral e tratamento de efluentes.

Curiosamente, a aplicação com o maior número de publicações encontradas foi a agricultura. Isso provavelmente se deve ao fato de que aplicações relacionadas à pavimentação e à construção civil já são bastante comuns e amplamente empregadas inclusive mundialmente, enquanto o uso na agricultura ainda é pouco explorado no Brasil (SILVA, 2003).

Neste sentido, Oliveira Júnior (2013) conduziu experimentos em ciclos de produção da bananeira “Prata-Anã”, de 2009 a 2012, com o objetivo de avaliar os efeitos em seu crescimento

utilizando diferentes combinações de escória de aciaria e calcário dolomítico. Os resultados coletados concluíram que todas as combinações foram eficientes na correção da acidez do solo.

Em outro estudo relacionado à correção de acidez do solo, Oliveira (2012) avaliou o uso da escória de aciaria, em substituição ao calcário, em um sistema de produção de grama bermuda. O estudo concluiu que a eficácia da escória de aciaria foi maior, em função da solubilidade do silicato de cálcio presente em sua composição ser quase sete vezes maior do que a do carbonato de cálcio, componente fundamental do calcário.

Wally (2007) avaliou a eficiência agrônômica das escórias de aciaria, considerando suas características químicas favoráveis para uso como corretivos de acidez do solo e fontes de alguns nutrientes para as plantas. Os resultados comprovaram a eficiência na correção da acidez do solo e indicaram que, quando aplicadas em solos com características semelhantes ao estudado (argissolo vermelho distrófico), não representam risco de acúmulo de metais pesados.

Silva (2003) estudou o uso agrícola de escórias de aciaria provenientes do município de Serra, Espírito Santo, avaliando-as quanto à possível contaminação dos solos pelos metais presentes em sua composição, seu potencial de aplicação como corretivo da acidez de solos e como fonte de fósforo e zinco para as plantas de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) e alface (*Lactuca sativa* – variedade Regina-de-Verão). O autor concluiu que a escória com granulometria inferior a 1 mm se mostrou eficiente para corrigir a acidez, neutralizar o alumínio tóxico dos solos e suprir as plantas com Ca e Mg; e que a escória com granulometria entre 2 e 10 mm não foi considerada adequada para uso agrícola, pois proporcionou resultados semelhantes aos tratamentos sem corretivo.

Na pesquisa desenvolvida por Corrêa (2006) foi avaliado o uso de escórias de aciaria como corretivos da acidez de solos a serem cultivados com soja e cana-de-açúcar; bem como foi avaliado o potencial de contaminação das plantas, dos solos e das águas de drenagem. Os resultados obtidos permitiram concluir a viabilidade de uso das escórias de aciaria para a correção da acidez do solo, neutralização do alumínio dos solos e para o fornecimento de Ca e Mg para as plantas, apesar de sua eficiência ter se mostrado levemente inferior ao calcário. Não houve contaminação expressiva dos solos, plantas e águas de drenagem e plantas em curto e médio prazo.

Miggiolaro (2009) realizou uma dissertação de mestrado sobre a aplicação de escória de aciaria, juntamente a lodos de esgoto e lama cal, na cultura da soja sob sistema plantio direto em latossolo vermelho. Posteriormente, a mesma autora desenvolveu uma tese de doutorado se

aprofundando no tema, avaliando as alterações químicas, físicas e biológicas ocorridas em solo experimental no município de Botucatu, São Paulo, após a aplicação de resíduos urbanos (lodos de esgoto) e industriais (escória de aciaria e a lama de cal). Foram avaliadas também a absorção de nutrientes e metais pesados, e seus efeitos sobre o desenvolvimento da cultura da soja, aveia e sorgo. Concluiu-se que ambos podem ser utilizados como corretivos de acidez do solo, uma vez que neutralizaram a sua acidez e forneceram Ca, Mg, P, K e S. Doses dos resíduos foram reaplicadas três e quinze meses depois, e não promoveram contaminação ao solo por metais pesados (MIGGIOLARO, 2014).

Em estudo semelhante realizado no mesmo solo em Botucatu (SP), porém excluindo o sorgo e mantendo apenas a soja e a aveia preta, Freitag (2008) concluiu que a aplicação dos resíduos melhorou as propriedades químicas e microbiológicas do solo em até 25 meses após a aplicação, além de favorecer o desenvolvimento das culturas da aveia preta e da soja.

No âmbito da pavimentação, Souza (2007) avaliou a utilização de resíduos de concretos refratários e escórias de aciaria em substituição aos agregados naturais para a fabricação de pisos intertravados. As peças foram fabricadas tanto em laboratório quanto em escala industrial, e os resultados atenderam à norma brasileira NBR 9781:1987 (ABNT, 1987). Um exemplo foi o ensaio de resistência à compressão, que encontrou valores acima de 50 MPa (os valores mínimos para atender a norma são de  $\geq 35$  MPa para veículos comerciais, e  $\geq 50$  MPa para veículos especiais). O autor realizou, ainda, alguns testes não exigidos pela norma (como absorção de água e abrasão, por exemplo), e os resultados também foram satisfatórios. Com isso, foi possível concluir que as escórias de aciaria têm potencial para serem utilizadas como matéria prima na produção de peças para pavimentação intertravada.

Silva (2015) também analisou a potencialidade do uso da escória de aciaria como matéria-prima alternativa na produção de pisos intertravados, e os resultados comprovaram o seu potencial de utilização como elemento substituto parcial dos agregados naturais (brita e areia), desde que sua granulometria não ultrapasse os 5 mm.

Resende (2010), por sua vez, avaliou o comportamento geotécnico de um trecho de 20 quilômetros de extensão da rodovia MG-232 em Mesquita, Minas Gerais, utilizando camadas de base estabilizadas granulometricamente, em cascalho, escória de aciaria e com adição de argila. Concluiu-se que a base em escória de aciaria apresentou bom comportamento em relação aos

resultados obtidos com a base confeccionada em cascalho, demonstrando, assim, a eficácia da sua utilização em camadas de pavimentação rodoviária, tanto pura, quanto com adição de argila.

O trabalho realizado por Pitanga et al. (2016) demonstrou o potencial de viabilidade técnica obtida com o aproveitamento de resíduos industriais (escórias de aciaria, provenientes da siderurgia e cinzas volantes, provenientes de cimenteiras) na composição das vias de tráfego florestais, realçando a relevância da proposta no atendimento à necessidade de empresas siderúrgicas de conferirem uma destinação sustentável de seus resíduos e à necessidade das empresas florestais de suprirem, com materiais de baixo custo, as significativas demandas de sua malha viária não pavimentada.

Em escala laboratorial, Rohde (2002) apresentou os resultados de um estudo sobre o uso de agregado siderúrgico, proveniente da EFE, na pavimentação. Após a correção da granulometria e de um processo de cura de quatro meses para a estabilização do potencial de expansão, constatou-se que o material obteve alguns resultados superiores aos de agregados naturais, como por exemplo o módulo de resiliência. Outros resíduos industriais foram adicionados (cinza e cal de carbureto), a fim de melhorar a resistência e a trabalhabilidade dos agregados. Os resultados permitiram concluir que a escória de aciaria pode ser empregada com bom desempenho na pavimentação, sem provocar riscos ao meio ambiente e à saúde pública, e trazendo vantagens econômicas em função de seu menor custo em relação aos agregados tradicionais.

Ainda na pavimentação, Gomes (2018) analisou o comportamento de misturas asfálticas a quente e mornas produzidas em laboratório, quando substituídos os agregados naturais, de calcário, por agregados siderúrgicos provenientes da escória de aciaria. Os resultados obtidos indicaram que o emprego do agregado siderúrgico melhorou a adesão, a resistência e a estabilidade das misturas. Contudo, a autora também faz um alerta para a necessidade de controlar o potencial expansivo das escórias de aciaria, para que de fato as misturas asfálticas possam ser consideradas seguras e tecnicamente viáveis.

Para avaliar o fator expansão de uma escória de aciaria para uso em pavimentação, foram conduzidos, por Baltazar (2001), testes com diferentes condições de cura em escórias de aciaria provenientes de uma mesma siderúrgica (localizada em Ouro Branco, Minas Gerais). Após analisar as variações sofridas durante os ensaios de expansão, o autor destacou que o teor de umidade influenciou diretamente na expansão volumétrica das escórias de aciaria e que os testes de cura em condições ambientes não atenderam ao limite de 3% preconizado pelo método PTM-130 (DER-

MG, 1982), sendo o processo de cura a vapor o mais eficiente, pois proporcionou expansão inferior a 0,2%.

Raposo (2005) conduziu um estudo com objetivos semelhantes, porém utilizando escórias de aciaria provenientes de uma siderúrgica da região metropolitana de Vitória, Espírito Santo. Porém, em sua pesquisa, os resultados dos ensaios de expansão obtidos pelo método PTM-130 demonstraram que a umidade de compactação não teve influência significativa na expansão volumétrica, contradizendo os resultados da pesquisa apresentada no item anterior – o que pode comprovar a variação existente na qualidade das escórias de aciaria de uma siderúrgica para outra. Outra conclusão destacada pelo autor foi que a influência da temperatura e da energia de compactação foram significativas para os resultados de expansão.

Foi testada, por Rocha (2011), a execução de revestimento asfáltico tipo tratamento superficial com escórias de aciaria em substituição a agregados naturais, no município de Serra, Espírito Santo. Após quatro meses da aplicação, verificou-se o bom desempenho funcional do revestimento, com ausência de fissuras, trincas e falhas, demonstrando o controle do potencial expansivo.

Giocondo (2014) realizou testes que indicaram que é possível substituir 100% dos agregados naturais por agregados siderúrgicos provenientes de EFE na fabricação de componentes construtivos de alvenaria estrutural, que exigem total ausência de características expansivas. O autor demonstrou, ainda, que os custos de produção de tais elementos foram inferiores aos das unidades de cimento e concreto, comumente produzidas no mercado.

Januzzi (2014) também avaliou o emprego da escória de aciaria na fabricação de blocos com fins estruturais. Segundo o autor, os blocos apresentaram propriedades mecânicas vantajosas, como boa resistência mecânica à compressão e baixa deformabilidade.

Gottardi (2015) analisou o comportamento mecânico de concretos asfálticos produzidos com a incorporação de escória de aciaria moída e resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais, em um total de 11 misturas com variados teores dos resíduos. Os resultados mostraram que a adição dos resíduos manteve as propriedades mecânicas e volumétricas das misturas asfálticas, quando comparadas à mistura de referência, atendendo aos requisitos das especificações vigentes do DNIT.

Estudo semelhante foi realizado no ano seguinte, por Fonseca (2016). Os resultados também comprovaram a viabilidade de uso conjunto dos dois resíduos (escória de aciaria e resíduos de

beneficiamento de rochas ornamentais) em concretos asfálticos, tanto do ponto de vista técnico quanto do ambiental.

