



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de
Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil



MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA METALÚRGICA

“ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA NA
CORREÇÃO DA ACIDEZ E NA MELHORIA DAS
PROPRIEDADES DOS SOLOS DA REGIÃO DE OURO PRETO”

Arianne Risney Ferreira Costa

Ouro Preto, 2019

Arianne Risney Ferreira Costa

“Estudo da utilização da escória de aciaria na correção da acidez e na melhoria das propriedades dos solos da região de Ouro Preto”

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Prof. Dr. Flavio Sandro Lays Cassino

Ouro Preto, 2019



FOLHA DE APROVAÇÃO

Arianne Risney Ferreira Costa

Estudo da utilização de escória de aciaria na correção da acidez e na melhoria das propriedades dos solos na plantação de milho da região de Ouro Preto

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Metalurgista.

Aprovada em 19 de dezembro de 2019

Membros da banca

Prof. Dr. Flávio Santos Lays Cassino - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Cláudio Batista Vieira - Universidade Federal de Ouro Preto
Eng^o Caio César Silveira - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral (PPGEM/UFOP)

Flávio Sandro Lays Cassino, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 20/12/2019



Documento assinado eletronicamente por **Nayara Aparecida Neres da Silva, COORDENADOR(A) DE CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA**, em 07/10/2024, às 16:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0790568** e o código CRC **C240F064**.

RESUMO

Neste trabalho foi estudada e avaliada a utilização de escória de aciaria para a melhoria das propriedades agrícolas dos solos da região de Ouro Preto. Em uma primeira etapa o trabalho consistiu em análises do solo da região e da escória básica de aciaria obtida. Em seguida foi realizado um experimento com a cultura do milho, realizado em escala de laboratório, plantado ao ar livre em unidades experimentais com diferentes teores de escória. O experimento avaliou o tempo de germinação, a taxa de crescimento e o ganho de massa das plantas crescidas nos solos com diferentes teores de escória, mostrando um efeito relevante destas adições nas propriedades do solo. Particularmente, é intenso o efeito da escória no tempo de germinação, que se apresentou cerca de 50% menor para as sementes plantadas em solo com adição de escória. O teor de escória que apresentou os resultados mais positivos é em torno de 3%. Como um estudo de viabilidade, este trabalho sugere fortemente uma pesquisa de campo para analisar a questão tratada.

Palavras chave: Escória de aciaria. Solos da região de Ouro Preto. Tempo de germinação.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Fluxograma da produção de aço em uma usina integrada.....	13
Figura 3.2: Representação esquemática de um Forno Elétrico a Arco.....	15
Figura 3.3: Fluxograma de produção em uma aciaria LD.....	18
Figura 3.4: Amostras de escórias de LD e FEA.....	24
Figura 3.5: Uma típica planta de beneficiamento da escória.....	25
Figura 3.5: As principais utilizações dos vários tipos de escórias siderúrgicas.....	27
Figura 4.1: Fluxograma das etapas principais do experimento.....	32
Figura 4.2: Amostra da escória de aciaria utilizada.....	33
Figura 4.3: Amostra do solo coletado após remoção de cascalhos e matéria orgânica...33	33
Figura 4.4: Detalhe da Folha 4 do Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais.....	34
Figura 4.5: Resultado da difração de raio-x do solo.....	34
Figura 4.6: Resultados da difração de raio-x, composição química do solo.....	35
Figura 4.7: Resultado da difração de raio-x da escória.....	36
Figura 4.8: Resultados da difração de raio-x, composição química da escória.....	36
Figura 4.9: Comparação entre os valores das medições do pH.....	38
Figura 4.10: Imagem ilustrativa do plantio.....	39
Figura 4.11: Amostra de milho (<i>Zea Mays</i>)	40
Figura 4.12.: As 15 unidades plantadas logo após a primeira semeadura.....	41
Figura 4.13: As 9 unidades plantadas logo após a segunda semeadura.....	42
Figura 5.1: O tempo de germinação em dias para cada uma das 15 unidades da primeira semeadura.....	44
Figura 5.2: Estágio de desenvolvimento das 15 unidades da primeira semeadura 11 dias após o plantio.....	45
Figura 5.3: Comparação do grau de desenvolvimento das plantas duas semanas após a semeadura.....	46
Figura 5.4: Comparação do grau de desenvolvimento das plantas três semanas após a semeadura.....	46
Figura 5.5: Comparação do grau de desenvolvimento das plantas a aproximadamente um mês.....	47
Figura 5.6: O tempo de germinação em dias para cada uma das 9 unidades da segunda semeadura.....	48

Figura 5.7: Comparação do grau de desenvolvimento das plantas 17 dias após o plantio.
.....49

Figura 5.8: Comparação do grau de desenvolvimento das plantas com aproximadamente
o mesmo tempo de crescimento germinadas em solos com diferentes teores de escória....50

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Composições Típicas das Escórias.....	20
Tabela 3.2: Composições Mineralógica das escórias de aciaria.....	22
Tabela 3.3: Quadro comparativo das faixas de composição química das escórias de aciaria geradas por refino oxidante (FEA e LD) e refino redutor (FP).....	23
Tabela 3.4: Características físico-químicas das escórias de aciaria.....	25
Tabela 3.5: Comparação do poder neutralizador de várias escórias de aciaria com a wollastonita.....	28
Tabela 4.1: Resultados da primeira medição do pH.....	37
Tabela 4.2: Resultados da primeira medição do pH.....	39
Tabela 5.1: Registro das datas de germinação em cada uma das unidades semeadas em 15/10/2019.....	43
Tabela 5.2: Registro das datas de germinação em cada uma das unidades semeadas em 25/10/2019.	48

LISTA DE SÍMBOLOS

FEA (Forno de Arco Elétrico)

EAI (Escória de Aço Inoxidável)

EA (Escória de Aciaria)

EFP (Escória de Forno Panela)

CCE (Carbonato de Cálcio Efetivo)

W (Wollastonita)

ABM (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS)

BI (Basicidade Binária)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	8
2	OBJETIVOS	11
2.1	Objetivo Geral	11
2.2	Objetivos Específicos	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1	Produção do Aço e das Escórias de Aciaria.....	12
3.1.1	Etapas iniciais da produção do aço.....	12
3.1.2	Processo FEA	13
3.1.3	Processo LD ou BOF.....	16
3.2	Propriedades e Características das Escórias de Aciaria.....	19
3.3	A Utilização das Escórias de Aciaria de Modo Geral e na Agricultura	26
4	MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1	A Metodologia Experimental	32
4.2	A Origem da Escória e a Coleta do Solo	32
4.3	Caracterização dos Materiais.....	34
4.3.1	O Solo Coletado	34
4.3.2	A escória de Aciaria Utilizada	35
4.4	Preparação das Diferentes Dosagens Solo/Escória e Semeadura de <i>Zea Mays</i>	39
4.4.1	Primeira Semeadura.....	41
4.4.2	Segunda Semeadura.....	41
5	O DESENVOLVIMENTO DAS PLANTAS – RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
6	CONCLUSÃO	51
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52

1. INTRODUÇÃO

A tentativa de mitigar os impactos ambientais de suas atividades sempre foi um compromisso e uma preocupação constantes na indústria siderúrgica, e esta preocupação é cada vez maior. De modo geral, com o desenvolvimento industrial, com a utilização cada vez maior de recursos naturais não renováveis, amplificou-se a preocupação com o descarte dos materiais e com a utilização dos resíduos gerados nos processos de fabricação, sempre buscando minimizar os impactos ambientais causados e reciclar os recursos não renováveis de modo sustentável.

Uma linha de crescente desenvolvimento e inovação é aquela da utilização de resíduos e subprodutos sólidos de praticamente todos os tipos de atividades industriais; muitas vezes promovendo modificações nestes subprodutos a fim de adaptá-los a novas utilizações, com o intuito de poupar e promover o uso racional dos recursos naturais, e sempre com base em uma aplicação técnica e ambiental viável.

No caso da indústria siderúrgica, segundo dados do instituto Aço Brasil¹ a produção de aço bruto no ano de 2018 foi de 35,4 milhões de toneladas e um parque produtor de aço formado por 32 usinas. Considerando-se uma média de 140 kg de escória de aciaria por tonelada de aço produzido, pode-se estimar em cerca de 4,9 milhões de toneladas a escória total produzida, que em sua maior parte é depositada nos pátios das siderúrgicas brasileiras; isto apenas no ano de 2018.

Neste contexto, é fundamental a busca do desenvolvimento e a da ampliação dos modos de utilização das escórias de aciaria, devido às enormes quantidades geradas, ao seu baixo custo e às suas propriedades físicas e químicas. O aproveitamento dessas escórias surge como única alternativa para minimizar o seu acúmulo em pátios siderúrgicos, causando sempre a supressão de espaços e riscos de contaminação atmosférica e de lençóis freáticos. No caso do Brasil estes resíduos são destinados à aterros que em sua maioria não atendem às normas ambientais de qualidade. Assim, a reutilização da escória, visando as demandas ambientais, sociais e econômicas, tem com o objetivo beneficiar tanto as organizações industriais quanto a sociedade e o meio ambiente.

A escória de aciaria, devido às suas propriedades, tem encontrado uma grande diversidade de aplicações, tanto na reciclagem ou em processos siderúrgicos dentro da própria usina

¹ Disponível no endereço digital <https://institutoacobrasil.net.br/site/parque-siderurgico/>
Acesso em 08/10/2019

em que é produzida, quanto em várias outras utilizações, como na indústria cimenteira, na pavimentação de estradas, como lastro ferroviário, na indústria de fertilizantes e corretivos agrícolas, entre outras.

Dentro deste quadro, o propósito deste trabalho é analisar a viabilidade do uso da escória de aciaria, atuando como substituto direto de corretivos de solo e fertilizantes, para aplicações agrícolas em solos da Região de Ouro Preto e, de modo geral, na recuperação de terras ácidas e melhoria da qualidade de solos pobres em nutrientes para as plantas.

De fato, a acidez de grande parte de seus solos é um dos principais fatores para a baixa produtividade da maioria dos cultivos no Brasil (SILVA *et al.*, 2016). Esta acidez ainda pode ser agravada pela aplicação frequente de fertilizantes nitrogenados, que favorecem o aumento da acidez do solo acarretando uma diminuição da disponibilidade dos nutrientes essenciais às plantas, tornando assim necessária a utilização de implementos para a correção do solo. Para tanto, uma das substâncias mais utilizadas é o calcário natural, devido a sua abundância e seu relativo baixo custo. Entretanto, muitos trabalhos de pesquisa realizados sobre o uso agrícola da escória de aciaria como corretor de solos, apontam bons e promissores resultados não só na correção da acidez, mas também na melhoria geral dos atributos químicos do solo que são importantes para o desenvolvimento das plantas. Isto acontece devido à rica composição química das escórias, que além de melhorarem o pH dos solos aportam nutrientes e micronutrientes fundamentais para o desenvolvimento das culturas.

Efetivamente, a motivação para este trabalho decorre da conjunção de três fatores: primeiro, uma disponibilidade de escória de aciaria a baixo custo devido à proximidade de Ouro Preto a usinas siderúrgicas; segundo, um visível aumento nos últimos anos da atividade agrícola no Município, particularmente no que se refere à agricultura familiar, de subsistência e às hortas e plantações comunitárias; o terceiro fator diz respeito ao solo predominante na região de Ouro Preto que é um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico 1, portanto um solo de baixa fertilidade que pode, e portanto deve, ser melhorado em suas qualidades agrícolas.

A espécie vegetal escolhida para avaliar a eficiência do uso da escória foi o milho (*Zea Mays*), que é uma das culturas mais frequentes na região, além de ser uma planta cujo desenvolvimento é muito bem conhecido. Basicamente, o experimento foi realizado semeando-se o milho em vasos contendo amostras de solo coletado na região com diferentes teores de escória básica de aciaria LD. O tempo de germinação e o

desenvolvimento inicial das plantas foram acompanhados e comparados com aqueles das plantas semeadas em solo livre de escória.

A natureza deste trabalho e o fato dele ter sido realizado em apenas um semestre implicam que ele tem um caráter fundamentalmente exploratório, e pretende apenas obter dados e orientações para a realização em uma segunda etapa de pesquisa, em escalas de tempo e espaço típicas do plantio agrícola, acompanhando todo o desenvolvimento das plantas, quantificando e analisando a qualidade da produção das culturas. De modo geral, a duração de experimentos que avaliam o uso em culturas agrícolas de resíduos siderúrgicos é no mínimo igual ao tempo do ciclo de vida total das plantas estudadas, já que podem haver efeitos a longo prazo do uso contínuo dos resíduos, nas plantas e nos solos, que também devem ser estudados. Entretanto, todas estas pesquisas de longo prazo devem ser precedidas de análises exploratórias que forneçam as orientações necessárias para que se possa projetar os trabalhos em escala agrícola.

