

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CAROLINE FORESTTI OLIVEIRA

**USO DE COPRODUTO DE DESSULFURAÇÃO DE REATOR KAMBARA COMO
AGENTE ESTABILIZANTE DE SOLOS PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO**

VITÓRIA
2018

CAROLINE FORESTTI OLIVEIRA

**USO DE COPRODUTO DE DESSULFURAÇÃO DE REATOR KAMBARA COMO
AGENTE ESTABILIZANTE DE SOLOS PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires

VITÓRIA
2018

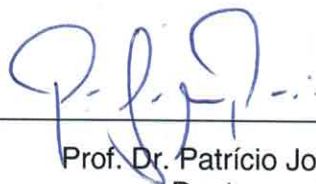
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

USO DE COPRODUTO DE DESSULFURAÇÃO DE REATOR KAMBARA COMO AGENTE ESTABILIZANTE DE SOLOS PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO

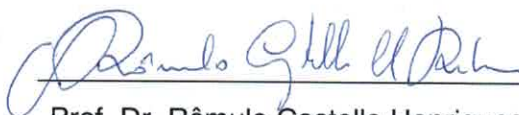
Caroline Forestti Oliveira

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Estruturas.

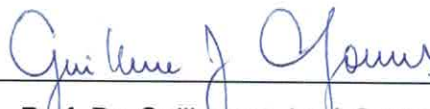
Aprovada no dia **16 de abril de 2018** por:



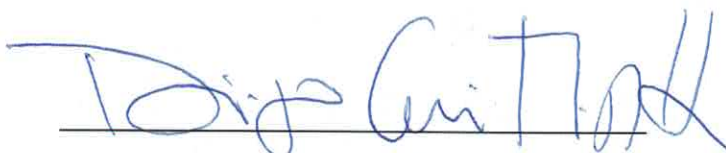
Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires
Doutor em Engenharia Civil
Orientador - UFES



Prof. Dr. Rômulo Castello Henriques Ribeiro
Doutora em Engenharia Civil
Examinador Interno - UFES



Prof. Dr. Guilherme José Cunha Gomes
Doutor em Engenharia Civil - PUC-Rio
Examinador Externo - PUC-Rio



M. Sc. Diego Corrêa Magalhães
Mestrado em Public and Environmental Affairs
Examinador Externo - AcelorMittal

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

O48u Oliveira, Caroline Forestti, 1991-
Uso de coproduto de dessulfuração de reator Kambara como
agente estabilizante de solos para fins de pavimentação /
Caroline Forestti Oliveira. – 2018.
108 f. : il.

Orientador: Patrício José Moreira Pires.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Pavimentos. 2. Estabilização dos solos. 3. Solos –
Compactação. 4. Dessulfuração. 5. Coproduto. I. Pires, Patrício
José Moreira. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro
Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

AGRADECIMENTOS

Com a certeza de que este trabalho foi fruto não apenas do meu esforço pessoal, mas de um conjunto de oportunidades que me foram concedidas e da contribuição, ainda que apenas motivacional, de diversas pessoas, agradeço, primeiramente ao orientador e mentor acadêmico Patrício, por acreditar na pesquisa e na minha capacidade de realizá-la, bem como pelos valiosos ensinamentos compartilhados ao longo desta jornada.

Dedico, também, este espaço, a minha família, pelo apoio incondicional e por terem sempre, apesar das adversidades, acreditado no poder transformador da educação. De mesma forma, aos meus melhores amigos, minha segunda família, e àqueles que se tornaram grandes amigos ao longo desta trajetória: Luísa, Rogério e Carlos Magno.

Por sua vez, obrigada, aos técnicos Deiverson e Leonaldo, cujos auxílios na execução do programa experimental, pela generosidade e paciência ao compartilhar a experiência de anos de geotecnia experimental, foram de grande importância na realização desta pesquisa.

Da forma geral, a toda a equipe do laboratório de Geotecnia e de Materiais de Construção Civil da UFES, pelo auxílio na realização dos ensaios, em especial à Natália e ao Sidineidy. Ao Laboratório de Plasma Térmico (LPT), do departamento de Física da UFES, pela realização das micrografias e ao professor Marcos Tadeu, do Departamento de Engenharia Mecânica da UFES, pela realização da difração de raio-X.

Finalmente, à ArcelorMittal Tubarão, pelo auxílio financeiro que possibilitou a realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho visa aprofundar o conhecimento sobre um novo coproduto siderúrgico gerado durante o processo de dessulfuração do ferro gusa no Reator Kambara (*Kambara Reactor* - KR) e avaliar seu potencial como agente estabilizante de solos para pavimentação. Para isto, inicialmente, o coproduto foi submetido à análise mineralógica (difração de raio-x - DRX), química (fluorescência de raio-x - FRX), pozolanicidade e ensaio de expansão *Pennsylvania Test Method* (PTM). Ensaios físicos e mecânicos (Índice de Suporte Califórnia e Módulo de Resiliência) foram realizados com dois solos da região no estado natural e, posteriormente, com os teores de 10, 20 e 30% de coproduto em massa, a fim de verificar o seu potencial como estabilizante de solos. Como forma de comparativa com outros agentes estabilizantes, realizou-se misturas dos solos com cimento e dos solos com agregados pétreos. No sentido de compreender mecanismos responsáveis pela melhoria dos parâmetros mecânicos obtida com coproduto, investigou-se a mineralogia dos solos (DRX) e microestrutura dos materiais, isolados e combinados. A microestrutura foi analisada por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), acompanhada de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS). O coproduto apresentou desempenho comparável, senão superior, ao do cimento Portland nos parâmetros mecânicos avaliados. De forma geral, o programa experimental permite concluir a viabilidade técnica do uso do coproduto segundo os critérios adotados por esta pesquisa, mostrando tratar-se de uma alternativa mais econômica e sustentável ao uso de aglomerantes tradicionais na pavimentação.

Palavras-chave: Coproduto de dessulfuração KR; Estabilização de solos; Pavimentação.

ABSTRACT

This work aims to deepen the knowledge on a new steelmaking industry co-product generated within the iron desulphurization process in Kambara Reactor (KR) and to evaluate its potential as a soil stabilizer for road construction application. To achieve this, initially the co-product was submitted to mineralogical (X-ray diffraction - XRD), and chemical (X-ray fluorescence - XRF) analysis, pozzolanic activity evaluation and Pennsylvania Test Method (PTM) expansion test. In order to verify the co-product performance as a stabilization agent, physical and mechanical tests (California Bearing Ratio – CBR and resilient modulus tests) were carried out with two local soils without any addition and, subsequently, incorporated with 10, 20 and 30% of co-product by mass. To compare its performance to other soil traditional stabilizers, mixtures of the soil-cement and of the soil-aggregate were equally tested. Once the co-product efficiency was confirmed, further tests were carried out to investigate the stabilization mechanisms responsible for resistance improvements on soils. The chemical composition and microstructural characteristics of materials were analyzed by Scanning Electron Microscopy (SEM) coupled with Energy Dispersive Spectroscopy (EDS). Firstly, samples were examined in powder isolated form and then in compacted mixtures. According to the criteria adopted by this experimental work, it has been concluded that the KR co-product is an efficient soil stabilizer for road application, thus a more economical and sustainable alternative to the use of traditional binders.

Key-words: KR desulphurization slag; Soil stabilization; Pavement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Fluxo da produção do aço	22
Figura 2-2 - Tipos de resíduos do processo siderúrgico	22
Figura 2-3 – Destinação dos coprodutos de aciaria produzidos no Brasil	27
Figura 2-4 – Equipamento de banho-maria elétrico utilizado para determinação da expansão das amostras: (a) sem tampa com 10 corpos-de-prova durante a realização do ensaio (b) com tampa.	30
Figura 2-5 – Resultados de ensaios de escória de aciaria EAF. (a) Curva de compactação de dois picos. (b) Comportamento do ISC em função da umidade	30
Figura 2-6 – Materiais tradicionalmente usados em camadas de pavimentos	33
Figura 2-7 – Resistência à compressão do solo como função da relação vazios/cimento expresso em termo da porosidade e do teor volumétrico do cimento	38
Figura 2-8 – Evolução das fases hidratadas da pasta de cimento.....	40
Figura 2-9 – Princípio da difração de raio-x	42
Figura 2-10 – Efeito da diferença do tamanho das partículas no FRX	44
Figura 3-1 – Localização dos pontos de coleta.....	50
Figura 3-2 – Curva granulométrica da composição de material inerte e do coproduto KR.....	52
Figura 3-3 – Preparação de amostras para MEV. (a) Amostras individuais em diferentes frações granulométricas, (b) fragmentos de corpos-de-prova compactados e (c) equipamento dotado de câmara para metalização de amostras	58
Figura 4-1 – Curvas granulométricas dos solos e do coproduto KR.....	60
Figura 4-2 – Difratoograma experimental de amostras dos materiais e com os respectivos minerais detectados	61
Figura 4-3 – Curva de compactação do coproduto KR na energia modificada.....	64
Figura 4-4 – Expansão PTM acumulada ao longo dos 14 dias de ensaio e as umidades de moldagem correspondentes	65
Figura 4-5 – Curvas Granulométricas do solo S1, coproduto e suas misturas	67
Figura 4-6 – Curvas Granulométricas do solo S2, coproduto e suas misturas	67
Figura 4-7 – Massa específica real dos grãos dos materiais sem adições e com diferentes teores de coproduto.....	68

Figura 4-8 – Variação dos limites de consistência com incorporação do coproduto em diferentes solos	69
Figura 4-9 – Curvas de compactação, ISC e expansão do solo S1 para as EN, EI e EM	70
Figura 4-10 – Curvas de compactação, ISC e expansão do solo S1KR10 para as EN, EI e EM.....	71
Figura 4-11 – Curvas de compactação, ISC e expansão do solo S1KR20 para as EN, EI e EM.....	72
Figura 4-12 – Curvas de compactação, ISC e expansão do solo S1KR30 para as EN, EI e EM.....	73
Figura 4-13 – Curvas de compactação, ISC e expansão do solo S1CP10 para as energias EN, EI e EM.....	74
Figura 4-14 – Curvas de compactação, ISC e expansão do solo S1 com 10, 20 e 30% de MI para a EM.....	75
Figura 4-15 – Curvas de compactação, ISC e expansão do solo S2 nas energias EN, EI e EM.....	76
Figura 4-16 – Curvas de compactação, ISC e expansão do solo S2KR10 nas energias EN, EI e EM.....	77
Figura 4-17 – Curvas de compactação, ISC e expansão do solo S2KR20 nas energias EN, EI e EM.....	78
Figura 4-18 – Curvas de compactação, ISC e expansão do solo S2KR30 nas energias EN, EI e EM.....	79
Figura 4-19 – Curvas de compactação, ISC e expansão do solo S2CP10 nas energias EN, EI e EM.....	80
Figura 4-20 – Curvas de compactação, ISC e expansão do solo S1 com 10, 20 e 30% de MI para a EM.....	81
Figura 4-21 – Resumo dos parâmetros da compactação, ISC e expansão para os solos e suas misturas na EM	82
Figura 4-22 – Resistência à compressão do solo como função da relação vazios/cimento expresso em termo da porosidade e do teor volumétrico do cimento	84

Figura 4-23 – (a) Equipamento utilizado para ensaio triaxial dinâmico e (b) amostra revestida.....	85
Figura 4-24 – Módulo de resiliência como função da tensão confinante	86
Figura 4-25 – Módulo de resiliência como função da tensão desviadora	86
Figura 4-26 – Modelo composto para solo S1 puro	87
Figura 4-27 – Modelo composto para a mistura S1KR30	87
Figura 4-28 – Modelo composto para a mistura S1CP10	88
Figura 4-29 – Módulo de resiliência para tensão confinante e desviadora de 0,10 MPa	89
Figura 4-30 – MEV/EDS da fração $d < 75\mu\text{m}$ de amostras individuais em pó	90
Figura 4-31 – MEV/EDS de fragmentos extraídos de corpos-de-prova compactados ISC.....	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 2-1 – Composição química típica das escórias de alto forno e do cimento Portland	21
Quadro 2-2 – Especificações técnicas mínimas para o uso de escórias de aciaria em pavimento rodoviários	24
Quadro 2-3 – Classificação ambiental das escórias de aciaria e de dessulfuração KR	25
Quadro 2-4 – Comparação entre procedimentos dos diferentes métodos de ensaios de expansibilidade de escórias de aciaria.....	29
Quadro 2-5 – Solo para misturas de solo-cimento	36
Quadro 2-6 – Requisitos químicos do pozolanas.....	45
Quadro 2-7 – Requisitos físicos de pozolanas	45
Quadro 2-8 – Características dos materiais empregados no pavimento	47
Quadro 3-1 – Programa Experimental	53
Quadro 4-1 – Resumo dos resultados para o coproduto KR	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Compostos instáveis e variação volumétrica	23
Tabela 2-2 – Teor de cimento segundo tipo de solo	37
Tabela 3-1 – Granulometria dos agregados e da composição obtida.....	52
Tabela 3-2 – Composição das misturas ensaiadas	56
Tabela 3-3 – Detalhes das amostras analisadas	57
Tabela 4-1 – Resumo da Caracterização Física do Solos	59
Tabela 4-2 – Análise semiquantitativa na forma de óxidos dos elementos por FRX..	62
Tabela 4-3 – Coeficiente dos modelos do módulo de resiliência	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AASHTO	<i>American Association of State Highway Transportation Officials</i>
BOF	<i>Basic Oxygen Furnace</i>
ISC	Índice de Suporte Califórnia
CEPED	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento
CPIII	Cimento Portland de alto forno
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DER/PR	Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DRX	Difração de raio-x
EAF	<i>Electric Arc Furnace</i>
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva
FRX	Fluorescência de raio-x
HRB	<i>Highway Research Board</i>
IAB	Instituto do Aço Brasil
KR	<i>Kambara Reactor</i>
LD	Linz e Donawitz
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
MEV	Microscópio ou Microscopia Eletrônica de Varredura
MI	Composição de material inerte pétreo
OECD	<i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i>
PTM	<i>Pennsylvania Test Method</i>
RS	Resistente a Sulfatos
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo

SUMÁRIO

à1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA.....	16
1.2 OBJETIVOS.....	18
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 PROCESSO SIDERÚRGICO E SEUS COPRODUTOS	19
2.2 COPRODUTO KR	27
2.3 EXPANSÃO DE COPRODUTOS DE ACIARIA.....	28
2.4 PAVIMENTAÇÃO	31
2.4.1 O pavimento e seus materiais	31
2.4.2 Estabilização e melhoramento de solos	33
2.4.3 Mecanismos químicos envolvidos na estabilização	39
2.4.4 Métodos de análise química, mineralógica e microestrutural.....	41
2.4.5 Métodos de dimensionamento de pavimentos	46
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	50
3.1 MATERIAIS	50
3.2 ENSAIOS.....	52
3.2.1 Etapa I: caracterização dos materiais	53
3.2.2 Etapa II: efeito da incorporação do coproduto	54
3.2.3 Etapa III: investigação dos mecanismos de estabilização	56
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1 ETAPA I: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	59
4.1.1 Caraterização física e mineralógica	59
4.1.2 Caracterização do coproduto KR	62
4.2 ETAPA II: EFEITO DA INCORPORAÇÃO DO COPRODUTO.....	66
4.2.1 Parâmetros físicos	66
4.2.2 Parâmetros mecânicos.....	69
4.3 ETAPA III: INVESTIGAÇÃO DOS MECÂNIISMOS DE ESTABILIZAÇÃO	89
4.3.1 Microestrutura e análise química	89

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
5.1	CONCLUSÃO	93
5.2	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	94
	REFERÊNCIAS.....	96
	APÊNDICE A – Dados para aplicação da metodologia Consoli <i>et al.</i> (2007)...	105

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA

Em obras de pavimentação, a escassez de jazidas naturais com especificações técnicas mínimas exigidas pelo projeto, associada à uma legislação ambiental mais austera quanto à concessão de licenças para a exploração de jazidas naturais, são fatores motivadores para a busca e utilização de materiais alternativos (RIBEIRO, 2008).

A extração e transporte de solos que atendam às especificações técnicas acarretam impactos ambientais, além de altos custos. No sentido de diminuí-los, buscam-se outros meios de melhorar as propriedades físicas e químicas do solo natural já existente no local. Para isto, é comum a utilização de técnicas de estabilização de solos, as quais proporcionam melhoria nas características de uma massa de solo, por modificações na sua própria estrutura, a fim de atender o critérios normatizados de utilização de solos em obras geotécnicas. Uma das primeiras técnicas empregadas pelo homem para estabilizar os solos na área de pavimentação foi das misturas de areia e argilas, visando promover melhorias nas vias utilizadas para transporte (SABAT e PATI, 2014).

As técnicas de estabilização dos solos podem ser divididas em dois grupos: aquelas que usam meios mecânicos, tal como a correção da granulometria e a adição ou subtração de certas quantidades das frações constituintes; ou meios químicos, utilizando aditivos orgânicos ou inorgânicos, tais como os materiais betuminosos, resinas, cal, cimento e outros. Em projetos modernos, observa-se também o uso de técnicas com aplicação de geossintéticos, fibras naturais e artificiais (BENTO, 2006).

O Brasil está entre os dez maiores produtores mundiais de aço (*Global Steel Report*, 2016). Ao longo do seu processo, é gerada uma grande quantidade de resíduos. Segundo o Instituto do Aço Brasil - IAB (2016), no ano de 2015, foram gerados 19,8 milhões de toneladas de subprodutos e resíduos siderúrgicos. A maior parte é reaproveitada na produção de cimento, uso agrônômico ou nivelção de terrenos e

aterros. Contudo, 12% ainda não possuem aplicação, sendo, portanto, estocados em pátios das empresas ou descartados em aterros (Instituto Aço Brasil, 2016).

Dado o grande volume de resíduos e coprodutos gerados pela indústria siderúrgica, tem-se buscado, nas últimas décadas, diversas formas de reinseri-los na cadeia produtiva da construção civil. Atualmente, 99% da escória de alto forno e 79% da escória de aciaria possuem destinação, sendo a maior parte empregada na indústria cimenteira (IAB, 2016).

Diante da escassez de solos que atendam às especificações técnicas para camadas de pavimentos, o uso de estabilização química de solos torna-se bastante atrativo. O uso de aglomerantes como cimento Portland e a cal é antigo. O uso do cimento é mais difundido, possuindo normas técnicas e diversos estudos sobre a otimização de fatores, como teor de aglomerante, umidade ideal, entre outros (CONSOLI *et al.*, 2015; MARQUES *et al.*, 2016). Atualmente, tem sido crescente o apelo pelo uso de resíduo e coprodutos industriais, seja por razões econômicas ou ambientais.

Ainda pouco conhecido no Ocidente, o coproduto de dessulfuração Reator Kambara (*Kambara Reactor* – KR) tem se mostrado promissor na estabilização química de solos para fins de pavimentação, por apresentar menor potencial expansivo que os demais subprodutos siderúrgicos (GONÇALVES, 2016; KIRMSE, 2006). É importante, portanto, aprofundar o conhecimento sobre esse material e avaliar sua possibilidade de substituir o cimento como aglomerante em camadas para a pavimentação, como alternativa mais sustentável na melhoria das características de solos naturais. Neste sentido, este projeto de pesquisa visa analisar a viabilidade técnica da utilização do coproduto KR na estabilização química de solos em camadas para pavimentação.

A partir do exposto, este projeto apresenta primeiramente uma revisão de literatura sobre os coprodutos siderúrgicos e sobre técnicas de estabilização química de solos. Buscou-se descrever os processos que geram os diversos resíduos, suas características químicas e as aplicações que têm sido dadas a esses materiais, especialmente no ramo da Geotecnia. No sentido de preencher a lacuna detectada em relação a utilização do resíduo de dessulfuração KR, esta pesquisa propõe formas de avaliar o uso desse material como estabilizante de solo. Foram também descritos os processos envolvidos na estabilização química de solos e a maneira pela qual os coprodutos siderúrgicos podem ser incorporados à técnica.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa é avaliar, por meio de ensaios laboratoriais, o efeito da incorporação de coproduto KR nos parâmetros físicos, mecânicos e de microestrutura de amostras do solos.

Para alcançar o objetivo geral, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- realizar ensaios de caracterização física dos materiais (solos e coproduto) de forma isolada para compreender a natureza e comportamento dos materiais individualmente;
- realizar análise química e mineralógica dos solos e coproduto;
- executar ensaios de compactação, expansão, capacidade de suporte (Índice de Suporte Califórnia - ISC) e ensaios de triaxiais para determinação do parâmetros relacionados ao módulo de resiliência (MR) para as seguintes composições: solos sem adição, com diferentes adições de coproduto e solo com estabilizantes convencionais (cimento e materiais pétreos);
- investigar os processos envolvidos na estabilização do solo com o coproduto, por meio de análise da microestrutura do solo, do coproduto e das misturas.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A fim de atingir os objetivos traçados, a dissertação está organizada em quatro capítulos. O **Capítulo 1** introduz o tema estudado: contextualiza-o, evidencia sua relevância e delimita seus objetivos. O **Capítulo 2** apresenta uma revisão bibliográfica, que serve como base para compreensão dos tópicos apresentados posteriormente. Esse capítulo concentra-se em expor as etapas do processo siderúrgico e de seus coprodutos, além dos métodos de estabilização de solos, em especial aqueles aplicados à pavimentação. O **Capítulo 3** discorre sobre o programa experimental: origem e preparação dos materiais usados, detalhes quanto à escolha e a execução dos ensaios laboratoriais. O **Capítulo 4** apresenta e discute os resultados obtidos. Por fim, nas **Considerações Finais** são expostas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSO SIDERÚRGICO E SEUS COPRODUTOS

Respondendo à crescente demanda mundial por produtos feitos de aço, as indústrias siderúrgicas têm aumentado a produção ao longo dos últimos 60 anos, atingindo o valor de 1,6 bilhão de toneladas produzidas no ano de 2016. Esse comportamento é natural, uma vez que acompanha o desenvolvimento das sociedades modernas, sendo o consumo do aço *per capita* um forte indicador do grau de industrialização de um país (ITA, 2016; World Steel Association 2016).

O Brasil, oitavo maior produtor mundial, contribui com 33,3 milhões de toneladas de aço por ano (*International Trade Administration* - ITA, 2016). Essa eminente posição impõe o desafio de gerenciar o grande volume de resíduos sólidos provenientes dessa cadeia produtiva. Ao longo do processo de produção do aço, são gerados diversos subprodutos, que variam segundo a matéria-prima utilizada e os processos empregados. A correta aplicação dos subprodutos da fabricação do aço exige conhecimento de sua origem e natureza. Para tal, faz-se necessário conhecer as diversas fases que compõem a fabricação do aço. Seu processo de produção divide-se em quatro etapas principais: preparação, redução, refino e laminação. Inicialmente, é feita a preparação das matérias-primas: sinter e coque (OLIVEIRA, 2011).

O minério de ferro passa pelo processo de sinterização, na qual os finos são aglomerados, resultando no sinter. E, a partir do carvão, produz-se o coque, matéria-prima na próxima etapa. Esses materiais são, então, enviados ao alto-forno, onde o coque exerce dupla função: redutor dos óxidos de ferro e combustível sólido do processo. Durante o processo, há redução do minério de ferro em um metal líquido: o ferro-gusa (liga de ferro e carbono com alto teor de carbono). Nessa fase, além do gusa, também é gerada a escória de alto-forno. Estima-se que seja gerado cerca 200 a 300 kg de escória de alto-forno por tonelada de ferro-gusa (ZETTERMANN, 2001).

Ao sair do forno com temperatura da ordem de 1500°C, a escória de alto forno pode ser resfriada lentamente, ao ar, ou rapidamente, por jato de água. O processo de resfriamento ao ar permite a cristalização de seus componentes e o material não adquire capacidade aglomerante. Esse material é conhecido como escória bruta de alto-forno ou *Dry Pit* e, quando britado, possui diversas aplicações em substituição a rochas naturais (agregado para concreto, pavimentação e lastro de vias férreas), devido à sua natureza inerte (JOHN, 1995; JOHN e AGOPYAN, 2014).

No caso da escória de alto-forno, quando submetida ao resfriamento brusco por jato de água, não há tempo suficiente para cristalização do material. Forma-se, assim, uma estrutura vítrea, pois a redução da temperatura diminui a mobilidade dos íons. Assim, o material forma grãos e, por isso, é chamado de escória granulada de alto-forno. Esse processo é conhecido por granulação, já que o material é reduzido a grãos similares aos da areia natural (JOHN, 1995). Por adquirir o potencial de aglomerante hidráulico quando moído, essa escória granulada de alto-forno possui amplo mercado. Atualmente, a maior parte deste subproduto é empregada na fabricação de cimento. Estudos mostram vantagens do cimento com escória em relação ao convencional como aumento da resistência, baixo calor de hidratação, maior durabilidade (Nippon Slag Association, 2016).

A basicidade (Razão V ou Basicidade Binária) é um fator muito utilizado em escórias com indicador de suas propriedades metalúrgicas e de sua estrutura. Este conceito baseia-se na definição de ácido/base de Gilbert Newton Lewis e é calculado a partir da relação em massa de óxidos básicos em relação a óxidos ácidos na escória ou simplesmente CaO/SiO_2 (FERRARO, 2014).

Segundo esse parâmetro, as escórias podem ser classificadas de acordo com a relação CaO/SiO_2 em ácidas (<1), normalmente produzidas em processos de carvão vegetal, ou básicas (>1). A basicidade auxilia na avaliação do potencial aglomerante dos coprodutos siderúrgicos e, logo, na escolha da aplicação adequada. O Quadro 2-1 compara os principais componentes de escórias, básicas e ácidas, com o cimento Portland (JOHN, 1995).

Quadro 2-1 – Composição química típica das escórias de alto forno e do cimento Portland

Composto	Escória básica (BATTAGIN e ESPER, 1988)	Escória ácida (adaptado de SOARES, 1982)	Cimento Portland (TAYLOR, 1992)
CaO	40 - 45	24 - 39	66
SiO ₂	30 - 35	38 - 55	22
Al ₂ O ₃	11 - 18	8 - 19	5
MgO	2,5 - 9	1,5 - 9	-
Fe ₂ O ₃	0 - 2	0,4 - 2,5	3
FeO	0 - 2	0,2 - 1,5	-
S	0,5 - 1,5	0,03 - 0,2	-
CaO/SiO ₂ média	1,31	0,68	3

Fonte: JOHN (1995)

A etapa do refino ocorre nas aciarias responsáveis por transformar o gusa em aço líquido. A maior parte do aço líquido é solidificada em equipamentos de lingotamento contínuo para produzir aço semi-acabado, lingotes e blocos. Na laminação, estes produtos são transformados nos mais variados produtos finais pelos denominados laminadores (OLIVEIRA, 2011).

Durante o processo de refino, o gusa líquido é misturado a outros elementos como sucata de aço e cal, nessa fase são gerados outros subprodutos. O refino pode ser feito em conversor a oxigênio (Linz e Donawitz – LD ou Basic Oxygen Furnace - BOF) ou a arco elétrico (*Electric Arc Furnace* - EAF). Portanto, nessa etapa, diversos tipos de escórias podem ser geradas, a LD, a BOF e EAF (ROHDE, 2002). Produz-se da ordem de 110 kg de escória de aciaria LD por tonelada de aço, 70 kg de escória de aciaria a arco elétrico e 40 kg de escória de arco elétrico (ROHDE, 2002; ZETTERMANN, 2001).