A pesquisa conduzida por Pedrosa (2010) demonstrou que misturas asfálticas usinadas do tipo CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente), confeccionadas com escória de aciaria curada, obtiveram desempenho superior ao mesmo tipo de mistura confeccionada com agregados naturais (gnáissicos). De acordo com o autor, *“as misturas asfálticas produzidas com agregado de escória de aciaria apresentaram maior estabilidade e maior módulo de resiliência, sendo, portanto, mais qualificadas para uso em pavimentos que serão solicitados por tráfego pesado em clima quente”*.

Em matrizes cimentícias, testes realizados por Polisseni (2005) consistiram na substituição do cimento Portland por escórias de aciaria moídas por meio da micronização, para garantir a sua estabilização volumétrica. Foi comprovada a viabilidade técnica, destacando o aumento da durabilidade das argamassas que utilizaram a EFE sobre as argamassas de referência. Apesar dos ensaios de resistência à compressão com as escórias terem apresentado resultados inferiores às argamassas de referência, os valores atenderam às exigências técnicas do cimento Portland.

A pesquisa conduzida por Gumieri (2002) apresentou objetivos e resultados semelhantes. A diferença é que foi aplicado o método de resfriamento brusco para eliminar a expansão das escórias de aciaria. Porém, a conclusão do ponto de vista da resistência mecânica foi a mesma: *“as argamassas compostas com escórias apresentaram níveis de resistência compatíveis com as especificações referentes ao cimento Portland, apesar destes resultados serem inferiores aos obtidos para as argamassas de referência”*.

Masuro (2001) também estudou o desempenho mecânico e a durabilidade das escórias de aciaria em argamassas utilizando o resfriamento brusco para estabilizar a expansão. Do ponto de vista de resistência à compressão, o desempenho apresentado pelas argamassas contendo escórias de aciaria foi o mesmo do que as argamassas de referência, independentemente do teor utilizado. Em relação aos demais ensaios (durabilidade, absorção de água, resistência ao ataque de íons cloretos e resistência ao ataque por sulfato), a incorporação das escórias de aciaria resultou em desempenho igual ou superior, em relação às argamassas de referência.

Geyer (2001) avaliou o emprego das escórias de aciaria (incluindo as escórias de panela) em matrizes cimentícias, como adição ao cimento Portland para a produção de concretos. Os ensaios de pozolanicidade, resistência à compressão, expansibilidade e profundidade de

carbonatação de concretos gerados com as adições de escórias de aciaria tiveram sua viabilidade técnica comprovada, indicando o uso de até 35% do material.

Além das escórias de aciaria, Arrivabene (2012) incorporou resíduos da serragem de granito em diferentes dosagens de misturas, visando avaliar suas propriedades para a produção de cimento. Os resultados obtidos comprovaram o potencial de utilização de ambos os resíduos como elementos de adição ao cimento. Também foi encontrada a publicação referente à esta mesma pesquisa, na plataforma SciELO.

Para verificar o potencial de incorporação das escórias de aciaria no cimento Portland, Zago (2015) submeteu escórias de aciaria do município de Serra, Espírito Santo, a processos de refusão e a diferentes taxas resfriamento, com o objetivo de formar novas escórias com diferentes graus de cristalinidade. Os ensaios executados nos corpos de prova confirmaram a sua viabilidade para utilização na indústria cimenteira.

A tese elaborada por Pacheco (2017) buscou demonstrar a utilização da escória de aciaria em argamassas para a construção civil, em substituição parcial do cimento ou como adição ao clínquer. Os resultados obtidos indicaram que argamassas com até 40% de substituição do cimento CP V-ARI por escórias de aciaria atenderam às especificações de resistência à compressão. O autor recomendou, para estudos futuros, a avaliação da durabilidade dessas argamassas.

Para fins de aplicação das escórias de aciaria como material de lastro ferroviário, Fernandes (2010) buscou caracterizar os materiais em larga escala. Os processos e metodologias de cura com base na hidratação e carbonatação se mostraram eficientes para a escória de aciaria LD, diminuindo o teor de cal livre a valores bem abaixo ao prescrito pelas normas, possibilitando seu uso como lastro ferroviário em vias sinalizadas. Outra constatação destacada pelo autor é que a escória de aciaria foi classificada ambientalmente como um resíduo inerte após o processo de cura, enquanto a escória não estabilizada foi classificada como resíduo não inerte.

Uma pesquisa conduzida por Dayrell (2013) analisou o comportamento expansivo das escórias de aciaria como material de lastro em vias férreas, e os resultados indicaram que elas podem ser empregadas com segurança, após o processo de tratamento e estabilização.

**CAPÍTULO III**  
**MARCOS REGULATÓRIOS**

### **3.1. O Contexto Brasileiro**

Neste item, são citadas as principais legislações nacionais relacionadas à pesquisa, bem como as principais normas técnicas existentes no Brasil.

#### ***3.1.1. LEGISLAÇÕES FEDERAIS***

Embora existam legislações que abordam a temática dos resíduos sólidos, como Resoluções do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) e Instruções Normativas do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), o principal instrumento legal vigente no Brasil é a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), por apresentar diretrizes gerais que orientam União, Estados, Distrito Federal e os Municípios na gestão e gerenciamento adequados dos resíduos sólidos.

##### **3.1.1.1 Lei 12.305/2010**

A Lei 12.305, de 2010 (BRASIL, 2010) instituiu a PNRS, trazendo diversos conceitos importantes para a gestão de resíduos, como “reciclagem”, “reutilização” e “destinação final ambientalmente adequada”. Este último, particularmente, merece destaque por mencionar alternativas e possibilidades nobres para a destinação de resíduos, como a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético, pensando na minimização de impactos ambientais adversos. Entretanto, a lei apresenta a diferenciação conceitual apenas de “resíduos sólidos” e “rejeitos”, sem mencionar os termos “coprodutos” ou “subprodutos”.

Em seu artigo 9º, a PNRS prevê a seguinte ordem de prioridade na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010). Como as escórias de aciaria são resíduos inerentes ao processo de fabricação do aço, os instrumentos utilizados para atender a tal requisito são tecnologias consagradas mundialmente pelo setor siderúrgico, que visam propiciar o seu tratamento e posterior reciclagem, por meio da valorização em agregados siderúrgicos.

A PNRS institui, ainda, instrumentos importantes de planejamento nos níveis nacional, estadual, microrregional, intermunicipal e metropolitano e municipal, exigindo, por exemplo, a

elaboração de Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS). Tais planos são requisitos aplicáveis às indústrias, e têm como conteúdo mínimo, entre outras exigências:

- O estabelecimento de metas e procedimentos relacionados à minimização da geração de resíduos sólidos;
- O diagnóstico dos resíduos sólidos gerados ou administrados (contendo a origem, o volume e a caracterização dos mesmos, incluindo os passivos ambientais a eles relacionados);
- Definição dos responsáveis por cada etapa do gerenciamento de resíduos sólidos, bem como os procedimentos operacionais relacionados a cada ponto;
- Ações preventivas e corretivas a serem executadas em situações de gerenciamento incorreto ou acidentes;
- Medidas saneadoras dos passivos ambientais relacionados aos resíduos sólidos.

Todas essas informações (incluindo, portanto, aquelas relacionadas às escórias de aciaria), são de conhecimento dos órgãos ambientais competentes, uma vez que deverão ser atualizadas e disponibilizadas a eles, inclusive sendo parte integrante do processo de licenciamento ambiental do empreendimento, de acordo com os artigos 23 e 24 da PNRS.

Dentre os 11 princípios da PNRS (ordenados no Artigo 6º), a maioria – listada a seguir – está diretamente relacionada à problemática discutida nesta pesquisa.

**a) Princípio III - A visão sistêmica, na gestão dos resíduos sólidos, que considere as variáveis ambiental, social, cultural, econômica, tecnológica e de saúde pública.**

Optar pelo beneficiamento de um resíduo, em vez de simplesmente pagar por sua disposição final em um aterro licenciado, é uma decisão que demanda investimentos altos, por parte dos geradores. A instalação de plantas beneficiadoras, a aquisição de equipamentos móveis, a contratação de operadores e os processos de licenciamentos ambientais são apenas alguns exemplos dos desembolsos necessários para o início da atividade. Neste contexto, a visão sistêmica mencionada neste princípio considera todas as variáveis relacionadas: ambiental, por incentivar o reuso e a reciclagem de um resíduo que seria descartado, além de evitar a extração de recursos naturais; social e cultural, por demonstrar e difundir à sociedade conceitos aplicados de boas práticas no âmbito da educação ambiental; econômica, devido à redução de custos envolvidos,

quando comparados ao envio para aterros e também em relação aos custos de extração de agregados naturais; tecnológica, pela busca de melhorias contínuas nos processos, equipamentos e pesquisas buscando o desenvolvimento de novas aplicações para resíduos; e, finalmente, de saúde pública, pelo fato de evitar contaminações das águas e do solo, causadas por possíveis falhas no descarte dos resíduos.

#### **b) Princípio IX - O desenvolvimento sustentável.**

Termo amplamente utilizado nos dias de hoje, o desenvolvimento sustentável está relacionado, basicamente, ao conjunto de ações e atitudes indispensáveis para que a geração atual não comprometa o atendimento das necessidades das gerações futuras, sejam elas no campo social, ambiental ou econômico. Desta forma, o simples fato de evitar a extração de um recurso natural, substituindo-o integral ou parcialmente por um coproduto, pode ser caracterizado como um ato sustentável, sobretudo na esfera ambiental: afinal, agregados naturais como a brita, por exemplo, são recursos não renováveis.

#### **c) Princípio V - a eco eficiência, mediante a compatibilização entre o fornecimento, a preços competitivos, de bens e serviços qualificados que satisfaçam as necessidades humanas e tragam qualidade de vida e a redução do impacto ambiental e do consumo de recursos naturais a um nível, no mínimo, equivalente à capacidade de sustentação estimada do planeta.**

A prática de priorizar a reutilização e a reciclagem de um resíduo que seria descartado também está diretamente ligada ao princípio da eco eficiência, isto é, da produção que considera os mínimos impactos possíveis ao meio ambiente. Da mesma forma, o resíduo – agora denominado coproduto – passa a integrar o quadro de possíveis produtos passíveis de serem comercializados no mercado, com a vantagem de ser considerado ecológico, ao mesmo tempo em que satisfaz as necessidades humanas, proporciona uma melhoria da qualidade de vida, mediante a redução dos impactos ambientais, como estabelece o princípio.

**d) Princípio VI - A cooperação entre as diferentes esferas do poder público, o setor empresarial e demais segmentos da sociedade.**

Todos os segmentos mencionados neste princípio são favorecidos quando existe uma gestão de resíduos voltada para ações com foco na reciclagem e reutilização. O setor empresarial, em particular, é o que mais se evidencia inicialmente, por abranger tanto os geradores e processadores dos resíduos, quanto os consumidores dos coprodutos. Considerando a versatilidade de aplicações das escórias de aciaria na construção civil, parcerias com o poder público são completamente factíveis, especialmente no horizonte da pavimentação. É prática comum a doação ou transferência desses materiais para as prefeituras de municípios localizados próximos aos locais de geração, com o propósito de serem empregados como revestimento primário de estradas vicinais. Os benefícios são facilmente capitalizados pela própria população dessas regiões, uma vez que as vias cobertas com as escórias de aciaria passam a permitir o acesso e a circulação de pedestres e veículos com muito mais facilidade.