Este trabalho, portanto, se insere no esforço de tornar a atividade siderúrgica cada vez mais sustentável, diminuindo seus impactos ambientais e ao mesmo tempo promovendo melhoria e desenvolvimento social.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade do uso de escória básica de aciaria na fertilização e melhoria dos atributos agrícolas dos solos da região de Ouro Preto.

2.2 Objetivos Específicos

- 1) Coletar solo da região e caracterizar sua composição química, pH e granulometria.
- 2) Obter escórias básicas de aciaria produzidas nas vizinhanças de Ouro Preto e fazer a caracterização física e química das mesmas.
- 3) Estudar experimentalmente, em escala de laboratório, o efeito de diferentes adições da escória de aciaria no plantio do milho (*Zea Mays*) em solo da região de Ouro Preto.
- 4) Avaliar nos experimentos controlados de plantio, o tempo de germinação, a taxa de crescimento e o ganho de massa de sementes de milho plantadas em solo da região com diferentes teores de escória, comparando-os com os de sementes plantadas no mesmo solo sem escória.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Produção do Aço e das Escórias de Aciaria

3.1.1 Etapas Iniciais da Produção do Aço

O processo siderúrgico de produção do aço inicia-se efetivamente a partir da mineração, onde são extraídas as matérias-primas principais, tais como os minérios de ferro, o calcário, a dolomita e o carvão mineral.

Estas matérias-primas já recebem algum grau de beneficiamento nas próprias minas onde são lavradas, e em seguida elas são transportadas até as usinas siderúrgicas, onde ocorrem novas fases de beneficiamento e preparação para a importante etapa da redução dos óxidos de ferro contidos no minério, que ocorre, quase sempre, em um alto-forno. Essas etapas iniciais de preparação dos insumos, antes da redução nos altos-fornos, incluem por exemplo a coqueificação do carvão mineral e a preparação, a sinterização ou a pelletização das misturas adequadas das matérias-primas.

No alto-forno, sob ação do calor, do carbono e do oxigênio, os óxidos de ferro são reduzidos, gerando o ferro metálico líquido no cadinho do forno. Esse banho de ferro líquido se separa, por diferença de densidade, da escória que é gerada no processo de redução e que tem o objetivo de diminuir o teor de impurezas, como o Fósforo (P), o Manganês (Mn), o Enxofre (S) e o Silício (Si), entre outras, retirando-as parcialmente da massa metálica sob a forma de óxidos de densidades bem menores que a do metal líquido.

Outras impurezas, particularmente o carbono, são eliminadas também na forma de gases, e o produto final do alto-forno é o ferro-gusa líquido que, carregado nos carros-torpedo, é levado à aciaria da usina para a produção do aço. Um fluxograma resumido do processo é mostrado na Figura 3.1.

Nos carros-torpedo ocorre também uma dessulfuração do ferro-gusa, que é feita injetando-se no meio metálico gases inertes e agentes dessulfurantes de alta reatividade, compostos basicamente de óxido de cálcio, carbureto de cálcio, magnésio metálico e outros elementos que reagem com o enxofre contido no gusa líquido, transformando-o em sulfeto e convertendo-o em escória.

As escórias geradas na operação dos altos-fornos, já que oriundas da redução dos minérios, contêm grande quantidade de sílica (SiO_2), comparativamente às escórias geradas na aciaria, na produção propriamente dita do aço. O teor elevado de sílica caracteriza as escórias de alto forno como ácidas relativamente às escórias de aciaria, que

tem baixo teor de sílica e altos teores de CaO e MgO. Assim, as escórias de alto forno, embora sendo a matéria-prima para a indústria do cimento, são menos importantes que as escórias de aciaria no que toca ao uso agrícola, para a calagem e correção de solos ácidos e pobres em nutrientes para as plantas. Portanto, este trabalho e esta revisão bibliográfica terão como foco apenas as escórias de aciaria.

Após a produção do ferro-gusa, a etapa seguinte de produção do aço é chamada de ‘refino’, e consiste no refinamento e ajuste da composição química do ferro-gusa, de modo a transformá-lo no aço pretendido. O ferro-gusa, para se evitar perda de calor, é logo transportado para as unidades da aciaria, às quais de modo geral se adiciona também sucata de aço reciclado. Atualmente, esta etapa da produção propriamente dita do aço pode ocorrer por duas vias principais, a que utiliza os Fornos a Arco Elétrico e a que utiliza os Convertedores a Oxigênio LD (*Linz-Donawitz*) também conhecido por BOF (*Basic Oxygen Furnace*). Uma revisão sumária destes dois processos é feita a seguir.

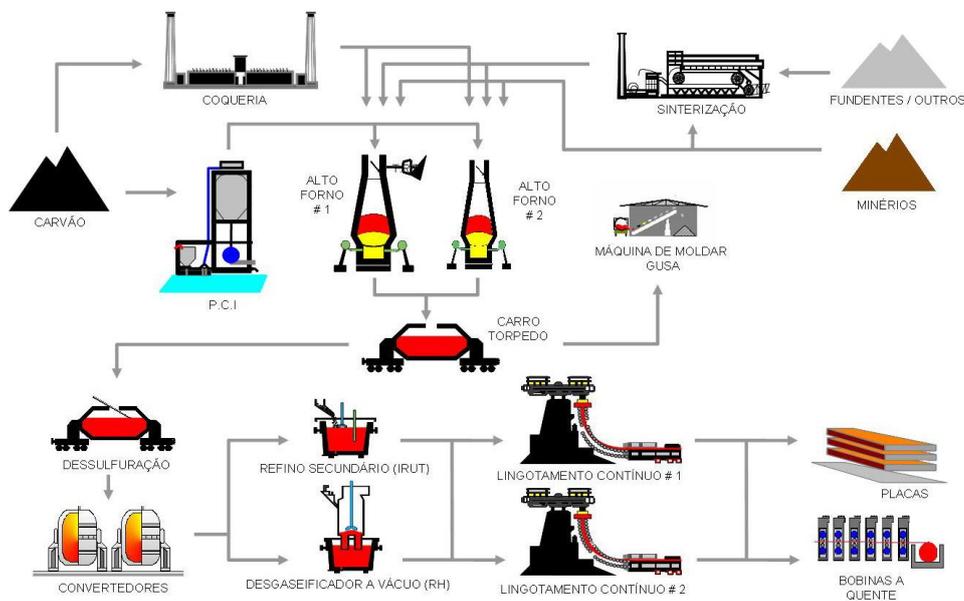


Figura 3.1. Fluxograma da produção de aço em uma usina integrada. Fonte: (CST, 2006. apud SOUZA, 2007).

3.1.2 Processo FEA

A produção de aço por Forno de Arco Elétrico (FEA), ou *Electric Arc Furnance (EAF)*, de maneira simplificada, baseia-se na fusão de sucata de aço em um forno a arco elétrico cuja temperatura é suficientemente elevada. Os eletrodos destes fornos são feitos de grafite ou carvão amorfo e após a fusão injeta-se oxigênio.

O processo EAF é comum em usinas semi-integradas, que usam diretamente a sucata de aço para, basicamente, reciclá-la. É um processo que permite um acurado controle da temperatura do banho metálico, obtido através do controle da altura dos eletrodos. De modo geral, três eletrodos são presos a braços que se estendem sobre o teto do forno e aparafusados a um mastro móvel verticalmente localizado ao lado do forno. O mastro controla a distância entre cada ponta de eletrodo e a sucata ou leito de fusão, regulando assim o comprimento do arco, o fluxo de corrente e, portanto, a temperatura.

A fonte de alimentação - normalmente transformadores, disjuntores a vácuo, um comutador para controle de tensão dos eletrodos - é instalada em um cofre de concreto a uma curta distância do forno. Há um sistema de refrigeração a água e barramentos de potência conectam o transformador do forno aos eletrodos.

Uma representação esquemática de um Forno Elétrico a Arco é mostrada na Figura 3.2.

Na operação, uma ponte rolante carrega o forno com sucata a partir de um vaso cilíndrico que é aberto na parte superior para o seu carregamento e equipado com um fundo removível para o descarregamento rápido. As caçambas de sucata são assim carregadas de maneira a garantir um melhor empacotamento da carga quando esta cai dentro do forno, permitindo obter uma boa condutividade elétrica na carga, baixo risco de quebra do eletrodo e boa proteção da parede do forno durante o derretimento. Às vezes, carbono e formadores de escória são adicionados à carga para evitar a superoxidação do aço e acelerar a formação de escória.

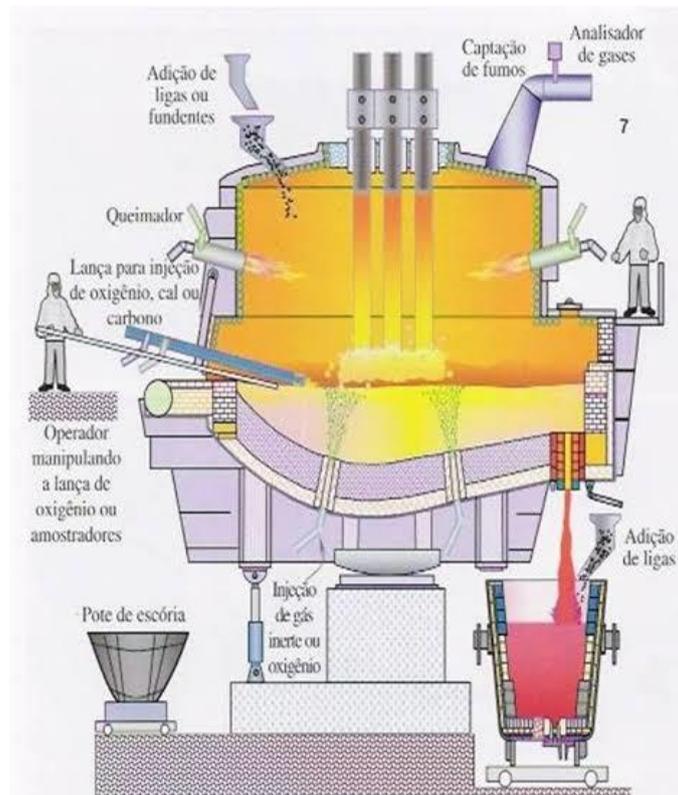


Figura 3.2. Representação esquemática de um Forno Elétrico a Arco².

Depois de carregar uma caçamba, o teto é movido de volta para o forno e os eletrodos são baixados. O derretimento começa com uma configuração de baixa energia com a fusão da sucata leve na parte superior da carga, protegendo as paredes laterais do superaquecimento. Deixando alguns resíduos de sucata não derretidos próximos às paredes do forno para mantê-las ainda protegidas, uma segunda caçamba de sucata é carregada, e o mesmo procedimento de fusão é seguido. Às vezes, quando se funde sucata muito leve exige-se o carregamento de uma terceira ou mesmo quarta caçamba de sucata.

Depois de carregar uma caçamba, o teto é movido de volta para o forno e os eletrodos são baixados. O derretimento começa com uma configuração de baixa energia com a fusão da sucata leve na parte superior da carga, protegendo as paredes laterais do superaquecimento. Deixando alguns resíduos de sucata não derretidos próximos às paredes do forno para mantê-las ainda protegidas, uma segunda caçamba de sucata é carregada, e o mesmo procedimento de fusão é seguido. Às vezes, quando se funde sucata muito leve exige-se o carregamento de uma terceira ou mesmo quarta caçamba de sucata.

² Disponível no endereço digital: <http://aciarianews.blogspot.com/2012/12/forno-eletrico-arco-fea.html>. Acesso em 10/08/2019.

Após a fusão completa, o nível de carbono no aço ainda é cerca de 0,25% acima do nível final de vazamento, o que evita a superoxidação do banho metálico. Uma escória básica se forma, consistindo tipicamente de 55% de cal, 15% de sílica e 15 a 20% de óxido de ferro. A formação de uma espuma estável de escória geralmente é induzida pela injeção de carbono ou uma mistura de cal e carbono, que reage com o óxido de ferro na escória produzindo monóxido de carbono. Essa espuma protege as paredes laterais do forno, permitindo a utilização de potências mais altas. Conforme necessário, o teor de carbono do aço é diminuído por sopro de oxigênio ou aumentado por injeção de carbono.

Amostras são coletadas, a temperatura é verificada, as adições são feitas e, quando todas as condições forem adequadas, o forno é basculado girando-o para a frente, para que o aço vaze através da bica de corrida, ou através de um orifício vertical.

Segundo informações da 4ª Conferência de Sucatas de Aço, Tarugo e DRI³, recepcionado pela SteelMint em agosto de 2019, à medida em que o acúmulo de sucata aumenta, o processo de produção de aço utilizando fornos elétricos se torna globalmente cada vez mais importante.

Na China, o maior produtor mundial de aço e que responde por mais da metade da produção global, estima-se que a utilização do processo EAF terá um crescimento a taxa constante e deverá ser responsável por algo entre 30% e 45% da produção total da China em 2050 (ZHANG et al., 2016).