A escória de aciaria é bastante utilizada em camadas de base e sub-base de estradas. Possui densidade, dureza e resistência elevadas e, por isso, também é usada como agregado para concreto asfáltico. Além disso, o seu alto ângulo de atrito, alta resistência e densidade fazem com que este material seja também usado em aterros e melhoramento de solos (Nippon Slag Association, 2016).

Em algumas indústrias, antes do refino, o ferro-gusa passa por um processo de dessulfuração no *Kambara Reactor* (KR), produzindo o coproduto KR. É importante ressaltar que as etapas descritas não são fixas, variando segundo a empresa e o aço que se deseja produzir. Estima-se que sejam produzidos de 7 a 9 kg do coproduto KR por tonelada de ferro-gusa tratado (SHENG *et al.*, 2014). A Figura 2-1 resume todo o processo de produção do aço, identificando a fase de produção do coproduto KR.

pavimentação de vias e outras aplicações, em substituição a parte das matérias primas naturais. Contribuem para reduzir, assim, a demanda por recursos naturais não renováveis. Segundo o IAB (2016), atualmente 99% da escória de alto-forno produzida é vendida para a indústria de cimento. As escórias de aciaria apresentam mais diversidade de aplicação, sendo empregadas principalmente em camadas rodoviárias e em aterros.

A principal limitação quanto ao uso da escória de aciaria para a pavimentação é a instabilidade volumétrica causada principalmente pela presença de cal livre (CaO) e periclásio (MgO). Além disso, as partículas de ferro metálico (Fe^0) presentes sofrem reações de corrosão e oxidação, aumentando ainda mais a instabilidade volumétrica do material. Conforme mostra a Tabela 2-1, alguns compostos formados pelas substâncias instáveis podem produzir variações volumétricas superiores a 300%. Procedimentos têm sido usados para minimizar o efeito expansivo da escória de aciaria, submetendo-a a um período de cura em pátio e regando-a com água natural ou aquecida. Porém, esse processo de estabilização exige no mínimo seis meses para hidratação dos elementos instáveis. Para acelerar o tratamento, sugere-se reduzir a granulometria do material, aumentando assim a superfície de contato com a água e, portanto, a rapidez das reações de hidratação (ROHDE, 2002).

Tabela 2-1 – Compostos instáveis e variação volumétrica

Composto	Fórmula química	Nome	Densidade (g/cm^3)	Variação de volume (%)
1	MgO	Periclásio	3,58	*
2	Mg (OH) ₂	Brucita	2,36	119,5
3	CaO	Cal	3,38	**
4	Ca(OH) ₂	Portlandita	2,24	99,4
5	CaCO ₃	Calcita	2,93	105,9
		Aragonita	2,71	122,6
6	CaCO ₃ .MgCO ₃	Dolomita	2,87	287,3
7	Fe^0	Ferro (metálico)	7,86	***
8	FeO	Wüstita	5,70	77,4
9	Fe ₂ O ₃	Hematita	5,24	328,7
10	Fe(OH) ₂	Hidróxido	3,40	271,7
11	FeO(OH)	Goetita	4,28	192,0

* Variação de volume em relação ao MgO

** Variação de volume em relação ao CaO

*** Variação de volume em relação ao Fe^0

Fonte: Rodrigues (2007)

Raposo (2005) avaliou a expansão de escória de aciaria LD por meio de diferentes ensaios, obtendo valores acima dos exigidos pela Norma EM 262 (DNER, 1994) e, apontando assim, a importância do pré-tratamento para redução dos níveis de expansão deste material. Apesar dos elevados resultados de expansão obtidos por

Raposo (2005), Diniz *et al.* (2017) mostraram que é possível utilizar a escória de aciaria LD em mistura para bases de pavimentos. Seus ensaios obtiveram valores abaixo dos exigidos para camadas de base (0,5%) para diversas misturas de solo incorporado com escória de aciaria LD tratada. A escória utilizada por Diniz *et al.* (2017) foi submetida à separação metálica e a fração não metálica foi posteriormente envelhecida para neutralizar o efeito da cal livre e do periclásio. Além da expansão, Diniz *et al.* (2017) também avaliaram características mecânicas e obtiveram melhoria na capacidade de suporte e resistência não drenada do solo.

Apesar de certa resistência inicial em razão de sua instabilidade volumétrica, o uso das escórias de aciaria em camadas de pavimentos rodoviários sofreu um ligeiro aumento no último ano (Instituto do Aço Brasil, 2016). Diversas pesquisas têm obtido êxito em mostrar o potencial do uso desse material para pavimentação, seja como agregado (TARAZONA, 2016; SOUZA, 2007; AUTELITANO e GIULIANI, 2016; ROHDE, 2002) ou estabilizante químico (DINIZ *et al.*, 2017; ORTEGA-LÓPEZ *et al.*, 2004).

A elaboração da NBR 16364 (ABNT, 2015) e a reclassificação fiscal da escória de aciaria na Nomenclatura Comum do Mercosul 2517.20 como macadame foram importantes incentivos ao uso do material (IAB, 2016). Na Europa, tanto escórias de aciaria quanto as de alto-forno foram retiradas em 1995 do Catálogo de Resíduos da União Europeia, bem como da lista de *Organisation for Economic Co-operation and Development* (OECD) (MOTZ e GEISELER, 2001). A Norma EM 262 (DNER, 1994) trata dos requisitos gerais e específicos do uso do material em camadas de pavimentos rodoviários (Quadro 2-2).

Quadro 2-2 – Especificações técnicas mínimas para o uso de escórias de aciaria em pavimento rodoviários

Parâmetro	Limites exigidos
Expansão PTM	3%
Granulometria	40% passante 1,27mm (1/2") 60% entre 1,27mm e 5,08mm (2")
Absorção de água	1 a 2%
Massa específica	3g/cm ³ a 3,5g/cm ³
Massa unitária	1,5kg/dm ³ a 1,7 kg/dm ³
Desgaste por abrasão Los Angeles	25%
Durabilidade ao sulfato de sódio (cinco ciclos)	0 a 5%

Fonte: Autora

Além das exigências elencadas no Quadro 2-2, o material não deve apresentar impurezas orgânicas ou qualquer tipo de contaminação por escórias de alto-forno, solos e outros materiais que venham a causar prejuízo às características exigidas

pelo projeto. A Norma PRO 263 (DNER, 1994) reitera que, desde que a escória atenda aos requisitos do Quadro 2-2, o material pode ser empregado em camadas de base, sub-base e misturas betuminosas.

O reaproveitamento de resíduos pode ser feito segundo três enfoques: a recuperação (extração e remoção de algumas substâncias presentes nos resíduos), reutilização (reaplicação de um resíduo, sem que passe por processos de transformação) e reciclagem (reaproveitamento de um resíduo, após este ter sido submetido a algum tipo transformação) (CONAMA, 2002). Seja qual for o tipo de reaproveitamento do material, é essencial classificá-lo quanto a critérios de periculosidade. A NBR 10004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública como perigosos (Classe I) ou não perigosos (Classe II) e, no caso dos não perigosos, ainda em inertes (Classe II-B) ou não (Classe II-A).

A classificação inicia com a identificação do processo ou atividade que deu origem ao resíduo, seus constituintes e características, e a comparação desses constituintes com os de outros resíduos que já tiveram seu impacto à saúde e ao meio ambiente avaliado. Nessa etapa, verificam-se aspectos de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, que permitem classificá-lo como perigoso ou não. Em seguida, é realizada a classificação como inerte ou não. Para isso, utiliza-se resultados de ensaios de lixiviação e solubilização, preconizados pela NBR 10005 (ABNT, 2004) e NBR 10006 (ABNT, 2004), respectivamente. Diversos pesquisadores classificaram escórias de aciaria, concluindo tratar-se de material não-perigoso não inerte (Quadro 2-3).

Quadro 2-3 – Classificação ambiental das escórias de aciaria e de dessulfuração KR

Classificação	Tipo de escória	Limite não atendido para Classe II-B
Masuro (2001)	EAF	Alumínio, fenóis, fluoretos
Mâncio (2001)	EAF	Fluoretos
Gumieri (2002)	LD	Alumínio, dureza, fenóis, fluoretos
Raposo (2005)	LD	Bário e mercúrio
Gonçalves (2016)	KR	Fenóis

Fonte: Autora

O resultado mais recente, obtido por Gonçalves (2016), apresentou o teor de fenóis de 0,02 mg/L, superior ao limite de 0,01mg/L. É importante, no entanto, apontar que esse componente não faz parte de compostos produzidos ao longo da fabricação do aço e sua presença pode estar ligada à contaminação durante a amostragem ou transporte. Além disso, a presença de fenóis, vai de encontro às condições do

processo de produção do aço, na qual os materiais são submetidos a elevadas temperaturas. O material atende aos demais parâmetros e encaixa-se, mais adequadamente, à Classe II-B.

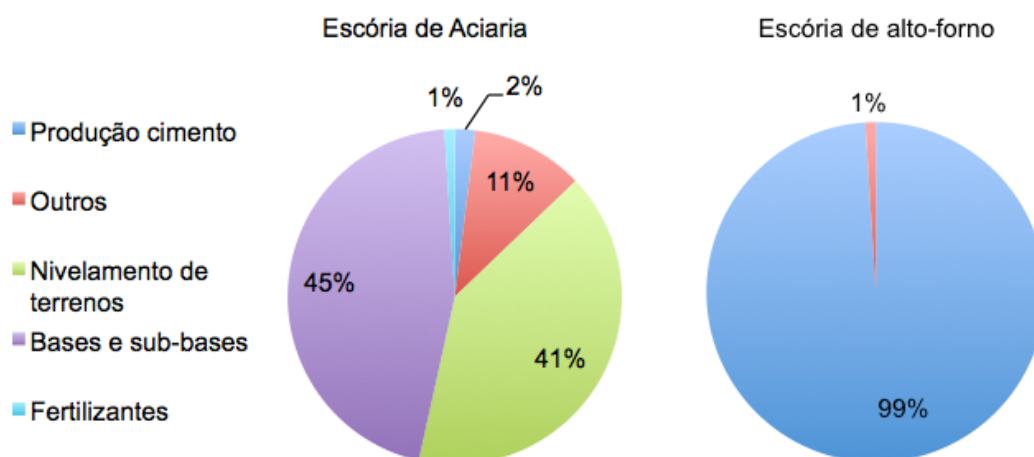
Em Nota Técnica, a ABNT (2017) esclarece que a NBR 10004 (ABNT, 2004), que baseia-se em critérios de potabilidade, não possui como objetivo permitir ou não a utilização de resíduos sólidos. Seu foco principal é classificar o material, a fim de instruir setores que os gerenciam. É importante fazer essa distinção, já que os cuidados relativos ao manuseio, transporte e armazenamento de um resíduo são norteados pela sua classificação, porém, sua utilização é função de vários fatores (ambientais, tecnológicos e econômicos). Rohde (2002) também ressalta que os ensaios ambientais reproduzem condições extremas, muito diferentes das encontradas durante o uso de materiais nos pavimentos.

A fim de mostrar a incoerência que representaria adotar a classificação NBR 10004 (2004) como limitante ao uso de um resíduo, Diniz *et al.* (2017) submeteram misturas de solo-cimento, solo-cal e solo-escória aos ensaios de lixiviação concluindo que todas as misturas são classificadas com não inertes. Portanto, caso esse fosse critério suficiente para limitar o uso de um material, solo-cimento e solo-cal deveriam igualmente ser considerados inadequados.

Comparando o teor de fenóis obtido por Gonçalves (2016) (0,02 mg/L) com outros valores de referência na legislação como a Resolução CONAMA nº 430, que dispõe sobre padrões de lançamento de efluentes e impõe o limite de 0,5 mg/L; e a Resolução CONAMA nº 420, que apresenta valores orientadores para solo e águas subterrâneas e limita o valor a 0,14 mg/L, o coproduto KR atendem confortavelmente aos limites.

A Figura 2-3 exibe as atuais destinações da escória de alto-forno e de aciaria no Brasil. A escória de alto-forno é quase integralmente aplicada na produção de cimento, enquanto 11% da escória de aciaria ainda não tem destinação específica. A maior parte da escória de aciaria é empregada em camadas de base e sub-base. Na Alemanha, extensas pesquisas, normas e regulamentações sobre o material fizeram com que 97% das escórias de aciaria, já em 1997, possuísem aplicação, seja como agregados na pavimentação ou em outros tipos de obras de engenharia.

Figura 2-3 – Destinação dos coprodutos de aciaria produzidos no Brasil



Fonte: Adaptado de IAB (2016, sem paginação)

2.2 COPRODUTO KR

Em resposta às exigências cada vez mais elevadas no controle dos teores de enxofre na produção do aço, o processo de dessulfuração passou a ser, também, realizado antes da redução do ferro-gusa. A dessulfuração do ferro-gusa, antes da fase redução na aciaria, é uma forma de reduzir a presença de enxofre no convertedor, melhorando a qualidade e eficiência do processo (KIRMSE, 2006).

Os requisitos de qualidade para diversas aplicações dos aços têm implicado em teores de enxofre abaixo de 50 ppm e, por questões de mercado, praticamente todas as empresas buscam atender esse valor. Produtos de aço com baixos teores de enxofre possuem melhores valores de mercado devido aos ganhos de qualidades nos requisitos de resistência mecânica na aplicação (SHENG, 2014).

A dessulfuração do gusa líquido pode ser realizada após sua saída dos altos-fornos, no próprio vasilhame de transporte (carro-torpedo) ou em panela de transferência, antes do carregamento nos convertedores. A prática de dessulfuração em panela tem sido muito difundida e o método com o uso do reator Kambara tem se destacado pela eficiência e baixo custo de operação, sendo, por esse motivo, bastante difundido no Japão e na China, maior produtor mundial de aço. Como resultado, o volume de coproduto KR produzido cresce, sendo estocado em pátios ou descartado em aterros sanitários ou ilegalmente no meio ambiente (SHENG, 2014).

Ao contrário do processo de dessulfuração em carro-torpedo, no processo KR as zonas mortas, isto é, zonas não antes atingidas pelo processo de dessulfuração, são substancialmente diminuídas e a área da interface de reação maximizada, aumentando a eficiência de utilização do agente dessulfurante (KIRMSE, 2006). Durante o processo, o gusa é submetido a forte agitação pelo rotor (impeller), feito de material refratário. Sob agitação, agentes dessulfurantes, como carbureto de cálcio e cal são adicionados através de calha e após 10 ou 15 minutos de tratamento, é possível obter taxas de dessulfuração de até 90% (LEMOS, 2011; SOUZA, 2007).

Na literatura, ainda há poucas publicações sobre o coproduto, sobretudo no que tange a sua utilização na pavimentação. Tong *et al.* (2016) o caracterizaram com o objetivo de promover sua valorização e mostrar seu potencial para a reutilização. Sheng *et al.* (2014) realizaram ensaio de caracterização (DRX, MEV, granulometria) para sua aplicação como agente neutralizador básico em águas ácidas resultantes de mineração. Kuo (2015) o utilizou em substituição ao agregado natural em concretos para pavimentos rígidos obtendo resultados adequados, porém, ressaltou que o período de cura necessário foi prolongado em 14 dias.

Gonçalves (2016) avaliou o potencial de utilização dos coprodutos de aciaria LD e KR, concluindo que o coproduto KR é mais vantajoso. Isso porque proporciona melhoria nas características de suporte e de resistência mecânica nas amostras de solo e apresenta menor potencial expansivo que o coproduto de aciaria LD. As demais publicações encontradas tratam do processo de dessulfuração em si, das técnicas e reagentes usados e não do coproduto produzido e de sua reutilização (LEMOS, 2011; KIRMSE, 2006; HUANG e HUANG, 2014).

2.3 EXPANSÃO DE COPRODUTOS DE ACIARIA

Sabe-se que a expansão é um parâmetro sensível no uso de agregados siderúrgicos. O potencial de expansibilidade de escórias de aciaria dentro dos padrões é uma das condições básicas para sua utilização em camadas de pavimento. Existem diversos ensaios para determinação da expansibilidade de coprodutos de aciaria. Entre eles, destaca-se o *Pennsylvania Testing Method* (PTM) - 130/78, *Japanese Industrial Standard* (JIS) A 5015/92 e ASTM D 4792/00,

desenvolvidos nos Estados Unidos e no Japão. Todos os métodos avaliam a expansão da escória a partir de corpos-de-prova moldados e imersos em água quente.

Adicionalmente, pode-se citar os métodos com agulhas de Le Chatelier (NBR 11582, ABNT, 1991) e autoclave (ASTM C 151, 1993) que, apesar de serem ensaios para determinação da expansibilidade acelerada do cimento Portland – hidratação acelerada do óxido de cálcio e de magnésio –, são também usados para escórias de aciaria. O Quadro 2-4 apresenta as principais diferenças nas condições dos ensaios com material compactado, além dos seus respectivos limites de expansibilidade.

Quadro 2-4 – Comparação entre procedimentos dos diferentes métodos de ensaios de expansibilidade de escórias de aciaria

Método	Temperatura (°C)	Tempo (dias)	Limite (%)
JIS A 5015 (1992)	80	10	2,0
ASTM D 4792 (2000)	70	7 ou mais	0,5
PTM-130 (1978)	71	14	3,0

Fonte: Autora

O método para determinação da expansibilidade da escória é uma questão muito debatida. Motz e Geiseler (2001) criticam o método de autoclave por reproduzir as condições de temperatura e pressão muito irrealistas (temperatura de 215°C e pressão de 21 bar). Para Rodrigues (2007), ensaio de agulhas de *Le Chatelier* produz uma grande variabilidade de resultados, por não indicar proporções específicas para pasta de cimento, escória e água. Os ensaios baseados na compactação, de forma geral, são criticados por apresentarem grande dispersão de resultados, devido às condições experimentais e à heterogeneidade do material.

Por isso, no sentido determinar de forma mais rápida e eficiente a expansibilidade das escórias, o ensaio método *Steam Test* foi criado na Alemanha. Nesse ensaio, ao contrário dos métodos com imersão, a hidratação da escória ocorre em câmara úmida, na qual, as moléculas de vapor penetravam na amostra mais rapidamente, resultando, assim, em valores de expansão mais elevados e mais parecidos aos observados em campo (MOTZ e GEISEILER, 2001; RODRIGUES, 2007; RAPOSO, 2005). O método americano PTM foi adaptado pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DER-MG) e é hoje preconizado pela Norma ME 113 (DNIT, 2009). Tal método, mais popular no Brasil, exige o mesmo aparato usado no ensaio de ISC, exceto pelo banho-maria elétrico, mostrado no Figura 2-4. Apesar da coerência comprovada entre o resultado do ensaio e o de campo, o *Steam Test* exige equipamentos específicos e não possui norma nacional.

Figura 2-4 – Equipamento de banho-maria elétrico utilizado para determinação da expansão das amostras: (a) sem tampa com 10 corpos-de-prova durante a realização do ensaio (b) com tampa.



(a)

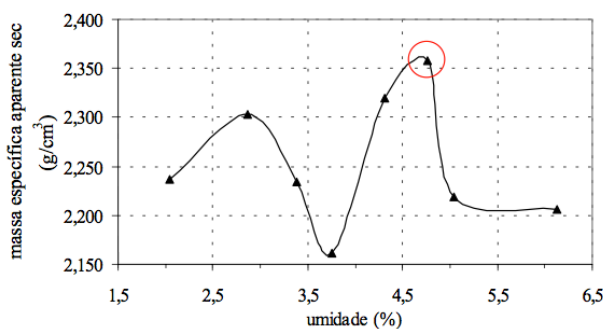


(b)

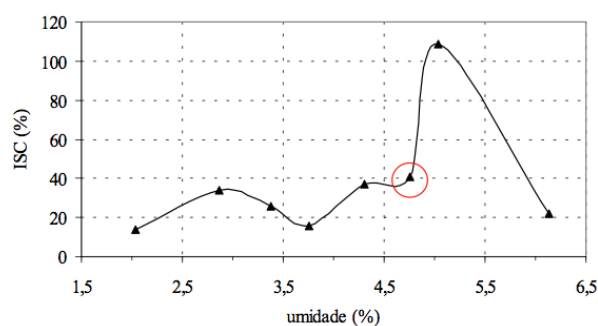
Fonte: Raposo (2005, p. 82)

Rohde (2002) realizou ensaio de compactação com energia do Proctor modificado em amostra escória de aciaria EAF, obtendo curvas de compactação com comportamentos peculiares. Dois picos foram observados para curva de compactação; a umidade ótima encontrada foi da ordem de 4,8%, correspondente à massa específica aparente máxima. O comportamento do ISC também foi atípico, já que seu valor máximo não correspondia, nem de forma aproximada, à umidade ótima. Rohde (2002) realizou igualmente o ensaio de compactação com escória LD com granulometria corrigida, no intuito de obter resultados tradicionais, porém não houve sucesso, na medida em que os resultados não apresentavam um padrão fixo. A Figura 2-5 mostra o resultado encontrado para escória EAF sem correção granulométrica.

Figura 2-5 – Resultados de ensaios de escória de aciaria EAF. (a) Curva de compactação de dois picos. (b) Comportamento do ISC em função da umidade



(a)



(b)

Fonte: Rohde (2002, p. 49 e 50)

Para Machado (2001) e Raposo (2005), que analisaram curvas de compactação de escória, o material não apresenta umidade ótima como é o caso para maior parte dos solos naturais. Machado (2001) acredita que o comportamento da escória assemelha-se a uma areia limpa, sem grandes variações na massa específica aparente e sem umidade ótima bem definida. Raposo (2005) avaliou a influência da umidade de compactação no método PTM e concluiu que não existe correlação entre a umidade e a expansão. Isso sugere certa incoerência das normas que baseiam-se na determinação da expansibilidade de amostra compactada na umidade ótima. Esse fato motivou o autor a realizar seus ensaios com o material seco ao ar (umidade da ordem de 2%).

2.4 PAVIMENTAÇÃO

O transporte viário, principal meio de escoamento de carga e transporte de passageiros do país, é constituído por 1,72 bilhão de quilômetros, 80% dos quais se encontram não-pavimentados. De forma geral, os usuários classificam cerca de 60% das rodovias como de regular a péssima (CNT, 2016). Dada a extensão continental do país e a situação deficitária de sua malha rodoviária, pavimentar e melhorar as condições das vias brasileiras exige um enorme volume de recursos naturais e financeiros. Em vista da urgência e importância do quadro, é necessário por em prática os avanços alcançados nas últimas décadas sobre o comportamento dos materiais e sobre novos modelos de dimensionamento de pavimentos. Dessa forma, será possível construir pavimentos mais duráveis e de melhor desempenho com menor custo e tempo possível (COUTINHO, 2011).

2.4.1 O pavimento e seus materiais

O pavimento de uma rodovia é a superestrutura composta por finas camadas com diferentes resistências e deformabilidades assentes sobre o sub-leito - terreno de fundação do pavimento (DNIT, 2006). Trata-se de uma estrutura com alto grau de complexidade destinada técnica e economicamente a suportar as cargas impostas pelo tráfego. De forma geral, os pavimentos rodoviários podem ser classificados em

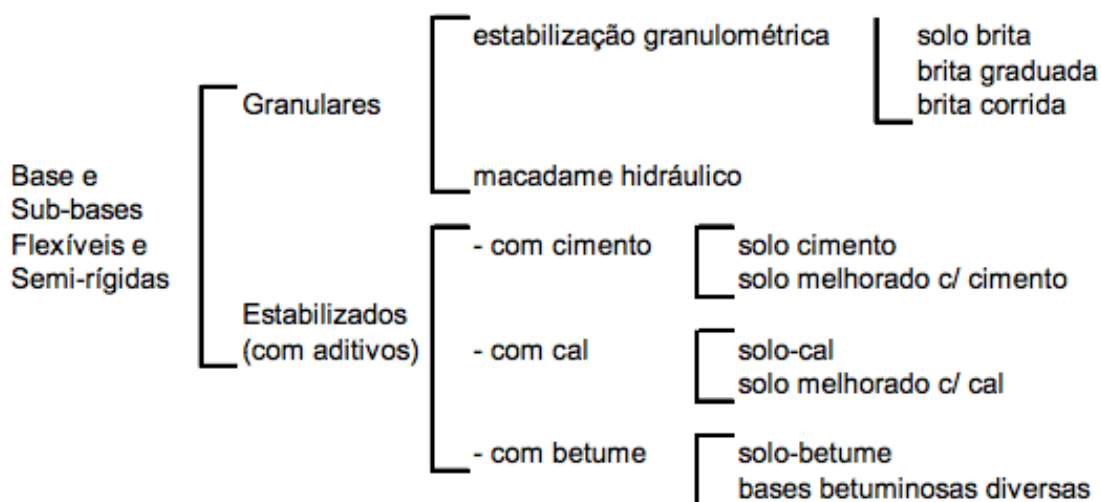
duas categorias: flexíveis (pavimentos asfálticos) ou rígidos (pavimentos de concreto de cimento Portland) (BERNUCCI *et al.* 2010).

Nos pavimentos flexíveis, estão, em geral, presentes camadas de revestimento asfáltico, base, sub-base e o reforço do sub-leito. O revestimento asfáltico atua como camada impermeabilizante e melhora as condições de rolamento, além de absorver parte dos esforços e transmiti-los de forma atenuada para as camadas adjacentes. A base, sub-base e reforço do sub-leito desempenham grande importância estrutural absorvendo esforços do tráfego e protegendo o sub-leito.

O pavimento rígido é constituído por placas de concreto de cimento Portland assentes sobre camada de sub-base granular ou cimentada. Quando a sub-base for cimentada, pode, adicionalmente, haver uma camada inferior de material granular. Os esforços provenientes do tráfego são absorvidos principalmente pelas placas de concreto de cimento Portland, resultando em pressões verticais bem distribuídas e aliviadas sobre a camada de sub-base ou sobre a camada de fundação. É usual designar-se a subcamada desse pavimento como sub-base, uma vez que a qualidade do material dessa camada equivale à sub-base de pavimentos asfálticos (BERNUCCI *et al.* 2010).

Adicionalmente, pode-se citar também outro tipo de pavimento: o semirrígido. Ele representa a situação intermediária entre os pavimentos rígidos e flexíveis. É constituído por revestimento asfáltico e camadas de base ou sub-base de material estabilizado com adição de cimento. O pavimento semirrígido é conhecido como pavimento do tipo direto quando a camada de revestimento asfáltico é executada sobre camada de base cimentada; e do tipo indireto ou invertido quando ela posiciona-se sobre camada de base granular e sub-base cimentada. Os materiais convencionalmente usados em bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas são mostrados na Figura 2-6.

Figura 2-6 – Materiais tradicionalmente usados em camadas de pavimentos



Fonte: DNIT (2006, p. 96)

O pavimento de concreto no Brasil era usual até o início dos anos 50, porém, com o aumento da demanda nacional por cimento no setor da construção civil, foi necessário buscar outras alternativas. O barateamento dos derivados de petróleo e a importação de técnicas americanas de construção, ocorridos na mesma época, contribuíram para a popularização do pavimento flexível (ABCP, 2009).