**e) Princípio VII - a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos.**

Por se tratar de um resíduo do ponto de vista legal, a responsabilidade compartilhada é uma realidade aplicável também ao agregado siderúrgico que é colocado no mercado. Assim, tanto a empresa geradora quanto o cliente consumidor devem estar alinhados em relação às suas responsabilidades e deveres: o gerador, além de garantir a entrega de um produto de qualidade, deve informar os requisitos ambientais para o seu gerenciamento e aplicação correta, que deverá ser cumprida pelo consumidor.

**f) Princípio VIII - o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania.**

A PNRS propõe a prática de hábitos de consumo sustentável e traz instrumentos variados para propiciar o incentivo à reciclagem e à reutilização dos resíduos sólidos. Os agregados siderúrgicos se encaixam perfeitamente como coprodutos passíveis de reciclagem e

reaproveitamento em diversos processos e atividades, sendo considerados bens econômicos, geradores de trabalho e renda e promotores de cidadania. Mesmo levando em consideração tais benefícios, é notória a dificuldade das entidades regulamentadoras e fiscalizadoras em aprovar destinações ambientalmente seguras para as escórias de aciaria no Brasil – o que as impede de serem consideradas justamente bens econômicos e de valor social, como menciona o princípio.

**g) Princípio IX - o respeito às diversidades locais e regionais.**

O Brasil é um país extremamente extenso, com usinas siderúrgicas localizadas em diversas regiões. A realidade do mercado é diferente em cada região e, portanto, as escórias de aciaria também teriam diferentes utilizações em função da localização geográfica da usina geradora, além das diferentes características de cada agregado siderúrgico produzido. No Estado de São Paulo, por exemplo, verifica-se uma demanda considerável pelos agregados siderúrgicos para a fabricação de artefatos de concreto em substituição ao basalto. No Espírito Santo, por sua vez, a principal demanda do mercado é para a utilização do material em estradas vicinais. Desta forma, o respeito às diversidades locais e regionais preconizado pelo princípio em questão é facilmente contornado pela elaboração de um plano de negócios local, considerando potenciais clientes consumidores, principais concorrentes e outros planejamentos administrativos, com o objetivo de inserir no mercado um novo produto, seguro, de qualidade e extremamente competitivo.

**3.1.1.2. Resolução CONAMA 313/2002**

A Resolução Conama nº313, de 29 de outubro de 2002 (BRASIL, 2002), que dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais, cataloga as escórias de aciaria como resíduos em seu Anexo II, sob o código A013 - Escória de produção de ferro e aço.

A referida legislação, em seu Art.2º, traz apenas o conceito de resíduos sólidos industriais, sem qualquer menção a termos como “coprodutos”, “subprodutos” ou mesmo uma diferenciação entre os materiais “escória” e “agregado siderúrgico”. O impacto para as usinas geradoras, neste caso, não é tão relevante em termos das obrigações legais aplicáveis – uma vez que as informações que devem constar no Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais são fundamentais para a gestão e o controle, tanto das empresas quanto das partes interessadas, independentemente de

serem consideradas resíduos ou não. Em outras palavras, na prática, as informações referentes ao agregado siderúrgico são consideradas e apresentadas nos inventários, ainda que com o nome de “escória”.

### **3.1.1.3. Instrução Normativa IBAMA n.13/2012**

O Anexo I da Instrução Normativa IBAMA nº13, de 18 de dezembro de 2012 (BRASIL, 2012) apresenta a chamada Lista Brasileira de Resíduos sólidos, na qual as escórias são listadas sob o código 10 02 01 - Escória e outros desperdícios da fabricação do ferro e do aço, dentro do capítulo 10 – Resíduos de processos térmicos, subcapítulo 10 02 - Resíduos da indústria do ferro e do aço. A Lista Brasileira de Resíduos Sólidos foi criada com base na Lista Europeia de Resíduos Sólidos (mencionada posteriormente, nesta pesquisa) para facilitar a troca de informações sobre a movimentação internacional de resíduos. Assim como as demais legislações federais, a IN 13/2012 não diferencia resíduos de coprodutos, trazendo apenas conceitos como “resíduos sólidos” e “resíduos de serviços de saúde”.

### **3.1.2. LEGISLAÇÕES ESTADUAIS**

A maior parte das siderúrgicas do Brasil está concentrada na região sudeste do país (principalmente em Minas Gerais, com um total de nove indústrias, seguido por São Paulo, com sete, e Rio de Janeiro, com quatro), conforme mostra a Figura 10.

**Figura 10.** Localização das indústrias siderúrgicas no Brasil.



Fonte: CNI - Confederação Nacional da Indústria (2014).

Os demais Estados mapeados (Espírito Santo, Rio Grande do Sul, Paraná, Ceará, Pernambuco, Bahia e Pará) possuem apenas uma ou duas indústrias. Assim, foram consultadas as Políticas Estaduais de Resíduos Sólidos dos três principais Estados mencionados acima.

### 3.1.2.1 Minas Gerais

Em Minas Gerais, a gestão dos resíduos sólidos foi estabelecida por meio da Lei 18.031/2009, que instituiu a Política Estadual de Resíduos Sólidos (MINAS GERAIS, 2009). Destaca-se a existência do conceito “valorização de resíduos sólidos”, que não foi inserido na PNRS:

“Requalificação do resíduo sólido como subproduto ou material de segunda geração, agregando-lhe valor por meio da reutilização, do reaproveitamento, da reciclagem, da valorização energética ou do tratamento para outras aplicações.” (MINAS GERAIS, 2009, cap.I).

O conceito representa um avanço em relação à PNRS, publicada um ano depois. Ele está presente no Art. 6º, onde são listados os princípios que orientam a Política Estadual de Resíduos Sólidos de Minas Gerais. Entre as suas diretrizes, está o incentivo ao uso de matérias-primas derivadas de materiais reciclados e o desenvolvimento de novos produtos e processos, onde o Agregado Siderúrgico também se enquadra perfeitamente.

A Deliberação Normativa Copam nº 195, de 03 de abril de 2014 (MINAS GERAIS, 2014), por sua vez, além de não diferenciar resíduos de coprodutos, não reconhece o nome “Agregado Siderúrgico”, denominando-o “escória de aciaria beneficiada”. O parágrafo único, do Art. 2º, estabelece que esta escória de aciaria beneficiada não perde o caráter de resíduo industrial. Outro fator agravante é o fato de criar exigências relacionadas à consolidação de informações e protocolo de registros periodicamente para o órgão ambiental estadual, tanto para geradores quanto para consumidores (chamados por ela de destinatários) das escórias de aciaria. A referida legislação foi revogada pela Deliberação Normativa Copam nº 221, de 21 de março de 2018, considerando que, durante o seu período de vigência, as exigências foram cumpridas pelas indústrias siderúrgicas envolvidas (MINAS GERAIS, 2018).

Em 2019, a Deliberação Normativa Copam nº 232 (MINAS GERAIS, 2019) instituiu o sistema online de Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR) em Minas Gerais, seguindo exemplos já existentes em estados como Santa Catarina, Rio Grande do Sul e Rio de Janeiro. O Art. 11, do capítulo III, exclui apenas as escórias de alto-forno oriundas da indústria siderúrgica de algumas exigências da DN, mas não faz menção às escórias de aciaria, sendo que ambas passam por processos de tratamento para serem colocadas no mercado como coprodutos (inclusive para

uma mesma aplicação em comum: a produção do cimento). Portanto, as obrigações criadas pela DN para geradores, transportadores e destinadores de resíduos também passaram a ser aplicáveis aos consumidores de escória de aciaria, dificultando ainda mais o processo comercial, uma vez que os produtos concorrentes (agregados naturais) são excluídos de qualquer legislação aplicável a resíduos.

### **3.1.2.2 São Paulo**

A Política Estadual de Resíduos Sólidos foi instituída em São Paulo em 2006, por meio da Lei 12.300 (SÃO PAULO, 2006). Seu texto possui algumas semelhanças em relação à PNRS, principalmente no que diz respeito aos princípios, objetivos, instrumentos e definições. Como distinção, destaca-se o Artigo 33:

“O emprego de resíduos industriais perigosos, mesmo que tratados, reciclados ou recuperados para utilização como adubo, matéria-prima ou fonte de energia, bem como suas incorporações em materiais, substâncias ou produtos, dependerá de prévia aprovação dos órgãos competentes, mantida, em qualquer caso, a responsabilidade do gerador.” (SÃO PAULO, 2006, cap.IV).

O parágrafo 1º do capítulo IV do referido artigo indica, ainda, que os geradores de resíduos industriais perigosos deverão comprovar que os produtos criados por meio da utilização dos resíduos não resultarão em riscos à saúde pública e ao meio ambiente. Apesar de não diferenciar resíduos de coprodutos e nem de mencionar os resíduos industriais não perigosos, os textos em questão indicam a possibilidade de tratar, reciclar e recuperar resíduos em diferentes aplicações, desde que aprovado previamente pelos órgãos competentes.

### **3.1.2.3 Rio de Janeiro**

A Política Estadual de Resíduos Sólidos do Rio de Janeiro foi instituída em 2003, pela Lei 4.191 (RIO DE JANEIRO, 2003). Por ser a mais antiga entre as três políticas citadas anteriormente (Nacional, Estadual de Minas Gerais e Estadual de São Paulo), não possui nenhum ponto de destaque em relação a elas.

A Resolução Conema nº 79, de 07 de março de 2018 (RIO DE JANEIRO, 2018) - Estabelece a criação do sistema online de Manifesto de Transporte de Resíduos no Rio de Janeiro. Apesar de não citar resíduos específicos, utiliza o termo “resíduos industriais” para a aplicabilidade da regulamentação, o que abrange as escórias de aciaria, tendo em vista que a legislação brasileira não distingue resíduos de coprodutos. Portanto, assim como em Minas Gerais, a resolução estabelece exigências legais para os geradores, transportadores e consumidores de resíduos, criando barreiras burocráticas para potenciais clientes das escórias de aciaria.

Outras legislações relacionadas à criação do sistema online de MTR em outros Estados brasileiros (Santa Catarina e Rio Grande do Sul) são semelhantes no que diz respeito à aplicabilidade às escórias de aciaria, já que são consideradas resíduos pela legislação federal.

### ***3.1.3. NORMAS TECNICAS***

#### **3.1.3.1 ABNT NBR 10.004/2004**

A NBR 10.004/2004 (Resíduos Sólidos – Classificação) é uma norma que estabelece os critérios para classificação dos resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e a saúde humana (ABNT, 2004), separando-os, basicamente, em perigosos (classe I) e não perigosos (classe II). Estes últimos são subdivididos ainda em não inertes (classe IIA) ou inertes (classe IIB), visando a um gerenciamento ainda mais específico para cada material. A NBR 10.004 é a atual referência para a classificação dos resíduos, tanto pelas organizações quanto para os órgãos reguladores.