3.1.3 Processo LD ou BOF

O Processo LD, executado pelo Convertedor a Oxigênio LD (onde L e D são as iniciais das cidades austríacas *Linz* e *Donawitz*), também conhecido por BOF (*Basic Oxygen Furnace*), é uma tecnologia de meados do século passado que representa uma evolução do Convertedor Bessemer. No hemisfério sul, a primeira instalação foi inaugurada em 1957 na Cia. Siderúrgica Belgo-Mineira. (ARAÚJO, 1997).

De uma maneira simplificada, o ciclo de operações de refino no Convertedor LD pode ser dividido em seis etapas:

- 1) Carregamento de carga sólida,
- 2) Carregamento do gusa líquido,
- 3) Sopro,

³ Notícia sobre o resumo da 4ª Conferência de Sucatas de Aço, Tarugo e DRI. Disponível no endereço digital: <https://www.recyclingtodayglobal.com/article/steelmint-scrap-eaf-steelmaking-2019/>. Acesso em 14/11/2019.

- 4) Medição de temperatura e retirada de amostras,
- 5) Vazamento,
- 6) Vazamento de escória.

Quanto à carga sólida, é vantajoso uma proporção alta de sucata, uma vez que seu teor em ferro é superior ao do gusa; é usado sucata de retorno da própria usina e também sucata comprada. De modo geral, a proporção de gusa líquido na carga do convertedor depende da sua composição e temperatura (conteúdo térmico), da qualidade do aço a ser produzido, do volume das adições de cal, minério e carepa, e em parte das dimensões do convertedor; normalmente ela varia entre 70 e 90% de gusa líquido.

Para o sopro, é utilizado oxigênio de alta pureza que é insuflado a velocidades supersônicas através de uma lança refratária, para realizar o refino do gusa líquido, reduzindo os teores de carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre, através da oxidação desses elementos. A queima, ou oxidação, dessas impurezas ocasiona uma elevação da temperatura. Os fundentes e os fluxantes (CaO , CaO.MgO e CaF_2) são adicionados para a formação da escória, responsável pela remoção das impurezas oxidadas presentes na massa líquida. A adição da cal no convertedor LD é necessária para a escorificação da sílica formada pela oxidação do silício contido na carga metálica e para a remoção do fósforo e enxofre. Além disso, uma quantidade de CaO suficiente deve ser mantida na escória para diminuir o ataque aos refratários. A cal utilizada no processo deve ser de alta reatividade. A fluorita, CaF_2 , fundente da cal, é adicionada para aumentar a fluidez de escórias muito viscosas. Outros fundentes, como os aluminatos (especialmente bauxita) e boratos, são também às vezes utilizados.

O processo LD é altamente oxidante e, portanto, o aço a ser vazado precisa ser desoxidado. Isto é feito durante o próprio vazamento do aço líquido para a panela de aço, normalmente por meio de adições de Alumínio e/ou Silício, que são jogados diretamente no jato de aço através de calhas direcionais. Durante o vazamento são adicionados ainda os ferro-ligas que irão conferir ao aço certas características desejadas. Esse material na granulometria adequada, é jogado através da mesma calha direcional mencionada acima. O tempo de vazamento deve estar dentro de uma faixa adequada, para minimizar a passagem de escória para panela, evitar uma oxidação excessiva do metal pelo ar, bem como perdas elevadas de temperatura, de modo a permitir uma produtividade adequada.

Podem ser citadas como principais vantagens do processo LD a rapidez na transformação do gusa líquido em aço e o reaproveitamento da sucata de recirculação interna.

Uma representação simplificada do fluxo de produção em uma aciaria LD é mostrada na Figura 3.3.

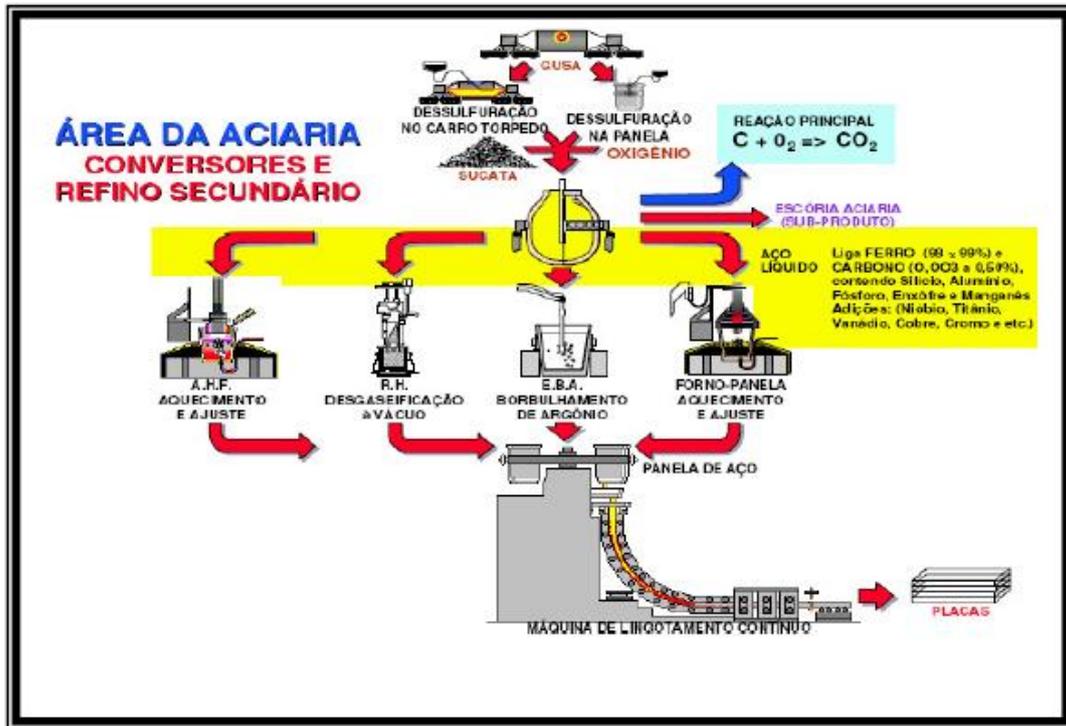


Figura 3.3. Fluxograma de produção em uma aciaria LD. Fonte: (LENZ e SILVA, 2004 apud SOUZA, 2007).

A última etapa da operação é o vazamento da escória no pote de escória, que é transportado a um local adequado onde a escória é basculada e, posteriormente, resfriada por jatos de água ou ar. O resfriamento acelerado é necessário para a fragmentação por choque térmico, diminuindo o tamanho inicial dos blocos. Esse material é então britado e submetido a uma separação magnética possibilitando seu posterior reaproveitamento no próprio Convertedor.

Como também pode ser visto no fluxograma da Figura 3.3, após o refino primário no Convertedor LD, ocorrem ainda algumas etapas antes da solidificação que ocorre no lingotamento; no caso das usinas integradas o tipo de lingotamento é o contínuo, que é muito mais produtivo que o convencional. Essas etapas entre o refino primário no Convertedor LD e o lingotamento são chamadas de Metalurgia Secundária e correspondem a uma degaseificação e um refino secundário em Forno Panela. Dependendo das especificações dos aços a serem produzidos, embora chamadas de secundárias, essas etapas são imprescindíveis na configuração das usinas modernas.

A degaseificação é feita a vácuo, de modo geral pelo processo RH (Ruhrstahl Heraeus) que é um processo de recirculação a vácuo realizado em um vaso revestido com

refratário, equipado com dois snorkels que são imersos no banho de aço, onde ocorrem uma descarbonetação suplementar, a desgaseificação e outras reações. Durante o refino secundário feito no Forno Panela são feitos ajustes finais da composição química e da temperatura de vazamento. O refino secundário gera uma escória particular, a escória de forno panela, com alto teor de CaO e MgO.

Conforme o Anuário Estatístico do IBS – Instituto Brasileiro de Siderurgia 2018, a produção brasileira de aço bruto atingiu o valor de $29,2 \times 10^6$ t no acumulado até outubro de 2018. Considerando que cerca de 80% desse total é produzido usando o processo LD (FREITAS, 2018; SOUZA, 2007), e um índice médio de geração de escória nas usinas que utilizam esse processo da ordem de 113 kg/t de aço líquido produzido, (VANCINI, 2005), pode-se estimar uma produção de escória de aciaria da ordem de $3,2 \times 10^6$ t só naquele ano.

3.2 Propriedades e Características das Escórias de Aciaria

A escória siderúrgica foi por muitos anos classificada como um resíduo sólido da produção do aço. Há algum tempo, entretanto, passou-se a adotar uma classificação da escória como um coproduto da siderurgia ou um agregado siderúrgico. Particularmente devido ao atrativo gerado pela enorme quantidade produzida desse material e à necessidade de encontrar utilizações adequadas que evitem o seu acúmulo em pátios de estocagem e os desgastes patrimoniais e ambientais daí decorrentes.

Com efeito, a quantidade específica de escória gerada na fabricação do aço está na faixa de 100kg a 150kg por tonelada de aço produzido, às vezes mais do que isto, dependendo das matérias-primas utilizadas e do processo de produção empregado (ABM, 2008, apud FREITAS, 2018). Segundo dados recentes da Worldsteel Association, a produção mundial no ano de 2018 foi de cerca de 1.700×10^6 t de aço bruto; levando-se em conta que cerca de 71% desse aço é produzido pelo processo LD/BOF, pode-se estimar que a produção mundial de escória de aciaria LD é atualmente, no mínimo, da ordem de 150×10^6 t anuais, o que é praticamente equivalente à produção total de aço bruto no ano de 1950, pouco antes do Processo LD/BOF começar a ser utilizado industrialmente.

A composição química é uma das características mais relevantes das escórias, particularmente no contexto deste trabalho, e de modo geral ela consiste basicamente de CaO, SiO₂, MgO, Al₂O₃, óxidos de ferro e produtos de reações de oxidação de elementos

como C, P, Mn e Cr entre outros. Devido à temperatura em que são geradas, nenhum composto orgânico está originalmente presente. A Tabela 3.1 apresenta um quadro comparativo das faixas composicionais típicas das escórias de alto-forno, aciaria LD e aciaria FEA.

A principal diferença entre a escória de alto-forno e a escória de aciaria, como já foi citado, está nas diferentes composições químicas das mesmas, o que se reflete nos seus diferentes índices de basicidade. O índice de basicidade da escória é utilizado como um parâmetro de controle de suas características, devido à sua facilidade de determinação e ao seu poder informativo. A basicidade da escória é definida de modo geral como a porcentagem mássica de óxidos básicos em relação a óxidos ácidos presentes na escória; segundo a definição de ácido/base de G. N. Lewis. Essa definição geral de basicidade pode levar a várias expressões, e a formulação mais simples para o índice de basicidade (BI), também conhecida como Razão V ou Basicidade Binária, é a relação mássica (FERRARO, 2014):

$$BI = \frac{W_{CaO}}{W_{SiO_2}}$$

Composição	Escória (% Massica)		
	AF	EAF	LD
CaO	42	32-46	6-45
SiO ₂	34	11-25	7-16
MgO	6	4-10	1-9
Al ₂ O ₃	14	4-8	1-4
FeO	0,35	-	8-30
MnO	-	4-7	3-7
TiO ₂	0,5	-	-
Fe ₂ O ₃	-	18-31	-
CaO Livre	-	-	0-8
P ₂ O ₅	-	0,6-1,4	1,6
S	-	0,1-0,2	0,13
Cr ₂ O ₃	-	-	0,35
BI = CaO/SiO ₂	1,23	1,84-2,91	0,86-2,8

Tabela 3.1. Composições Típicas das Escórias. Fonte: (FERRARO, 2014).

Em muitos casos são também incorporadas as influências de compostos como MgO, P₂O₅, Al₂O₃, entre outros (FERRARO, 2014):

$$BI = \frac{W_{CaO}}{W_{SiO_2} + W_{Al_2O_3}} \quad BI = \frac{W_{CaO} + 1,4W_{MgO}}{W_{SiO_2} + 0,6W_{Al_2O_3}} \quad BI = \frac{W_{CaO} + 1,4W_{MgO}}{W_{SiO_2} + 0,84W_{P_2O_5}}$$

No que concerne ao uso das escórias siderúrgicas como implementos agrícolas para a calagem e a correção do pH de solos ácidos, o índice de basicidade é evidentemente um dos parâmetros mais importantes pois ele está diretamente relacionado com a quantidade de cal presente na escória. A partir da Tabela 3.1 se conclui então que a escória de aciaria é muito mais atrativa para o uso na agricultura do que a escória de alto-forno.

Do mesmo modo que a composição química, a composição mineralógica das escórias depende de vários fatores. De modo geral, as principais fases minerais presentes nas escórias de aciaria são: dissilicato de cálcio, diferrita de cálcio, wustita (FeO), cal livre (CaO), periclásio (MgO), dentre outras espécies mostradas na Tabela 3.2 (RAPOSO, 2005).