Os pavimentos com base ou sub-base de solo-cimento são empregados no Brasil desde 1939, quando foi construída a estrada Caxambu-Areias. Desde então, foram executados no país mais de 25.000 km com essa solução, um marco mundial (ABCP, s.d.). O solo-cimento é indicado como base e sub-base de pavimentos flexíveis e também sub-base de pavimentos de concreto. No campo rodoviário, serve também como contenção de encostas, usando-se solos do próprio leito da futura base, misturados com cimento no local ou usando-se solos selecionados, de jazida, misturados em usina central ou no próprio campo. O baixo custo inicial e a alta durabilidade são dois pontos fortes dessa alternativa (ABCP, 2009).

2.4.2 Estabilização e melhoramento de solos

Segundo Lambe e Whitman (1969), técnicas de melhoramento do solo tornam-se com o passar do tempo mais factíveis e atrativas como solução para solos inadequados encontrados no local da obra. Essas técnicas de melhoramento visam mudar parâmetros como: resistência, compressibilidade, permeabilidade.

Palmeira (1990) define a estabilização como sendo a técnica de melhorar as características de uma massa de solo por modificações na sua própria estrutura, a fim de proporcionar melhorias no comportamento dos solos aplicadas em obras geotécnicas. Segundo Batalione (2007), trata-se de uma técnica milenar, iniciada com o uso de misturas de areia em argilas, como solução para vias de transporte. Na Europa, técnicas de estabilização de solos moles não-orgânicos com colunas de cal e cimento têm sido usadas na Suécia e Finlândia há mais de 20 anos, para redução de recalques e estabilização de aterros (EUROSOILSLAB, 2002).

As técnicas de estabilização dos solos dividem-se em dois grupos. O primeiro grupo utiliza meios mecânicos tal como a correção da granulometria, por meio da adição ou subtração de certas quantidades das frações constituintes. O segundo, por sua vez, emprega meios químicos utilizando aditivos orgânicos ou inorgânicos, tais como os materiais betuminosos, resinas, cal, cimento e outros. Em projetos modernos, observa-se também o uso de técnicas com aplicação de geossintéticos, fibras naturais e artificiais. A técnica adotada para estabilizar um solo deve levar em consideração fatores econômicos, as finalidades do pavimento e as características dos materiais (BENTO, 2006).

No solo natural, é frequentemente observada não só a ausência de certa faixa de graduação ou outros tipos de limitação. Essas deficiências podem ser corrigidas com a estabilização granulométrica por incorporação de finos plásticos para conferir coesão a um material granular ou vice-versa (INGLES e METCALF, 1972, apud EMMERT, 2010). No Brasil, o início da utilização dessa técnica na pavimentação ocorreu no estado de São Paulo a partir da década de 60 com misturas solo-agregado. Durante o período, a experiência estrangeira foi absorvida pelos técnicos nacionais, permitindo avanços no desenvolvimento da pavimentação rodoviária. Nesta época, foram usados os materiais locais: pedregulhos de cava ou de rio, pedregulhos de granitos alterados (salmorão), com finalidade corretiva, a fim de atender aos requisitos exigidos pelos critérios das camadas aos quais se destinavam (SERRA, 1987).

Outra forma de promover a melhoria das características do solo é por via química. Estabilizante químico é todo material que, ao ser adicionado ao solo, reage como agente impermeabilizante, dispersante ou agregante dos materiais presentes, provocando mudanças nas suas propriedades físicas e químicas (LAMBE e

MICHAELS, 1954, apud MACHADO *et al.* 2003). Gidigas (1976, apud MACHADO *et al.*, 2003) aponta os fatores que influenciam na estabilização de solos:

- solo: propriedades físicas, químicas e físico-químicas, características da mistura e umidade após a mistura;
- material estabilizante: quantidade e propriedades;
- mistura: tipo, método e temperatura; e
- compactação e cura do produto estabilizante: umidade ótima, método e grau de compactação e cura.

Entre as variáveis envolvidas, destacam-se o tipo de solo usado (e seus materiais constituintes), as proporções da mistura, o teor de água e o grau de compactação. O uso de técnicas de estabilização é bastante antigo. Bento (2006) cita passagem na história da humanidade em quem os povos romanos utilizaram a cal na construção da via Apia, ano 312 a.C.

Muitos agentes químicos podem ser empregados, como cloreto de sódio, cloreto de cálcio, cimento Portland, cal, entre outros. Cloreto de sódio e cloreto de cálcio são indicados quando se deseja manter a umidade do solo, agindo no controle da poeira em estradas rurais. O cimento Portland e cimento asfáltico são indicado para promover a união das partículas do solo. O cimento adicionado ao solo na presença de água gera concreto, portanto, a mistura de solo-cimento produz material de resistência superior à do solo natural, ainda que muito inferior à do concreto. Solo-cimento é indicado para estradas com baixo nível de tráfego. Cal e cloreto de cálcio são mais eficientes na redução da plasticidade e controle da expansibilidade de solos. No mercado, existem ainda outras opções de estabilizantes e a escolha do tipo depende de fatores técnicos e econômicos, inerentes a cada projeto (LIU e EVETT, 2004).

O cimento Portland é aplicado desde o século XIX. As misturas de solo com cimento são consideradas de uso tradicional e escopo de diversas normas nacionais. Como agente estabilizante, popularizou-se no começo do século XX, por misturas de solo e materiais tradicionais para pavimentação nos Estados Unidos (ZHU e LIU, 2008).

Entre as técnicas de melhoramento de solo com uso do cimento, podem-se distinguir dois tipos: o solo melhorado ou tratado com cimento e o solo-cimento. Ambas têm

como objetivo estabilizar quimicamente o solo a fim de obter certas características de resistência e durabilidade requeridas para determinado projeto. A diferença entre as técnicas pode ser feita segundo dois critérios: o teor de cimento empregado e a resistência à compressão aos sete dias.

A Norma ES 11 (DER-PR, 2005) distingue solo tratado com cimento de solo-cimento a partir da resistência à compressão simples da mistura aos sete dias de idade. Segundo a norma, o solo tratado com cimento apresenta uma resistência entre 1,20 MPa e 2,10 MPa, enquanto solo-cimento deve apresentar resistência superior a 2,10MPa.

Quando se faz necessária uma melhoria significativa da resistência do solo, empregam-se percentuais que variam de 5% a 10% em massa. Para o solo melhorado com cimento, são empregados menores teores (geralmente de 2% a 4%), de modo a obter uma melhoria apenas parcial das características dos solos - sobretudo na trabalhabilidade, sem que haja grandes incrementos na resistência.

Praticamente qualquer tipo de solo pode ser utilizado, entretanto são mais indicados solos com areia entre 45% e 50% e com ausência de matéria orgânica (Portland Cement Association, 1969, apud SOUZA, 2007). Sabe-se que a matéria orgânica retarda a hidratação do cimento, por absorver os íons de cálcio liberados durante a hidratação e, então, compromete as reações secundárias do cálcio liberado com o dióxido de silício (SiO_2) e a alumina (Al_2O_3) do solo, também responsáveis pelo ganho de resistência (INGLES e METCALF, 1972, apud FOPPA, 2005). A NBR 12253 (ABNT, 2012) recomenda o uso de solo com 100% de material passante na peneira de abertura 76 mm e no máximo 45% de material retido na de abertura de 4,8 mm. A Norma ES 143 (DNIT, 2010) especifica a granulometria e limites de consistência do solo usado em misturas de solo-cimento para pavimentação (Quadro 2-5).

Quadro 2-5 – Solo para misturas de solo-cimento

Parâmetro	Limites (%)
Peneira 2 2/1	100
Peneira Nº 4	50 a 100
Peneira Nº 40	15 a 100
Peneira Nº 200	5 a 35
Limite de Liquidez	40
Índice de Plasticidade	18

Fonte: Adaptado de DNIT (2010)

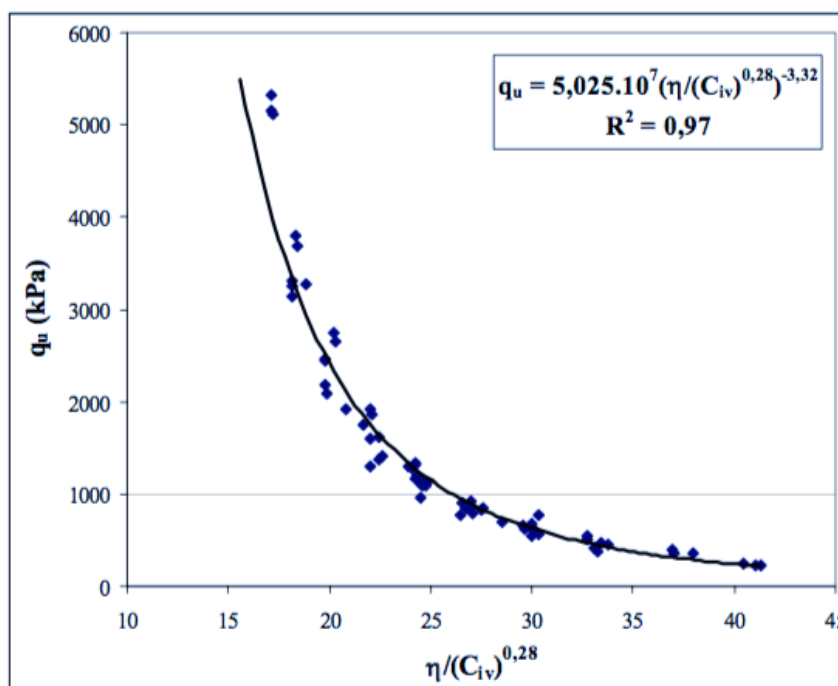
De acordo com o Centro de Pesquisa e Desenvolvimento - CEPED (1999), a quantidade de cimento a ser utilizada na dosagem deve ser determinada em função das características do solo, do teor de umidade e da densidade a ser obtida na compactação. A NBR 12253 (ABNT, 2012) sugere teores de adição do cimento Portland, em dosagens de solo-cimento para pavimentação, a partir da classificação do solo.

Tabela 2-2 – Teor de cimento segundo tipo de solo	
Classificação do solo	Teor de cimento em massa (%)
A 1-a	5
A 1-b	6
A2	7
A3	9
A4	10

Fonte: ABNT (1992)

Recentes pesquisas na área de estabilização de solos têm buscado correlacionar os diversos parâmetros envolvidos na técnica (umidade, energia de moldagem, dosagem, entre outros) que determinam a resistência da mistura. Foppa (2005), Consoli *et al.* (2007) e Marques *et al.* (2016) sugerem que a resistência à compressão de amostras de solo-cimento pode ser expressa com alto grau de precisão em função da relação entre a porosidade (η) e o teor volumétrico de cimento em porcentagem do volume total. (C_{iv}). Essa interpretação dos dados de resistência permite não apenas um melhor entendimento do comportamento do solo, mas também garante mais liberdade e confiabilidade aos projetistas ao determinar a dosagem ideal de estabilizante. A Figura 2-7 mostra os resultados dessa interpretação proposta com a relação $\eta/C_{iv}^{0,28}$, a qual fornece um coeficiente de determinação de 0,97.

Figura 2-7 – Resistência à compressão do solo como função da relação vazios/cimento expresso em termo da porosidade e do teor volumétrico do cimento



Fonte: Foppa (2005, p. 126)

É importante precisar que, segundo Foppa (2005), os resultados obtidos correspondem a amostras moldadas em um mesmo teor de umidade. Isso porque a variação do teor de umidade possui grande influência na resistência à compressão. Mesmo mantendo constante a massa específica aparente seca, a mudança de umidade gera diferentes arranjos estruturais nas partículas.

Além do uso do cimento e cal, já bastante consolidado, há uma crescente tendência de substituição de estabilizantes tradicionais por materiais alternativos, sejam eles naturais ou subprodutos de diversas cadeias, por razões econômicas, ambientais ou relacionadas a características de engenharia (OBUZOR *et al.*, 2011). Aos poucos, outros materiais passam a ser usados como agentes estabilizantes. Na Suécia, misturas de cal, cimento, cinza volante, escória de alto-forno em diferentes proporções e combinações com a gipsita, sílica ativa e cloreto de cálcio, têm sido analisadas. Avalia-se a variação da resistência obtida com cada agente químico. Resultados mostram que não existe agente universalmente ideal para todos os tipos de solo (ÄHNBERG *et al.*, 2003).

Os diferentes tipos de escórias de aciaria têm sido largamente estudados como estabilizante químicos para solos (DINIZ *et al.*, 2017). Quanto ao coproduto KR, são

escassos os estudos acerca de sua aplicação, sobretudo na pavimentação. Na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), pesquisas recentes têm analisado sua aplicação como agente estabilizante para solos coesivos de baixa consistência (TESSARI *et al.*, 2016; MORATTI e SCOTÁ, 2016) e para camadas de pavimento (GONÇALVES, 2016; ANDRADE *et al.*, 2017).

2.4.3 Mecanismos químicos envolvidos na estabilização

Os processos que promovem estabilização química do solo variam segundo o agente estabilizador empregado, o tipo de solo e as condições sob as quais eles estão submetidos.

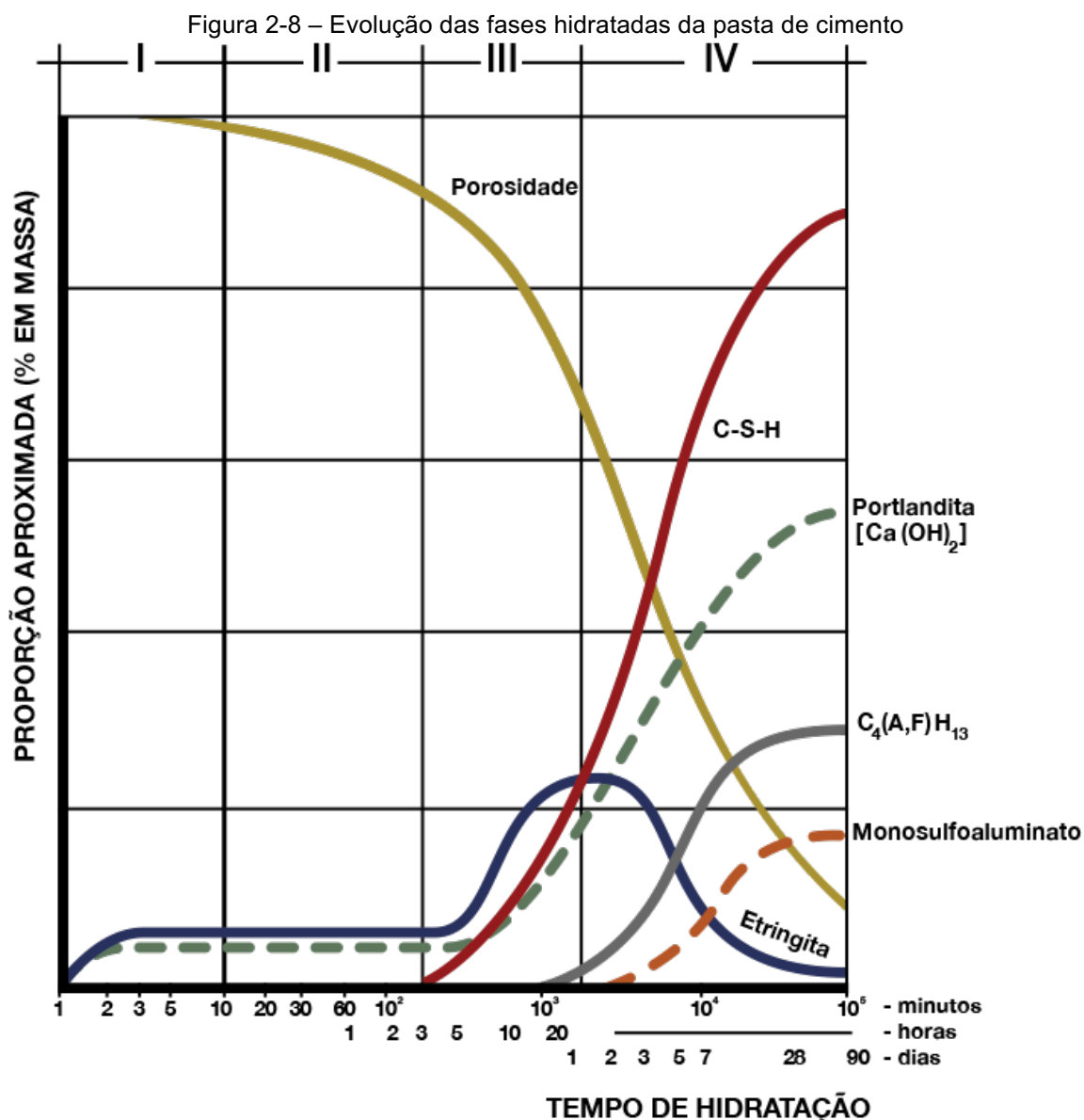
No caso do cimento Portland - composto principalmente por tri-cálcico C_3S ($3CaO.SiO_2$) e o silicato bi-cálcico C_2S ($2CaO.SiO_2$) - as reações que promovem o ganho de resistência são as ditas reações primárias e secundárias. Essas reações geram o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e aluminato de cálcio hidratado (C-A-H), compostos responsáveis pela resistência.



As reações primárias advindas da interação do cimento com água, são a hidratação (Equação 2-1) e hidrólise (Equação 2-2). Nessa fase, o C-S-H e a portlandita ($Ca(OH)_2$) são formados pela hidratação do cimento, elevando o pH para cerca de 12. A hidratação do cimento também gera o trissulfato hidratado, C_6ASH_{32} , conhecido como cristais prismáticos de etringita. A etringita transforma-se eventualmente em monossulfato hidratado, C_4ASH_{18} , que apresenta-se na forma de cristais de placas hexagonais (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Inicialmente, os produtos gerados são gelatinosos e amorfos. Com o passar do tempo ocorre a cristalização dos minerais e enrijecimento dos compostos, aumentando a resistência. As reações secundárias ocorrem da interação do cálcio, liberado pelas reações primárias, com a sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) presentes no

solo, formando novamente C-S-H e agora também C-A-H (Equação 2-3 e Equação 2-4).



Fonte: Locher *et al.* (1976, apud Centurione *et al.*, 2003a, p. 2097)

Conforme mostrado na Figura 2-8, entre os compostos formados no período inicial de hidratação do cimento, a etringita gerada cristaliza-se à temperatura ambiente, contribuindo para o enrijecimento da pasta. Esse composto, ao cristalizar-se, sofre aumento volumétrico, que, caso ocorra de forma tardia, é muitas vezes associado à formação de trincas no concreto endurecido. Todavia, grande parte dos trabalhos publicados indica que os processos químicos gerados a partir da etringita não são responsáveis pelos fenômenos de deterioração estrutural. Quando há pequenos espaços disponíveis no interior do concreto, a etringita ocorre sob a forma de cristais delgados e curtos. No entanto, quando ocorrem poros, os cristais são mais

desenvolvidos dando origem a densas aglomerações. Logo, esse mineral cristalizado se ajusta ao espaço disponível, sem exercer ação expansiva considerável (CENTURIONE *et al.*, 2003b; BALTIC *et al.*, 2000)

No caso da cal, a estabilização baseia-se inicialmente na troca catiônica entre seus componentes e os minerais argílicos. A grande concentração de cálcio presente causa floculação das partículas da argila, reduzindo a expansibilidade e a plasticidade do solo. Quando em alta concentração, a cal provoca também reações pozolânicas entre os minerais do solo, cálcio da cal e água, dando origem aos componentes cimentícios, como o C-S-H, o C-A-H e aluminossilicatos de cálcio hidratado (C-A-S-H). As pozolanas responsáveis pelo processo são materiais silicosos ou silicoaluminosos que, na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente formando composto com propriedades ligantes (NBR 12653, ABNT, 2015). Esses componentes são responsáveis pelo ganho de resistência adicional no solo-cal. As reações pozolânicas são lentas e sua eficiência depende do teor de cal, da mineralogia do solo e da temperatura (MAUBEC *et al.*, 2017; DIAMOND e KINTER, 1965).



Equação 2-5

As reações pozolânicas são muito desejáveis no caso do concreto, por exemplo, pois consomem o C-H, melhorando a durabilidade da pasta em ambientes ácidos. Seus produtos preenchem espaços capilares, elevando a resistência e a impermeabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

2.4.4 Métodos de análise química, mineralógica e microestrutural

O ganho de resistência no solo está diretamente ligado a ação de compostos específicos encontrados nos agentes estabilizantes. Portanto, para compreender as propriedades físico-químicas do coproduto e os princípios que regem sua ação como estabilizante químico, é essencial conhecer sua composição e microestrutura. Materiais sólidos podem ser classificados segundo a regularidade dos seus arranjos atômicos. A partir da análise do arranjo atômico dos sólidos, é denominada estrutura cristalina aquela que possui átomos organizados segundo um padrão tridimensional repetitivo. Metais, cerâmicas e alguns polímeros possuem essa configuração.

Os átomos que compõem um material podem também apresentar uma disposição desordenada e irregular, sendo, então, chamados de não-cristalinos (amorfo ou vítreos). Resfriamento rápido é uma forma de obter estrutura deste tipo, uma vez que o tempo curto não permite o processo de sua organização. Metais são geralmente cristalinos, algumas cerâmicas são cristalinas, outras, como o vidro inorgânico, são amorfas. Polímeros geralmente apresentam-se da forma não-cristalina ou com graus de cristalinidade.

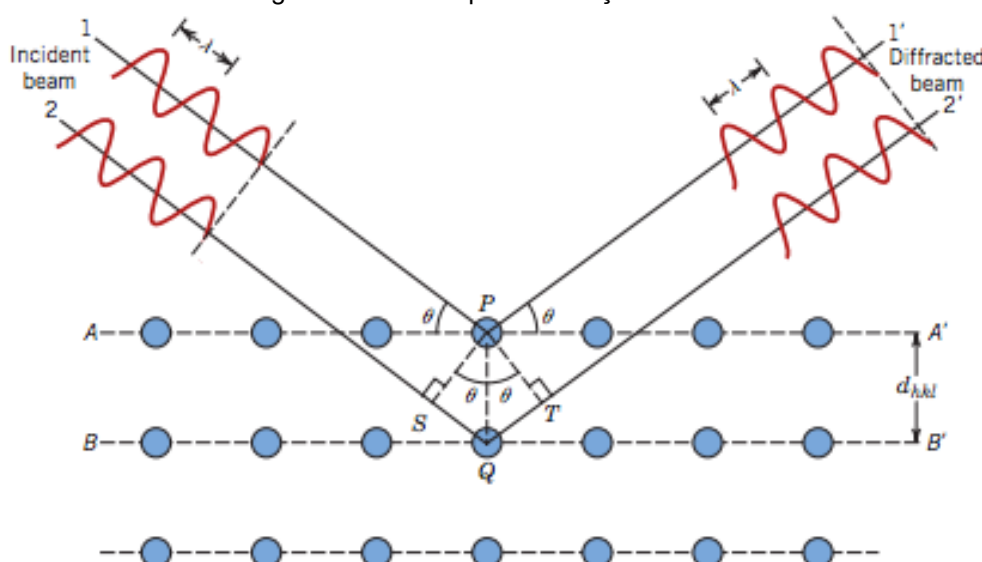
2.4.4.1 Difração de raio-X (DRX)

O raio-X, onda eletromagnética de pequeno comprimento e alta energia, tem contribuído historicamente para o avanço do entendimento dos arranjos moleculares e atômicos de materiais. A difração de raio-X é uma técnica que se baseia no princípio de Bragg para indicar em qual ângulo ocorre o fenômeno da difração em amostras em pó desorientadas de materiais cristalinos (CALLISTER e RETHWISCH, 2011). A lei de Bragg relaciona o comprimento de onda (λ), o espaço interatômico (d) e o ângulo de difração (θ) para interferência construtivas.

$$n\lambda = 2 d \sin \theta$$

Equação 2-6

Figura 2-9 – Princípio da difração de raio-x



Fonte: CALLISTER e RETHWISCH (2011)

Ao incidir um feixe de raios-X sobre um cristal, poderá haver interferências construtivas ou destrutivas entre as ondas eletromagnéticas. Quando a lei de Bragg não é satisfeita, a interferência entre as ondas não é construtiva, gerando ondas

difratadas de baixa intensidade. A técnica baseia-se na organização e periodicidade do arranjo atômico. Logo, ela é ineficaz para materiais sólidos totalmente amorfos e para líquidos.

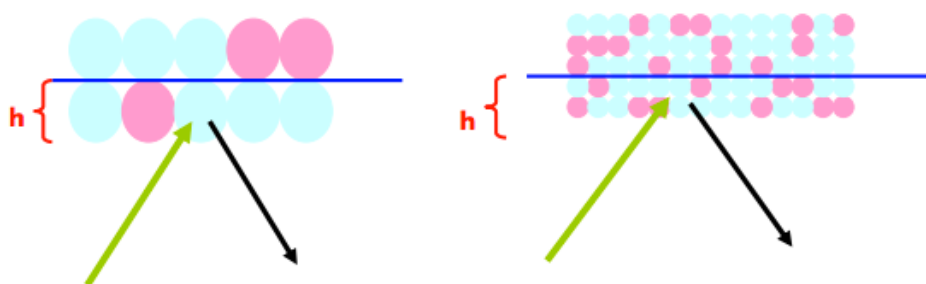
Os solos usados e o coproduto foram submetidos à determinação qualitativa para caracterização estrutural de substâncias cristalinas por difração de raios-X. O DRX tem por objetivo detectar as fases minerais a partir da análise baseada na comparação do difratograma como os padrões de referência disponíveis em banco de dados. O material analisado pode ser submetido ao método de pó, no qual cada partícula é um pequeno cristal, orientado aleatoriamente em relação ao feixe incidente. Na preparação das amostras argílicas de DRX, indica-se orientar as partículas dos argilominerais para intensificar a reflexão do plano basal e permitir a identificação de espécies minerais presentes em menores quantidades. A orientação das partículas é facilitada pelo formato de placas, comum nos argilominerais.

2.4.4.2 Fluorescência de Raio-X (FRX)

A análise por espectroscopia de fluorescência de raio-X (FRX) é um método quantitativo baseado na medida das intensidades (número de raios-X detectados por unidade de tempo) dos raios-X emitidos por amostras analisadas. De forma resumida, o FRX é composto por três fases: excitação dos elementos da amostra, dispersão e posterior detecção dos raios-X. Vem sendo amplamente utilizado por não promover a destruição da amostra, exigir uma pequena quantidade de material e por dispensar pré-tratamento químico (NASCIMENTO, 1999).

Brisola e Fernandes (2009) explicam que durante a preparação das amostras para FRX é interessante trabalhar com faixas granulométricas menores para garantir que os raios incidam sobre a maior parte dos grãos. Como eles incidem de forma superficial, grãos maiores causam o efeito mostrado na Figura 2-10, impedindo que elementos presentes em menores quantidades sejam analisados.

Figura 2-10 – Efeito da diferença do tamanho das partículas no FRX



Fonte: Brisola e Fernandes (2009)

2.4.4.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Microscopia eletrônica de varredura é uma ferramenta muito útil de investigação da microestrutura de um material. A superfície da amostra é examinada por um feixe refletido, coletado e transmitido na mesma velocidade por um tubo de raios catódicos. A técnica exige que a superfície do material seja condutora. Para materiais não condutores, utiliza-se um tratamento com uma camada de material metálico. As imagens produzidas podem ser ampliadas de 10 até 50.000 vezes em alguns equipamentos. O microscópio pode ser dotado de equipamento que permite realizar análise qualitativa e semiquantitativa dos elementos presentes na superfície investigada (CALLISTER e RETHWISCH, 2011).