Conforme mencionado anteriormente, as escórias de aciaria são classificadas mundialmente como resíduos não perigosos, isto é, substâncias que não apresentam riscos à saúde pública e ao meio ambiente, por não apresentarem nenhuma das características listadas na norma como relativas a resíduos perigosos: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. A própria NBR 10.004, em seus anexos A e B, determina mais de 100 códigos diferentes para resíduos perigosos de fontes não especificadas e especificadas, respectivamente, e as escórias não são listadas em nenhum deles.

### **3.1.3.2 ABNT NBR 16.364/2015**

Em 2015, a ABNT publicou uma norma técnica com o intuito de regulamentar a utilização do Agregado Siderúrgico como base e sub-base em pavimentação: A NBR 16.364/2015 – Execução de sub-base e base estabilizadas granulometricamente com agregado siderúrgico para pavimentação rodoviária – Procedimento (ABNT, 2015). A norma não é de cunho ambiental, pois apresenta apenas requisitos técnicos específicos para os materiais a serem empregados como base e sub-base na pavimentação rodoviária, tais como ensaios de abrasão Los Angeles, índice de forma, dentre outros.

### **3.1.3.3 DNIT 406/2017 e DNIT 407/2017**

Em 2017, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) publicou duas especificações técnicas para o uso do Agregado Siderúrgico na pavimentação: DNIT 406/2017 – Base estabilizada granulometricamente com Açobrita® – Especificação de Serviço (DNIT, 2017a) e DNIT 407/2017 – Sub-base estabilizada granulometricamente com Açobrita® (DNIT, 2017b). Com isso, o nome registrado como Açobrita® passou a poder ser utilizado pelos produtores, desde que o Agregado Siderúrgico atenda aos requisitos técnicos das duas especificações em questão. Ambas as normas referenciam a ABNT NBR 16.364/2015, por conterem requisitos semelhantes para os Agregados Siderúrgicos. Os principais deles estão listados a seguir:

- Índice de Suporte Califórnia deve ser igual ou superior a 20%;
- Ensaio de Abrasão Los Angeles deve apresentar desgaste inferior a 55%;
- Potencial de Expansão deve ser inferior a 3%;
- Módulo de Resiliência na umidade ótima deve ser igual ou superior a 300 Mpa;
- Índice de Forma deve ser superior a 0,5;
- Porcentagem de partículas lamelares deve ser menor ou igual a 10%.

## **4.2 Panorama Internacional**

Neste item, são apresentados os principais marcos regulatórios dos Estados Unidos da América e da Europa, regiões cujo acesso às informações foi facilitado devido à existência de

entidades que consolidam dados gerais da siderurgia, como a Euroslag, a Eurofer e a *World Steel Association* (WSA). Além disso, são países que figuram entre os maiores produtores mundiais de aço.

#### **4.2.2 Estados Unidos**

Uma das normas que nortearam o desenvolvimento de um procedimento brasileiro se encontra no Capítulo NR 538, do Código Administrativo de Wisconsin, dos Estados Unidos: Guia para o uso benéfico de coprodutos industriais (WISCONSIN, 2015). A primeira versão da NR 538 foi aprovada em 1998, como resultado da Lei 27 de Wisconsin, de 1996, que orientou o Departamento de Recursos Naturais (DRN) do estado a definir regras para a reutilização de resíduos industriais de alta geração, com o objetivo de incentivar o seu uso de modo ambientalmente adequado. A norma reconhece os benefícios da reutilização de coprodutos, e incentiva o seu uso para preservar os recursos naturais, economizar energia e reduzir ou eliminar a necessidade de descarte em aterros sanitários, além de prolongar a vida útil das operações de pedreiras existentes.

A NR 538 se aplica a cinco tipos de coprodutos industriais: lama da indústria de papel; cinzas resultantes da recuperação de energia, incluindo cinzas e escórias de carvão; material capturado em sistemas de dessulfuração de gases de combustão; areia e escória de sistemas de fundição de ferro e aço; poeira de fornos de cal; e outros resíduos sólidos não perigosos com características semelhantes, conforme determinado pelo DRN.

Para cada coproduto, foram estabelecidos requisitos para os geradores, bem como critérios regulamentadores para o seu armazenamento, transporte e utilização. Outros requisitos incluem a apresentação de certificados anuais ao DRN, comprovando o atendimento das exigências da norma, e solicitações para projetos que ela mencione, para permitir uma avaliação do potencial de impactos à saúde humana e ao meio ambiente. De maneira geral, as exigências ambientais estão relacionadas a controles operacionais para evitar a poluição do meio ambiente, através de operações que minimizem a poeira, o odor e o derramamento dos coprodutos industriais.

A norma define claramente quais são as aprovações e restrições de uso para cada um dos coprodutos aplicáveis, classificando-os em diferentes categorias de possíveis usos, desenvolvidas com base no risco potencial à saúde humana e ao meio ambiente. Os valores estabelecidos são

baseados em limites de contato direto (inalação e ingestão) e nos padrões de qualidade das águas subterrâneas existentes nos regulamentos norte-americanos. As categorias variam de 1 a 5, sendo os usos permitidos para os coprodutos da Categoria 1 os menos restritivos, e os permitidos para a Categoria 5, os mais restritivos (Tabela 3). A classificação é baseada em caracterizações químicas de amostras representativas dos materiais, que também devem atender às especificações físicas e estruturais aplicáveis e aceitas para a utilização.

**Tabela 3.** Usos aprovados para Coprodutos Industriais, segundo NR 538 – Wisconsin.

Métodos de Usos Benéficos		Categoria de Coproduto Industrial				
		5	4	3	2	1
(1)	Matéria Prima para Fabricação de um Produto	X	X	X	X	X
(2)	Estabilização / Solidificação de Resíduos	X	X	X	X	X
(3)	Fonte de Combustível Alternativo / Recuperação Energética	X	X	X	X	X
(4)	Cobertura de Aterro Sanitário	X	X	X	X	X
(5)	Preenchimento Geotécnico Confinado: (a) sub-base de edifícios comerciais, industriais ou institucionais, (b) base e sub-base de lotes pavimentados, (c) base e sub-base de estradas pavimentadas, (d) preenchimento de valas, (e) preenchimento de pilares de pontes, (f) abandono de tanques, abóbadas ou túneis, (g) material de nivelamento, (h) estabilização da base do solo e do pavimento para melhorias estruturais listadas de (a) a (c), (i) material controlado de baixa resistência para melhorias estruturais listadas em a, d, e, f		X	X	X	X
(6)	Aterro de instalações de transporte encapsulado		X	X	X	X
(7)	Aterro de instalações de transporte tampado			X	X	X
(8)	Preenchimento geotécnico não confinado			X	X	X
(9)	Curso de Superfície Não Ligada				X	X
(10)	Curso de Superfície Ligada				X	X
(11)	Curso de Superfície Ligada (rodovias federais, estaduais ou municipais)			X	X	X
(12)	Pedra Decorativa				X	X
(13)	Abrasivo de Tempo Frio				X	X

**Fonte:** Adaptado de Wisconsin (2018a)

Por serem resíduos não perigosos e, em sua maioria, inertes, as escórias de aciaria conseguiriam se enquadrar em todos os métodos listados na Tabela 3.

A norma estabelece também os requisitos regulamentares para os geradores de coprodutos industriais:

- Determinar se a instalação gera um coproduto industrial, conforme definição da NR 538;
- Caracterizar e determinar a categoria do coproduto industrial;
- Preencher e enviar o formulário de Certificação Inicial e os dados do teste de caracterização para o DRN avaliar e aprovar (ou não);
- Notificar o DRN do projeto proposto utilizando coprodutos industriais;
- Utilizar o coproduto industrial para um uso benéfico aprovado e de acordo com os requisitos específicos do projeto;
- Armazenar, manusear e utilizar o coproduto industrial de acordo com os padrões de desempenho;
- Construir e operar uma instalação de armazenamento de coproduto industrial de acordo com os requisitos aplicáveis;
- Transportar o coproduto industrial de acordo com os requisitos aplicáveis;
- Cumprir os requisitos de participação pública para projetos de grande volume;
- Realizar monitoramento ambiental para projetos de grande volume;
- Cumprir os requisitos de notificação do proprietário, se necessário;
- Preencher e enviar os formulários anuais de certificação até 1º de abril de cada ano, contendo as informações referentes ao ano anterior;
- Manter registros;
- Recaracterizar o coproduto industrial com base no volume utilizado ou armazenado e enviar os resultados para o DRN.

Para os armazenadores dos coprodutos industriais (sejam os geradores ou não) as obrigações são:

- Enviar o formulário de Certificação Inicial e os dados de teste para cada coproduto industrial que será armazenado. Se os Geradores já tiverem enviado dados de teste, eles não precisarão ser incluídos no formulário de certificação do recurso de armazenamento;
- Armazenar, manusear e utilizar coprodutos industriais de acordo com os padrões de desempenho;
- Construir e operar uma instalação de armazenamento de coproduto industrial de acordo com os requisitos aplicáveis;
- Preencher e enviar os formulários anuais de certificação até 1º de abril de cada ano, contendo as informações referentes ao ano anterior.

Os detalhes e as informações necessárias para as etapas acima, além de outros requisitos para o transporte, são descritos ao longo da própria norma, tornando simples o seu entendimento e interpretação.

Como restrições para a aplicação de coprodutos industriais, a norma estabelece que os mesmos não podem ser colocados abaixo do lençol freático, em águas permanentes ou em áreas que precisam ser desaguadas antes da aplicação, para limitar potenciais impactos às águas superficiais e subterrâneas. Também são citadas restrições de uso próximo a áreas residenciais, com exceção de estradas (incluindo as rurais).

Em abril de 2018, foi publicada a emenda *Wisconsin Act 285*, que altera a classificação da escória de aciaria para coproduto, e não mais um resíduo sólido para descarte, desde que gerenciada de forma controlada e como um item de valor. O decreto também estabelece uma nova restrição: a escória de aciaria não pode ser utilizada de forma não confinada em propriedades privadas que estejam a menos de 30 metros de residências, escolas e creches, sem autorização prévia do DRN (WISCONSIN, 2018b).

#### **4.2.3 Europa**

A Europa gera aproximadamente 18,4 milhões toneladas de escórias de aciaria anualmente, de acordo com a Euroslag (2016), associação de organizações e empresas interessadas em todos os aspectos da geração e utilização de produtos provenientes das escórias. Deste montante, 71% são utilizadas em aplicações de construção (cimento, massa asfáltica, obras de engenharia, etc.). Entre os 29% restantes, inclui-se o armazenamento interno, disposição final em aterros e também o uso na agricultura, onde os teores de silicato são utilizados como fertilizantes.

Os principais regulamentos europeus que discorrem sobre a utilização das escórias são a *EU Waste Framework Directive* (Diretiva Europeia sobre Resíduos), o REACH (sigla para *Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals*, traduzido em Registro, Avaliação, Autorização e Restrição de Produtos Químicos) e o Catálogo Europeu de Resíduos. Outras regulamentações relacionadas são a Decisão do Conselho Europeu sobre a Disposição de Resíduos em Aterros, o Regulamento Europeu sobre o Transporte de Resíduos e o Regulamento Europeu para Produtos de Construção.