Das Tabelas 3.1 e 3.2 conclui-se que a escória de alto-forno não contém nenhum óxido livre, como CaO, MgO e FeO, mas todos eles estão presentes nas escórias de aciaria LD. E é exatamente a presença desses óxidos livres que causa a instabilidade volumétrica das escórias de aciaria, caracterizada por uma grande expansão do volume da escória em condições de hidratação e confinamento (POLISSENI, 2005; ARRIVABENE, 2012). São as propriedades eletroquímicas dos óxidos livres e suas altas energias de superfície que os fazem fortes adsorvedores de água, e quando sofrem hidratação ocorrem reações que causam uma grande expansão volumétrica da escória, além de provocar mudanças nas formas alotrópicas de outros componentes e oxidação de frações metálicas presentes na escória (POLISSENI, 2005). Tais considerações justificam grandes esforços para se entender como a composição química, as fases presentes e os fatores estruturais formados durante o resfriamento das escórias influenciam nas suas propriedades.

Fase Mineral	Fórmula
Bredigita	$\alpha\text{-CaO}\cdot\text{SiO}_2$
Brown millerita	$4\cdot\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$
Diopsita	$\text{Ca Mg}(\text{SiO}_3)_2$
Ferrita dicálcico	$2\cdot\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$
Geledita	$\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$
Mervinita	$\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$
Óxido de alumínio e magnésio	$\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$
Óxido de cálcio	CaO
Periclásio	MgO
Silicato de Magnésio	$\beta\text{-}2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$
Silicato dicálcico – lamita	$\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$
Silicato tricálcico	$3\cdot\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$
Wustita	FeO

Tabela 3.2. Composições Mineralógica das escórias de aciaria. Fonte: (RAPOSO, 2005).

Entretanto, se a instabilidade volumétrica causada pelos óxidos livres constitui o grande obstáculo para o aproveitamento das escórias de aciaria na construção civil, como lastro de ferrovias e na pavimentação de estradas; só podendo ser utilizadas para esses fins depois de estabilizadas, é exatamente a presença desses óxidos livres que, segundo estudos recentes, torna a escória de aciaria LD mais atraente ainda para o uso na agricultura, já que esses óxidos parecem ter um importante papel na fixação do K no solo, o que é essencial para o desenvolvimento das plantas (DEUS *et al*, 2018). Portanto, essa revisão bibliográfica mostra que as características das escórias de aciaria LD que as tornam inapropriadas para o uso direto na engenharia civil, são exatamente aquelas que as tornam atraentes para o uso na agricultura.

Quanto à escória de alto-forno, exatamente por não apresentar óxidos livres em sua composição, é atualmente consumida em larga escala, como matéria-prima, na indústria cimenteira. Além de permitirem uma emissão de CO₂ 50% menor na produção do cimento, o concreto feito com o cimento de escória de alto-forno apresenta uma alta resistência à difusão de cloretos e álcalis, que estão sempre associados à corrosividade do concreto e à sua expansibilidade.

Já as escórias de aciaria, apesar da sua aplicação em pavimentações e lastros de ferrovias depois de beneficiadas e estabilizadas, de acordo com o IBS – Instituto Brasileiro de Siderurgia, ainda se mantem estocado cerca de 56% da escória produzida (CHOTOLI,

2006), sendo, portanto, altamente necessário encontrar novas utilizações para esse tipo de escória.

Quanto à escória de forno panela, gerada por refino redutor e que também pode ter grande importância como insumo agrícola, embora não será estudada neste trabalho, apenas para constar, é mostrado na Tabela 3.3 um quadro comparativo de sua composição química típica com aquelas das escórias de refino oxidante.

Parâmetros	FEA (%)	FP (%)	LD (%)*
CaO	30-35	45-55	6-45
SiO₂	15-20	20-25	7-16
MgO	8-12	8-12	1-9
Al₂O₃	3-9	3-9	1-4
FeO	25-35	0,5-3,5	8-30
MnO	3-6	0,5-3,5	3-7
CaO livre	-	-	0-8
P₂O₅	-	-	1,6
S	-	-	0,13
Cr₂O₃	-	-	0,35
i=CaO/SiO₂	1,75-2,00	2,2-2,25	0,86-2,8

Tabela 3.3. Quadro comparativo das faixas de composição química das escórias de aciaria geradas por refino oxidante (FEA e LD) e refino redutor (FP). Fonte: (GUMIERE, 2000 apud GEYER, 2001).

É claro que, do ponto de vista metalúrgico, as escórias de aciaria desempenham funções fundamentais cuja eficiência está diretamente ligada à qualidade final do aço produzido. Propriedades das escórias como viscosidade, basicidade óptica, densidade, tensão superficial e interfacial, condutividade térmica, condutividade elétrica, temperatura entre outras, estão ligadas diretamente com as suas funções metalúrgicas, e do papel da escória depende a qualidade do aço. Entretanto, no contexto desse trabalho, estas propriedades metalúrgicas das escórias de aciaria são subsidiárias. E mesmo que as operações de beneficiamento das escórias também dependam dessas propriedades, no caso em questão do aproveitamento agrícola desse material, as propriedades físicas das escórias que são mais relevantes se referem à grau de umidade, granulometria, massa aparente, absorção, porosidade aparente entre outras. Para a avaliação de todas estas características físicas das escórias existem ensaios padronizados, por exemplo, umidade, massa

específica aparente, densidade, porosidade, análise granulométrica e superfície específica (FREITAS, 2018).

A característica física mais importante da escória para o seu uso como material de calagem agrícola é a distribuição de tamanho das partículas. Quanto mais fina a partícula, mais reativo o material será na neutralização da acidez do solo. (NATIONAL SLAG ASSOCIATION, 2011).

Quanto aos aspectos macroscópicos das escórias de aciaria LD e aciaria FEA, mostrados na Figura 3.4, verifica-se a que a escória do primeiro tipo apresenta coloração mais clara e seus grãos são todos “lisos”, enquanto a escória FEA, além da coloração mais escura seus grãos são “porosos” e “lisos”.



Figura 3.4. Amostras de escórias de LD e FEA. Fonte: (FREITAS, 2007).

Além de todas as características e propriedades já mencionadas das escórias de aciaria LD, o tratamento dado a este coproduto logo após a sua produção e a duração do tempo de estocagem também podem influenciar suas propriedades de interesse agrônomo. E como foi visto na seção anterior, após a última etapa da operação do Convertedor LD, que corresponde ao vazamento da escória no pote de escória, a mesma é resfriada por jatos d'água suficientes para causar fraturas por choque térmico na massa inicial. É claro que a taxa com que é feito esse resfriamento vai influenciar enormemente a mineralogia da massa hidratada. A seguir, a Tabela 3.4 mostra algumas propriedades físico-químicas das escórias de aciaria.

Características	Valor
Densidade aparente (Kg/L)	3,2 – 3,6
Porosidade (%)	3
Abrasão Los Angeles (%)	20 – 25
Durabilidade ao Sulfato de Sódio (%)	< 12
Dureza	6 – 7
ISC (%)	> 300
Polaridade	Alcalina (pH 8 – 10)

Tabela 3.4. Características físico-químicas das escórias de aciaria. Fonte: (CASTELO BRANCO, 2004 apud BARBOSA, 2013).

Após o seu resfriamento, as etapas de beneficiamento das escórias de aciaria compreendem a britagem, o peneiramento e a separação magnética, que resultam em agregados de escória de diferentes granulometrias. Uma planta de beneficiamento de escória de aciaria LD é mostrada na Figura 3.5. Depois de beneficiada, escória de aciaria é geralmente armazenada em pilhas, assentadas em pátios de estocagem abertos. A exposição ao tempo é uma forma de promover a estabilização volumétrica dessa escória. Às vezes, com objetivo de acelerar a expansão volumétrica, promove-se a “cura” ou “envelhecimento da escória”, molhando-a por um determinado período, assegurando a hidratação dos óxidos livres. A utilização de escória LD não curada na pavimentação de rodovias, que atualmente faz a maior utilização dessas escórias, pode levar a graves problemas de rachaduras e danificação do revestimento ou capa de rolamento das estradas.



Figura 3.5. Uma típica planta de beneficiamento da escória. Fonte: (CST, 2006 apud SOUZA, 2007).

3.3 A Utilização das Escórias de Aciaria de Modo Geral e na Agricultura

Com o crescimento mundial da produção de ferro e aço, fato que tem sido um dos sustentáculos da modernização da humanidade nas últimas décadas (PEREIRA; KORNDORFER, 2000 apud HOJO, 2010), há o conseqüente aumento nas emissões, efluentes e resíduos de fabricação. E mesmo que exista, já há muitas décadas, um compromisso da indústria siderúrgica de buscar a reutilização destes rejeitos, sejam eles sólidos, líquidos ou gasosos, a quantidade gerada atualmente é tão grande, particularmente a dos resíduos sólidos, que já se constitui um dos grandes problemas das usinas manter grandes pátios de estocagem destes materiais, criando graves problemas ambientais e patrimoniais.

A indústria siderúrgica, impelida há muito tempo a encontrar soluções economicamente viáveis que possibilitem a reutilização destes resíduos, particularmente das escórias de alto-forno, aciaria LD e aciaria FEA, pode hoje caracterizá-los como coprodutos, dado o grande número de aplicações já bem estabelecidas para estes materiais.

Com efeito, no artigo de revisão relativamente recente, “*An Overview of Utilization of Steel Slag*” (YI et al., 2012), são identificados pelo menos oito usos viáveis para as escórias siderúrgicas de modo geral: escórias de alto-forno, de aciaria LD, de aciaria FEA, escórias de refino secundário, ou de forno panela e até de resíduos de fundição. Tais usos incluem algumas reutilizações dentro da própria usina e várias utilizações externas que naturalmente envolvem custos de transporte.

Dentro das próprias usinas já é economicamente viável reutilizar escórias para recuperar metal e como matéria-prima para a sinterização. Algumas empresas siderúrgicas, como a Nippon Steel Corporation e a Sumitomo Metal Industries Ltd. desenvolveram processos de refino secundário dos aços que utilizam escórias de etapas anteriores para completar a operação (YI et al., 2012).

As utilizações externas incluem a indústria do cimento, pavimentação de estradas e ferrovias, fertilizantes agrícolas, tratamento de águas residuais industriais e construções hidráulicas como estabilização de margens e leitos de rios contra erosão, diques e blocos de blindagem para proteção costeira. Até recifes artificiais já foram feitos utilizando-se escórias. (YI et al., 2012). A Figura 3.5 mostra um quadro do que acontece na Europa no que concerne às utilizações das escórias e com as respectivas quantidades empregadas;

nota-se que praticamente toda escória produzida é reutilizada, ficando apenas 5% do total em estocagem temporária.

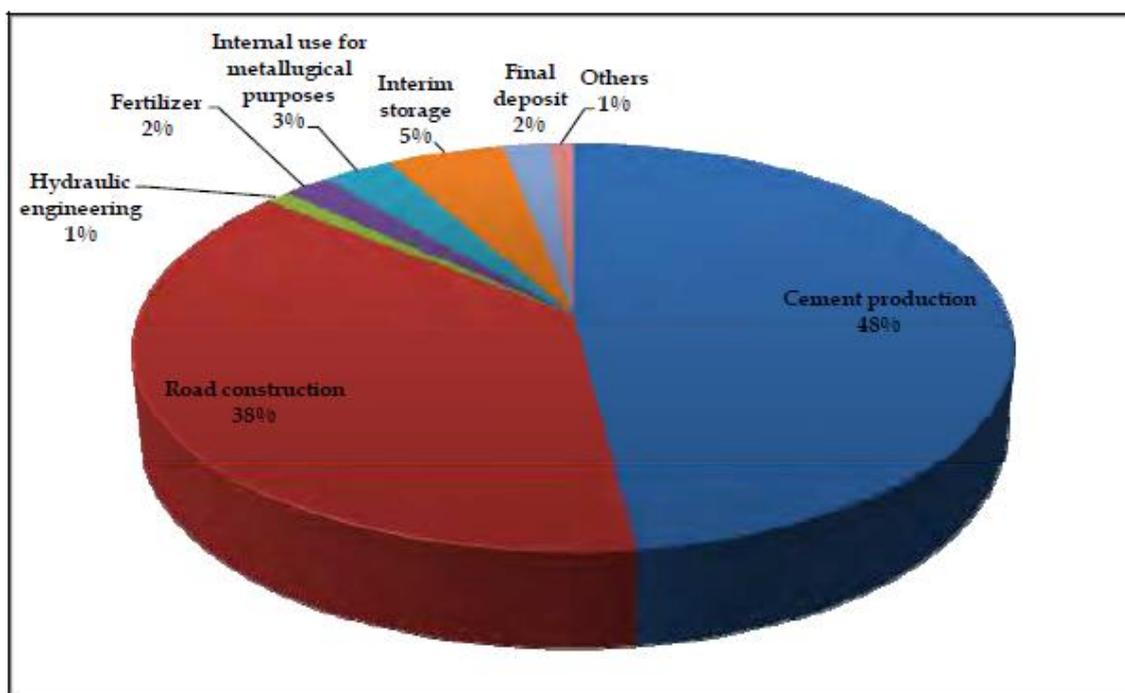


Figura 3.6. As principais utilizações dos vários tipos de escórias siderúrgicas. Fonte: (BRANCA e COLLA, 2012).