2.4.4.4 Pozolanicidade

A NBR 12653 (ABNT, 2015) estabelece também critérios físicos e químicos mínimos para que o material seja empregado como adição no cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. A mesma norma divide os materiais pozolânicos em naturais (materiais de origem vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido) ou artificiais (provenientes do tratamento térmico ou subprodutos industriais). O coproduto KR é, portanto, um exemplo de pozolana artificial, por ser resultado de um processo industrial.

A fim de estabelecer os critérios de avaliação de pozolanas, a referida norma classifica os materiais pozolânicos em três tipos:

- Classe N: naturais e artificiais como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, cherts silicosos, terra diatomáceas e argilas calcinadas;

- Classe C: cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas;
- Classe E: quaisquer pozolanas, não contempladas nas classes N e C.

O coproduto KR enquadra-se na Classe E, logo, deve atender aos parâmetros correspondentes, mostrados no Quadro 2-6 e Quadro 2-7.

Quadro 2-6 – Requisitos químicos do pozolanas

Propriedades	Classe de material pozolânico			Método de ensaio
	N	C	E	
SO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	≥ 70	≥ 70	≥ 50	NBR NM 22 (ABNT, 2012)
SO ₃	≤ 4	≤ 5	≤ 5	NBR NM 16 (ABNT, 2012)
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	≤ 3	NBR NM 24 (ABNT, 2003)
Perda ao fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6	NBR NM 18 (ABNT, 2012)
Álcalis disponíveis em Na ₂ O	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5	NBR NM 25 (ABNT, 2003)

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2014)

Os parâmetros químicos do coproduto foram obtidos a partir do resultado do FRX, exceto pelo teor de umidade, determinado por meio de ensaio realizado no Laboratório de Geotecnia da UFES. Os álcalis disponíveis em Na₂O foram obtidos a partir do FRX de forma indireta, por meio da relação indicada pela NBR NM 25 (ABNT, 2003):

$$E_{qa} = Na + 0,658 K$$

Equação 2-7

Sendo que:

- E_{qa} é o equivalente em Na₂O, em porcentagem;
- Na e K são os resultados para o óxido de sódio e óxido de potássio presentes na amostra, determinados pelo FRX;
- 0,658 é o fator de transformação estequiométrico de K₂O em Na₂O.

Os parâmetros físicos mostrados no Quadro 2-7 foram determinados no laboratório por meio de ensaios.

Quadro 2-7 – Requisitos físicos de pozolanas

Propriedade	Classe de material pozolânico			Método de ensaio
	N	C	E	
Material retido na peneira 45µm	< 20%	< 20 %	< 20%	NBR 15894-3 (ABNT, 2010)
Índice de desempenho do cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 90%	≥ 90%	≥ 90%	NBR 5752 (ABNT, 2014)
Atividade pozolânica com cal aos sete dias	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	NBR 5751 (ABNT, 2015)

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2015)

2.4.5 Métodos de dimensionamento de pavimentos

Dimensionamento de pavimentos consiste na escolha dos materiais e no cálculo das espessuras das sucessivas camadas que compõem o pavimento, de modo a garantir que a vida útil corresponda a um número determinado de repetições de carga. Na pavimentação, em geral, a chave para o dimensionamento não é a ruptura súbita, mas a evolução progressiva dos defeitos resultantes do acúmulo de deformações permanentes infringidas pelo tráfego. Há dois métodos principais de dimensionamento de pavimentos: métodos empíricos e os métodos mecanísticos. Os métodos empíricos baseiam-se em experiências repetidas inúmeras vezes em campo, sob condições conhecidas, e a partir delas preveem-se as espessuras necessárias para atender ao critério de ruptura por deformação permanente. Os métodos mecanísticos, por outro lado, possuem uma abordagem mais analítica e tentam reduzir a parcela de empirismo. Para isso, propõem-se que o pavimento seja avaliado em função do estado tensão-deformação provocado pelos carregamentos efetivamente atuantes, análise similar àquela aplicada a estruturas de aço ou concreto.

2.4.5.1 Método Empírico do DNIT

Como exemplo de método empírico pode-se citar o método do DNIT para dimensionamento de pavimento flexíveis, largamente utilizado no país. Ele é derivado do método desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos, de autoria de W. J. Turnbull, C.R. Foster e R.G. Ahlvin, com base em estudos experimentais da AASHTO (DNIT, 2006). Por ter sido desenvolvido sob condições específicas, a metodologia não pode ser generalizada com confiabilidade para outras condições, pois não considera especificidades das diversas variáveis que influenciam no desempenho funcional e estrutural de um pavimento (FRANCO, 2007).

As camadas que compõem o pavimento são dimensionadas a partir do número equivalente de repetições do eixo-padrão sobre a rodovia (número N, resultado do estudo de tráfego) e do ISC do material. De posse das referidas variáveis, as espessuras das camadas são determinadas por meio de ábacos. Como mostra o

Quadro 2-8, esse método indica os valores limites para expansão, ISC, índice de grupo (IG), limites de liquidez (LL), índice de plasticidade (IP) dos materiais que compõem o pavimento de acordo com a camada onde serão empregados (DNIT, 2006).

Quadro 2-8 – Características dos materiais empregados no pavimento

Camada	Expansão (%)	ISC (%)	IG	LL (%)	IP (%)
Base	$\leq 0,5$	≥ 80	-	≤ 25	≤ 6
Sub-base	$\leq 1,0$	≥ 20	0	-	-
Reforço de sub-leito	$\leq 1,0$	$\geq \text{ISC}_{\text{sub-leito}}$	-	-	-
Sub-leito	-	2	-	-	-

Fonte: Autora

O ISC reproduz a ruptura do solo em seu estado crítico - saturação completa. Por ser obtido de forma relativamente simples com uso de equipamento portátil, tornou-se mundialmente popular. É importante notar que o método do DNIT, baseado no ISC, não dá devida atenção às deformações causadas pelo movimento cíclico das cargas sobre a superfície do pavimento. Negligenciar os efeitos da deformação pode culminar em graves problemas na estrutura do pavimento (FRANCO, 2007).

2.4.5.2 Método Mecanístico-Empírico

Com os avanços no entendimento do comportamento dos pavimentos e o desenvolvimento de novos métodos de laboratório, o uso de métodos puramente empíricos tem sido alvo de questionamentos. Atualmente, apoia-se em conceitos da chamada “Mecânica dos Pavimentos” para melhor representar o efeito dos veículos sobre o pavimento.

Desenvolveu-se, assim, uma nova metodologia: o método de dimensionamento mecânico-empírico (ME). Um dos principais parâmetros necessários para o ME é o módulo de resiliência que avalia o comportamento tensão-deformação de solos. Ele é obtido por meio de ensaios triaxiais de carga repetida, sob condições normatizadas.

Trata-se da relação entre a tensão de desvio (σ_d), aplicada repetidamente, e a deformação elástica axial resultante (ε_R) para determinada condição de ensaio (número de repetições da carga, tempo de aplicação, frequência, umidade, densidade, tipo de compactação, entre outros fatores). Os parâmetros de tensão e deformação são obtidos em ensaios triaxiais cíclicos de grandeza fixada (duração de

carga e de ciclo específicas), aplicados a um corpo-de-prova cilíndrico. Durante o procedimento, o corpo-de-prova é colocado em câmara triaxial e submetido a pares de tensão axial dinâmica e tensão confinante estática.

A deformação recuperável, medida ao longo do ensaio, é usada para o cálculo do Módulo de Resiliência, uma forma mais precisa e sofisticada de avaliar materiais usados no pavimento. Ao contrário do tradicional ISC, que avalia a resistência ao cisalhamento (ruptura localizada) e baseia-se em macrodeformações, o MR avalia a deformabilidade e as microdeformações do material. No Brasil, o procedimento desse ensaio é escopo da Norma ME 134 (DNIT, 2010) e é calculado segundo a Equação 2-8.

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_R} \quad \text{Equação 2-8}$$

Resultados dos ensaios triaxiais dinâmicos, em geral, exprimem o MR, em função da tensão confinante (σ_3) para solos arenosos, e em função da tensão desviadora (σ_d), no caso de solos argilosos/siltosos, conforme sugere a Norma ME 134 (DNIT, 2010). Essa relação para solos arenosos é expressa por um gráfico do MR em função da tensão confinante, ambos em escala logarítmica. Da regressão linear dos dados do gráfico, surge a Equação 2-9, na qual k_1 e k_2 são os parâmetros de resiliência do solo.

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \quad \text{Equação 2-9}$$

O modelo originalmente usado para solos argilosos, conhecido como bilinear, descreve por meio de gráfico em escala aritmética dois comportamentos distintos: aumento acentuado de MR antes de uma determinada tensão de desvio (k_1), descrito pela Equação 2-10 e, após a tensão k_1 ser atingida, MR passa a crescer com uma taxa inferior, conforme a Equação 2-11.

$$MR = k_2 + k_3(k_1 - \sigma_d) \quad k_1 > \sigma_d \quad \text{Equação 2-10}$$

$$MR = k_2 + k_4(\sigma_d - k_1) \quad k_1 < \sigma_d \quad \text{Equação 2-11}$$

O modelo bilinear tradicional impõe dificuldade em apropriar as constantes-problema, pois o intercepto entre duas retas é de difícil determinação. Em função dessa limitação, Svenson (1980) introduz o modelo log-log, como o usado para solos arenosos, substituindo apenas σ_3 por σ_d . Mais tarde, o modelo composto (Equação

2-12), proposto por Macedo (1996), dispensa a previsão do comportamento do solo, podendo ser aplicado igualmente para solos argilosos/siltoso e arenosos.

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$$

Equação 2-12

O modelo composto, além do benefício de se aplicar a qualquer solo, teve sua precisão verificada por diversos pesquisadores que concluíram sua superioridade, obtendo coeficientes de correlação R^2 superiores aos demais modelos. Atualmente, o modelo está consolidado (FERREIRA, 2002; MARANGON e MOTTA, 2006).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental teve por objetivo analisar o coproduto e avaliar as mudanças por ele provocadas nas características físicas e mecânicas dos solos. Seu desempenho foi então comparado com o de outros agentes estabilizadores: cimento e agregados pétreos.

3.1 MATERIAIS

Foram coletados dois solos em diferentes regiões do estado do Espírito Santo. A argila amarela, aqui denominada solo S1, proveniente do distrito de Caramuru, e a areia rosada, denominado solo S2, coletada no distrito de Pendanga. Os solos escolhidos apresentam capacidade de suporte inferior a 80% e são, portanto, inadequados para camada de base.

Figura 3-1 – Localização dos pontos de coleta



Fonte: Autora

Empresa ArcelorMittal Tubarão, situada na região metropolitana de Vitória, forneceu o coproduto KR, coletado conforme a NBR 10007 (ABNT, 2004) do Canteiro 08 da

empresa. A siderúrgica separa o coproduto de dessulfuração KR em duas frações granulométricas 9-19mm e 0-9mm, sendo a última objeto de estudo deste trabalho. O coproduto KR usado passou um processo de separação metálica que tem como objetivo retirar parte do ferro metálico. Esse processo de beneficiamento reduz a instabilidade volumétrica do coproduto e possibilita o reuso do ferro no processo. Outros coprodutos siderúrgicos da mesma indústria – coproduto de aciaria LD, como a Acerita® – têm sido amplamente estudados no Laboratório de Geotecnia da UFES. Nesta pesquisa, optou-se por utilizar esta fração granulométrica devido aos resultados positivos alcançados por pesquisas recentes no laboratório da UFES.

Tessari *et al.* (2016) avaliaram a incorporação deste material em amostras de bentonita, obtendo aumento de 220% do valor da resistência não drenada nos ensaios *Cone Fall* e *Vane Test* de laboratório. Moratti e Scotá (2016) analisaram seu efeito no aumento da resistência não drenada em solos moles, por meio de ensaios de *Cone Fall* e *Vane Test* de laboratório obtendo acréscimos de até 190% na resistência. Especificamente no campo da pavimentação, Gonçalves (2016) obteve acréscimos de 170% na capacidade de suporte de solos lateríticos com a incorporação de 20% de KR, em massa. Gonçalves (2016) também mostrou que a expansão dessas misturas atendem ao limite de 0,5% exigido pela Norma EM 262 (DNER, 1994) para base de pavimentos.

O cimento Portland utilizado nas misturas de solo-cimento foi adquirido em comércio local. Trata-se de cimento composto com escória de alto forno resistente a sulfatos (CPIII 40 RS), produzido segundo a norma NBR 7175 (ABNT, 2003).

Utilizou-se uma mistura de agregados provenientes de pedreira localizada na região metropolitana para produzir uma composição aqui denominada material inerte (MI). Essa composição reproduz de forma aproximada a curva granulométrica do coproduto KR, constituindo-se de 24% de brita 0, 28% de pedrisco e 48% de pó de pedra. A Tabela 3-1 apresenta o resultado da caracterização dos agregados.

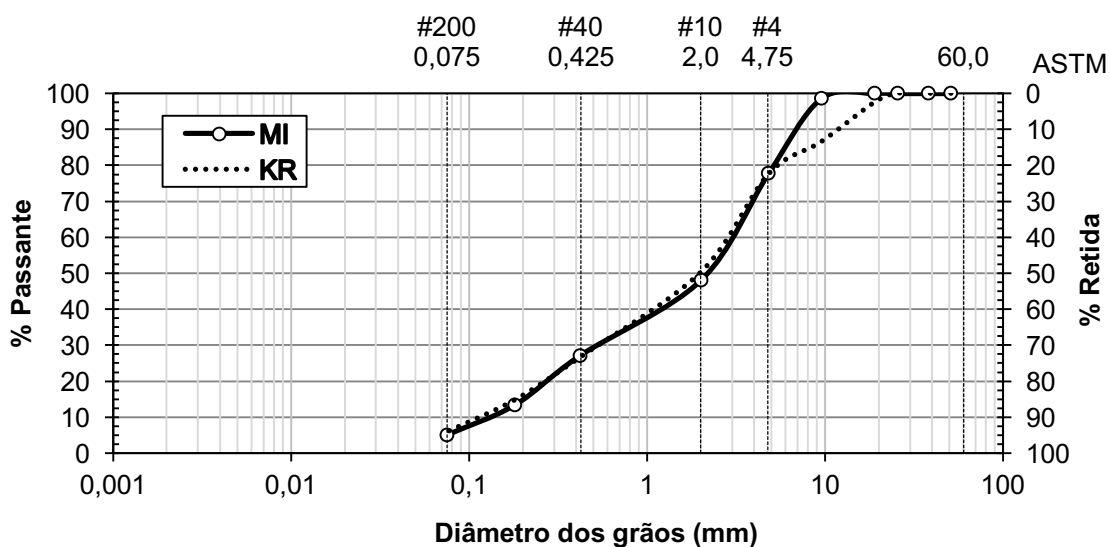
Tabela 3-1 – Granulometria dos agregados e da composição obtida

Propriedade	Agregado			MI
	Brita 0	Pedrisco	Pó de pedra	
Massa específica real (g/cm^3)	2,80	2,84	2,84	-
Massa unitária (kg/dm^3)	1,51	1,44	1,57	-
50,8 mm (2")	100,0	100,0	100,0	100,0
38,1 mm (1½")	100,0	100,0	100,0	100,0
25,4 mm (1")	100,0	100,0	100,0	100,0
19,0 mm (¾")	100,0	100,0	100,0	100,0
Fração de diâmetro (%)				
9,5 mm (3/8")	94,1	100,0	100,0	98,6
4,8 mm (#4)	20,5	88,4	100,0	77,7
2,0 mm (#10)	7,1	14,2	88,1	48,0
0,42 mm (#40)	4,8	1,9	52,9	27,1
0,18 mm (#80)	2,0	1,0	26,1	13,3
0,075 mm (#200)	0,6	0,4	9,8	5,0

Fonte: Autora

A Figura 3-2 apresenta as curvas granulométricas do coproduto KR e do material inerte pétreo preparado, que apresenta variação máxima 5% da curva do coproduto.

Figura 3-2 – Curva granulométrica da composição de material inerte e do coproduto KR



Fonte: Autora

3.2 ENSAIOS

O programa experimental pode ser dividido em três etapas: Etapa I, de caracterização dos materiais; Etapa II compreende os ensaios mecânicos que visam verificar o potencial do coproduto como estabilizante; e Etapa III, que concentra-se em compreender o princípio de ação do coproduto com estabilizante químico por meio de análise química e microestrutural dos materiais isolados e combinados. O

Quadro 3-1 amostra de forma mais detalhada os ensaios realizados em cada fase do programa experimental.

Quadro 3-1 – Programa Experimental

Quadro 6.1 - Programa Experimental			
Etapa	Ensaio	Misturas	Objetivo
I	Granulometria	Solos e coproduto	Conhecer os materiais de forma isolada
	Limites de liquidez		
	Limites de plasticidade		
	Massa específica real dos grãos		
	Difração de raio-x		
	Fluorescência de raio-x	Coproduto	
	Expansão PTM		
	Ensaio de pozolanicidade		
II	Compactação	Solos e suas misturas	Avaliar o potencial de estabilização do coproduto para diferentes solos
	Expansão		
	Índice de Suporte Califórnia		
	Módulo de resistência		
III	Microscopia eletrônica e energia dispersiva	Solos, coproduto e misturas	Investigar o processo de estabilização do coproduto

Fonte: Autora

3.2.1 Etapa I: caracterização dos materiais

A etapa de caracterização dos materiais visa analisar suas características de forma isolada. Foram realizados ensaios de caracterização física, isto é, o ensaio de granulometria (NBR 7181, ABNT, 2016), limites de consistência (NBR 6459, ABNT, 2017 e NBR 7180, ABNT, 2016) e massa específica real dos grãos (NBR 6508, ABNT, 1984). A partir dos resultados da análise granulométrica e limites de consistência, foi possível classificar os solos segundo dois principais sistemas de classificação: Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) ou *Highway Research Board* (HRB). Isso permite prever em grande parte o comportamento geotécnico, auxiliando profissionais na escolha de técnicas de estabilização adequadas, sejam elas granulométricas ou químicas. No caso da estabilização química, a classificação do solo serve como forma de escolha do teor de aglomerante usado (Tabela 2-2).

Sabe-se que a mineralogia é fator essencial para compreender e prever o comportamento de materiais, sobretudo argilosos. Tal fato motivou a realização de análises DRX da fração fina ($d < 75\mu\text{m}$) dos solos e do coproduto. Amostras dos solos

S1 e S2 foram preparadas conforme o manual da EMBRAPA (1997). Preparou-se uma pasta com a fração argílica, depositada sobre uma fina lâmina de vidro de forma que as lamelas dos minerais planares ficassem paralelas umas às outras, intensificando assim seus picos diagnósticos. A amostra do coproduto, por sua vez, foi analisada na forma de pó solto desordenado.

Adicionalmente, submeteu-se o coproduto a uma caracterização específica, visando investigar sua composição química, atividade pozolânica e seu maior fator limitante: a expansibilidade. Para análise química foi empregada a fluorescência de raio-x. A atividade pozolânica foi avaliada segundo os critérios da NBR 12653 (ABNT, 2015) e a expansibilidade pelo método PTM, como indicado pela Norma EM 262 (DNER, 1994) para escórias de aciaria.

3.2.2 Etapa II: efeito da incorporação do coproduto

Realizou-se os ensaios físicos e mecânicos com os solos S1 e S2 puros e incorporados com teores crescentes de KR (10, 20 e 30% em massa). A análise granulométrica completa (peneiramento e sedimentação) das misturas de solos com o coproduto KR possui o intuito principal de verificar o comportamento das curvas granulométricas e seu potencial como estabilizante físico. Os solos e as misturas solo-KR também foram submetidos a ensaios de limites de consistência a fim de avaliar se o material promovia mudanças significativas na plasticidade, como é observado na ação da cal como estabilizante, por exemplo.

Quanto às características mecânicas, as quais representam o foco principal desse trabalho, foram realizados ensaios de compactação, expansão e de resistência segundo dois enfoques: método do DNIT baseado no tradicional ISC e método ME baseado no módulo de resiliência obtido em ensaios triaxiais de cargas repetidas. Para os ensaios mecânicos foram executados ensaios, não apenas com as misturas solo-KR, mas também misturas com estabilizantes convencionais (cimento Portland e agregado pétreo, aqui denominado material inerte). A mistura com cimento tem por objetivo comparar o desempenho do coproduto com o de um aglomerante químico comercial. O uso do agregado pétreo visa avaliar o quanto do efeito estabilizante do coproduto está associado à correção granulométrica. O uso de dois solos de

classificações geotécnicas distintas permite avaliar para qual tipo de solo o coproduto KR seria mais adequado.

3.2.2.1 Compactação, expansão e ISC

Os ensaios mecânicos tradicionais na pavimentação - compactação, expansão e ISC - são básicos tanto para escolha dos materiais quanto para controle durante a execução das camadas de pavimentos. Para pavimentação é desejável o uso de materiais com alta massa específica aparente máxima, isto é, com menor índice de vazios.

A compactação é capaz de promover o aumento da massa específica aparente do solo de forma instantânea pela expulsão do ar por meio da aplicação de pressão, vibração e impacto. Realizou-se ensaios de compactação nas energias normal (600 kJ/m^3), intermediária (1290 kJ/m^3) e modificada (2700 kJ/m^3) para os solos, misturas solo-KR e as misturas padrão (solo-cimento e solo-agregado), de forma a observar o efeito das diferentes adições na massa específica aparente.

Realizado com o material compactado, o ISC é a relação entre a pressão necessária para produzir uma determinada penetração de um pistão padrão em corpos-de-prova de solo saturado e a pressão necessária para produzir a mesma penetração numa brita padronizada. Este parâmetro é utilizado por métodos empíricos para determinar a espessura de camadas de pavimento flexível. O procedimento do ensaio é descrito pela NBR 9895 (ABNT, 2016). Como prevê a norma, a expansibilidade e curva de compactação foram determinadas juntamente como ensaio de ISC.

A Tabela 3-2 mostra a composição das misturas ensaiadas. Os teores usados para o coproduto basearam-se nos resultados obtidos por Gonçalves (2016), cujos resultados de resistência sugeriram o teor ideal de coproduto é da ordem de 30%. Para as misturas com cimento, optou-se por utilizar um teor extremo, correspondente ao máximo indicado na Tabela 2-2. Apesar de pouco realista, o teor de 10% de cimento exprimiria o máximo melhoramento alcançado com uso do cimento Portland.

Tabela 3-2 – Composição das misturas ensaiadas

Código adotado	Teor (%)			
	Solo	KR	Cimento Portland	Material inerte
S1	100	-	-	-
S1KR10	90	10	-	-
S1KR20	80	20	-	-
S1KR30	70	30	-	-
S1CP10	90	-	10	-
S1MI10	90	-	-	10
S1MI20	80	-	-	20
S1MI30	70	-	-	30
S2	100	-	-	-
S2KR10	90	10	-	-
S2KR20	80	20	-	-
S2KR30	70	30	-	-
S2CP10	90	-	10	-
S2MI10	90	-	-	10
S2MI20	80	-	-	20
S2MI30	70	-	-	30

Fonte: Autora

3.2.2.2 Módulo de resiliência (MR)

O ensaio do módulo de resiliência foi realizado com um número menor de amostras. Optou-se por executar o ensaio apenas com solo S1, sem incorporações e em duas misturas: solo-KR no teor de 30% e solo-cimento no teor de 10%. Deseja-se, portanto, comparar o teor máximo utilizado com KR e um teor extremo de cimento.

3.2.3 Etapa III: investigação dos mecanismos de estabilização

Confirmado o potencial de estabilização do coproduto por meio dos ensaios mecânicos, esta etapa concentrou-se em realizar ensaios a fim de entender os mecanismos envolvidos no processo de estabilização química promovida pelo material. Nesta fase, optou-se por ensaiar apenas o solo argiloso S1, o qual apresentou os melhores resultados. As mudanças microestruturais provocadas para incorporação dos diferentes agentes estabilizantes nos solos foram analisadas com Microscópio Eletrônica de Varredura (MEV). Inicialmente, os materiais diferentes foram observados de forma individual/isolada em pó, e, em um segundo momento, na forma de amostras compactadas. As análises foram complementadas por dispersão de energia (EDS), que para as amostras individuais, foi aplicada apenas à fração fina ($d < 75\mu\text{m}$). A Tabela 3-3 lista as amostras analisadas.

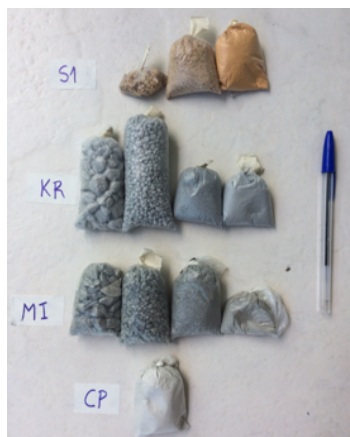
Tabela 3-3 – Detalhes das amostras analisadas

Fase	Código	Material	Fração (mm)
Amostras individuais	S1#10	Solo argiloso	$2.0 \geq d$
	S1#200		$0.075 \leq d < 2.0$
	S1		$d < 0.075$
	KR#4	Coproduto KR	$d \geq 4.8$
	KR#10		$2.0 \leq d < 4.8$
	KR#200		$0.075 \leq d < 2.0$
	KR		$d < 0.075$
	MI#4	Material Inerte	$d \geq 4.8$
	MI#10		$2.0 \leq d < 4.8$
	MI#200		$0.075 \leq d < 2.0$
	MI		$d < 0.075$
	CP	Cimento Portland	Integral
Corpos-de-prova de ISC	S1	Solo argiloso natural	
	S1KR30	Solo argiloso + 30% Coproduto	
	S1MI20	Solo argiloso + 20% Material inerte	
	S1CP10	Solo argiloso + 10% Cimento Portland	

Fonte: Autora

As amostras individuais em pó foram separadas por peneiração em faixas granulométricas e acondicionadas em sacos plásticos. Amostras dos corpos-de-prova de ISC foram compactadas na energia modificada com teor de umidade próximo à umidade ótima conhecida, permaneceram 96 horas submersas e foram levadas à ruptura em prensa automática conforme a NBR 9895 (ABNT, 2016). Após a ruptura, separou-se fragmentos de cada um dos corpos-de-prova extraídos dos moldes, acondicionado-os em sacos plásticos fechados hermeticamente. A Figura 3-3 mostra o aspecto dos materiais e a câmara de metalização utilizada na preparação das amostras.

Figura 3-3 – Preparação de amostras para MEV. (a) Amostras individuais em diferentes frações granulométricas, (b) fragmentos de corpos-de-prova compactados e (c) equipamento dotado de câmara para metalização de amostras



(a)



(b)

Fonte: Autora



(c)

O ensaio empregou o microscópio Shimadzu SuperScan SS-550 e todas as amostras foram metalizadas com uma fina camada de ouro, por se tratarem de materiais originalmente não condutores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ETAPA I: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Caracterização física e mineralógica

A Tabela 4-1 mostra o resumo da caracterização física dos materiais. Apesar da caracterização geotécnica ser destinada a solos, a título de comparação, o coproduto KR foi igualmente classificado. Segundo a classificação desenvolvida pela AASHTO, o coproduto, é considerado “excelente a bom” (A-1-b), por possuir partículas maiores e natureza não plástica (NP).