#### 4.2.3.1 A Diretiva Europeia sobre Resíduos 2008/98/EC

Tendo em vista que, de acordo com a Diretiva Europeia sobre Resíduos (EUROPEAN COMMISSION, 2008), qualquer objeto ou substância pode ser ou um resíduo ou um “não-resíduo”, coprodutos são, por definição, classificados como não-resíduos. Isso significa que os coprodutos devem estar sujeitos, quando aplicável, às legislações que excluem resíduos de seu escopo, como por exemplo o Regulamento REACH nº 1907/2006.

O artigo 5º da Diretiva Europeia sobre Resíduos traz o conceito de coproduto, definindo que o material resultante de um processo produtivo cujo objetivo principal não seja a produção do mesmo só pode ser considerado um coproduto (e não um resíduo), se atender às seguintes condições:

- a) Existir a certeza de posterior utilização;
- b) Poder ser utilizado diretamente, sem processamentos posteriores, a não ser os normalmente praticados na indústria;
- c) Ser produzido como parte integral de um processo produtivo;
- d) A posterior utilização atender a todos os requisitos técnicos aplicáveis como produto e não causar impactos ao meio ambiente ou à saúde humana.

O artigo 6º, por sua vez, define as condições para os materiais que não se enquadram na definição de coprodutos do artigo 5º, mas que podem deixar de ser resíduos (“*end-of-waste*”) e se tornarem um produto/matéria-prima secundária, desde que tenham sido submetidos a uma operação de valorização ou beneficiamento, incluindo a reciclagem, e que satisfaçam aos seguintes critérios:

- a) Ser comumente utilizados em aplicações específicas;
- b) Possuírem mercado ou demanda definidos;
- c) Atenderem às exigências técnicas para as aplicações pretendidas;
- d) Não causarem impactos adversos ao meio ambiente ou à saúde humana.

Nos termos da Diretiva em questão, a escória de aciaria pode ser classificada inicialmente como um resíduo, mas deixando esta condição após o seu processamento/beneficiamento, o atendimento a critérios técnicos e à comprovação da inexistência de eventuais riscos à saúde e ao meio ambiente. O agregado siderúrgico é um coproduto proveniente de diversas etapas de beneficiamento da escória de aciaria, possui mercado e demanda bem definidos e atende à legislação, normas técnicas e critérios para que suas aplicações pretendidas não causem impactos

adversos ao meio ambiente ou à saúde humana. Portanto, está alinhado aos conceitos introduzidos pela Diretiva Europeia sobre Resíduos, podendo ser enquadrado legalmente como um coproduto.

A Figura 11 mostra as diferentes classificações das escórias de aciaria conforme os artigos 5º e 6º da Diretiva Europeia sobre Resíduos 2008/98/EC.

**Figura 11.** Fluxograma para determinação do estado das escórias de aciaria considerando os artigos 5º e 6º da Diretiva Europeia sobre Resíduos 2008/98/EC.



Fonte: adaptado do Artigo de Posição da Euroslag e da Eurofer (2012)

#### 4.2.3.2 Regulamento REACH nº 1907/2006

O regulamento REACH (EUROPEAN COMMISSION, 2006) se aplica a todas as substâncias químicas, seja isoladamente ou como parte de preparações, bem como a artigos (nome dado aos objetos que, durante a produção, recebem modificações especiais em sua forma, superfície ou design, determinando que possuem funções em um nível superior à sua composição química – roupas e aparelhos elétricos, por exemplo) produzidos ou exportados para a Europa

(CHEMSAFETY PRO, 2019). Após a publicação da Diretiva Europeia sobre Resíduos, o agregado siderúrgico passou a ser comumente registrado como uma substância sob o Regulamento REACH, uma vez que deixou a classificação de resíduo. Durante o processo de registro, os dados disponíveis de todos os países europeus sobre as composições de escória e seus respectivos processos de produção foram avaliados e intensamente discutidos. Como resultado, as definições existentes do EINECS (do inglês *European Inventory of Existing Chemical Substances* – Inventário Europeu das Substâncias Químicas Existentes) foram revisadas, considerando o “de acordo” em registrar as escórias como substâncias (EUROSLAG e EUROFER, 2012), como mostra a Tabela 4.

**Tabela 4.** Registros das Escórias no EINECS.

Family no.	Common name		EINECS name	EINECS No. CAS No.
1	Granulated Blast furnace Slag	GBS	Slag, ferrous metal, blast furnace (granulated)	266-002-0 65996-69-2
	Air-cooled Blast furnace Slag	ABS	Slag, ferrous metal, blast furnace (air-cooled)	266-002-0 65996-69-2
2	Basic Oxygen furnace Slag (converter slag)	BOS	Slag, steelmaking, converter	294-409-3 91722-09-7
3a	Electric Arc Furnace slag (from Carbon steel production)	EAF C	Slag, steelmaking, elec. furnace (carbon steel production)	932-275-6 294-410-9 <sup>a</sup> 91722-10-0 <sup>a</sup>
3b	Electric Arc Furnace slag (from Stainless/ high alloy steel production)	EAF S	Slag, steelmaking, elec. furnace (stainless/high alloy steel production)	932-476-9 294-410-9 <sup>a</sup> 91722-10-0 <sup>a</sup>
4	Steelmaking slag	SMS	Slag, steelmaking	266-004-1 65996-71-6

Fonte: Euroslag e Eurofer (2012)

Para todos os registros, o REACH exige que os fabricantes e importadores informem as substâncias fabricadas ou importadas em quantidades acima de uma tonelada por ano. Um dossiê de registro também deve ser preparado e submetido à Agência Europeia dos Produtos Químicos (ECHA – *European Chemicals Agency*), que avalia as informações apresentadas pelas empresas para examinar as propostas de ensaio e avaliar se uma determinada substância constitui um risco para a saúde humana ou para o meio ambiente. Normalmente, somente após a conclusão do registro com sucesso (com atribuição do número REACH) a substância pode ser fabricada, importada ou colocada no mercado (CHEMSAFETY PRO, 2019).

Vale destacar que, durante o processo de registro das escórias de aciaria no REACH, foram necessários inúmeros testes e investigações sobre a composição química dos materiais, bem como os seus efeitos na saúde humana e no meio ambiente. Neste contexto, foi realizada uma extensa pesquisa bibliográfica, além de numerosos testes adicionais de toxicidade (como, por exemplo, irritação da pele e dos olhos, sensibilização da pele, mutação genética em bactérias, citogenicidade em células de mamíferos) e ecotoxicidade (toxicidade a curto e longo prazo em invertebrados, efeitos em microrganismos do solo, toxicidade para plantas terrestres, inibição do crescimento de algas). Os testes mostraram que as escórias investigadas não são perigosas (EUROSLAG e EUROFER, 2012).

#### 4.2.3.3 Lista Europeia de Resíduos

A Lista Europeia de Resíduos (EWC – *European Waste Catalogue*), estabelecida pela Decisão 2000/532/ECC (EUROPEAN COMMISSION, 2000), contém duas menções às escórias:

- 10 02 01 → Resíduos do processamento de escória
- 10 02 02 → Escória bruta/não processada

A existência das diversas etapas de beneficiamento das escórias de aciaria as exclui automaticamente do item 10 02 02, uma vez que ela é processada, deixando de ser bruta e se tornando um novo material com valor econômico, o agregado siderúrgico. Tais materiais tampouco podem ser enquadrados na entrada 10 02 01, visto que sua classificação foi alterada para coprodutos após a publicação da Diretiva Europeia sobre Resíduos. Assim, pode-se inferir que a escória que sofreu qualquer etapa de processamento não é abrangida pela Lista Europeia de Resíduos e, portanto, não deve ser classificada como resíduo.

Também deve ser ressaltado que os processos de beneficiamento das escórias de aciaria são integrados e não alteram a composição química inerente das escórias, mas apenas melhoram suas propriedades físicas e mecânicas como uma continuação do processo de produção (EUROSLAG e EUROFER, 2012).

**CAPÍTULO IV**  
**DISCUSSÃO**

#### 4.1 Panorama Atual

Como no Brasil não existe diferença, em termos legais, entre os conceitos de resíduos e coprodutos, as regulamentações aplicáveis aos resíduos acabam dificultando e tornando mais burocrático o processo de comercialização do agregado siderúrgico como um coproduto. A PNRS, apesar de ser um marco regulatório, tornando-se o principal instrumento legal para o gerenciamento de resíduos sólidos no país, não traz uma definição para os resíduos que podem ser reciclados, reutilizados, reaproveitados e comercializados por possuir valor agregado, qualidade e potencial para substituírem matérias-primas não renováveis em outros processos ou atividades.

Em São Paulo, o órgão ambiental permite apenas a utilização do agregado siderúrgico de forma confinada, isto é, em aplicações que assegurem que o material esteja devidamente contido: base e sub-base em pavimentação e fabricação de artefatos de concreto (para esta, o parecer técnico favorável foi concedido a uma única siderúrgica do Estado).

Nos demais Estados brasileiros, não existem restrições legais em relação ao uso do agregado siderúrgico. Todavia, tampouco existem autorizações formais para quaisquer aplicações conhecidas, o que demonstra uma relação de falta de segurança entre geradores e fiscalizadores. No caso de alguns Estados, como Minas Gerais, Rio de Janeiro, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, existem ainda mais requisitos em legislações estaduais que são aplicáveis para resíduos, como é o caso do sistema online de MTR mencionado anteriormente, por exemplo.

Apesar das restrições criadas em São Paulo, existem diversos outros usos (confinados e não confinados) possíveis para o agregado siderúrgico, já mencionados neste trabalho: revestimento primário, lastro ferroviário, corretivos e fertilizantes do solo, dentre outras. Todos eles apresentam diversos benefícios econômicos e ambientais, relacionados principalmente à contribuição para a preservação de recursos naturais não renováveis, ao aumento dos índices de reciclagem dos municípios e ao prolongamento da vida útil dos aterros, tendo em vista que a destinação da escória como resíduo é evitada. O Instituto Aço Brasil (2019) cita, ainda, o benefício de redução da emissão de gases de efeitos estufa na produção de cimento, devido à possibilidade de uso das escórias de aciaria no processo, assim como ocorre com as escórias de alto-forno.

Entretanto, mesmo com tantas possibilidades de aplicações técnicas e ambientalmente seguras e consolidadas, as escórias de aciaria beneficiadas e transformadas em agregados siderúrgicos ainda são enquadradas como resíduos no Brasil, devido à inexistência de leis que as

classifiquem como coprodutos, incentivando assim o seu uso por todo o país. A legislação federal brasileira não dá margem a outras interpretações, ou seja, as escórias de aciaria são classificadas como resíduos sólidos industriais.

As recentes normas técnicas, publicadas pela ABNT e pelo DNIT, para a utilização das escórias de aciaria na pavimentação certamente representam um avanço nesse sentido – todavia, são apenas condutas a serem seguidas, não possuindo nenhum caráter de cumprimento obrigatório e nem tendo sua existência atestada ou reconhecida na forma de leis. A discussão necessita avançar tecnicamente para se definir um marco regulatório da utilização para todo o território nacional, avaliando as diversas vantagens e contribuições econômicas, sociais e ambientais relacionadas à preservação dos recursos naturais não renováveis do país.