Como foi dito, os chamados países desenvolvidos, como USA, Japão, Alemanha, França, praticamente reutilizam 100% da escória que produzem, mas a China, responsável por mais da metade da produção mundial de aço, consegue reutilizar apenas 22% da escória produzida (YI et al., 2012). Não foi possível encontrar na literatura dados referentes à quantidade total de escória reaproveitada no Brasil.

No que toca especificamente ao uso das escórias de aciaria na agricultura, o artigo de revisão *“Possible Uses of Steelmaking Slag in Agriculture: An Overview* mostra”, lançada no ano de 2012, mostra que desde 1880 escórias provenientes da produção de aço pelo processo Gilchrist–Thomas (ou Bessemer-básico) já eram utilizadas como fertilizantes fosfáticos na agricultura. Nos EUA, desde 1930 já existem registros de utilização de escórias na agricultura de vários Estados e em muitas culturas como milho, trigo, trigo sarraceno, aveia e soja, dando resultados iguais ou melhores do que a utilização de quantidades equivalentes de calcários naturais (NATIONAL SLAG ASSOCIATION, 2011).

Atualmente, já estão bem estabelecidas e entendidas muitas das funções que as escórias de aciaria, particularmente de aciaria LD, podem ter no plantio agrícola quando

apropriadamente empregadas. Estas escórias são usadas como fonte de calcário para calagem e melhoria do pH de solos ácidos devido a presença de CaO e MgO; como fertilizante fosfático pela presença de P₂O₅; como estabilizadores de agregados de solos; no aporte de nutrientes como o Si, e de micronutrientes como Cu, Zn, Cd, Fe e Mn, entre outros (NATIONAL SLAG ASSOCIATION, 2011; DEUS *et al*, 2018; CHOTOLI, 2006; COLLA, 2012).

Para propósitos agrícolas, a avaliação química de um corretivo de acidez de solo é feita determinando-se o seu ‘poder de neutralização’, PN, e o seu conteúdo percentual total de CaO + MgO. O PN de um corretivo de solo é o mesmo que a porcentagem ‘equivalente de carbonato de cálcio’ (ECaCO₃) do corretivo. Os ensaios analíticos para se determinar essas características dos materiais corretivos são padronizados e divulgados pela Embrapa em seu Manual de Métodos de Análise de Solo (TEIXEIRA, 2017).

De acordo com a National Slag Association (2011, p.2), a legislação brasileira para materiais usados como corretivos de acidez de solos considera a wollastonita, uma rocha natural, como o material padrão para a calagem e a correção do pH. Para a wollastonita os valores de %ECaCO₃ e %(CaO+MgO) são, respectivamente, 60% e 30%. De acordo com esta legislação, qualquer material para ser considerado corretivo de acidez de solo deve ter no mínimo estes valores da wollastonita caracterizando sua capacidade de correção do pH.

A Tabela 3.5 mostra as composições químicas de diferentes escórias de aciaria, com seus respectivos valores de PN e %ECaCO₃, comparados à wollastonita. Pode-se observar, que as diferentes escórias, EAI (Escória de Aço Inoxidável), EA (Escória de Aciaria), EFP (Escória de Forno Panela), CCE (Carbonato de Cálcio Efetivo), W (Wollastonita), podem ser utilizadas como fontes alternativas de calcário exibindo boa performance na neutralização da acidez dos solos.

Materiais	CaO	MgO	PN	TR	CCE	Si	P ₂ O ₅	K ₂ O
	%		%ECaCO ₃		%		g kg ⁻¹	
EAI	37.65	9.55	84	71	60	13.6	3.5	0.3
EA	28.13	6.10	70	71	50	14.2	11	0.3
EFP	36.10	5.76	77	80	62	21.6	2.5	0.3
W	30.00	3.00	60	100	60	16.0	1.5	0.1

Tabela 3.5. Comparação do poder neutralizador de várias escórias de aciaria com a wollastonita. Fonte: (NATIONAL SLAG ASSOCIATION, 2011).

A Tabela 3.5 mostra também diferentes concentrações de Si e P₂O₅ em diferentes escórias. A escória de aciaria contém a maior porcentagem de P₂O₅ enquanto a escória de forno panela, ou de refino secundário, tem o maior teor de Si.

De fato, toda a literatura analisada mostra que o uso adequado das escórias de aciaria na agricultura traz benefícios aos atributos químicos do solo, como aumento do pH em solos ácidos; aumento no conteúdo de micronutrientes e de nutrientes como fósforo, cálcio e magnésio; e aumento do conteúdo do elemento benéfico silício. Todos esses aspectos contribuem para uma maior produção agrícola (NATIONAL SLAG ASSOCIATION, 2011).

Para o uso adequado das escórias, a caracterização química inicial do solo a ser tratado deve ser feita, para que se possa calcular a dose adequada de escória, seja ela usada como corretivo de pH ou como fertilizante. A aplicação da escória de modo homogêneo na área de plantio, a sua granulometria e a sua incorporação adequada no solo também são aspectos importantes a serem considerados. Evidentemente, é sempre importante conhecer a caracterização química e física da escória antes de sua aplicação no solo.

Um dos problemas para a utilização das escórias siderúrgicas na agricultura é a possível presença de metais pesados, que em níveis elevados podem se tornar tóxicos e limitar o uso destes materiais em atividades agrícolas. Como as escórias de aciaria têm composição química muito variável, devido aos diferentes processos e cargas utilizadas nos Convertedores, torna-se importante a quantificação desses metais pesados no solo e nas culturas antes e após a aplicação prolongada das escórias.

Dada a sua relevância, esta questão de uma possível contaminação por metais pesados tem recebido bastante atenção (NATIONAL SLAG ASSOCIATION, 2011; HUMARIA, 2014; BRANCA e COLLA, 2012; SOBRAL et al., 2011). Entretanto, todos

os resultados, até agora, têm mostrado que não há uma tal contaminação. Na verdade, muitas pesquisas têm mostrado que o uso da escória parece diminuir a disponibilidade de metais pesados para as plantas (BRANCA E COLLA, 2012). Isto acontece, segundo National Slag Association (2011), devido a um aumento da quimissorção dos cátions de metais pesados por partículas do solo que é causada por um aumento do pH e outras características do solo devido ao uso da escória. Por exemplo, foi constatado que, após 18 meses de incubação de escória de aciaria em um Argisol, as solubilidades do Zn, Mn, Pb, Ni, Cd e Cu diminuíram, resultado que foi explicado pelo fenômeno de quimissorção influenciada pelo pH do solo.

Alguns experimentos de longo prazo na Alemanha mostraram que a aplicação por mais de 50 anos de escória básica de aciaria como material de calagem e fertilizante não aumentou o conteúdo de Cr móvel no solo e, após o uso destas escórias, não houve aumento significativo no teor de Cr. encontrado em plantas (BRANCA E COLLA, 2012).

No Brasil, muitos estudos sobre o uso agrícola das escórias siderúrgicas têm sido feitos com vários tipos de solos e de culturas, boa parte destes trabalhos estão relatados no mesmo relatório da National Slag Association (2011), utilizado diversas vezes nesse projeto como referência, e todos eles apresentaram resultados positivos para as culturas plantadas com uso das escórias quando comparado ao uso dos calcários naturais.

No Brasil, em culturas como a da cana-de-açúcar (SOBRAL et al., 2011), a do arroz de sequeiro (BRASIL et al., 2008), a da goiabeira (HOJO, 2010), o uso das escórias promoveu melhorias nos atributos químicos do solo, reduzindo a acidez e aumentando os teores de Ca, Mg, P e Si nos solos, contribuindo para uma melhor produção em todas as culturas pesquisadas.

De acordo com Hojo, os solos da maior parte do Brasil são ácidos e caracterizados por uma baixa fertilidade, e a extração dos nutrientes pelo cultivo das plantas com o emprego de grandes quantidades de fertilizantes, principalmente os nitrogenados de aplicação frequente e ao longo dos anos, podem contribuir para a elevação da acidez, que influencia diretamente na baixa produtividade das culturas. A prática da correção atua no aumento do pH, do cálcio, do mágnesio, na neutralização do alumínio e promove o aumento da capacidade de troca de cátions efetiva e a saturação por bases. Contribuindo significativamente nos efeitos químicos dos solos, colaborando para uma maior eficiência das raízes na absorção de água e nutrientes, promovendo uma diminuição na fixação do fósforo, precipitação do alumínio, manganês, além de prover cálcio e magnésio.

Proporcionando melhorias nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (HOJO, 2010).

Enfim, o aproveitamento da escória de aciaria como insumo agrícola pode trazer benefícios em diferentes esferas, na questão ambiental, vem como alternativa na prevenção e redução de resíduos sólidos produzidos pela indústria siderúrgica, promovendo a reutilização destes subprodutos de uma maneira sustentável e benéfica a sociedade, a sua reutilização reduz a disposição da escória em aterros e acarreta uma diminuição da degradação ambiental provocada pela extração de agregados pétreos (CASTELO BRANCO, 2004).

Na esfera econômica, a escória possui um custo inferior ao do calcário natural, porém deve ser levado em consideração as distâncias médias de transporte para analisar a viabilidade econômica.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 A Metodologia Experimental

O delineamento do trabalho experimental seguiu o fluxograma abaixo. Cada uma das etapas indicadas será detalhada em seguida:

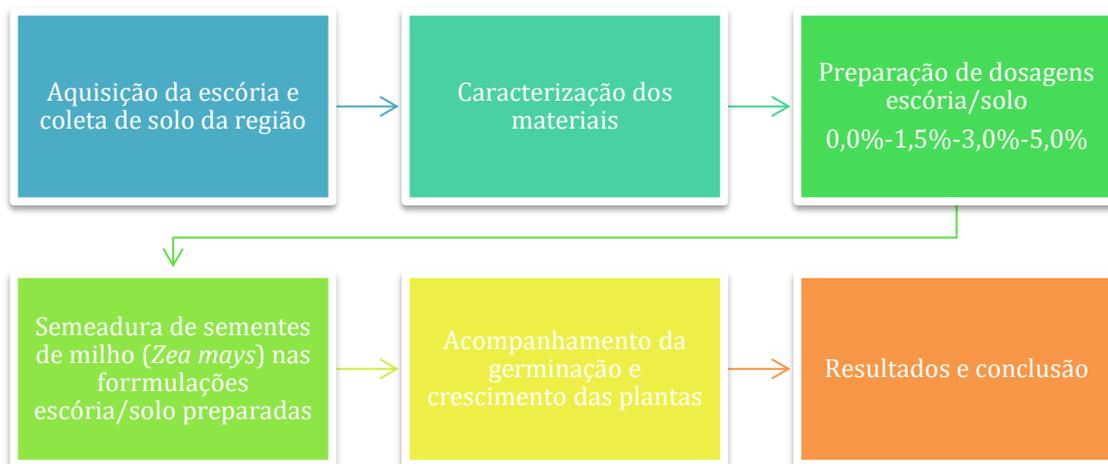


Figura 4.1. Fluxograma das etapas principais do experimento.

4.2 A Origem da Escória e a Coleta do Solo

A escória utilizada neste trabalho é originária da empresa Gerdau Açominas, localizada no município de Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil, próximo à Ouro Preto. É uma escória de aciaria gerada durante o refino de aço em convertedores LD/BOF. Na empresa, após a produção, a escória foi resfriada por aspersão de água e logo em seguida beneficiada e estocada em pátio aberto. No beneficiamento foram realizadas as etapas de britagem, separação magnética e classificação granulométrica. Na Figura 4.2 se vê uma amostra da escória utilizada.



Figura 4.2. Amostra da escória de aciaria utilizada.

O solo utilizado na pesquisa foi coletado no Campus do Morro do Cruzeiro - UFOP, no município de Ouro Preto localizado no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Foram coletados cerca de 60kg de solo da camada superficial (0-20cm). Todo o material coletado passou por peneiramento para retirada de cascalhos e material orgânico, deixando-o apto para a semeadura em porções uniformes. Uma amostra do solo coletado é apresentada na Figura 4.3.



Figura 4.3. Amostra do solo coletado após remoção de cascalhos e matéria orgânica.

4.3 Caracterização dos Materiais

4.3.1 O Solo Coletado

De acordo com o Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais, cujo detalhe relevante é mostrado na Figura 4.4, o solo da região de Ouro Preto onde foi feita a coleta é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico 1 (baixa fertilidade).