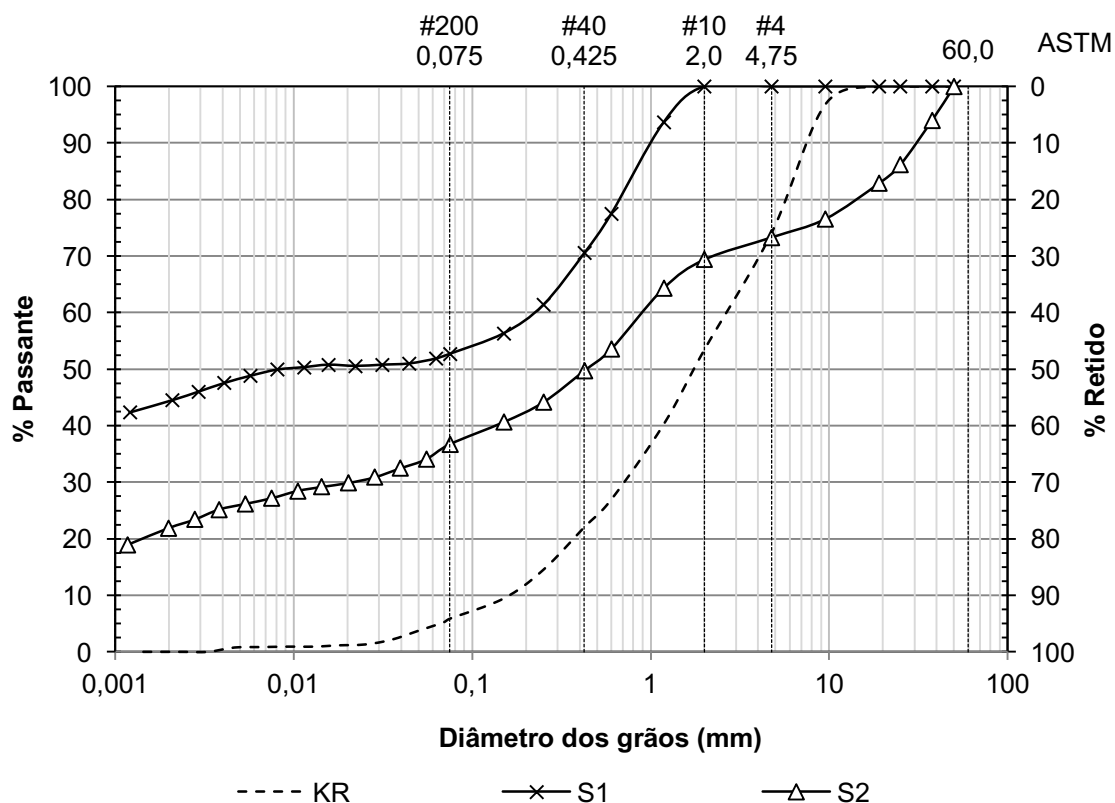
Tabela 4-1 – Resumo da Caracterização Física do Solos

Propriedade		Amostra		
		S1	S2	KR
Massa específica real dos grãos (g/cm^3)		2,67	2,73	3,31
Limite de liquidez (%)		55,4	52,0	-
Limite de plasticidade (%)		27,4	29,8	-
Índice de plasticidade (%)		28,0	22,6	NP
Fração Passante (%)	4,8 mm (#4)	100,0	73,3	74,1
	2,0 mm (#10)	100,0	69,4	53,5
	0,42 mm (#40)	70,5	49,8	22,5
	0,075 mm (#200)	52,7	36,8	5,9
Coeficiente de uniformidade		-	3,6	36,0
Coeficiente de curvatura		-	1,2	1,4
Classificação	AASHTO	A-7-6	A-2-7	A-1-b
	SUCS	CH	SC	SM
Índice de grupo (IG)		12	3	0

Fonte: Autora

A Figura 4-1 apresenta as curvas granulométricas dos solos e do coproduto KR. A partir dos coeficientes de uniformidade e de curvatura, os materiais granulares - S2 e KR – podem ser classificados como mal graduados e uniforme, respectivamente. Sabe-se que a distribuição granulométrica dos solos e agregados é um parâmetro que influencia diretamente nas características mecânicas como a capacidade de suporte e a resistência à compressão.

Figura 4-1 – Curvas granulométricas dos solos e do coproduto KR

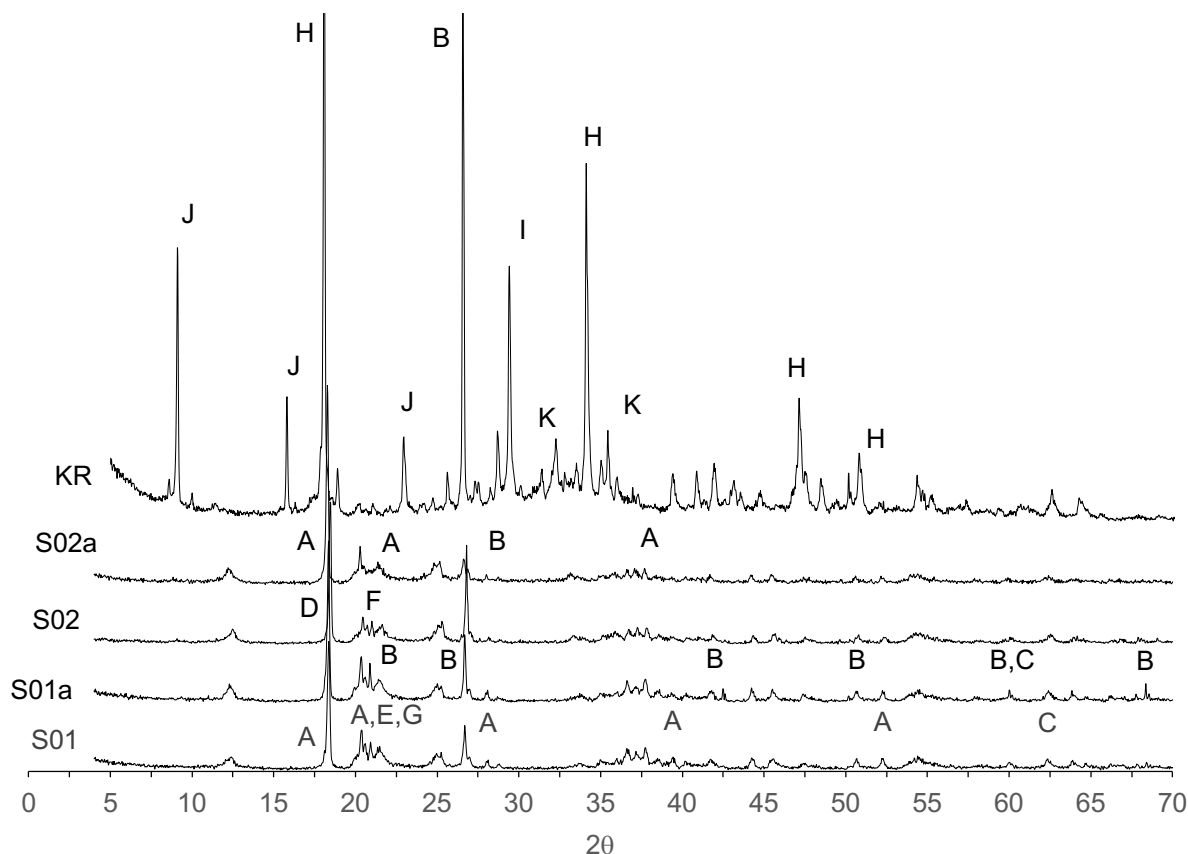


Fonte: Autora

Determinação qualitativa para caracterização estrutural de substâncias cristalinas por DRX foi aplicada à fração fina ($d < 75 \mu\text{m}$) dos solos e do coproduto. Duas amostras de cada um dos solos (S01a e S01, para o solo argiloso e S02a e S02, para o solo arenoso) foram submetidas à DRX com faixa de varredura (2θ) de 4° a 70° , passo de $0,04^\circ$. Amostra não orientada do coproduto, na forma de pó, foi, igualmente, submetida à DRX com um passo de $0,026^\circ$. Os difratogramas resultantes são mostrados na Figura 4-2.

Figura 4-2 – Difratoograma experimental de amostras dos materiais e com os respectivos minerais detectados

- | | | |
|---|---|--|
| A - Gibbsite $\text{Al}(\text{OH})_3$ | B - Quartz SiO_2 | C - Kaolinite $\text{Al}_2\text{Si}_2(\text{OH})_4$ |
| D - Magnesium Aluminum Hydroxide $\text{MgAl}_2(\text{OH})_8$ | E - Silicon oxide SiO_2 | G - Sodium Aluminum Silicate NaAlSiO_4 |
| F - Sodium Iron Oxide Silicate $\text{NaFeO}_{2.35}\text{Si}_{0.175}$ | I - Calcite CaCO_3 | K - Magnesioferrite MgFe_2O_4 |
| H - Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ | | |
| J - Ettringite $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})12.26\text{H}_2\text{O}$ | | |



Fonte: Autora

Conforme a Figura 4-2, os principais minerais encontrados nas amostras dos solos foram gipsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e compostos de silício, seja na forma do quartzo, e ou ainda na forma de óxido de silício, observado no solo S1. O solo argiloso apresentou caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2(\text{OH})_4$), argilomineral de estrutura 1:1, sem caráter expansivo e bastante frequente nos solos brasileiros.

O coproduto apresenta picos de cristalinidade bem definidos. Os principais minerais identificados foram: portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), quartzo (SiO_2), calcita (CaCO_3), etringita ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})12.26\text{H}_2\text{O}$) e magnesioferrita (MgFe_2O_4). Picos de menores intensidades indicaram igualmente a possível presença de calciocopiapita ($\text{Ca}_6\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})12\text{xH}_2\text{O}$), magnetita (FeFe_2O_4) e wustita (FeO). A presença da magnetita e wustita era esperada por se tratarem de produtos das reações de oxidação e hidratação do ferro metálico (Fe^0). Portlandita é resultante da hidratação

da cal livre residual do processo siderúrgico e a calcita, da carbonatação da portlandita. Sabe-se que a portlandita e a etringita são compostos gerados pelas reações de hidratação do cimento, dita reações primárias. Na estabilização com cimento, o cálcio da portlandita reage com os componentes do solo gerando compostos responsáveis pelo ganho de resistência. A etringita, por sua vez, cristaliza-se, conferindo maior resistência à mistura e preenchendo possíveis poros.

4.1.2 Caracterização do coproduto KR

4.1.2.1 Fluorescência de raio-X (FRX)

O coproduto KR foi submetido a ensaio de fluorescência de raio-x. Adicionalmente, optou-se por também analisar amostras dos dois coprodutos mais difundidos na região: escória de aciaria LD e escória de alto-forno *Dry Pit*, provenientes da mesma empresa que forneceu o KR. As amostras foram secadas ao ar e a fração de diâmetro inferior a 75µm foram analisadas. O resultado expressa, na forma de óxidos, os elementos presentes nas amostras (Tabela 4-2).

Tabela 4-2 – Análise semiquantitativa na forma de óxidos dos elementos por FRX

Óxidos	Teor na amostra (%)		
	KR	<i>Dry pit</i>	LD
CaO	44,8	41,2	43,4
Fe ₂ O ₃	26,0	2,7	26,4
SiO ₂	14,6	32,4	12,7
Al ₂ O ₃	5,1	9,3	4,9
MgO	2,7	5,2	5,0
SO ₃	3,8	4,5	0,2
MnO	1,7	0,6	3,2
P ₂ O ₅	0,5	0,1	1,3
TiO ₂	0,3	0,5	0,4
Na ₂ O	0,1	0,3	0,2
SrO	0,1	0,1	0,1
K ₂ O	< 0,10	0,32	< 0,10

Fonte: Autora

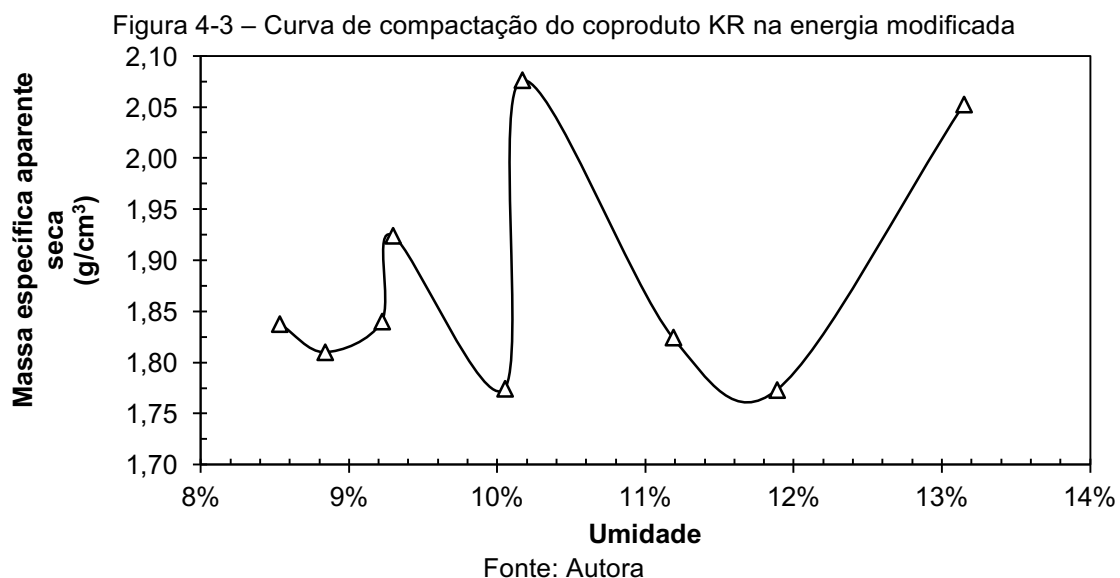
A presença de cal e de componentes com ferro é inerente ao processo, pois esses são ingredientes adicionados ao longo da produção do aço. Conforme mostrado na Tabela 4-2, os diferentes coprodutos apresentam teores similares de cal livre (da ordem de 40%) enquanto o teor de periclásio para a amostra de coproduto KR é

cerca de metade do valor encontrado para os demais coprodutos. Sabe-se que esses dois compostos são os principais responsáveis pelo caráter expansivo dos coprodutos siderúrgicos. A concentração mais baixa de periclásio poderia então justificar a menor instabilidade volumétrica do coproduto KR quando comparado com os demais coprodutos siderúrgicos, observada por Gonçalves (2016).

Segundo a Tabela 4-2, os componentes presentes em maiores quantidades são a cal livre, hematita (Fe_2O_3) e o sílica (SiO_2), componentes também presentes no cimento Portland. Entretanto, no cimento Portland, a hematita está presente em menores proporções (da ordem de 3%, TAYLOR, 1992) e age com um retardador de pega. Em maiores proporções, como é o caso do produto KR, a hematita pode ser indesejável. O dióxido de silício detectado pelo FRX havia anteriormente sido identificado no DRX, sob a forma cristalina do quartzo.

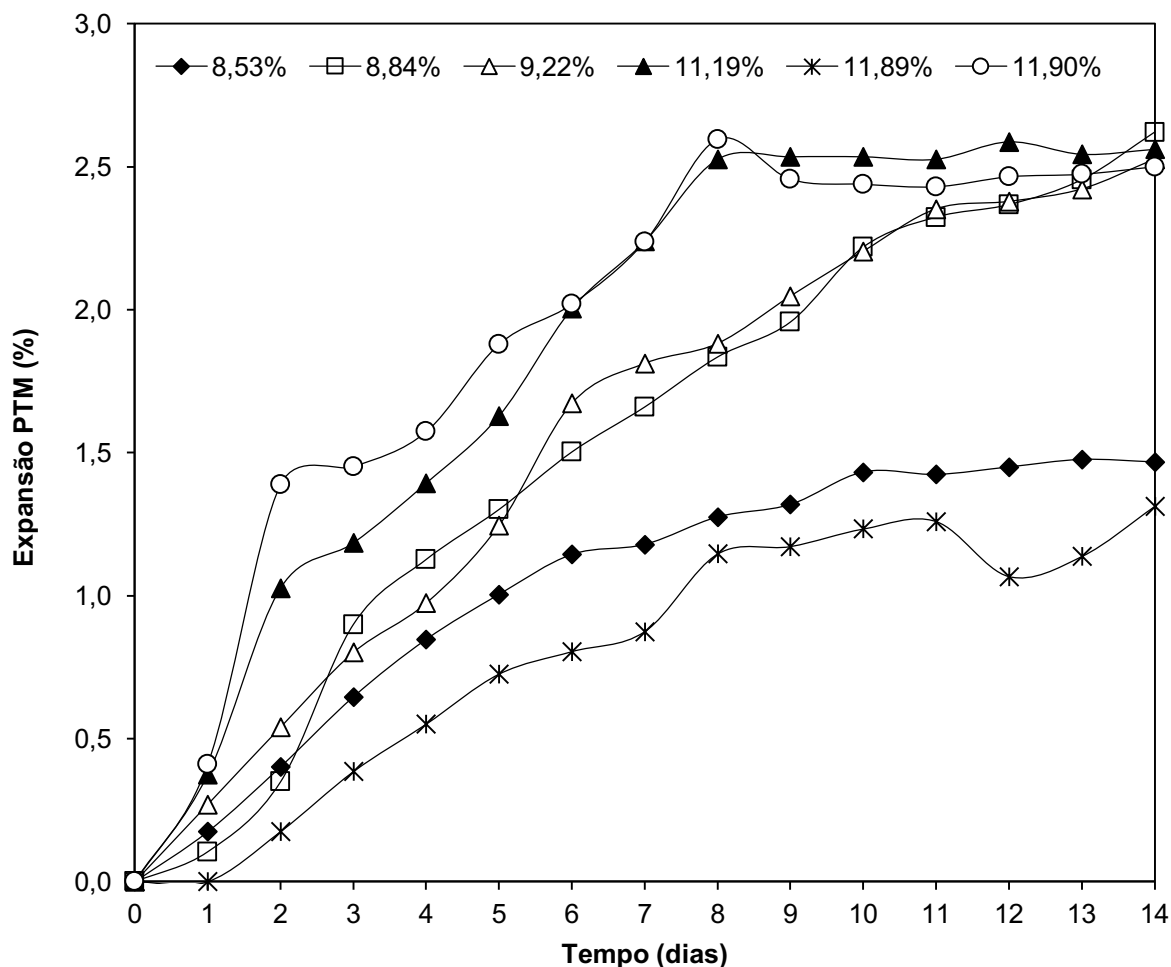
4.1.2.2 Expansão PTM

A fim de determinar a expansibilidade do coproduto, corpos-de-prova foram moldados e submetidos aos procedimentos da Norma ME 113 (DNIT, 2009). Inicialmente realizou-se o ensaio de compactação do material na energia modificada, uma vez que a expansão PTM corresponde ao valor da expansão na umidade ótima. Entretanto, como observa-se na Figura 4-3 o comportamento do coproduto KR reitera o descrito por Rohde (2002) e Raposo (2005) para escórias de aciaria. Conforme estes autores, o material apresenta uma curva de compactação com múltiplos picos. Além disso, Raposo (2005) observa que, ao contrário do que indica a Norma ME 113 (DNIT, 2009), a expansão PTM não é função da umidade de moldagem dos corpos-de-prova.



Todos os corpos-de-prova foram submetidos aos procedimentos do método PTM, com leituras de extensômetro ao longo de 14 dias, sendo os sete primeiros na condição submersa e os sete últimos na condição saturada. A condição saturada exigida na segunda fase do ensaio foi garantida por meio da saturação de cada corpo-de-prova duas horas antes das leituras. Como a norma não indica a temperatura da água adicionada, optou-se por utilizar água em temperatura ambiente. A Figura 4-4 apresenta a expansão dos corpos-de-prova ao longo de todo o ensaio e as respectivas umidades de moldagem. Os resultados obtidos estão de acordo com a Norma EM 262 (DNER, 1994) que limita a expansão acumulada a 3% para uso na pavimentação.

Figura 4-4 – Expansão PTM acumulada ao longo dos 14 dias de ensaio e as umidades de moldagem correspondentes



Fonte: Autora

É importante observar que apesar dos valores encontrados se aproximarem do limite, as condições de execução no ensaio PTM são extremas e pouco semelhantes às encontradas em campo. Adicionalmente, é importante frisar que raramente este tipo de material é aplicado de forma isolada em camadas de pavimento. Em geral, deseja-se incorporá-lo ao solo ou a misturas como solo-cimento e solo-cal. Quando associado a outros materiais, a expansão do coproduto KR, bem como dos demais coprodutos de aciaria, apresenta valores abaixo do limite para camadas de base de 0,5% (DINIZ *et al.*, 2017; GONÇALVES, 2016).

4.1.2.3 Ensaios de Pozolanicidade

O coproduto KR foi moído no moinho de bolas por 9000 ciclos. Separou-se a fração passante na peneira de abertura 75 μ m (nº 200), descartando o material retido. O

material preparado foi submetido aos ensaios preconizados pela NBR 12653 (ABNT, 2015): massa específica (necessário para determinar o traço da argamassa com cal), teor de umidade, finura na peneira de abertura 45 μ m (nº 325), abatimento (para determinação quantidade de água e de superplastificante dos traços) e de resistência. Os resultados obtidos são mostrados no Quadro 4-1.

Quadro 4-1 – Resumo dos resultados para o coproduto KR

Parâmetro		Limite	Resultado	Situação
Químico	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)	≥ 50	45,7	Não atende
	SO ₃ (%)	≤ 5	3,8	Atende
	Teor de umidade (%)	≤ 3	2,29	Atende
	Perda da fogo (%)	≤ 6	< 0,1	Atende
	Álcalis disponíveis em Na ₂ O (%)	≤ 1,5	0,19	Atende
Físico	Material retido na peneira 45mm (#325)	< 20	22,25	Não atende
	Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (%)	≥ 90	79,33	Não atende
	Atividade pozolânica com cal aos 7 dias (MPa)	≥ 6	0,50	Não atende

Fonte: Autora

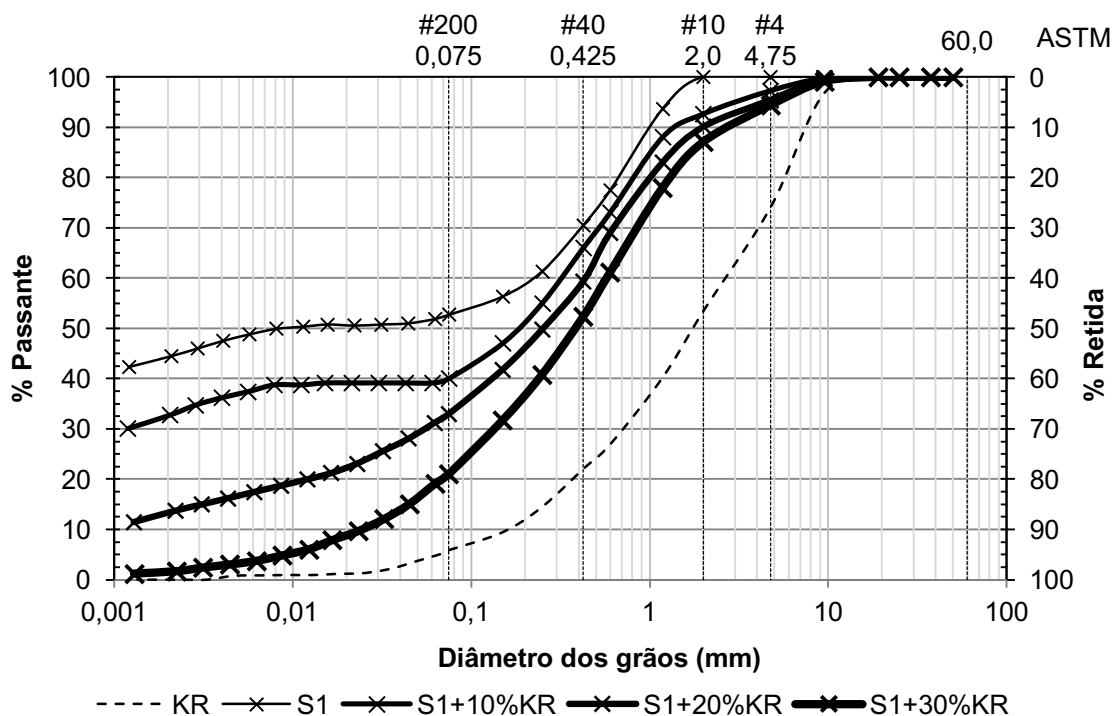
Como é possível observar no Quadro 4-1, o coproduto não atende ao teor de SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ e aos requisitos físicos. Logo, conclui-se que ele não pode ser empregado como material pozolânico para cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Mesmo não atendendo a alguns dos parâmetros exigidos, os resultados, exceto pela atividade pozolânica com cal, aproximam-se dos limites. Além disso, é importante notar que a NBR 12653 (ABNT, 2015) trata especificamente da avaliação de materiais para este fim (uso como aditivo em cimento), não sendo, portanto, determinante da presença ou não de reações pozolânicas de forma geral. Seriam necessários outros critérios de avaliação para que atividade pozolânica do material fosse completamente descartada.

4.2 ETAPA II: EFEITO DA INCORPORAÇÃO DO COPRODUTO

4.2.1 Parâmetros físicos

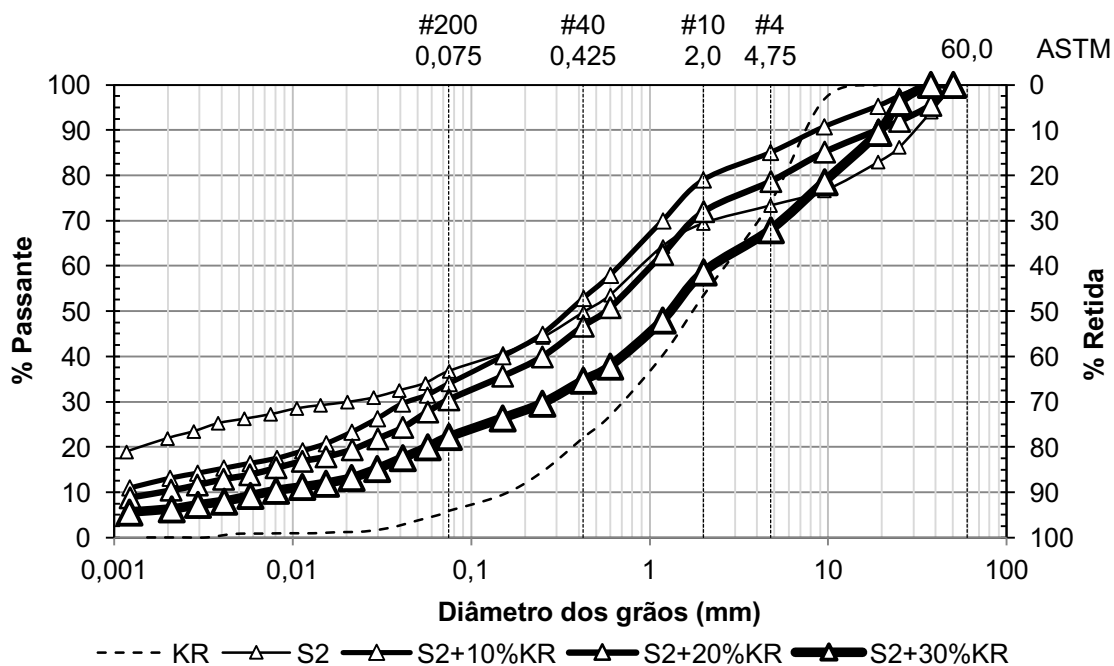
A granulometria foi determinada por peneiramento e sedimentação. O efeito de estabilização granulométrica pôde ser verificado observando as curvas dos solos naturais e de suas misturas (Figura 4-5 e a Figura 4-6).