Visando identificar alternativas de aplicação para coprodutos da indústria siderúrgica e aperfeiçoar as existentes, o Instituto Aço Brasil criou também o Centro de Coprodutos Aço Brasil (CCABrasil), que levantou as principais iniciativas no Brasil para redução e agregação de valor aos coprodutos e resíduos (CENTRO DE COPRODUTOS AÇO BRASIL, 2016). Dentre elas, destacam-se:

- Desenvolvimento de novos mercados para potencializar a venda de resíduos e coprodutos – 78,6% do setor;
- Identificação de boas práticas para coleta, manuseio, estocagem e transporte – 78,5% do setor;
- Novas formas de reciclagem no próprio processo – 74,2% do setor;
- Estruturação / aperfeiçoamento da gestão de resíduos e coprodutos – 54,6% do setor;
- Novas formas de reuso – 52,1% do setor;
- Inovação tecnológica para desenvolvimento de novas aplicações – 52,1% do setor.

A partir deste levantamento, é possível verificar que as indústrias siderúrgicas brasileiras atuam, principalmente, no âmbito que atualmente lhes é permitido, considerando as atuais legislações vigentes no país: a prospecção de novos mercados e a busca por novas formas de reutilizar seus resíduos e coprodutos em seus próprios processos internos, dadas às limitações legais existentes.

Apesar de não terem sido identificadas, pelo CCABrasil, iniciativas com o objetivo de propor mudanças na esfera das políticas públicas – como é o caso da presente pesquisa – em 2007, foi iniciado o desenvolvimento de um trabalho em conjunto entre a Cetesb, as siderúrgicas do

Estado de São Paulo e a ABM (Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração), com o apoio de diversos sindicatos e associações, visando à elaboração – e futura aprovação – de um procedimento para diferentes usos do agregado siderúrgico em São Paulo. Os trabalhos avançaram ao longo dos anos, até a criação e protocolo do procedimento na Cetesb, em 2011.

Entre os anos de 2016 e 2020, o grupo manteve reuniões ordinárias com os objetivos de atualizar o procedimento, introduzindo conceitos importantes como a Economia Circular, e definir novas estratégias de abordagem junto ao órgão ambiental. Em paralelo, o mesmo grupo iniciou a avaliação de uma possível forma de apresentar o documento para o Ministério do Meio Ambiente (MMA) a partir de 2020, em uma tentativa de discutir o assunto a nível federal.

Em relação aos aspectos técnicos, é importante destacar que o Potencial de Expansão é um dos ensaios mais críticos para determinar uma boa qualidade das escórias de aciaria, sendo fator chave para um bom desempenho do material na maioria das aplicações pretendidas, principalmente na pavimentação e na fabricação de artefatos de concreto. Por serem materiais volumetricamente instáveis, isto é, que apresentam características expansivas, sua estabilização se faz necessária para que possam ser utilizados com segurança em materiais de construção (GUMIERI, 2002). A Figura 12 mostra um exemplo dos danos que podem ser causados pela expansão das escórias na pavimentação, em um trecho de estrada localizada em Vitória, no Espírito Santo.

**Figura 12.** Ruptura em pavimento causada por expansão de escória de aciaria.



Fonte: Baltazar, 2001.

O fenômeno da expansão é causado, principalmente, pela hidratação dos óxidos de cálcio livre e de magnésio em presença de umidade, e ocorre com mais frequência nas escórias de aciaria LD, justamente porque seus teores de CaO livre são geralmente maiores do que os identificados nas EFE (GUMIERI, 2002). O tratamento da expansão ocorre por meio da cura, processo citado no item 2.3 desta pesquisa.

Possíveis obstáculos e dificuldades técnicas com um determinado produto são mais facilmente contornados, pelo fato do interesse pelo seu uso e comercialização pertencer tanto aos produtores quanto aos consumidores. Entretanto, ao adentrar a esfera de aplicação de resíduos, o processo se torna mais burocrático, devido às questões ambientais e legais envolvidas.

O objetivo principal de uma política sobre resíduos sólidos consiste em minimizar os impactos negativos de sua produção e gestão, bem como os riscos à saúde humana e ao meio ambiente. Uma política de resíduos tem igualmente como objetivo a redução da utilização de recursos naturais e o incentivo à aplicação prática de uma hierarquia sobre a gestão dos resíduos. A PNRS não é diferente – processos como a reutilização e a reciclagem devem ter prioridade sobre a disposição final em aterros. Todavia, na prática, não há tanta fluidez no ato de reutilizar e/ou reciclar resíduos sólidos industriais em outros processos e atividades, uma vez que a sobrecarga

regulamentar sobre as partes envolvidas acaba desestimulando exatamente o que a política busca incentivar.

A Diretiva 2008/98/CE do Conselho e Parlamento Europeu, relativa aos resíduos, avança no entendimento sobre a diferenciação entre resíduos e “não-resíduos”, definindo critérios para que um material seja diretamente considerado um coproduto ou ainda, que um material inicialmente considerado como um resíduo no ato da sua geração, perca esta condição, podendo ser reclassificado como uma matéria-prima secundária.

Comparando-se ambos os sistemas de gerenciamento de resíduos, seja o definido pela PNRS brasileira, seja o definido pela Diretiva Europeia 2008/98/CE relativa aos resíduos, nota-se três elementos centrais que, em conjunto, categorizam o “não-resíduo”:

- A garantida utilização futura do material;
- A segurança à saúde pública e ao ambiente;
- A equivalência entre a definição de coproduto (Diretiva 2008/98/CE) e resíduos sólidos reutilizáveis (PNRS/2010), entendida como materiais oriundos de um processo produtivo que podem ser inseridos em outro processo produtivo e/ou aplicados para determinado fim, sem que necessitem de tratamento/transformação.

A norma americana NR 538, do estado de Wisconsin, é menos abrangente do que a europeia, estando mais direcionada para a reutilização de alguns resíduos industriais específicos, cuja geração é alta – entre eles, as escórias de aciaria. A norma também apresenta o conceito de coprodutos e reconhece formalmente os benefícios de sua reutilização, desde que não haja riscos à saúde humana e ao meio ambiente.

**CAPÍTULO V**  
**CONSIDERAÇÕES FINAIS**

## 5.1 Considerações Finais

A PNRS instaura princípios como a prevenção e a redução na geração de resíduos, trazendo um conjunto de instrumentos para propiciar o aumento da sua reciclagem e reutilização. Porém, os diferencia apenas de rejeitos (tudo o que não pode ser reciclado ou reutilizado, após esgotadas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos/tecnologias disponíveis e economicamente viáveis) – mas não de coprodutos (tudo o que tem valor econômico, podendo ser reciclado ou reaproveitado). Assim, a comercialização de tais materiais acaba sendo prejudicada, pelo fato dos requisitos legais aplicáveis aos resíduos (como por exemplo, as exigências relacionadas ao transporte) serem considerados fatores complicadores pelos possíveis consumidores, que acabam preferindo optar pelas matérias-primas naturais – mesmo que pagando mais caro por isso – apenas para estarem dispensados das exigências ambientais que lhes seriam cabíveis.

A problemática em questão expõe o regresso do país em relação ao atendimento de diretrizes de sua própria PNRS: de um lado, o discurso de que a reciclagem deve ser incentivada, evitando ao máximo o uso de aterros sanitários. Do outro, a prática contraditória: há uma dificuldade constante em obter aprovação legal para usos já mundialmente consolidados das escórias de aciaria, como alternativas seguras para evitar seu envio para aterros e ainda reduzir o consumo de recursos naturais.

O caminho a ser seguido para solucionar o problema não é a criação de uma norma técnica genérica, isto é, que englobe todas as possíveis aplicações para o agregado siderúrgico. Como suas características físico-químicas são variáveis (podendo sofrer alterações devido a mudanças nas matérias-primas utilizadas, nos processos de produção do aço ou durante os processos de beneficiamento), o ideal é que cada empresa geradora estabeleça seus próprios controles de qualidade, a fim de verificar se suas escórias atendem ou não a determinados parâmetros de qualidade para aplicação como coprodutos, com base nas normas existentes. Se estas não existirem, as discussões técnicas podem ocorrer junto às entidades responsáveis pela sua normatização.

Porém, fica claro que a inexistência de um suporte legal que diferencie os conceitos resíduos e coprodutos dificulta qualquer avanço sobre o tema no país. Casos reais apresentados de marcos regulatórios nos Estados Unidos e na Europa demonstram os benefícios de distinguir os dois conceitos, sem fugir dos requisitos ambientais a serem cumpridos, tanto pelos geradores quanto

pelos consumidores. A experiência adquirida com a aplicação das escórias de aciaria mundialmente pela indústria do aço, somada aos diversos estudos comprovando sua viabilidade técnica, ambiental, social e econômica, já ajudaria a esclarecer, no âmbito da legislação, a necessidade pela diferenciação entre as definições de resíduos e coprodutos.

Como o conceito de “resíduos sólidos reutilizáveis”, apresentado pela PNRS, é equivalente à definição de coproduto pela legislação europeia (Diretiva 2008/98/CE), uma possível direção seria distinguir formalmente os dois conceitos em uma revisão da Lei 12.305/2010, ou mesmo criar uma nova resolução, trazendo o conceito de “coproduto” (sem contrapor as definições já introduzidas pela PNRS) e demonstrando quais seriam as exigências ambientais necessárias para cada um deles.

A realização de uma avaliação de riscos da utilização das escórias de aciaria (ou de qualquer outro resíduo industrial com aplicação direta no meio ambiente) à saúde e ao meio ambiente poderia ser um requisito exigido pelos órgãos competentes – desde que mantendo uma frequência que não inviabilizasse economicamente o escoamento do material para o mercado. Porém, os conceitos, parâmetros e critérios utilizados tanto pela Comunidade Europeia quanto pelos EUA – referências conceituadas em termos de cuidado e precaução com saúde, segurança e meio ambiente – são desafiantes e poderiam ser utilizados como exemplo para a legislação brasileira, que alcançaria os mesmos benefícios reconhecidos pelos países já regulamentados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREAS, L.; DIENER, S.; LAGERKVIST, A. **Steel slags in a landfill top cover – Experiences from a full-scale experiment.** Waste Management, Volume 34, Issue 3, March 2014, p.692-701.

ARRIVABENE, L. F. **Adição de resíduo da indústria de granito em escória de aciaria BOF visando sua utilização na produção de cimento.** 2012. 165 folhas. Tese (Doutorado em Metalurgia e Materiais). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS. **Gestão de Coprodutos: Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico.** 2008. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008. (Nota Técnica). 28 p: il.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1982. **Produtos e ligas de cobre – Terminologia** – NBR 5019/1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987. **Peças de concreto para pavimentação – Especificação** - NBR 9781:1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992. **Cimento Portland – Determinação do teor de escória granulada de alto-forno por microscopia** – NBR 5754/1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004. **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos** – NBR 15.116/2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004. **Resíduos Sólidos: Classificação** – NBR 10.004/2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015 - **Execução de sub-base e base estabilizadas granulometricamente com agregado siderúrgico para pavimentação rodoviária - Procedimento** - NBR 16.364/2015.

BALTAZAR, R. P. **Caracterização do fator expansão de uma escória de aciaria em diferentes processos de cura para uso em pavimentação.** 2001. 83 folhas. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2001.