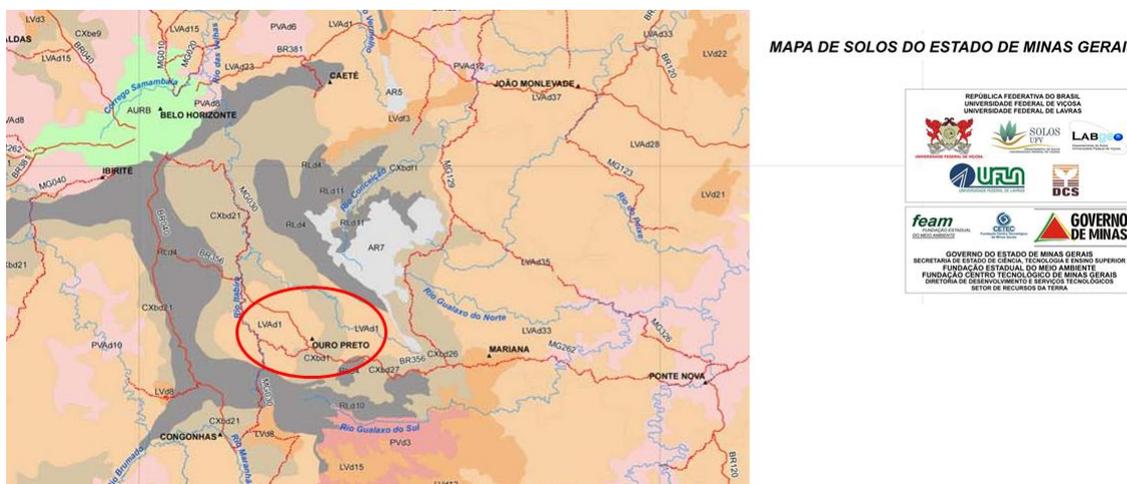


Figura 4.4. Detalhe da Folha 4 do Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais. Fonte: Governo do Estado de Minas Gerais⁴

As composições química e mineralógica do solo e da escória foram analisadas utilizando-se difração de raios-x, realizada no Nanolab REDEMAT- UFOP. Os espectros obtidos para as amostras do solo coletado são mostrados nas Figura 4.5 e 4.6.

⁴ Disponível no endereço http://www.feam.br/images/stories/arquivos/mapadosolo/mapa_solos_4.jpg
Acesso em 12/11/2019

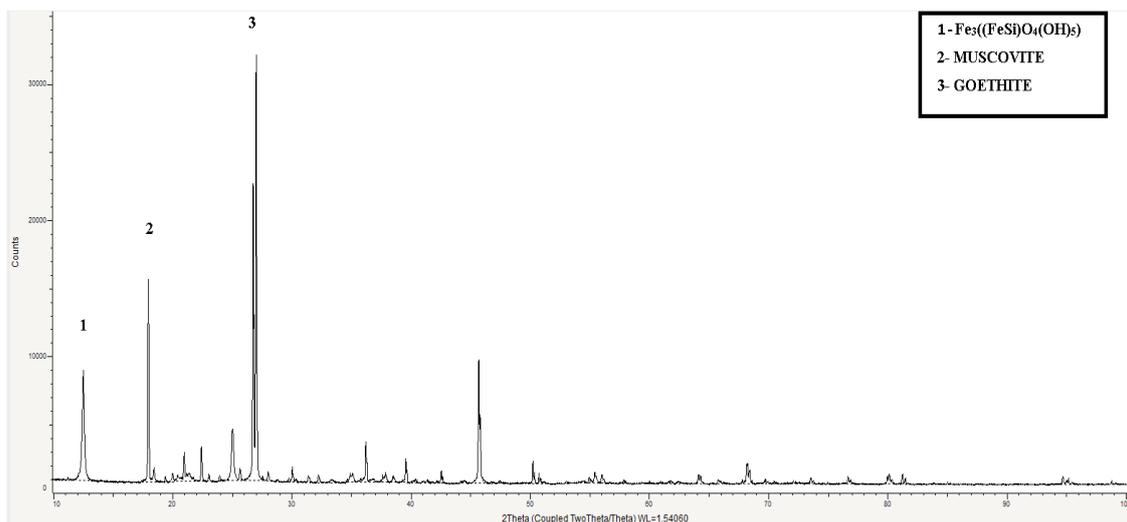


Figura 4.5. Resultado da difração de raio-x do solo.

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [$^{\circ}2\theta$]	Scale Factor	Chemical Formula
*	96-153-2513	34	Si O2	0.000	0.497	Si3.00 O6.00
*	96-900-5473	30	Muscovite	0.000	0.135	O47.88 F0.12 Si12.28 Al11.10 Ti0.08 Fe0.08 Cr0.40 Mg0.08 Ca0.02 Na1.07 K2.90
*	96-900-2159	22	Goethite	0.000	0.028	Fe4.00 H4.00 O8.00
*	96-231-0680	20	Fe3 ((Fe Si) O4 (O H)5)	0.000	0.162	Fe24.00 O54.00 Si6.00

Figura 4.6. Resultados da difração de raio-x, composição química do solo.

Estas análises do solo mostram efetivamente que se trata de um solo de pobres atributos agrícolas. É um solo ferruginoso, rico em silício e alumínio e isento de fósforo.

4.3.2 A escória de Aciaria Utilizada

A escória utilizada é a de granulometria mais fina obtida após o beneficiamento. A maior faixa granulométrica é a de finos menores que 1mm, os grãos maiores estão na faixa de 2mm a 5mm, como pode ser observado na Figura 4.2.

A composição química e mineralógica da escória é mostrada nas Figuras 4.7 e 4.8.

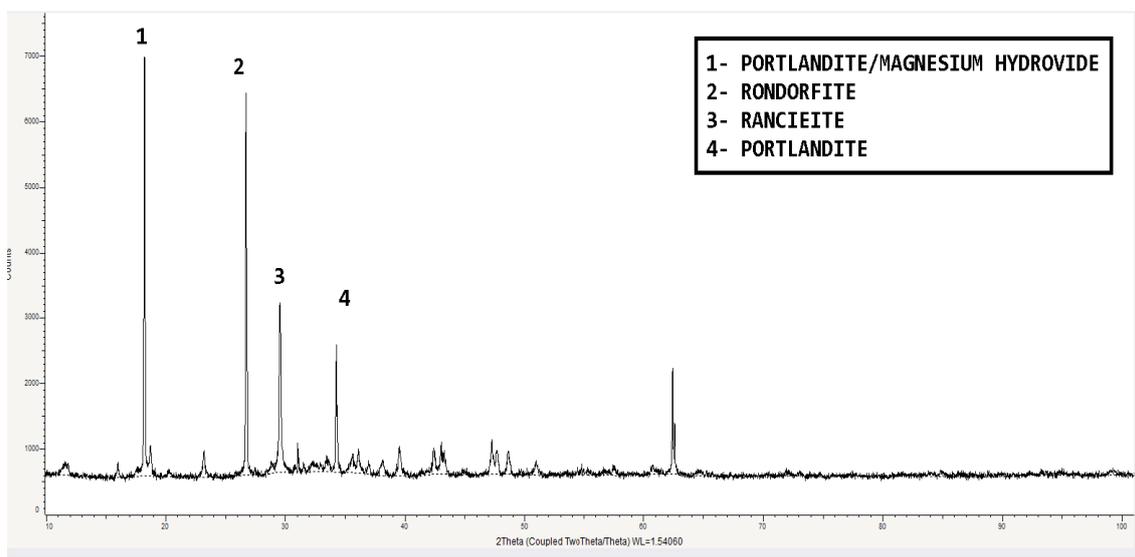


Figura 4.7. Resultado da difração de raio-x da escória.

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [$^{\circ}2\theta$.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	96-900-1298	39	Calcite	0.000	0.352	Ca5.62 Mg0.38 C6.00 O18.00
*	96-900-6805	39	Periclase	0.000	0.092	Mg4.00 O4.00
*	96-100-8781	28	Portlandite	0.000	0.092	Ca1.00 O2.00 H2.00
*	96-900-5700	22	Rancieite	0.000	0.021	Ca1.59 Mn0.17 O2.19
*	96-101-0485	29	Magnesium hydroxide	0.000	0.048	Mg1.00 O2.00 H0.00
*	96-900-5827	20	9005826	0.000	0.051	Fe16.00 Si8.00 O32.00
*	96-901-2668	18	Rondorfite	0.000	0.022	Ca64.00 Mg8.00 Si32.00 O128.00 Cl16.00

Figura 4.8. Resultados da difração de raio-x, composição química da escória.

O espectro de difração obtido para as amostras de escória apresenta picos de difração relativamente largos, bem mais largos, por exemplo, do que aqueles obtidos para amostras de solo. Este fato indica que a escória utilizada já sofreu um processo de envelhecimento, ou cura, devido à hidratação e longo tempo de estocagem. A caracterização química da escória mostra que é um material rico em cálcio e magnésio, com parte do cálcio na forma de calcita, não muito usual em escórias de aciaria. Não foi

detectada a presença de fósforo, que geralmente ocorre em pequenas quantidades em escórias deste tipo.

Para se avaliar diretamente a capacidade da escória utilizada na calagem e elevação do pH do solo, e com a impossibilidade laboratorial de fazer as medidas de pH segundo a técnica padrão, procedeu-se da seguinte maneira: primeiramente foram preparadas misturas solo/escória com porcentagens em peso de escória de 0,0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7%; onde 0,0% representa evidentemente o solo puro, sempre utilizado para efeito de comparação. Em seguida, para possibilitar uma medida do pH destas misturas solo/escória com os equipamentos disponíveis, foram preparadas três amostras de lama a partir de cada uma das misturas solo/escória. Assim, devido a possíveis inhomogeneidades nas misturas solo/escória, aplicou-se na preparação destas amostras um delineamento experimental com três repetições, e cada uma das amostras de lama foi preparada utilizando-se 140g da mistura solo/escória correspondente e completando-as com um igual volume de água deionizada. As lamas foram alocadas em recipientes de vidro fechados e em seguida homogeneizadas.

As medidas de pH das 24 amostras de lama foram realizadas em dois tempos distintos: logo após a preparação das mesmas e com um intervalo de tempo de cerca de duas semanas após essa preparação. A primeira medição ocorreu no dia 4 de novembro de 2019 e a segunda no dia 21 de novembro de 2019. Todas as medidas foram realizadas no Laboratório de Bio&Hidrometalurgia-UFOP. O pHmetro utilizado é da marca Digimed com o eletrodo, modelo DME-CV1.

Os valores obtidos na primeira medição do pH em função da porcentagem de escória das lamas são apresentados na Tabela 4.1.

pH \ %escória	0,0%	1,0%	2,0%	3,0%	4,0%	5,0%	6,0%	7,0%
Amostra 1	7,8	8,16	8,20	8,29	8,39	8,32	8,49	8,64
Amostra 2	7,89	8,17	8,15	8,30	8,19	8,40	8,71	8,67
Amostra 3	8,01	8,15	8,16	8,38	8,52	8,52	8,62	8,84

Tabela 4.1. Resultados da primeira medição do pH.

Resultados obtidos da segunda medição do pH, 17 dias após a preparação das amostras, são apresentados na tabela 4.2 a seguir.

%escória \ pH	0,0%	1,0%	2,0%	3,0%	4,0%	5,0%	6,0%	7,0%
Amostra 1	7,72	8,46	8,91	9,36	9,47	9,99	10,06	10,33
Amostra 2	7,86	8,41	8,92	9,85	9,59	9,86	10,41	10,44
Amostra 3	8,04	8,30	9,12	10,12	9,92	9,89	10,25	10,77

Tabela 4.2. Resultados da segunda medição do pH.

A Figura 4.9 faz uma comparação entre os resultados obtidos nas duas medições do pH.

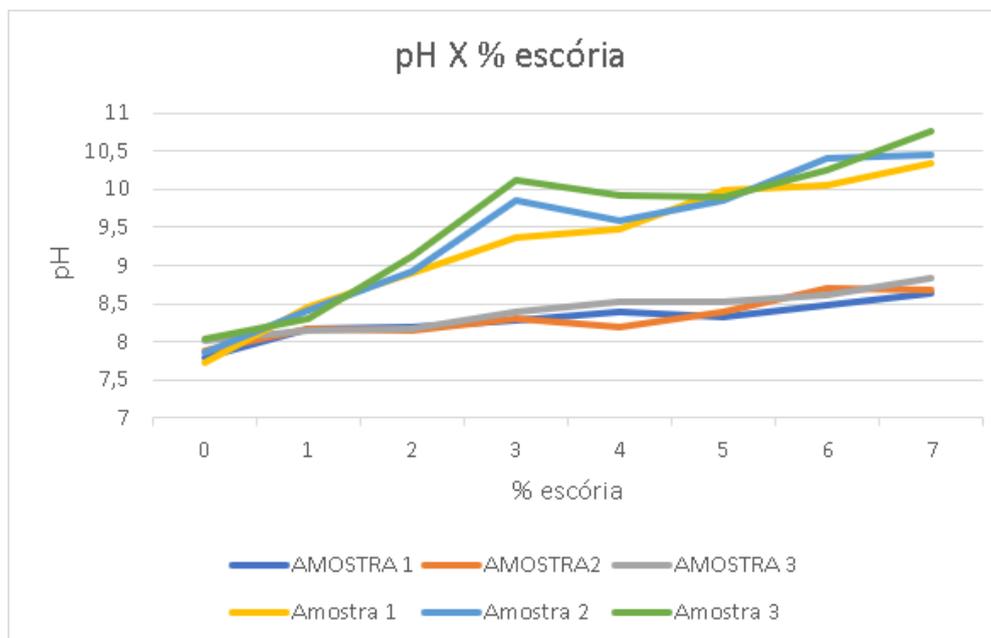


Figura 4.9. Comparação entre os valores das medições do pH.