Figura 4-5 – Curvas Granulométricas do solo S1, coproduto e suas misturas



Fonte: Autora

Figura 4-6 – Curvas Granulométricas do solo S2, coproduto e suas misturas



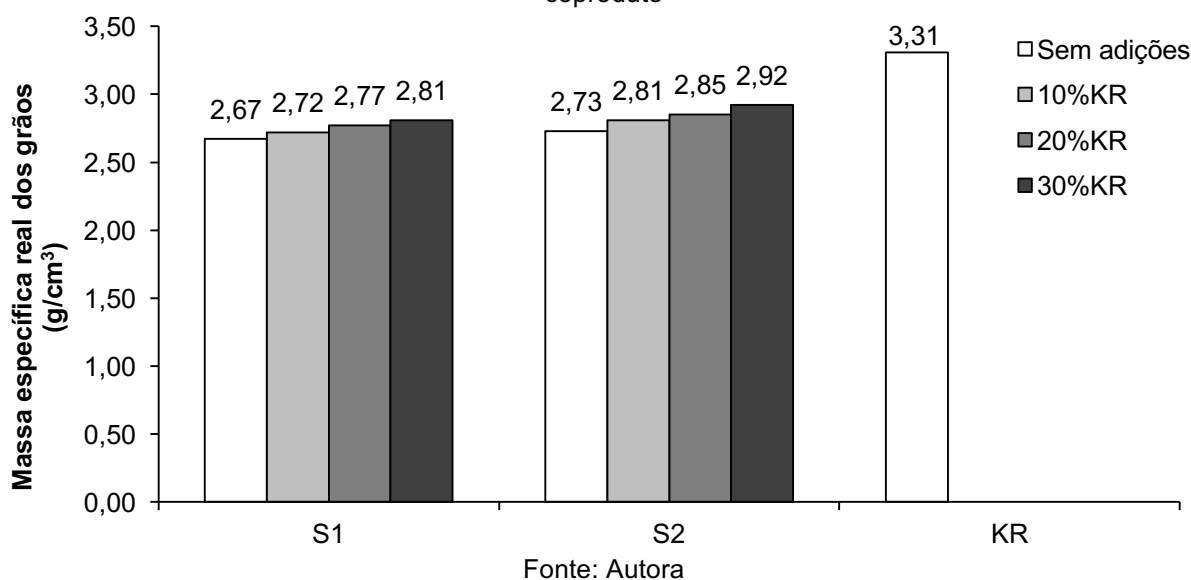
Fonte: Autora

O efeito positivo da incorporação do coproduto é mais acentuado no solo argiloso S1 que no solo arenoso S2, o qual possui naturalmente uma melhor distribuição das

partículas e maior teor de areia. Na Figura 4-5, observa-se que a curva do solo S1 apresenta originalmente um patamar, isto é, ausência de certa faixa granulométrica e que com a adição crescente do coproduto a distribuição torna-se mais uniforme.

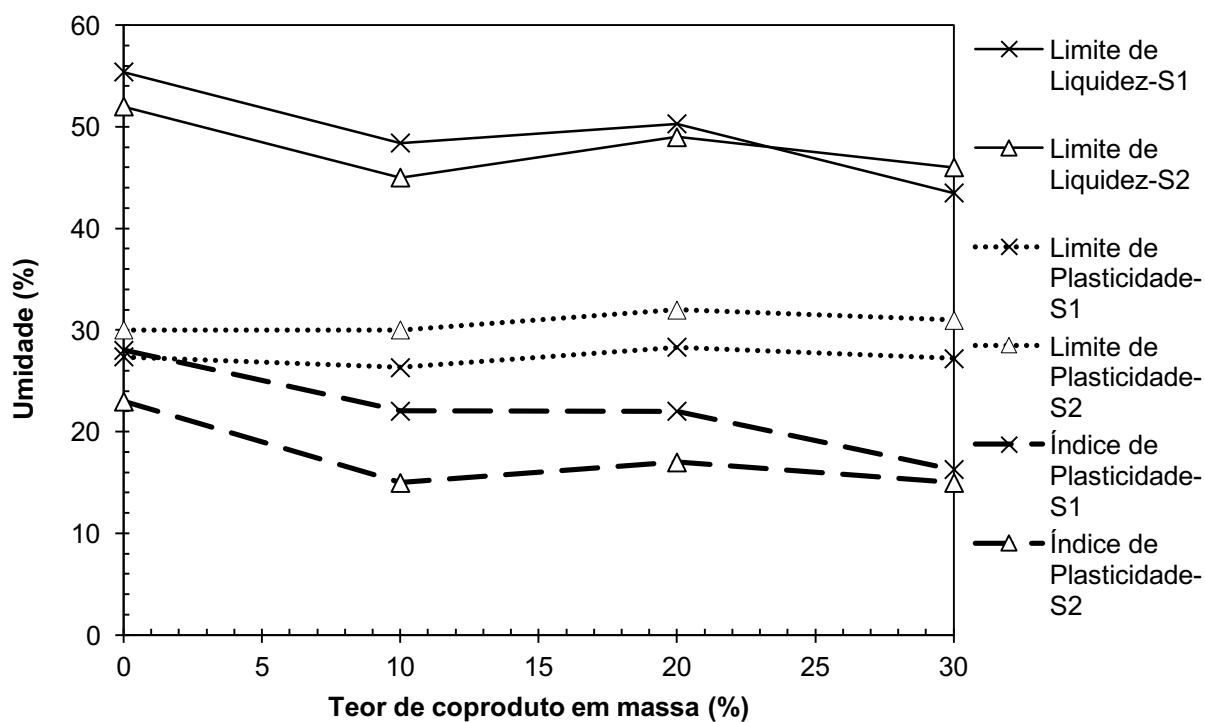
Para posterior cálculo do diâmetro das partículas do ensaio de sedimentação, foi necessário obter a massa específica real dos grãos das misturas, o que possibilitou, adicionalmente, analisar a variação deste parâmetro com a incorporação do coproduto (Figura 4-7). Constatou-se que há aumento gradual da massa específica real dos grãos com o aumento do teor de incorporação do coproduto. O comportamento era esperado, pois o coproduto apresenta massa específica bastante superior a dos solos, atribuída à presença do ferro na sua composição.

Figura 4-7 – Massa específica real dos grãos dos materiais sem adições e com diferentes teores de coproduto



A Figura 4-8 analisa a variação dos limites de consistência com a incorporação do coproduto para cada um dos solos. De forma geral, o efeito da incorporação causa variações de pequena ordem. A incorporação do coproduto provocou ligeira redução dos limites de liquidez, enquanto os limites de plasticidade aumentaram. As maiores variações observadas (da ordem de 7%) ocorrem nos limites de liquidez, enquanto os limites de plasticidade apresentam-se aproximadamente constantes.

Figura 4-8 – Variação dos limites de consistência com incorporação do coproduto em diferentes solos



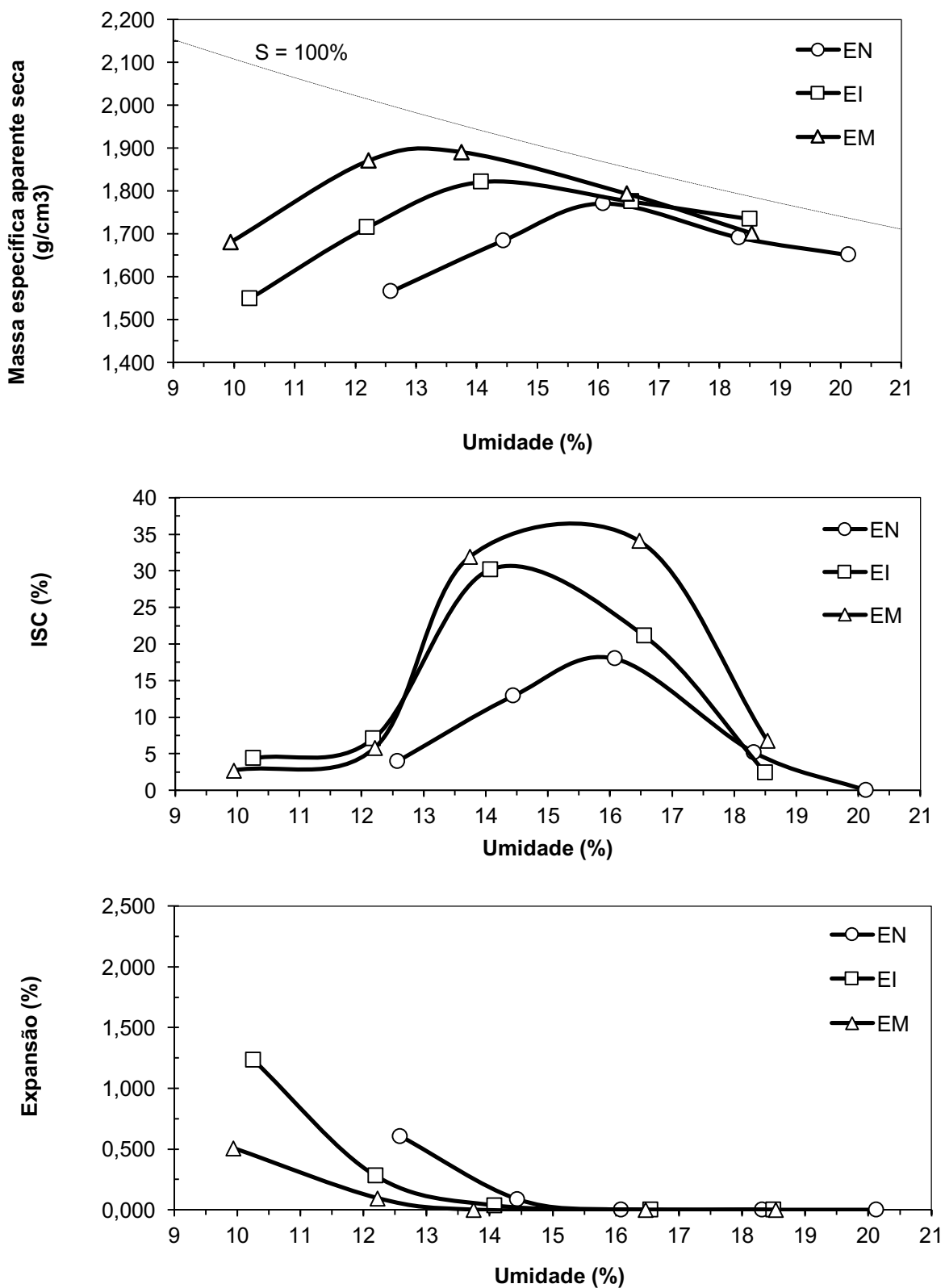
Fonte: Autora

4.2.2 Parâmetros mecânicos

4.2.2.1 Compactação, ISC e expansão

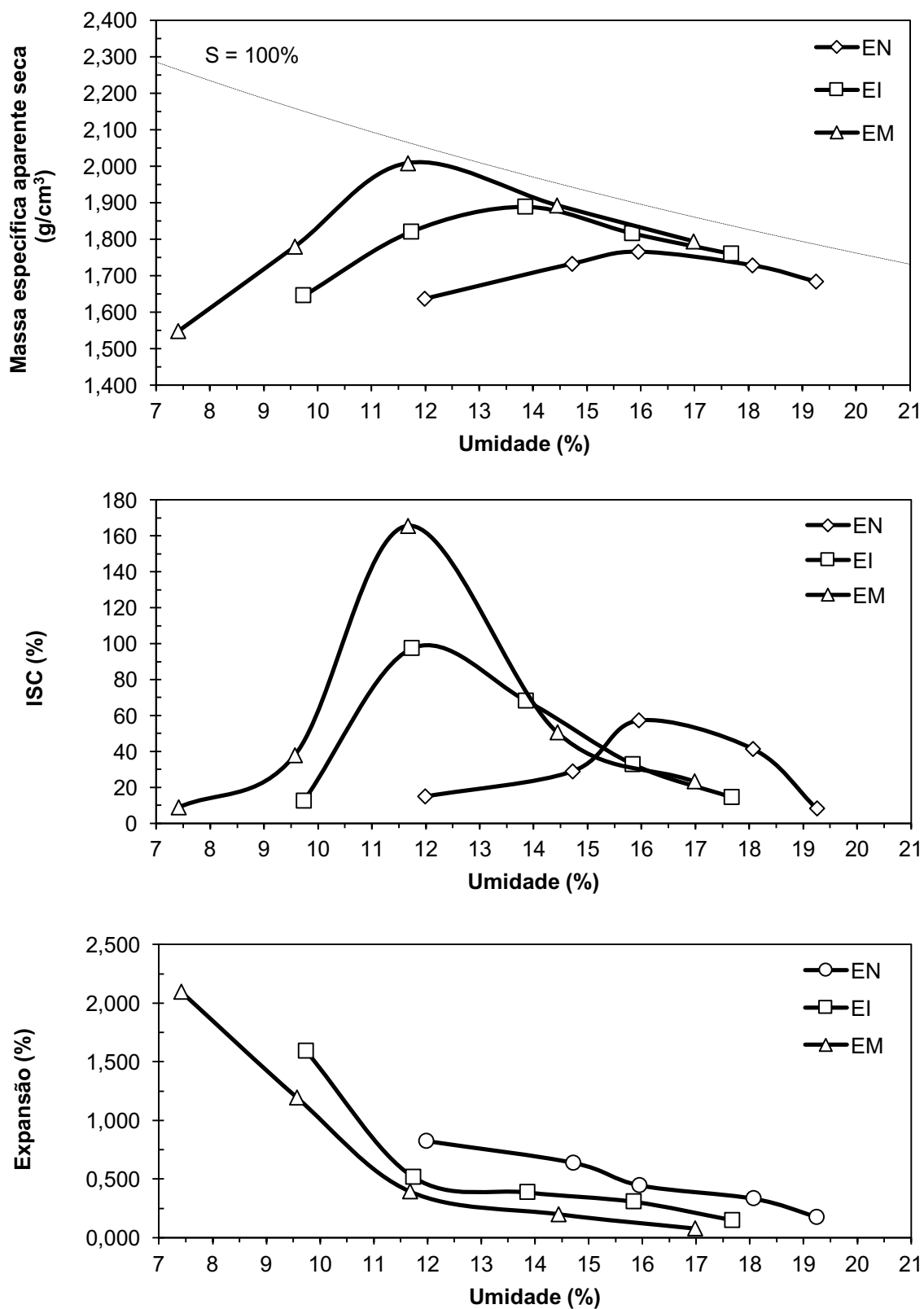
Solos S1 e S2, no estado natural e em misturas, foram submetidos ao ensaio de compactação, ISC e expansão nas energias normal (EN), intermediária (EI) e modificada (EM). Resultados dos ensaios para o solo S1 são mostrados na Figura 4-9, Figura 4-10, Figura 4-11, Figura 4-12, Figura 4-13 e Figura 4-14. Para o solo S2, os resultados são apresentados na Figura 4-15, Figura 4-16, Figura 4-17, Figura 4-18 e Figura 4-19.

Figura 4-9 – Curvas de compactação, ISC e expansão do solo S1 para as EN, EI e EM



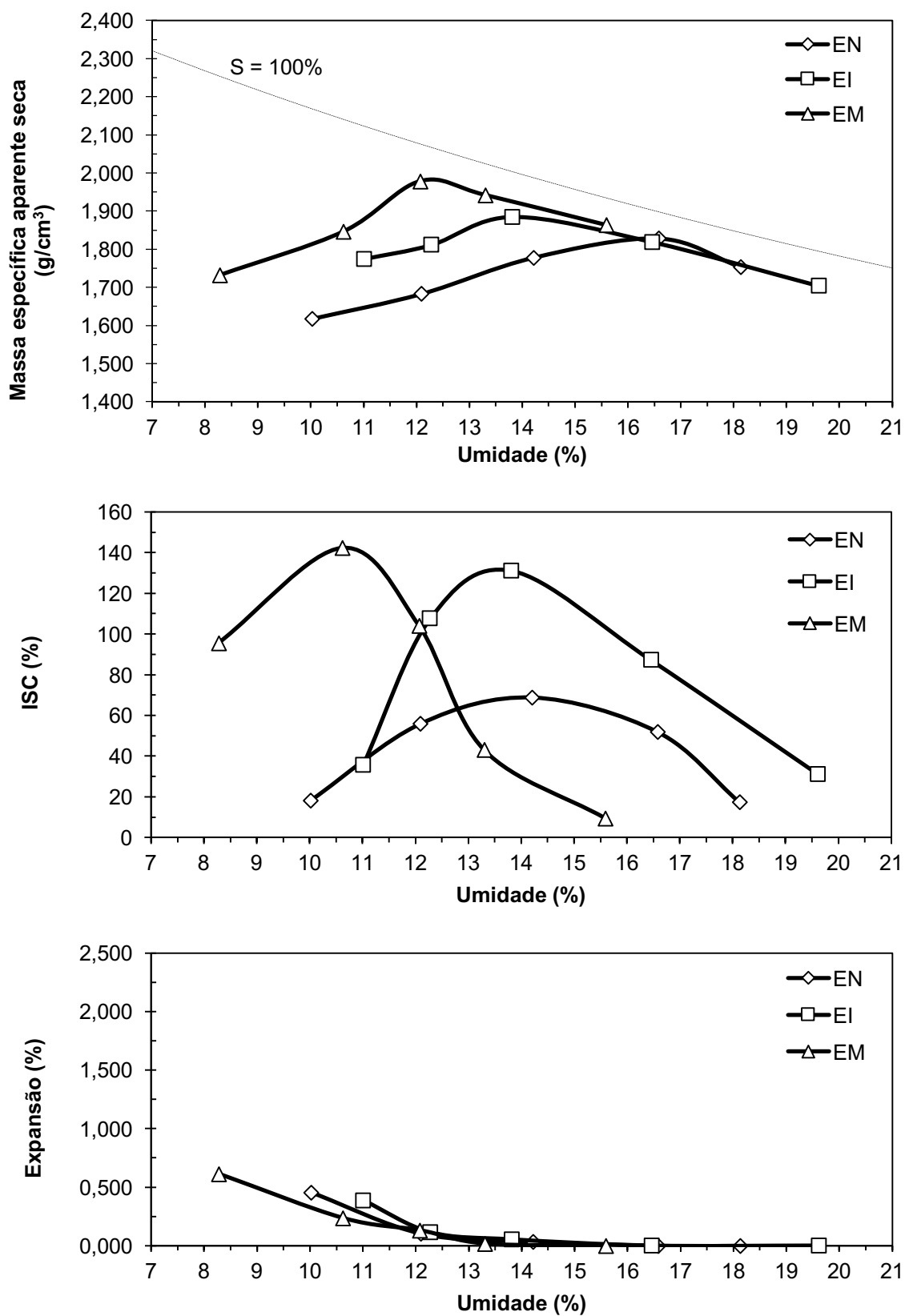
Fonte: Autora

Figura 4-10 – Curvas de compactação, ISC e expansão do solo S1KR10 para as EN, EI e EM



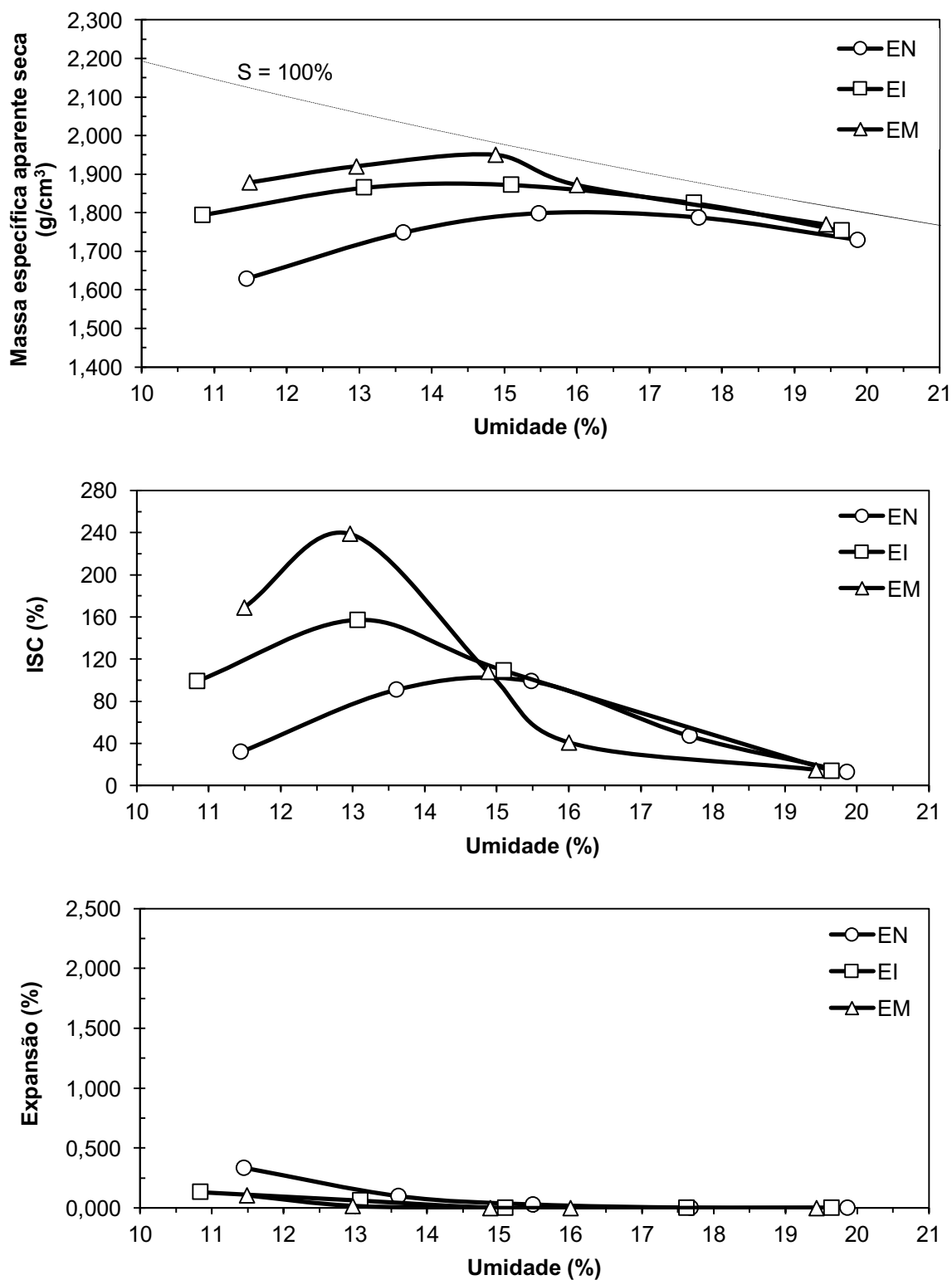
Fonte: Autora

Figura 4-11 – Curvas de compactação, ISC e expansão do solo S1KR20 para as EN, EI e EM



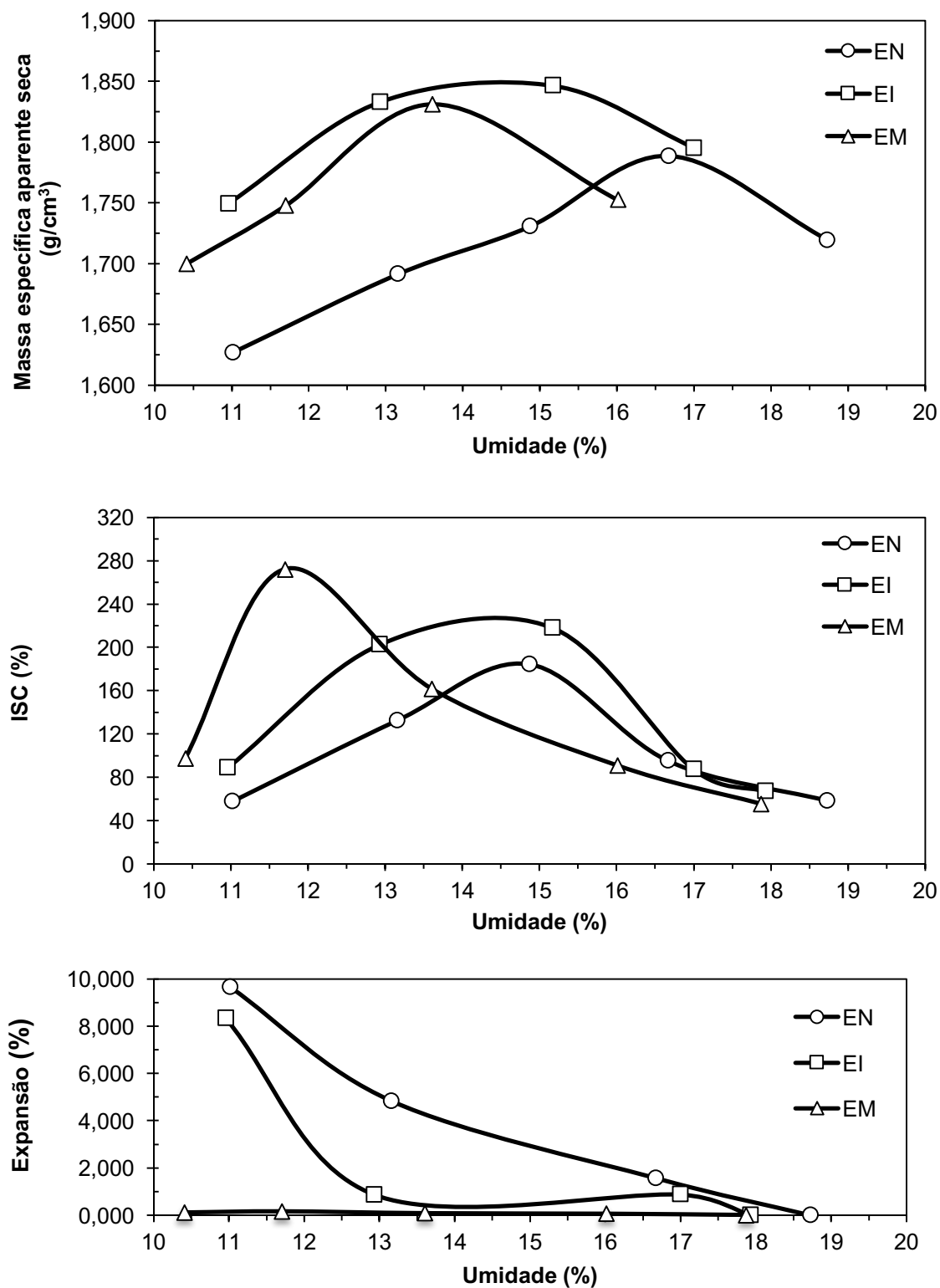
Fonte: Autora

Figura 4-12 – Curvas de compactação, ISC e expansão do solo S1KR30 para as EN, EI e EM