BICALHO K. V.; OLIVEIRA F. U.; RAPOSO C. O. L.; CASTELLO R. R.; SILVA M. G. **Avaliação de três métodos de determinação da expansão de escórias de aciaria brasileiras para pavimentação.** In: 10 Congresso Nacional de Geotecnia, 2006, Lisboa: Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 2006. v. 3. p. 777-786.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 12 de agosto de 2010 – Dispõe sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Brasília, DF. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm)>. Acessado em 27 de outubro de 2017.

BRASIL. **Resolução nº 313, de 29 de outubro de 2002 - Dispõe sobre o inventário Nacional de Resíduos Sólidos industriais.** CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Brasília, DF. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/port/conama/legislacao/CONAMA\\_RES\\_CONS\\_2002\\_313.pdf](http://www.mma.gov.br/port/conama/legislacao/CONAMA_RES_CONS_2002_313.pdf)>. Acessado em 19 de julho de 2018.

BRASIL. **Instrução Normativa nº 13, de 18 de dezembro de 2012.** IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Brasília, DF. Disponível em: <[https://servicos.ibama.gov.br/phocadownload/legislacao/in\\_13\\_18dez2012\\_ibama\\_lista\\_brasileira\\_residuos.pdf](https://servicos.ibama.gov.br/phocadownload/legislacao/in_13_18dez2012_ibama_lista_brasileira_residuos.pdf)>. Acessado em 22 de junho de 2019.

CARVALHO, P. S. L.; MESQUITA, P. P. D.; ARAÚJO, E. D. G. **Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade.** BNDES Setorial, n. 41, Rio de Janeiro, p. 181-236, mar. 2015.

CARVALHO, S. Z.; VERNILLI, F.; ALMEIDA, B.; DEMARCO, M.; SILVA, S. N. **The recycling effect of BOF slag in the portland cement properties. Resources, Conservation and Recycling, Volume 127, December 2017, p.216-220.**

CASTELO BRANCO, V. T. F. - **Caracterização de Misturas Asfálticas Com o Uso de Escória de Aciaria como Agregado.** Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 135 p., 2004.

CENTRO DE COPRODUTOS AÇO BRASIL. **Conheça o Centro de Coprodutos Aço Brasil.** Disponível em: <<http://www.ccabrasil.org.br/>>. Acessado em 19 de julho de 2018.

CHEMSAFETY PRO. **EU REACH Regulation (EC) No 1907/2006.** Disponível em: <[https://www.chemsafetypro.com/Topics/EU/REACH\\_Regulation\\_EC\\_No\\_1907\\_2006.html](https://www.chemsafetypro.com/Topics/EU/REACH_Regulation_EC_No_1907_2006.html)>. Acessado em 21 de junho de 2019.

CHENG, X.; YANG, Q. **The comprehensive utilization of steel slag.** Fly Ash Compr. Util. (5) (2010), p.45-49.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **A indústria do aço no Brasil.** – Brasília: CNI, 2012. 48 p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Visão da Indústria Brasileira sobre a Gestão de Resíduos Sólidos.** Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006221.pdf>>. Acessado em 20 de dezembro de 2019.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRÂNSITO. **Transporte rodoviário: desempenho do setor, infraestrutura e investimentos.** – Brasília: CNT, 2017a.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRÂNSITO. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** – Brasília: CNT, 2017b.

CORRÊA, M. L. T. **Utilização de escória de aciaria como corretivo da acidez de solos para cultivos de soja e cana-de-açúcar e avaliação da contaminação ambiental.** 2006. 187 folhas. Tese (Doutorado em Fertilidade do solo e nutrição de plantas; Gênese, Morfologia e Classificação, Mineralogia, Química). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2006.

DAS, B.; PRAKASH, S.; REDDY, P. S. R.; MISRA, V. N. **An overview of utilization of slag and sludge from steel industries.** Resources, Conservation and Recycling, Volume 50, Issue 1, March 2007, p.40-57.

DAYRELL, F. O. **Metodologia geotécnica sustentável para credenciamento da escória de aciaria como lastro ferroviário.** 2013. 177 folhas. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2013.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE MINAS GERAIS. **Método de Ensaios para Avaliação do Potencial de Expansão de Escória de Aciaria – PTM 130 – DER-MG,** 1982.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2017. **Base estabilizada granulometricamente com Açobrita® – Especificação de Serviço – DNIT 406/2017.**

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2017. **Sub-base estabilizada granulometricamente com Açobrita® - Especificação de Serviço – DNIT 407/2017.**

DEVI, V. S.; GNANAVEL, B. K. **Properties of concrete manufactured using steel slag.** Procedia Engineering, volume 97 (2014), p.95-104.

DIENER, S.; ANDREAS, L.; HERRMANN, I.; ECKE, H.; LAGERKVIST, A. **Accelerated carbonation of steel slags in a landfill cover construction.** Waste Management, Volume 30, Issue 1, January 2010, p.132-139.

EUROPEAN COMMISSION, 2000. **2000/532/EC: Commission Decision of 3 May 2000 replacing Decision 94/3/EC establishing a list of wastes pursuant to Article 1(a) of Council Directive 75/442/EEC on waste and Council Decision 94/904/EC establishing a list of hazardous waste pursuant to Article 1(4) of Council Directive 91/689/EEC on hazardous waste (notified under document number C(2000) 1147).** Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32000D0532&from=EN>>. Acessado em 21 de junho de 2019.

EUROPEAN COMMISSION, 2006. **Regulation (EC) No 1907/2006 of The European Parliament and of the Council of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation,**

**Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH), establishing a European Chemicals Agency, amending Directive 1999/45/EC and repealing Council Regulation (EEC) No 793/93 and Commission Regulation (EC) No 1488/94 as well as Council Directive 76/769/EEC and Commission Directives 91/155/EEC, 93/67/EEC, 93/105/EC and 2000/21/E.** Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:396:0001:0849:EN:PDF>>. Acessado em 21 de junho de 2019.

EUROPEAN COMISSION, 2008. **Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives.** Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&from=EN>>. Acessado em 21 de junho de 2019.

EUROSLAG; EUROFER. **Position Paper on the status of Ferrous Slag complying with the Waste Framework Directive 2008/98/CE (Articles 5/6) and the REACH Regulation.** Disponível em: <[https://www.euroslag.com/wp-content/uploads/2019/01/Position\\_Paper\\_April\\_2012.pdf](https://www.euroslag.com/wp-content/uploads/2019/01/Position_Paper_April_2012.pdf)>. Acessado em 21 de junho de 2019.

EUROSLAG. **Slag: A high grade product out of a high quality controlled industry – Statistics 2014.** Disponível em: <<http://www.euroslag.com/products/statistics/2014/>>. Acessado em 13 de dezembro de 2017.

EUROSLAG. **Statistics 2016.** Disponível em: <<https://www.euroslag.com/products/statistics/statistics-2016/>>. Acessado em 21 de junho de 2019.

EVANGELISTA, B. L. **Avaliação do Ciclo de Vida Comparativa de Peças de Concreto para Pavimentação Convencionais e com Incorporação de Escória de Forno Elétrico.** 2017. 134 folhas. Dissertação – Área de concentração Ambiente, da Faculdade de Tecnologia da Unicamp. Limeira, 2017.

FARIA, R. A. F. **Contribuição ao Estudo das Propriedades Mecânicas e da Durabilidade de Concretos com Escória de Aciaria Elétrica (EAF) como Agregado Graúdo.** 2007. 146 folhas. Dissertação (Mestrado) – Área de concentração: Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2007.

FERNANDES, D. P. **Estudo de estabilização química, geomecânica e ambiental das escórias de aciaria LD para fins de aplicação como material de lastro ferroviário em vias sinalizadas.** 2010. 162 folhas. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2010.

FERRARO, B. **Estudo das Propriedades Termofísicas de Escória Metalúrgica e de Escórias Sintéticas de CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de São Paulo – 2014, p.12.

FONSECA, J. F. **Efeitos do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais e escória de aciaria como fileres na rigidez viscoelástica linear e características de fratura da matriz de agregados finos.** 2016. 122 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2016.

FREITAG, E. E. **Escória de aciaria, lama cal e lodos de esgoto no cultivo da soja sob sistema de plantio direto.** 2008. 278 folhas. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrônomicas. Botucatu, 2008.

FRONEK, A. B. **Feasibility of expanding the use of steel slag as a concrete pavement aggregate.** Masters of Science in Engineering Civil. Cleveland State University. 2012.

GAO, X.; OKUBO, G. M.; MARUOKA, N.; SHIBATA, H.; ITO, T.; KITAMURA, S. Y. **Production and utilisation of iron and steelmaking slag in Japan and the application of steelmaking slag for the recovery of paddy fields damaged by Tsunami.** Miner. Process. Extractive Metall., 124 (2015), p.116-124.

GEYER, R. M. T. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto.** 2001. 188 folhas. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

GIOCONDO, A. C. C. - **Desenvolvimento de Blocos Confeccionados com Escória Proveniente da Reciclagem do Aço.** 2008. 189 folhas. Dissertação (Mestrado - Área de Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia). Universidade de São Paulo. São Carlos, 2008.

GOMES, J. F. **Estudo laboratorial de misturas asfálticas mornas com agregados de escória de aciaria.** 2018. 99 folhas. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília. Brasília, 2018.

GOTTARDI, E. V. **Aproveitamento do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais e de escória de aciaria moída como filer em pavimentos de concreto asfáltico.** 2015. 134 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2015.

GROENNIGER, J.; FALCHETTO, A. C.; ISAILOVIC, I.; WANG, D.; WISTUBA, M. P. **Experimental investigation of asphalt mixture containing Linz-Donawitz steel slag.** Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), Volume 4, Issue 4, August 2017, p.372-379.

GUMIERI, A. G. - **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria do processo LD como adição em cimentos.** 2002. 251 folhas. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

GUO, J.; BAO, Y.; WANG, M. **Steel slag in China: Treatment, recycling, and management.** Waste Management, Volume 78, August 2018, p.318-330.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Centro de Coprodutos Aço Brasil.** Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site2015/coprodutos.asp>>. Acessado em 20 de dezembro de 2019.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2018.** Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>>. Acessado em 17 de dezembro de 2019.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Panorama de Escória de Aciaria no Brasil.** 2010. Disponível em: <[http://feam.br/images/stories/arquivos/arquivossmrr/escoria/lucila\\_caselato.pdf](http://feam.br/images/stories/arquivos/arquivossmrr/escoria/lucila_caselato.pdf)>. Acessado em 10 de dezembro de 2017.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Proposta da Indústria do Aço para Estabelecimento de LME's para Fontes Fixas Existentes,** Rio de Janeiro, 2010. Reunião do comitê.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14040. **Environmental management - Life cycle assessment – Principles and framework.** Geneva. 2006. 20p.

JANUZZI, R. V. **Modelagem do comportamento mecânico de blocos e prismas produzidos com escória de aciaria elétrica para alvenaria estrutural.** 2014. 135 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2014.

JIANG, Y.; LING, T.; SHI, C.; PAN, S. **Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete - A review.** Resources, Conservation and Recycling, Volume 136, September 2018, p.187-197.