O gráfico de linhas apresentado na figura acima mostra características importantes do efeito da escória no pH do solo. Em primeiro lugar, o valor do pH da lama composta de solo sem escória não variou no período considerado. Isto garante que todo o aumento do pH observado nas outras lamas após 17 dias de incubação, se deve exclusivamente à presença da escória. Fica também evidente que o efeito da escória no pH depende do tempo. Quanto aos valores absolutos de pH obtidos nesta análise, eles não podem ser tomados como os valores “reais” que seriam obtidos através do procedimento padrão para medidas de pH em solos, como exposto por exemplo no Manual de Métodos de Análise de Solos da Embrapa (CLAESSEN, 1997). Na verdade, solos da região de Ouro Preto com composições mineralógicas bem parecidas com a composição encontrada para o solo coletado, têm pH muito mais baixo, na faixa entre 4,0 e 4,5; como pode ser visto em (ANDRADE *et al.*,2012)

4.4 Preparação das Diferentes Dosagens Solo/Escória e Semeadura de *Zea Mays*

Para testar o efeito das adições de escória no plantio das sementes de milho (*Zea Mays*) foram preparadas misturas solo/escória com as seguintes concentrações de escória em porcentagem mássica: 0,0%; 1,5%; 3,0% e 5%. As misturas foram preparadas em quantidades suficientes para o plantio das sementes em vasos apropriados e identificados, como ilustrado na Figura 4.10.



Figura 4.10. Imagem ilustrativa do plantio.

As sementes utilizadas foram adquiridas no comércio agrícola e são mostradas na Figura 4.11.



Figura 4.11. Amostra de milho (*Zea Mays*).

O plantio das sementes foi realizado no período de outubro a dezembro de 2019. Os vasos semeados foram mantidos ao ar livre em área de acesso controlado. O clima de Ouro Preto possui características básicas de clima tropical de montanha, a média anual da temperatura em Ouro Preto é de 18,5°C. As temperaturas mais elevadas coincidem com o período chuvoso, a região possui alta pluviosidade, concentrada principalmente entre os meses de outubro a março (CASTRO, 2006).

A temperatura ideal para o desenvolvimento do milho (*Zea mays*), está compreendida entre 24 e 30°C. É uma cultura muito exigente em água, a quantidade consumida pela planta, durante o seu ciclo está em torno de 600mm. Outro parâmetro de extrema importância para a planta é a radiação solar, sem a qual o processo fotossintético é inibido e a planta é impedida de expressar o seu potencial máximo produtivo. Assim, o período de crescimento e desenvolvimento é afetado pela umidade do solo, temperatura, radiação solar. Na região Sudeste, as épocas de plantio das lavouras de milho de alta produtividade concentram-se nos meses de outubro e novembro (ALVARENGA *et al.*, 2010).

No total, foram realizadas duas semeaduras com um intervalo de tempo de 10 dias entre elas. Cada uma das semeaduras é descrita a seguir.

4.4.1 Primeira Semeadura

A primeira semeadura ocorreu no dia 15 de outubro. As sementes foram plantadas em vasos de plástico apropriados, contendo cada um cerca de 400g de mistura solo/escória. Nesta primeira semeadura foram usadas as misturas com as dosagens de 0,0%, 1,5% e 3,0% em peso de escória. O delineamento experimental utilizado foi em blocos, com cinco repetições num esquema fatorial 3x5 (cinco vasos para cada uma das três misturas testadas). Foram plantadas duas sementes de milho (*Zea mays*) em cada pote, numa profundidade de 2 a 3cm, totalizando 15 unidades experimentais; em seguida foi adicionado a cada vaso semeado um volume de 150ml de água. Após o plantio, a umidade de cada unidade foi controlada por meio de regas diárias com cerca de 100ml. A Figura 4.12 mostra as 15 unidades logo após a semeadura



Figura 4.12. As 15 unidades plantadas logo após a primeira semeadura.

4.4.2 Segunda Semeadura

A segunda semeadura ocorreu do dia 25 de outubro de 2019. O experimento foi implantado e conduzido em vasos plásticos de capacidade maior que os da primeira semeadura, contendo cerca de 900g de mistura solo/escória. Nesta semeadura foram utilizadas misturas com concentrações de 0,0%, 3% e 5,0% em peso de escória. O

delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com três repetições, num esquema fatorial 3x3. Foram semeadas duas sementes de milho (*Zea mays*) em cada pote, numa profundidade de 2 a 3cm, totalizando 9 unidades experimentais. Após o plantio foi adicionado a cada unidade cerca de 350ml de água; em seguida a hidratação dos vasos foi controlada por meio de regas diárias com cerca de 100ml de água. A figura 4.13 mostra as 9 unidades logo após a semeadura.



Figura 4.13. As 9 unidades plantadas logo após a segunda semeadura.

5 O DESENVOLVIMENTO DAS PLANTAS – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a primeira semeadura em 15/10/2019 as unidades plantadas foram observadas diariamente e registrou-se a primeira germinação em 21/10/2019, seis dias após o plantio, em duas unidades experimentais contendo 3% de escória. As germinações posteriores em cada uma das demais unidades estão registradas na Tabela 5.1, com as respectivas datas de germinação.

Sem escória	Data da germinação
Pote 11	28/10/2019
Pote 12	26/10/2019
Pote 13	26/10/2019
Pote 14	28/10/2019
Pote 15	9/11/2019

1,5 % escória	Data da germinação
Pote 6	23/10/2019
Pote 7	23/10/2019
Pote 8	25/10/2019
Pote 9	24/10/2019
Pote 10	29/10/2019

3,0 % escória	Data da germinação
Pote 1	29/10/2019
Pote 2	21/10/2019
Pote 3	21/10/2019
Pote 4	23/10/2019
Pote 5	23/10/2019

Tabela 5.1. Registro das datas de germinação em cada uma das unidades semeadas em 15/10/2019.

O gráfico da Figura 5.1 mostra o tempo de germinação em dias para cada uma das unidades da primeira semeadura.

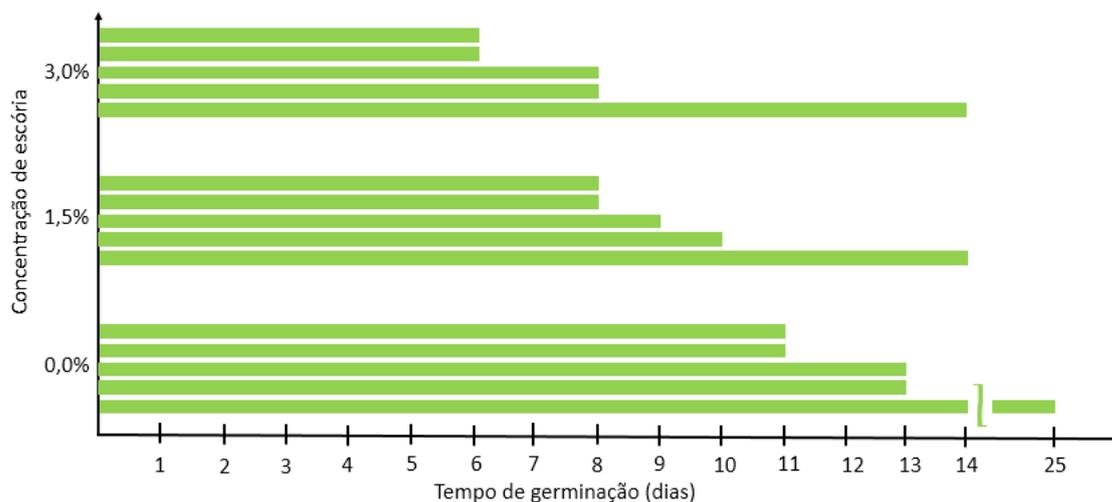


Figura 5.1. O tempo de germinação em dias para cada uma das 15 unidades da primeira sementeira.

A Figura 5.1 mostra um efeito das adições de escória no tempo de germinação. As duas germinações mais precoces, que ocorreram em solos com 3,0% de escória, antecederam de cinco dias as primeiras germinações em solo puro. No solo com 1,5% de escória as germinações também antecederam, em média, aquelas que ocorreram em solo sem escória.

A Figura 5.2 mostra o estado das 15 unidades da primeira sementeira em 26/10/2019; na fila em primeiro plano estão os cinco vasos contendo solo com 3,0% de escória, aqueles com 1,5% estão dispostos na segunda linha e na última linha as unidades com solo puro. Vê-se que, em quatro das cinco unidades da primeira e da segunda linhas já ocorreu a germinação, enquanto que das cinco unidades com solo puro, em apenas uma ocorreu a germinação.



Figura 5.2. Estágio de desenvolvimento das 15 unidades da primeira sementeira 11 dias após o plantio.

Pode-se observar, na Figura 5.2, que as germinações mais precoces que ocorreram nas unidades contendo 3,0% de escória levaram, conseqüentemente, a um maior desenvolvimento das plantas até a data do registro. Nas unidades com 1,5% de escória as germinações também ocorreram bem anteriormente às unidades com solo livre de escória e, na data do registro, as plantas dessas unidades apresentavam um grau de desenvolvimento médio ligeiramente inferior àquelas das unidades com 3,0% de escória. Observou-se também que o número de sementes germinadas em cada vaso é em média maior nas unidades que contêm escória.

Nas Figura 5.3 e 5.4, são apresentados os estágios de desenvolvimento das plantas com duas e três semanas após o plantio, respectivamente. Na Figura 5.3 as plantas mostradas são aquelas que germinaram mais precocemente em cada uma das misturas solo/escória utilizadas.

Nota-se nitidamente que o grau de desenvolvimento das plantas germinadas em vasos com 1,5% e 3,0% de escória é bem maior do que aquele da planta germinada em solo puro, e ainda esse desenvolvimento parece aumentar com a concentração de escória no solo, pelo menos até 3,0%.



Figura 5.3. Comparação do grau de desenvolvimento das plantas duas semanas após a semeadura.



Figura 5.4. Comparação do grau de desenvolvimento das plantas três semanas após a semeadura.

Na Figura 5.5 é mostrado o desenvolvimento das plantas um mês após a semeadura aproximadamente. Nota-se um nítido efeito das adições de escória, já que as plantas das unidades mostradas nas duas primeiras linhas comparadas com aquelas da terceira linha, apresentam em média uma massa vegetal maior, um maior número de folhas com área foliar ligeiramente maior. Entretanto, parece que a quantidade de solo, de apenas 400g, disponível em cada unidade foi insuficiente para um maior e melhor desenvolvimento das plantas; já se pode notar, na Figura 5.5, que nas plantas mais desenvolvidas já começam a amarelecer algumas folhas com cerca de um mês após o plantio. Em vista desta

observação a segunda sementeira foi feita em vasos maiores, contendo cada um cerca de 900g de mistura solo/escória.



Figura 5.5. Comparação do grau de desenvolvimento das plantas a aproximadamente um mês.

A segunda sementeira realizada em 25/10/2019 gerou nove unidades plantadas que foram acompanhadas e observadas diariamente, e registrou-se a primeira germinação em 02/11/2019, seis dias após o plantio, em duas unidades experimentais contendo 3% de escória. As germinações posteriores em cada uma das demais unidades estão registradas na Tabela 5.2, com as respectivas datas de germinação.

Sem escória	Data da germinação
Pote 1	04/11/2019
Pote 5	04/11/2019
Pote 9	02/11/2019

3% escória	Data de germinação
Pote 4	05/11/2019
Pote 7	31/10/2019
Pote 3	Não houve germinação

5% escória	Data da germinação
Pote 2	05/11/2019
Pote 6	Não houve germinação
Pote 8	Não houve germinação

Tabela 5.2. Registro das datas de germinação em cada uma das unidades semeadas em 25/10/2019.

O gráfico da Figura 5.6 mostra o tempo de germinação em dias para cada uma das unidades da primeira semeadura.