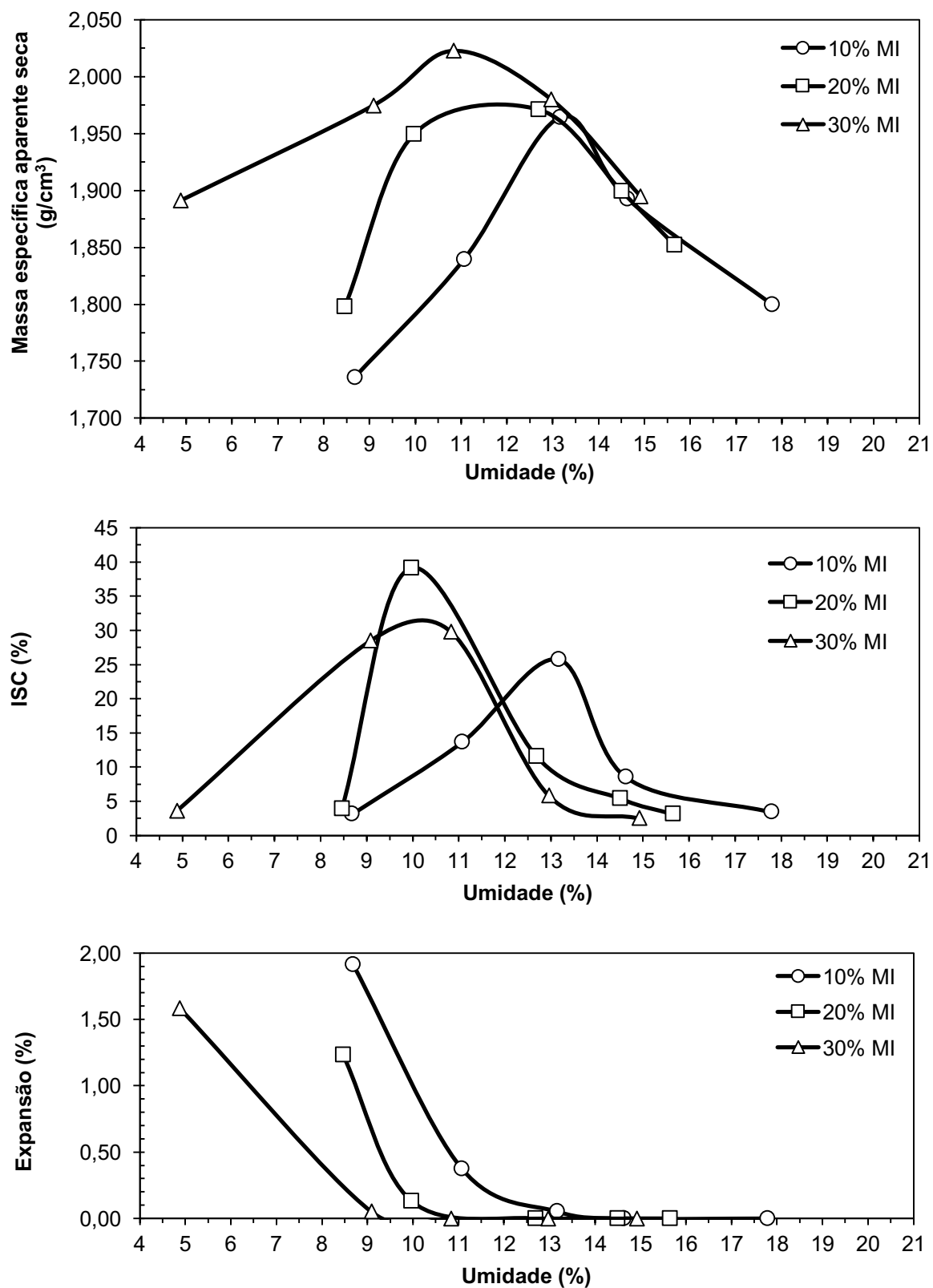
Fonte: Autora

Figura 4-13 – Curvas de compactação, ISC e expansão do solo S1CP10 para as energias EN, EI e EM



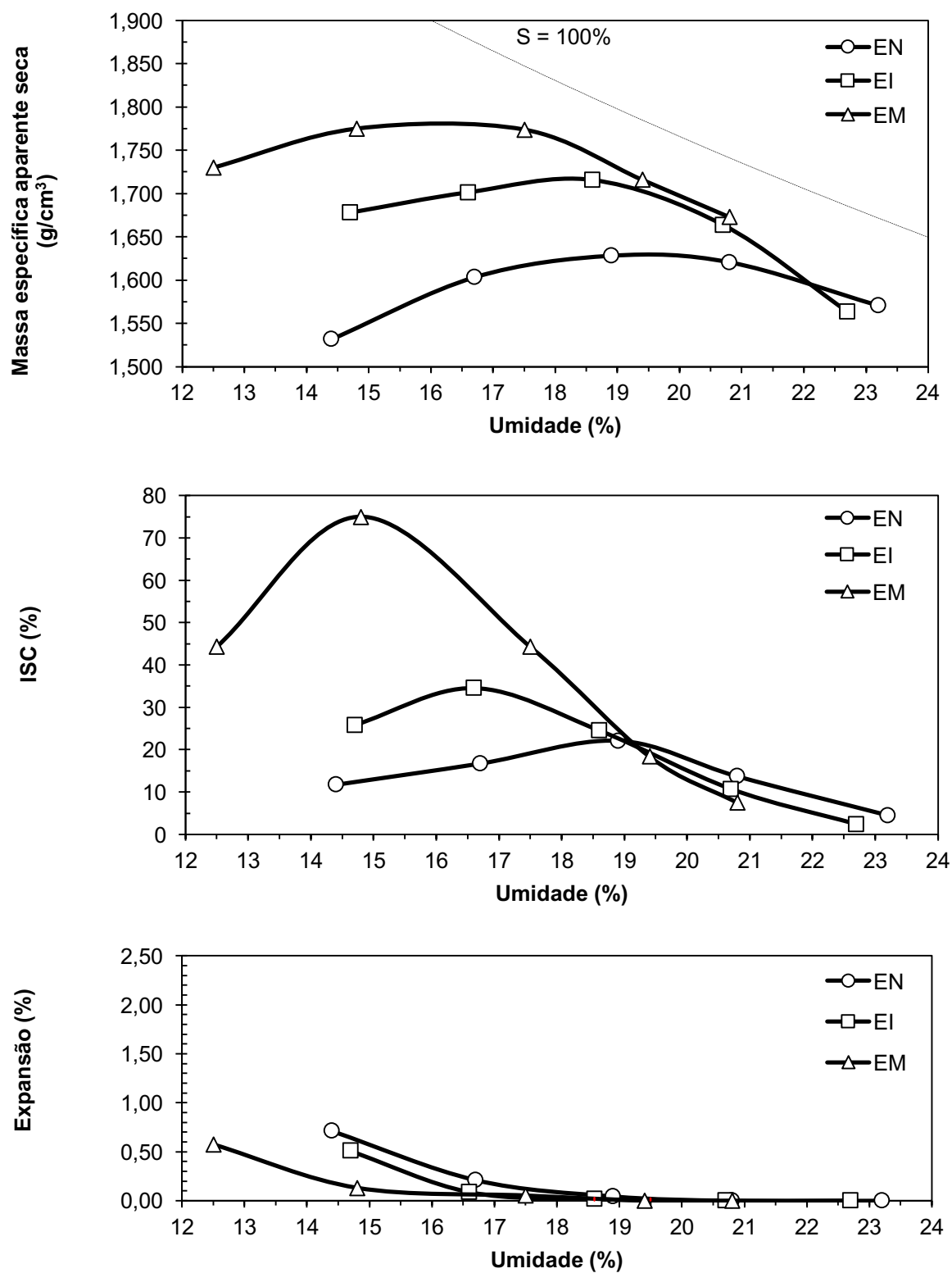
Fonte: Autora

Figura 4-14 – Curvas de compactação, ISC e expansão do solo S1 com 10, 20 e 30% de MI para a EM



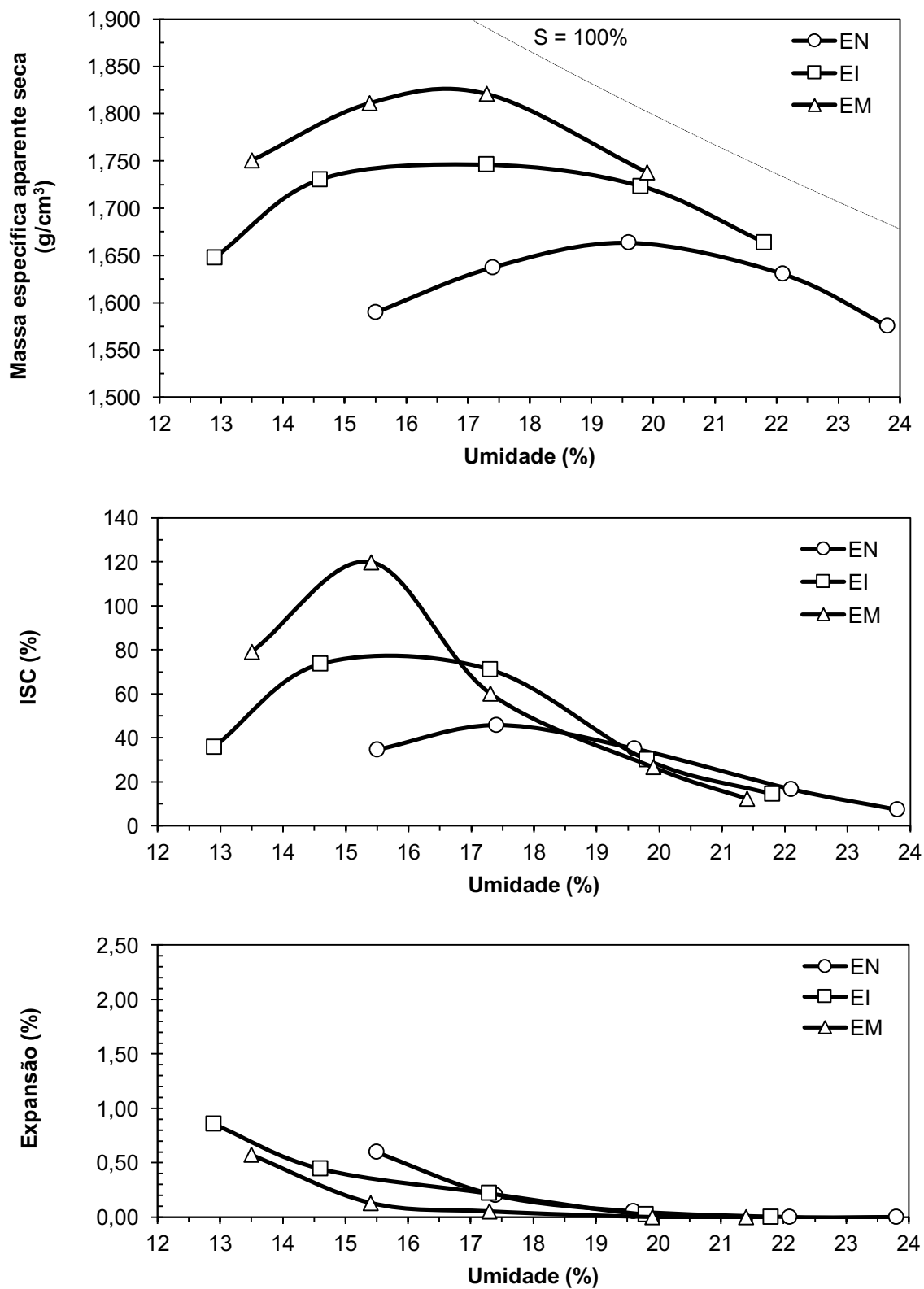
Fonte: Autora

Figura 4-15 – Curvas de compactação, ISC e expansão do solo S2 nas energias EN, EI e EM



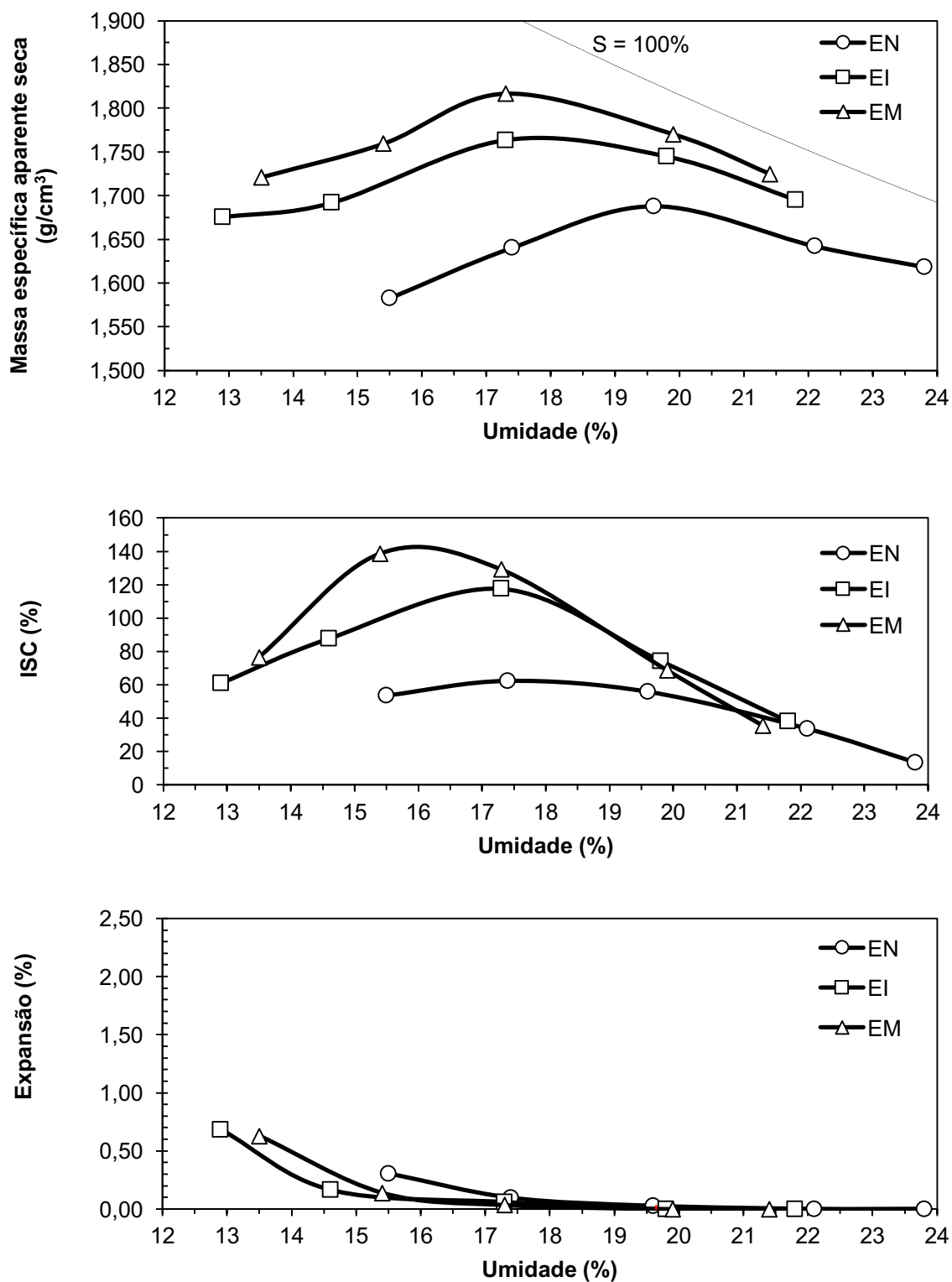
Fonte: Autora

Figura 4-16 – Curvas de compactação, ISC e expansão do solo S2KR10 nas energias EN, EI e EM



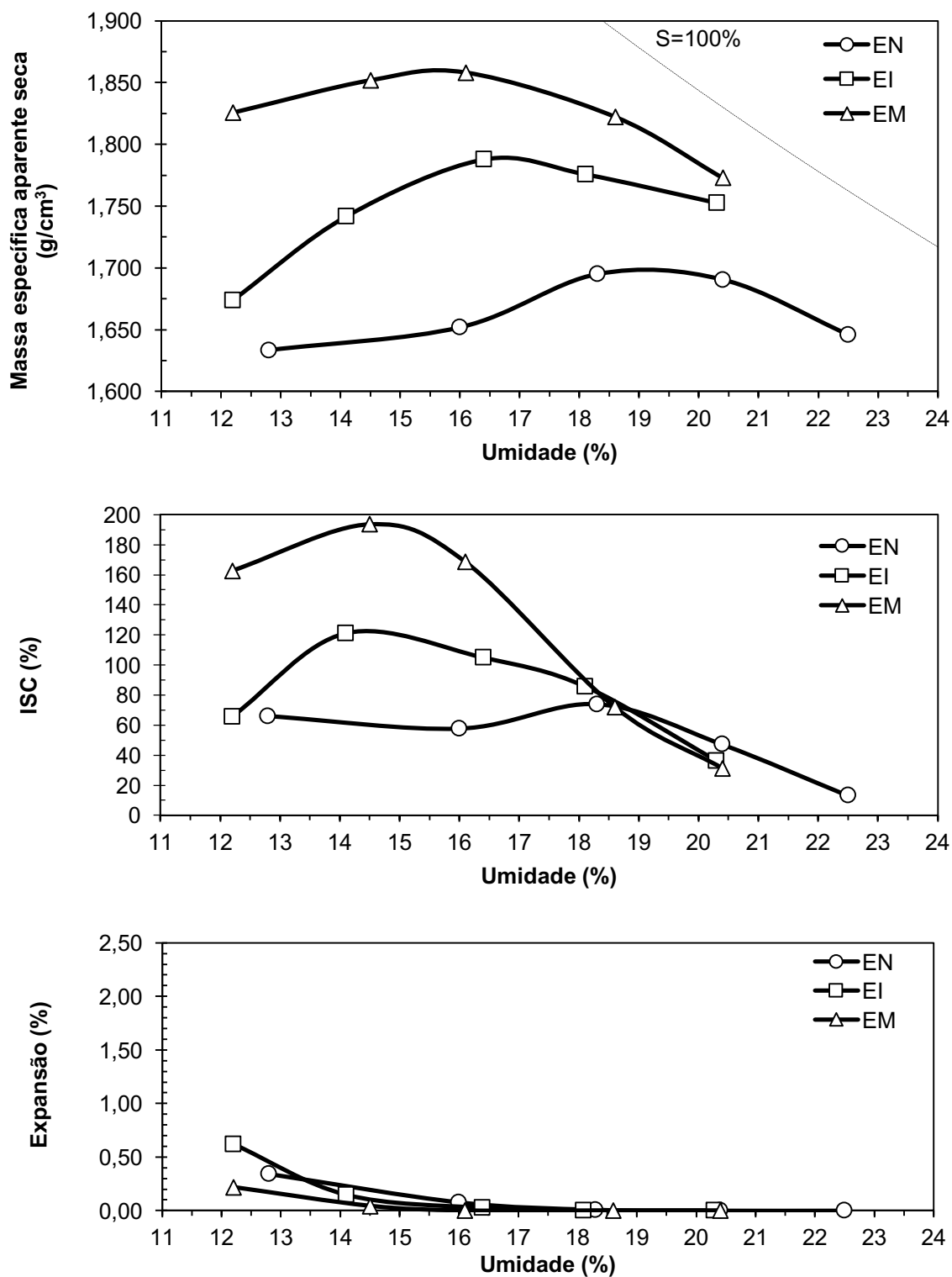
Fonte: Autora

Figura 4-17 – Curvas de compactação, ISC e expansão do solo S2KR20 nas energias EN, EI e EM



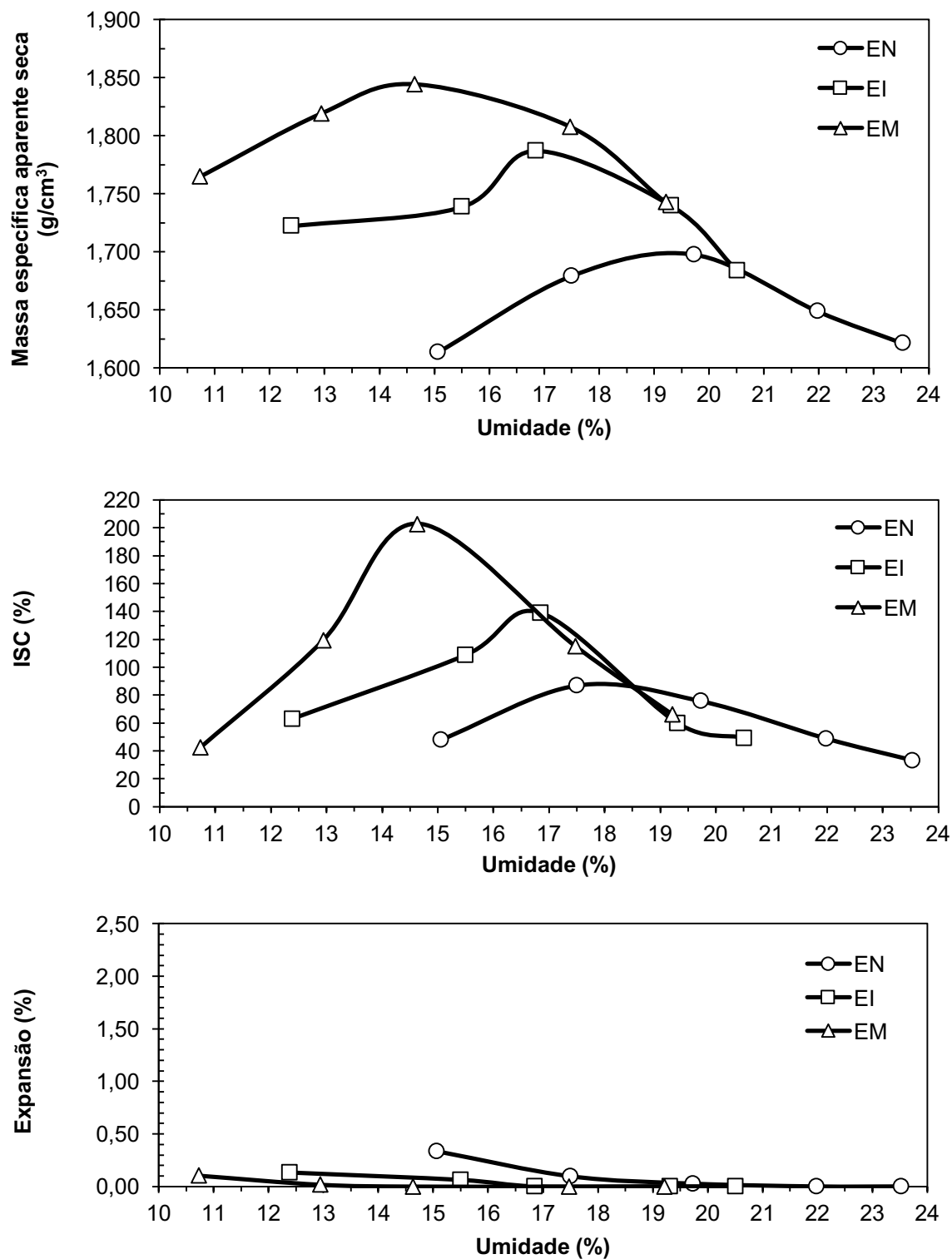
Fonte: Autora

Figura 4-18 – Curvas de compactação, ISC e expansão do solo S2KR30 nas energias EN, EI e EM



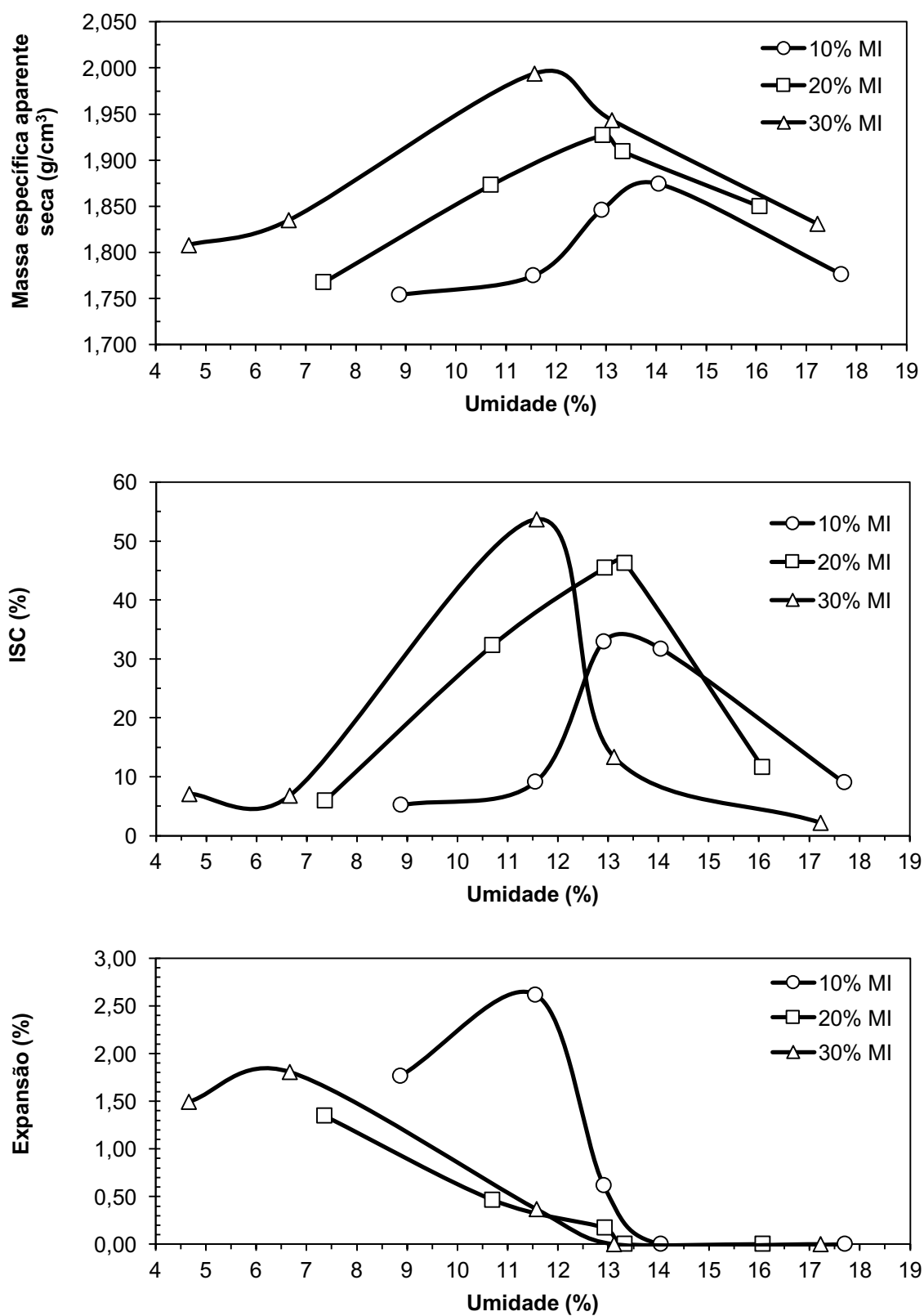
Fonte: Autora

Figura 4-19 – Curvas de compactação, ISC e expansão do solo S2CP10 nas energias EN, EI e EM



Fonte: Autora

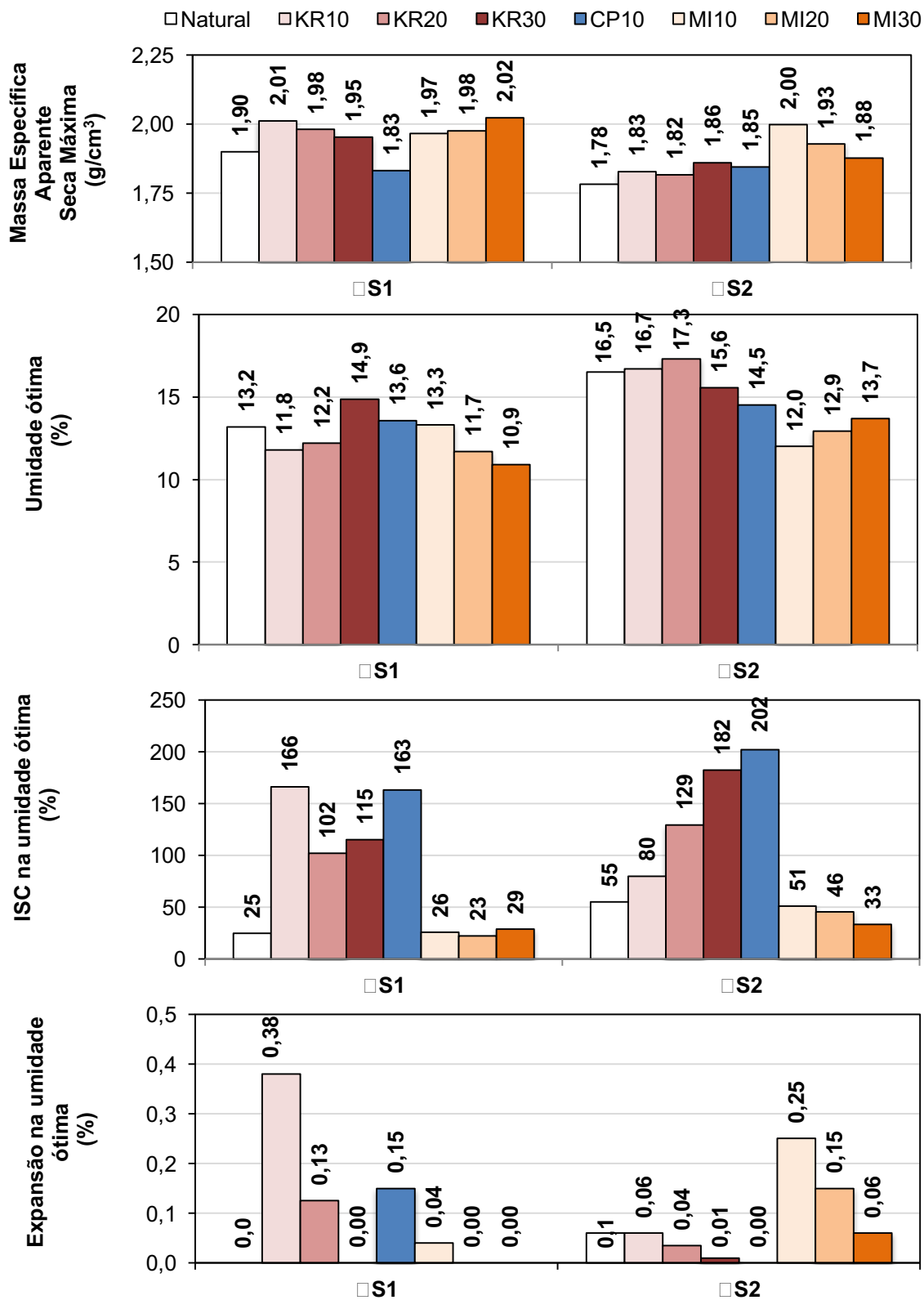
Figura 4-20 – Curvas de compactação, ISC e expansão do solo S1 com 10, 20 e 30% de MI para a EM



Fonte: Autora

A Figura 4-21 resume os resultados obtidos para todas as misturas com os solos S1 e S2 durante o ensaio de compactação, expansão e ISC.