KAMBOLE, C.; PAIGE-GREEN, P.; KUPOLATI, W. K.; NDAMBUKI, J. M.; ADEBOJE, A. O. **Basic oxygen furnace slag for road pavements: A review of material characteristics and performance for effective utilisation in southern Africa.** Construction and Building Materials, Volume 148, 1 September 2017, p.618-631.

KRAYUSHKINA, K.; PRENTKOYSKIS, O.; BIELIATYNKSYI, A.; JUNEVICIUS, R. **Use of steel slags in automobile road construction, Transport.** 2012. 7:2, p.129-137.

KIESSLING, R.; LANGE, N. **Non-Metallic Inclusions in Steel British Corrosion.** Volume 13, Issue 2, 01 January 1978, p.55-56. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1179/000705978798318891>>. Acessado em 13 de maio de 2017.

LI, Q.; DING, H.; RAHMAN, A.; HE, D. **Evaluation of Basic Oxygen Furnace (BOF) material into slag-based asphalt concrete to be used in railway substructure.** Construction and Building Materials, Volume 115, 15 July 2016, p.593-601.

LIAPIS, I.; LIKOYDIS, S. **Use of electric arc furnace slag in thin skid-resistant surfacing**. *Procedia Soc. Behav. Sci.*, volume 48 (2012), p. 907-918.

MACHADO, A. T.; GOMES, A. O.; CARDOSO, R. J. C.; CRUZ, E. B. **O uso de escórias de aciaria como agregado na construção civil**. IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2002. Disponível em: <[http://www.infohab.org.br/entac2014/2002/Artigos/ENTAC2002\\_1595\\_1602.pdf](http://www.infohab.org.br/entac2014/2002/Artigos/ENTAC2002_1595_1602.pdf)>. Acessado em 21 de dezembro de 2017.

MAGADI, K. L.; ANIRUDH, N.; MALLESH, K. M. **Evaluation of bituminous concrete mixture properties with steel slag**. *Transportation Research Procedia*, volume 17 (2016), p.174-183.

MASUERO, A. B. **Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição ao cimento**. 2001. 289 folhas. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

MIGGIOLARO, A. E. **Atributos químicos e físicos do solo após reaplicação de lodos de esgoto, escória de aciaria e lama cal em sistema semeadura direta**. 2014. 115 folhas. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrônomicas. Botucatu, 2014.

MIGGIOLARO, A. E. **Lodos de esgoto, escória de aciaria e lama cal na cultura da soja sob sistema plantio direto em latossolo vermelho**. 2009. 114 folhas. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrônomicas. Botucatu, 2009.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa COPAM nº 195, de 03 de abril de 2014 - Estabelece exigências de prestação periódica de informações sobre o resíduo denominado escória de aciaria**. Belo Horizonte, MG. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=268897>>. Acessado em 26 de junho de 2019.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa COPAM nº 221, de 21 de março de 2018 - Revoga a Deliberação Normativa COPAM nº 195, de 3 de abril de 2014**. Belo Horizonte, MG. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=46038>>. Acessado em 26 de junho de 2019.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa COPAM nº 232, de 27 de fevereiro de 2019. Institui o Sistema Estadual de Manifesto de Transporte de Resíduos e estabelece procedimentos para o controle de movimentação e destinação de resíduos sólidos e rejeitos no estado de Minas Gerais e dá outras providências**. Belo Horizonte, MG. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=47998>>. Acessado em 26 de junho de 2019.

MINAS GERAIS. **Lei nº 12.031, de 12 de janeiro de 2009. Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos.** Belo Horizonte, MG. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=9272>>. Acessado em 20 de dezembro de 2019.

MONSHI, A.; ASGARANI, M. K. **Producing Portland cement from iron and steel slags and limestone.** Cement and Concrete Research, Volume 29, Issue 9, September 1999, p.1373-1377.

MOTZ, H.; GEISELER, J. **Products of steel slags: an opportunity to save natural resources.** Waste Management, Volume 21, Issue 3, June 2001, p.285-293.

NASCIMENTO, K. A. L. **Utilização de Escória Proveniente da Reciclagem do Aço em Concreto de Cimento Portland.** 2007. 128 folhas. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos / Instituto de Química de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2007.

OLIVEIRA, M. R. **Aplicação de escória de aciaria e calcário no solo e desenvolvimento do primeiro ciclo da grama bermuda.** 2012. 63 folhas. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrônômicas. Botucatu, 2012.

OLIVEIRA JÚNIOR, M. X. **Uso de escória de aciaria e calcário em bananeira prata-anã.** 2013. 97 folhas. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências Agrônômicas. Botucatu, 2013.

PACHECO, R. F. R. **Estudo sobre a utilização das escórias de aciaria LD naturais ou modificadas para substituição parcial do cimento ou como adição ao clínquer.** 2017. 297 folhas. Tese (Doutorado em Ciências). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2017.

PEDROSA, R. A. A. **Estudo de viabilidade técnica e econômica do uso de agregados de escória de aciaria em concreto betuminoso usinado a quente.** 2010. 113 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2010.

PITANGA, H. N.; SILVA, T.O.; SANTOS, A. L.; SILVA, A. C. B.; LIMA, D. C. **Classificação met de misturas de solo-escória de aciaria-cinza volante compactadas visando a aplicação em estradas florestais.** Rev. Árvore vol.40 no.5. Viçosa, 2016.

POLISSENI, A. E. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escória de aciaria elétrica micronizada como material cimentício.** 2005. 251 folhas. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

PROCTOR, D. M.; FEHLING, K. A.; SHAY, E. C.; AND, J. L. W.; GREEN, J. J.; AVENT, C. **Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace, and electric arc furnace steel industry slags.** Environ. Sci. Technol., 34 (2000), p.1576-1582.

RAMOS, M. F.; POLISSENI, E. A.; FREESZ, S. W. J. **Gestão ambiental da escória de aciaria**. 2007. Disponível em: <<http://wwwo.metallurgica.com.br/gestao-ambiental-da-escoria-de-aciaria>>. Acessado em 12 de dezembro de 2017.

RAPOSO, C. O. L. **Estudo experimental de compactação e expansão de uma escória de aciaria LD para uso em pavimentação**. 2005. 164 folhas. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2005.

REDDY, A. S.; PRADHAN, R. K.; CHANDRA, S. **Utilization of Basic Oxygen Furnace (BOF) slag in the production of a hydraulic cement binder**. International Journal of Mineral Processing, Volume 79, Issue 2, May 2006, p.98-105.

RESENDE, A. D. **Utilização da escória de aciaria pura e com adição de argila como camada de base em pavimentação rodoviária**. 2010. 210 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2010.

RIO DE JANEIRO. **Lei nº 4191, de 30 de setembro de 2003. Dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos e dá outras providências**. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=374214>>. Acessado em 20 de dezembro de 2019.

RIO DE JANEIRO. **Resolução CONEMA nº 79, de 07 de março de 2018 – Aprova a Norma Operacional para o Sistema Online de Manifesto de Transporte de Resíduos**. Disponível em: <<https://sogi8.sogi.com.br/Arquivo/Modulo113.MRID109/Registro1289826/resolucao%20conema%20n%C2%BA%2079,%20de%2007-03-2018.pdf>>. Acessado em 26 de junho de 2019.

ROCHA, F. L. L. **Utilização do agregado siderúrgico (escória de aciaria) em revestimento asfáltico tipo tratamento superficial**. 2011. 115 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2011.

ROHDE, L. **Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos: estudo laboratorial**. 2002. 118 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

ROSLAN, N. H.; ISMAIL, M.; ABDUL-MAJID, Z.; GHOREISHIAMIRI, S.; MUHAMMAD, B. **Performance of steel slag and steel sludge in concrete**. Construction and Building Materials, Volume 104, 1 February 2016, p.16-24.

SÃO PAULO. **Lei nº 12.300, de 16 de março de 2006 – Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos e define princípios e diretrizes**. Diário Oficial - Poder Executivo, São Paulo, SP. 17 mar. 2006. Seção 1, p.1.

SILVA, J. **Avaliação do potencial agrônomico e de contaminação ambiental decorrente do uso de uma escória de aciaria como corretivo e fertilizante de solos**. 2003. 134 folhas.

Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2003.

SILVA, V. C. **Análise da potencialidade de uso da escória de aciaria como matéria-prima alternativa na produção de pisos intertravados.** 2015. 157 folhas. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável). Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2015.

SKAF, M.; MANSOB, J. M.; ARAGÓN, A.; FUENTE-ALONSO, J. A.; ORTEGA-LÓPEZ, V. **EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use.** Resources, Conservation and Recycling, Volume 120, 2017, p.176-185.

SOBRAL, M. F.; NASCIMENTO, C. W. A.; CUNHA, K. P. V.; FERREIRA, H. A.; SILVA, A. J.; SILVA, F. B. V. **Escória de siderurgia e seus efeitos nos teores de nutrientes e metais pesados em cana-de-açúcar.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Volume 15, no.8, Campina Grande. Agosto de 2011.

SOUZA, E. B. O. **Escórias de aciaria e resíduos de concretos refratários em componentes de pavimentação.** 2007. 128 folhas. Dissertação (Mestrado) – Área de Concentração: Meio Ambiente. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

TSAKIRIDIS, P. E.; PAPADIMITRIOU, G. D.; TSIVILLIS, S.; KORONEOS, C. **Utilization of steel slag for Portland cement clinker production.** Journal of Hazardous Materials, Volume 152, Issue 2, April 2008, p.805-811.

WALLY, M. S. **Respostas das plantas e modificação de propriedades do solo pela aplicação de escória básica de aciaria.** 2007. 96 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrônoma). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

WISCONSIN. **Chapter NR 538 - Beneficial Use of Industrial Byproducts.** Wisconsin, EUA. 2015. Disponível em: <[https://docs.legis.wisconsin.gov/code/admin\\_code/nr/500/538](https://docs.legis.wisconsin.gov/code/admin_code/nr/500/538)>. Acessado em 13 de julho de 2018.

WISCONSIN. **Guidance for the Beneficial Use of Industrial Byproducts.** Wisconsin, EUA. 2018a. Disponível em: <<https://dnr.wi.gov/files/PDF/pubs/wa/WA1769.pdf>>. Acessado em 13 de julho de 2018.

WISCONSIN. **Wisconsin Act 285.** An Act to amend 289.01 (33); and to create 287.29 of the statutes; relating to: iron or steel slag managed as an item of value and providing a penalty. Wisconsin, USA. 2018b. Disponível em: <<https://docs.legis.wisconsin.gov/2017/related/acts/285>>. Acessado em 17 de dezembro de 2019.

YU, X.; TAO, Z.; SONG, T.; PAN, Z. **Performance of concrete made with steel slag and waste glass.** Construction and Building Materials, Volume 114, 1 July 2016, p.737-746.

ZAGO, S. C. **Estudo do efeito da cristalinidade da escória de aciaria nas propriedades físico-químicas do cimento Portland CPIII.** 2015. 146 folhas. Dissertação (Mestrado em Ciências). Escola de Engenharia de Lorena – Universidade de São Paulo. Lorena, 2015.