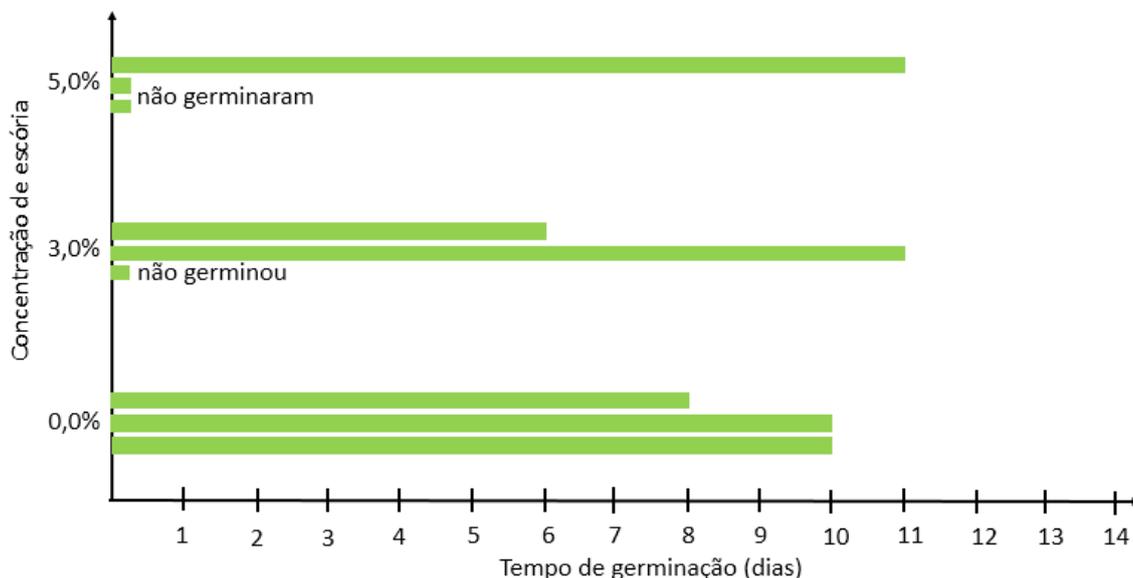


Figura 5.6: O tempo de germinação em dias para cada uma das 9 unidades da segunda semeadura.

Observa-se que novamente a germinação mais precoce ocorreu em uma unidade contendo solo com 3,0% de escória. Embora a taxa de germinação foi bem menor que na semeadura anterior. Uma possível explicação para este fato é que exatamente na época da segunda semeadura a intensidade pluviométrica em Ouro Preto aumentou bastante, e o excesso de hidratação e a falta de sol parece ter afetado o desenvolvimento das sementes.

A Figura 5.7 mostra o estado das 9 unidades da segunda semeadura em 11/11/2019. Nesta montagem as unidades estão distribuídas aleatoriamente, e para se identificar o tipo mistura solo/escória de cada unidade é necessário se referir à Tabela 5.2 onde estão indicados os teores de escória de cada unidade. Nota-se que nas unidades 1, 5 e 9, todas com solo puro, as plantas se desenvolveram bem, como também aconteceu com as unidades 4 e 7, que contêm solo com 3,0% de escória.



Figura 5.7. Comparação do grau de desenvolvimento das plantas 17 dias após o plantio.

Na Figura 5.8 é feita uma comparação do desenvolvimento das plantas de unidades contendo solo com diferentes concentrações de escória. As plantas comparadas têm todas aproximadamente o mesmo tempo de crescimento, em torno de uma semana. Pode-se observar que, neste caso, o desenvolvimento das plantas nas unidades sem escória e com 3,0% de escória é praticamente o mesmo. Entretanto, a planta da unidade com 5,0% de escória, mesmo levando em conta uma diferença de dois ou três dias de crescimento em relação às outras, tem nitidamente um grau de desenvolvimento menor.



Figura 5.8. Comparação do grau de desenvolvimento das plantas com aproximadamente o mesmo tempo de crescimento germinadas em solos com diferentes teores de escória.

Uma análise geral dos resultados apresentados para as duas sementeiras mostra que há um nítido efeito das adições de escória nas propriedades agrícolas do solo ouro-pretano. Este efeito, entretanto, parece ser mais intenso para concentrações em torno de 3,0% de escória, e ele diminui de intensidade para concentrações maiores como 5,0%. É possível que este fato esteja ligado a um aumento excessivo do pH do solo para concentrações de escória maiores do que 3,0%. De fato, uma análise da Figura 4.9 mostra que a concentração de 3,0% representa de certo modo um ponto crítico, já que só a partir daí o efeito da escória é significativo. O efeito da escória que pareceu mais relevante foi no encurtamento de quase 50% no tempo de germinação nas unidades com 3,0% de escória em ambas sementeiras. Isto acarretou um maior desenvolvimento relativo das plantas germinadas em solo com 3,0% de escória.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho, ainda que muito limitado no tempo para o tipo de estudo proposto, pode evidenciar alguns efeitos da utilização agrícola da escória básica de aciaria em solos de Ouro Preto. Como conclusão geral, e principal, pode-se dizer que os resultados mostram que vale a pena investir em um estudo de campo, na escala de tempo do ciclo de vida das plantas, para quantificar e avaliar mais precisamente os efeitos da escória de aciaria no solo de Ouro Preto evidenciados por este trabalho.

Especificamente, podemos concluir que certamente as adições de escória a plantações de milho encurtam o tempo de germinação e parecem aumentar a probabilidade de germinação das sementes. Provavelmente, isto acontece devido ao aporte em nutrientes fornecido pela escória, principalmente Ca e Mg, elementos dos quais mostrou-se pobre o solo coletado. Nos resultados obtidos o tempo de germinação foi cerca de 50% menor para as sementes plantadas em solo com escória, o que é bem significativo.

Pode-se concluir também que as adições de escória têm um eficiente efeito no aumento do pH do solo. Esta eficiência aumenta de modo geral com a concentração de escória no solo, mas os resultados obtidos parecem indicar que só a partir de 3% de escória esse aumento do pH é bem significativo. É possível que para concentrações maiores que as analisadas haja alguma saturação no efeito da escória no pH, já o aumento induzido pela concentração de 3,0% de escória não é muito diferente daquele induzido pelo teor de 5%.

Enfim, este trabalho como estudo da viabilidade da utilização de escória de aciaria para melhoria dos solos de Ouro Preto, sugere fortemente a realização de um estudo mais amplo, que avalie o desenvolvimento das plantas até a produção, uma vez que os resultados encontrados neste trabalho indicam ações benéficas da escória no solo de Ouro Preto.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, G. C. P. de. Caracterização física e classificação dos solos. 2005. Material de apoio - Departamento de transportes. Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2005.

ALVARENGA, R. C. et al. **Cultivo do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2010.

ANDRADE, Larice Nogueira; LEITE, Mariangela Garcia Praça; BACELLAR, Luís de Almeida Prado. Composição mineralógica e geoquímica dos solos do parque estadual do Itacolomi-Ouro Preto/MG. **Quaternary and Environmental Geosciences**, v. 3, n. 1-2, 2012.

ARAÚJO, L. A. Manual de Siderurgia. Vol. 1. Produção. São Paulo. Editora Arte & Ciência. 1997. 470p.

ARRIVABENE, Lúcio Flávio. **Adição de resíduo da indústria de granito em escória de aciaria BOF visando sua utilização na produção de cimento**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6484 - solo: sondagens de simples reconhecimentos com SPT: Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6502: rochas e solos**. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

BARBOSA, Marina Renó. Caracterização geoambiental das escórias de aciaria de cinco estados brasileiros. 2013.

BRANCA, Teresa A.; COLLA, Valentina. Possible uses of steelmaking slag in agriculture: an overview. **Material Recycling-Trends and Perspectives**. [http: www.itechopen.com/books/material-recycling-trends](http://www.itechopen.com/books/material-recycling-trends).(11 novembro de 2019), p. 339-353, 2012.

BRASIL, E. C.; NASCIMENTO, E. V. S. do; SILVA, K. C. do R. **Influência da Aplicação de Escória sobre Atributos Químicos do Solo e Teores de Nutrientes em Plantas de Arroz de Sequeiro**. *In*: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 17., 2008, Rio de Janeiro. **Anais [...]** Rio de Janeiro: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro: Embrapa Solos; Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2008. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/85507/1/TRAB-1765-671.pdf>. Acesso em: 26 maio 2019.

CARVALHO FILHO, A. de. **Solos e ambientes do quadrilátero ferrífero (mg) e aptidão silvicultural dos tabuleiros costeiros**. 2008. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008-

CLAESSEN, Marie Elisabeth Christine. Manual de métodos de análise de solo. **Embrapa Solos-Documents (INFOTECA-E)**, 1997. CLAESSEN, Marie Elisabeth Christine. Manual de métodos de análise de solo. **Embrapa Solos-Documents (INFOTECA-E)**, 1997.

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, p. 181-236, 2015.

CASTELO BRANCO, V. T. F. **Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia-COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

CASTRO, Jeanne Michelle Garcia. Pluviosidade e movimentos de massa nas encostas de Ouro Preto. 2006.

CHAND, S.; PAUL, B.; KUMAR, M. An overview of use of Linz-Donawitz (LD) steel slag in agriculture. **Curr. World Environ**, v. 10, p. 975-984, 2015.

CHOTOLI, F. F. Obtenção de Clínquer de Cimento a Partir de Escória de Aciaria a Oxigênio: estudo em escala laboratorial. **São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas**, 2006.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE); ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS (ABM). **Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico**. Brasília: CGEE , 2008.

DAN SOLUÇÕES. **Tudo que você precisa saber sobre patologias das fundações**. São Paulo, 11 set. 2017. Post do Blog Dan Soluções. Disponível em: <http://www.dansolucao.com.br/blog-dan-solucao-item.php?post=tudo-que-voce-precisa-saber-sobre-patologias-das-fundacoes>. Acesso em: 06 jul. 2019.

FERRARO, B. F. **Estudo das propriedades termofísicas de escória metalúrgica e de escórias sintéticas de CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO**. 2014. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/p/augusto.neiva/TCC/TCCs-finais-2014/2014-07.pdf>. Acesso em: 24 maio 2019.

FREITAS, Hérika B. Misturas asfálticas de módulo elevado com uso de escória de aciaria como agregado. **Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programas de Pós-Graduação de Engenharia. Dissertação de Mestrado**, 2007.

FREITAS, Suzy Magaly Alves Cabral de. Escória de aciaria: caminhos para uma gestão sustentável. 2018.

GEYER, Rejane Maria Turbino. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001. (Tese de Doutorado).

GUMIERE, Adriana Guerra. **Estudo da Viabilidade Técnica da Utilização de Escórias de Aciaria do Processo LD como Adição em Cimentos**. UFRGS. Porto Alegre, 2002. (Tese de Doutorado).

HOJO, R. H. **Utilização de escória de siderurgia na cultura da goiabeira**. 2010. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2010. Disponível em: <https://www.fcav.unesp.br/Home/download/pgtrabs/pv/d/3633.pdf>. Acesso em: 25 maio 2019.

HUMARIA, Mir Syeda Yuhannatul. Impact of Iron and Steel Slag on Crop Cultivation: A Review. **Current World Environment**, v. 9, n. 1, p. 216-219, 2014.

NATIONAL SLAG ASSOCIATION et al. A Guide For The Use of Steel Slag in Agriculture and for Reclamation of Acid Lands. 2011.

POLISSENI, Antônio Eduardo. Estudo da viabilidade técnica da utilização de escória de aciaria elétrica micronizada como material cimentício. 2005.

RAPOSO, C. O. L. Estudo Experimental de Compactação e Expansão de um Escória de Aciaria LD para Uso em Pavimentação. 2005.163 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005.

ROMANINI, A. **Aula 5: classificação do solo**. Versão: 1.1. Geotécnica I, Engenharia Civil, Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade do Estado de Mato Grosso, Sinop, 2017. Disponível em: http://sinop.unemat.br/site_antigo/prof/foto_p_downloads/fot_15034aula_05_-_pdf.Aula_05_-.pdf. Acesso em: 06 jul. 2019.

SILVA, Blênio Márcio Cunha et al. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE ESCÓRIAS DE ACIARIA, 2016.

SOBRAL, M. F. *et al* . Escória de siderurgia e seus efeitos nos teores de nutrientes e metais pesados em cana-de-açúcar. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande , v. 15, n. 8, p. 867-872, Ago. 2011. Disponível em:
http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662011000800015.
Acesso em: 28 maio 2019.

SOUZA, EB de O. Escórias de aciaria e resíduos de concretos refratários em componentes de pavimentação. **Belo Horizonte, UFMG**, 2007.

VANCINI, G. L. *Avaliação de Metais e Não Metais da Escória de Aciaria de Usinas Siderúrgicas Brasileiras Conforme NBR 10004/2004*. 2005. 164p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005.

WORLD STEEL ASSOCIATION *et al*. World Steel in Figures 2018 Now Available. **World Steel Association: Brussels, Belgium**, 2018.

YI, Huang *et al*. An overview of utilization of steel slag. **Procedia Environmental Sciences**, v. 16, p. 791-801, 2012.

ZHANG, Qi *et al*. A Bottom-up Energy Efficiency Improvement Roadmap for China's Iron and Steel Industry up to 2050. 2016.