Figura 4-21 – Resumo dos parâmetros da compactação, ISC e expansão para os solos e suas misturas na EM



Fonte: Autora

Apesar de ter apresentado valores elevados de ISC, a mistura S1CP10, enquadrada como solo-cimento, quando submetida a ensaio de compressão axial, descrito pela NBR 12025 (ABNT, 2012), resultou na resistência 1,67 MPa aos sete dias. Concluiu-se a partir desse resultado, que a mistura, mesmo empregando a dosagem máxima indicada pela NBR 12225 (ABNT, 2012), não atende ao valor normativo mínimo de 2,10 MPa para uso como solo-cimento para camada de pavimento.

Observa-se que ambos os solos, com ISC inferiores a 80%, são inicialmente inadequados para camadas de base de pavimentos, e com a incorporação do coproduto, passaram a atender ao limite normativo. O cimento Portland provocou igualmente um grande aumento no ISC, como esperado. As misturas com MI apresentaram valores próximos, senão inferiores, aos solos puros e indicaram que a estabilização promovida pelo coproduto é química e não granulométrica. Dentre todos os resultados obtidos para o ISC, vale ressaltar o elevado desempenho do coproduto para o solo argiloso, com aumento da ordem de 560% do aumento do ISC para a mistura com 10%, superando até mesmo o resultado com cimento.

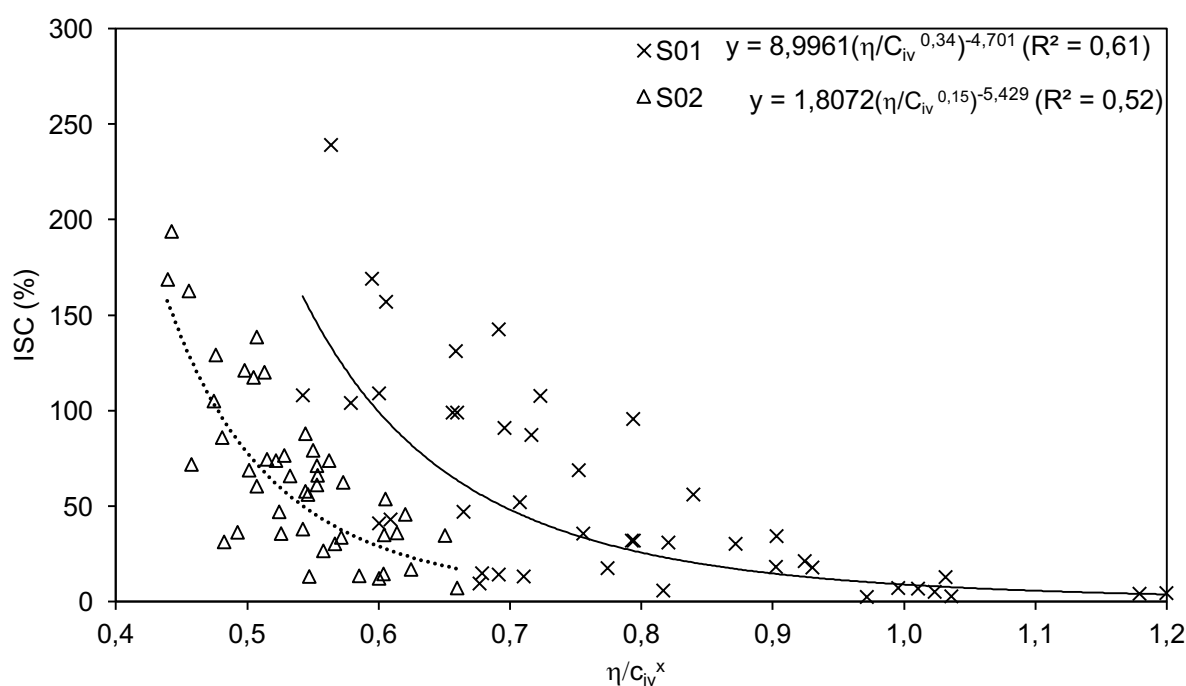
Os resultados da compactação mostraram que a massa específica aparente máxima para todas as composições com coproduto foram maiores que para o solo puro, excedendo até mesmo o valor obtido com cimento Portland. As misturas com MI também apresentaram aumento da massa específica aparente máxima. As umidades ótimas apresentaram variações inferiores a 5%. De forma geral, observa-se que a adição do coproduto provocou ligeiro aumento da umidade ótima enquanto a adição do MI provocou redução do valor. A adição do cimento provocou efeitos distintos nos solos: enquanto para S1 houve um leve aumento, para S2 apresentou redução.

Todos os resultados de expansão atenderam ao máximo exigido para camadas de bases (0,5%). A incorporação do coproduto produziu um aumento da expansão somente para as misturas com o solo S1, que, ainda assim, apresentaram valores bem abaixo do limite. Para o solo S2, apesar da incorporação do coproduto, a expansão é mantida para mistura com 10% de KR e sofreu redução para as demais misturas, chegando a zero com 30% de KR. A adição do cimento no solo S2 reduziu a expansão, porém para o solo S1, o efeito é contrário.

Os resultados das misturas com KR, obtidos a partir do ensaio de compactação e ISC, podem ser analisados segundo a interpretação aplicada por Consoli *et al.*

(2007). A partir dessa análise, a capacidade de suporte seria expressa como função da razão entre a porosidade e o teor de coproduto. O expoente do teor de adição (C_{iv}) de 0,28, utilizado por Foppa (2005) e por Consoli *et al.* (2007), não se mostra adequado para os solos analisados neste trabalho. Para cada um dos solos, o expoente de C_{iv} foi, portanto, determinado de forma aproximada por sucessivas tentativas, de forma a obter o melhor ajuste. Essa metodologia foi aplicada aos resultados da composição com o coproduto. A distribuição dos pontos sugere certo grau de conformação com o modelo sugerido por Consoli *et al.* (2007), contudo, os valores de R^2 foram bastante inferiores aos obtidos por ele. Os dados calculados a partir dos ensaios de compactação e de ISC, utilizados para produzir a Figura 4-22, são mostrados no Apêndice A.

Figura 4-22 – Resistência à compressão do solo como função da relação vazios/cimento expresso em termo da porosidade e do teor volumétrico do cimento



Fonte: Autora

4.2.2.2 Módulo de resiliência

Os ensaios triaxiais de carga repetida foram conduzidos em laboratório. Por tratar-se de um ensaio com um custo superior ao ISC, realizou-se uma quantidade reduzida de determinações. O procedimento do ensaio é descrito pela Norma ME 134 (DNIT, 2010). Os corpos-de-prova foram moldados nas condições de umidade ótima e

massa específica aparente máxima determinadas pela compactação na energia modificada. Durante a cura de sete dias os corpos-de-prova permaneceram na câmara úmida, sob as mesmas condições. A Figura 4-23 mostra o equipamento usado no ensaio e a preparação da amostra.

Figura 4-23 – (a) Equipamento utilizado para ensaio triaxial dinâmico e (b) amostra revestida



(a)

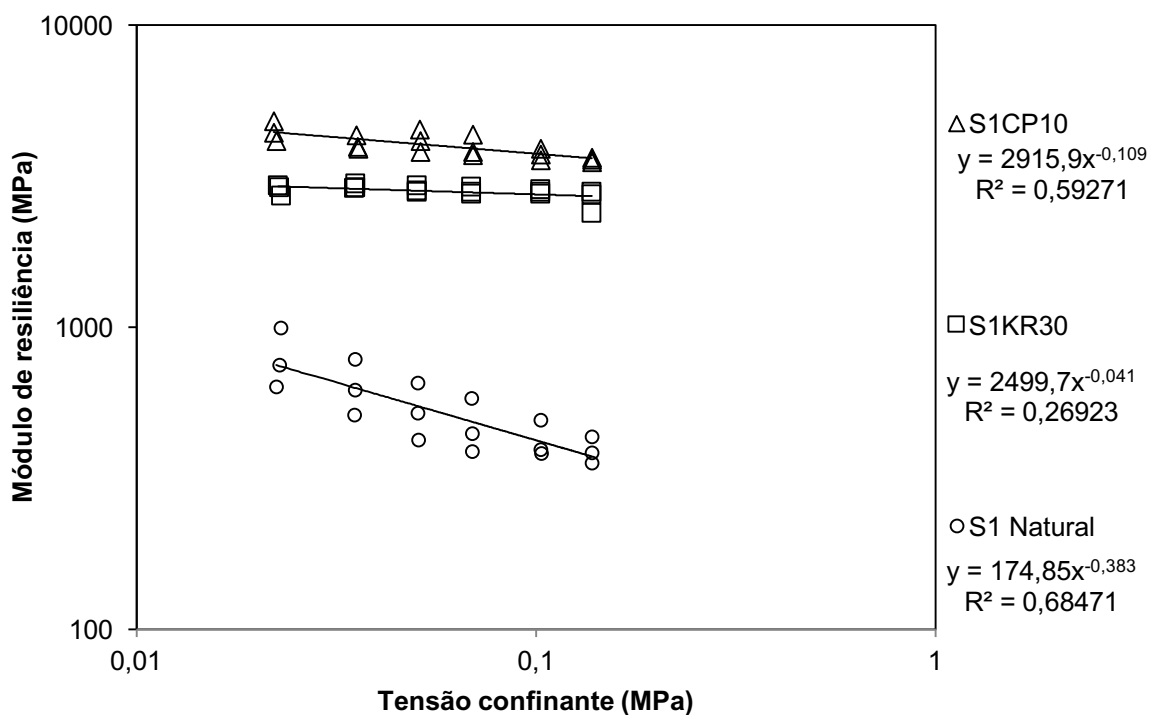


(b)

Fonte: Autora

Três modelos de ajustes foram aplicados aos resultados do ensaio triaxial dinâmico: em função da tensão confinante, em função da tensão desviadora e o modelo composto que utiliza ambas as tensões. A Figura 4-24 apresenta o resultado do ajuste para o modelo linear da tensão confinante para as três misturas e bem como os coeficientes de conformação (R^2) obtidos.

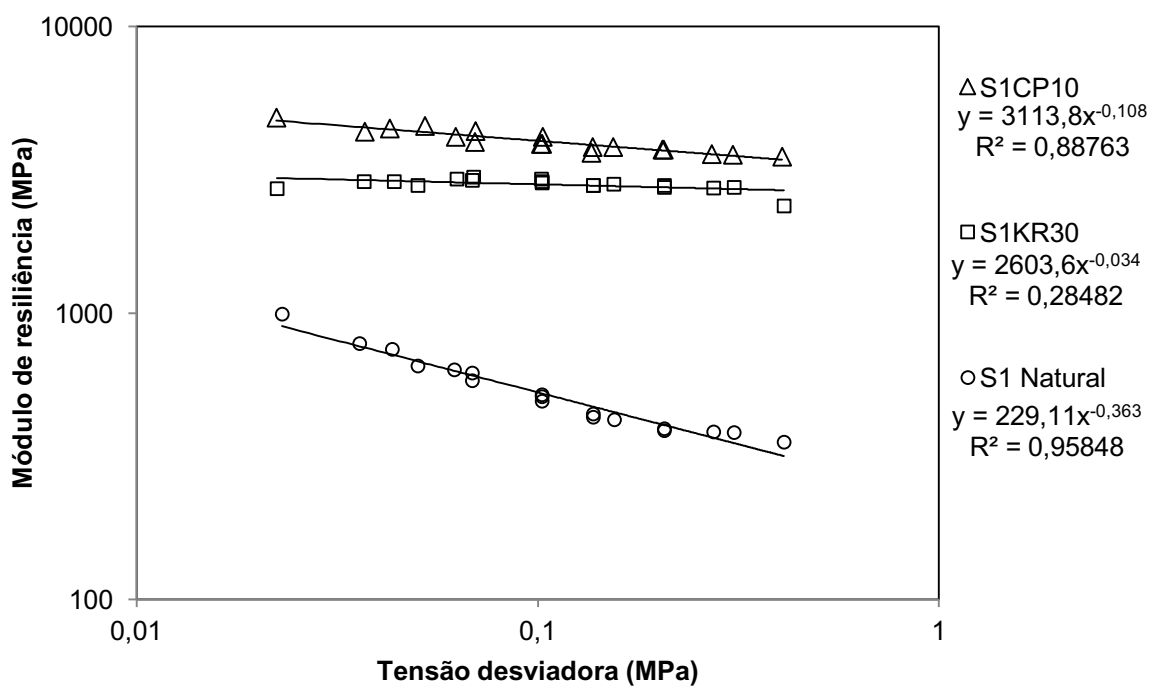
Figura 4-24 – Módulo de resiliência como função da tensão confinante



Fonte: Autora

Os ajustes lineares a partir da tensão desviadora e seus coeficientes de determinação são mostrados na Figura 4-25.

Figura 4-25 – Módulo de resiliência como função da tensão desviadora

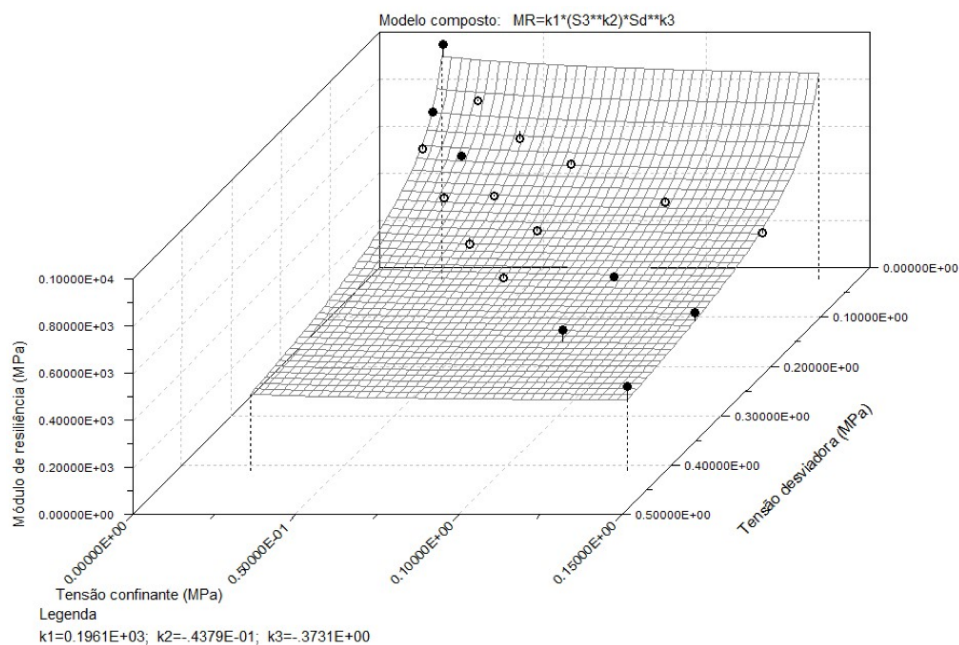


Fonte: Autora

Para análise do modelo composto utilizou-se o software LabFit, desenvolvido na Universidade Federal de Campina Grande. Com o uso deste programa, foi possível

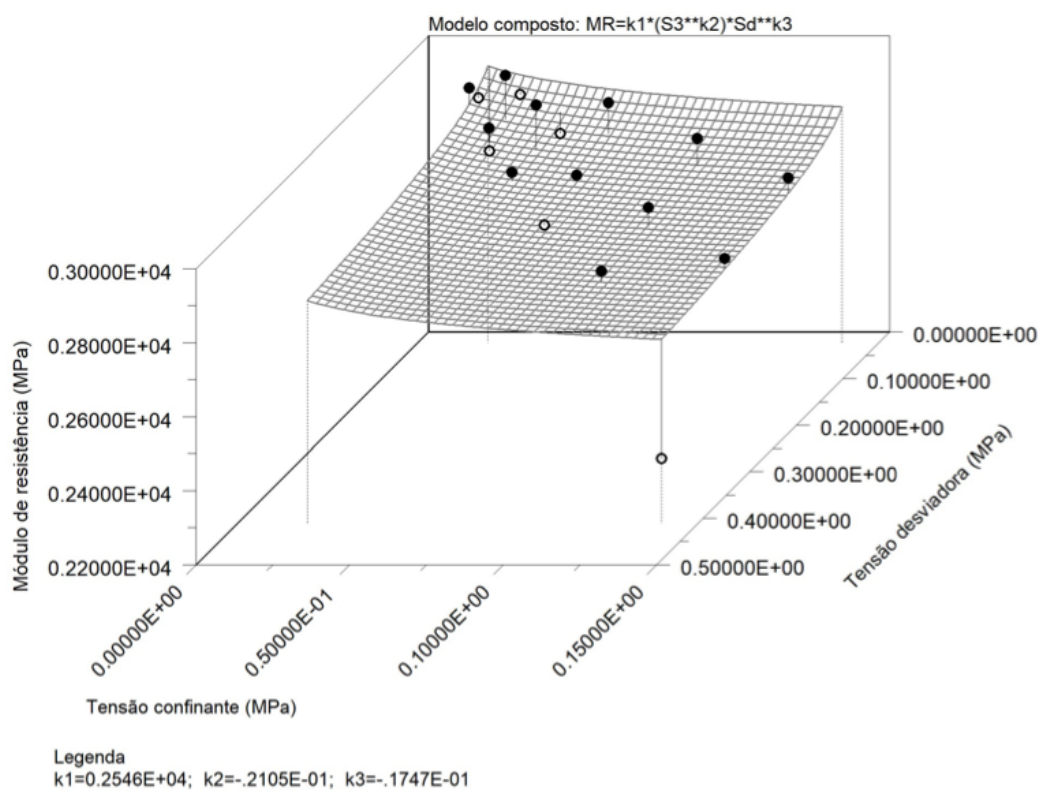
obter os coeficientes de equação do modelo composto, o R^2 correspondente, além de gráficos 3D que ilustram variação do MR em função simultaneamente das tensões confinante e desviadora (Figura 4-26 a Figura 4-28).

Figura 4-26 – Modelo composto para solo S1 puro



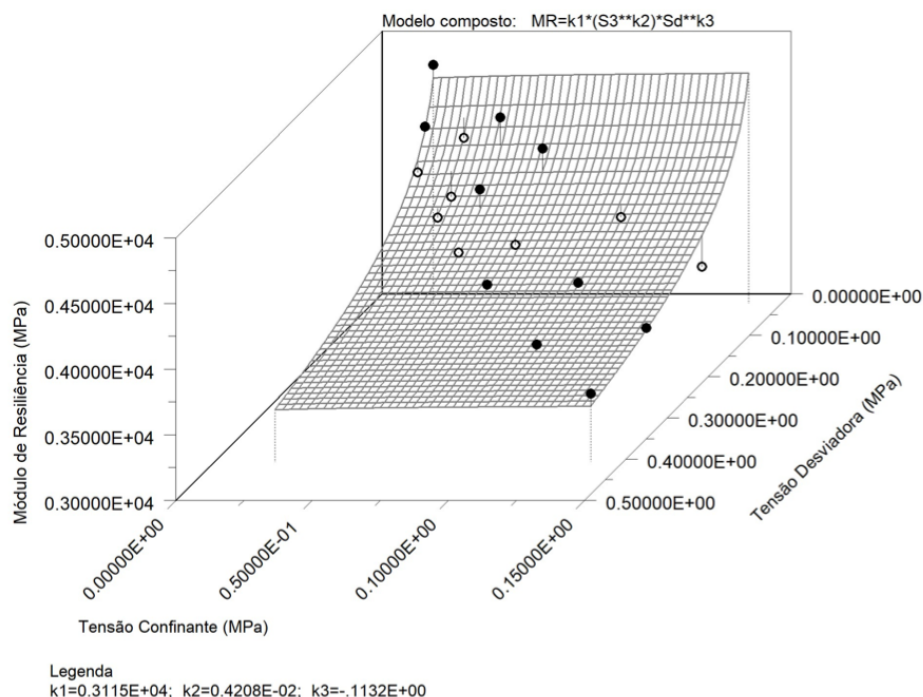
Fonte: Autora

Figura 4-27 – Modelo composto para a mistura S1KR30



Fonte: Autora

Figura 4-28 – Modelo composto para a mistura S1CP10



Fonte: Autora

A Tabela 4-3 apresenta de forma resumida os coeficientes dos modelos de MR das misturas e seus respectivos coeficientes de determinação, que avaliam a qualidade de cada um dos ajustes. O modelo composto foi o que melhor descreveu os valores de MR para as três amostras. A mistura S1KR30, entretanto, apresentou valores de R^2 abaixo de 0,5 para todos os modelos.

Tabela 4-3 – Coeficiente dos modelos do módulo de resiliência

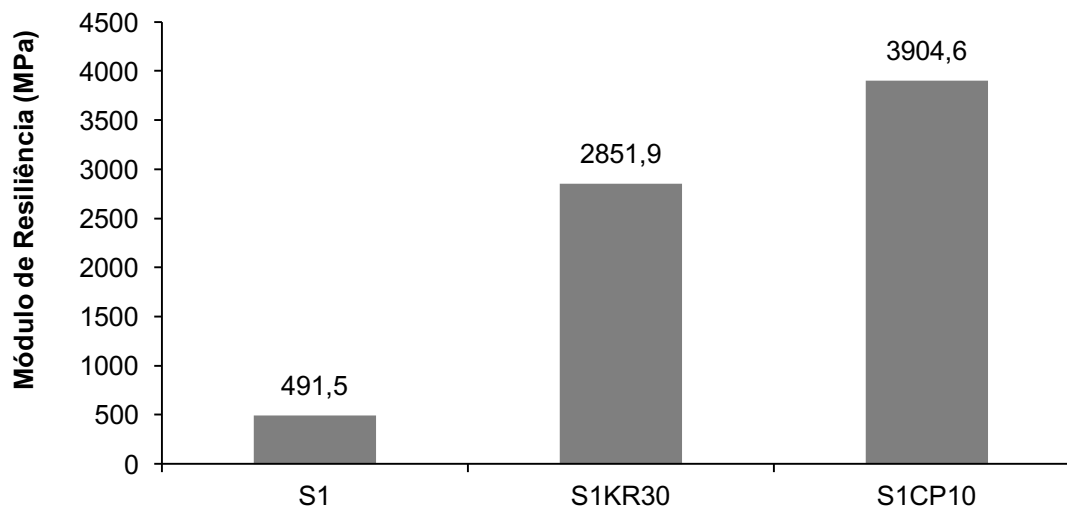
Modelos		S1	Mistura S1KR30	S1CP10
$k_1 \sigma_3^{k_2}$	k1	1,75E+02	2,50E+03	2,92E+03
	k2	-3,83E-01	-4,10E-02	-1,09E-01
	R^2	0,68	0,27	0,59
$k_1 \sigma_d^{k_2}$	k1	2,29E+02	2,60E+03	3,11E+03
	k2	-3,63E-01	-3,04E-02	-1,08E-01
	R^2	0,96	0,28	0,89
$k_1 \sigma_d^{k_2} \sigma_d^{k_3}$	k1	1,96E+02	2,55E+02	3,12E+03
	k2	-4,38E-02	-2,11E-01	4,21E-03
	k3	-3,73E-01	-1,75E-01	-1,13E-01
	R^2	0,98	0,30	0,89

Fonte: Autora

Para comparar o desempenho dos dois estabilizantes de forma mais objetiva, selecionou-se o MR correspondente ao estado de tensões $\sigma_1 = \sigma_3 = 0,10$ MPa para as três amostras, como mostra a Figura 4-29. O valor de MR da mistura com coproduto apresentou um desempenho 5,8 vezes superior ao do solo natural, ficando, ainda assim abaixo do resultado do solo-cimento. Vale ressaltar que o teor de cimento empregado de 10% é pouco realista, o que sugere a competitividade do

coproduto, se comparado com teores de cimento mais comumente utilizados (da ordem de 6%).

Figura 4-29 – Módulo de resiliência para tensão confinante e desviadora de 0,10 MPa



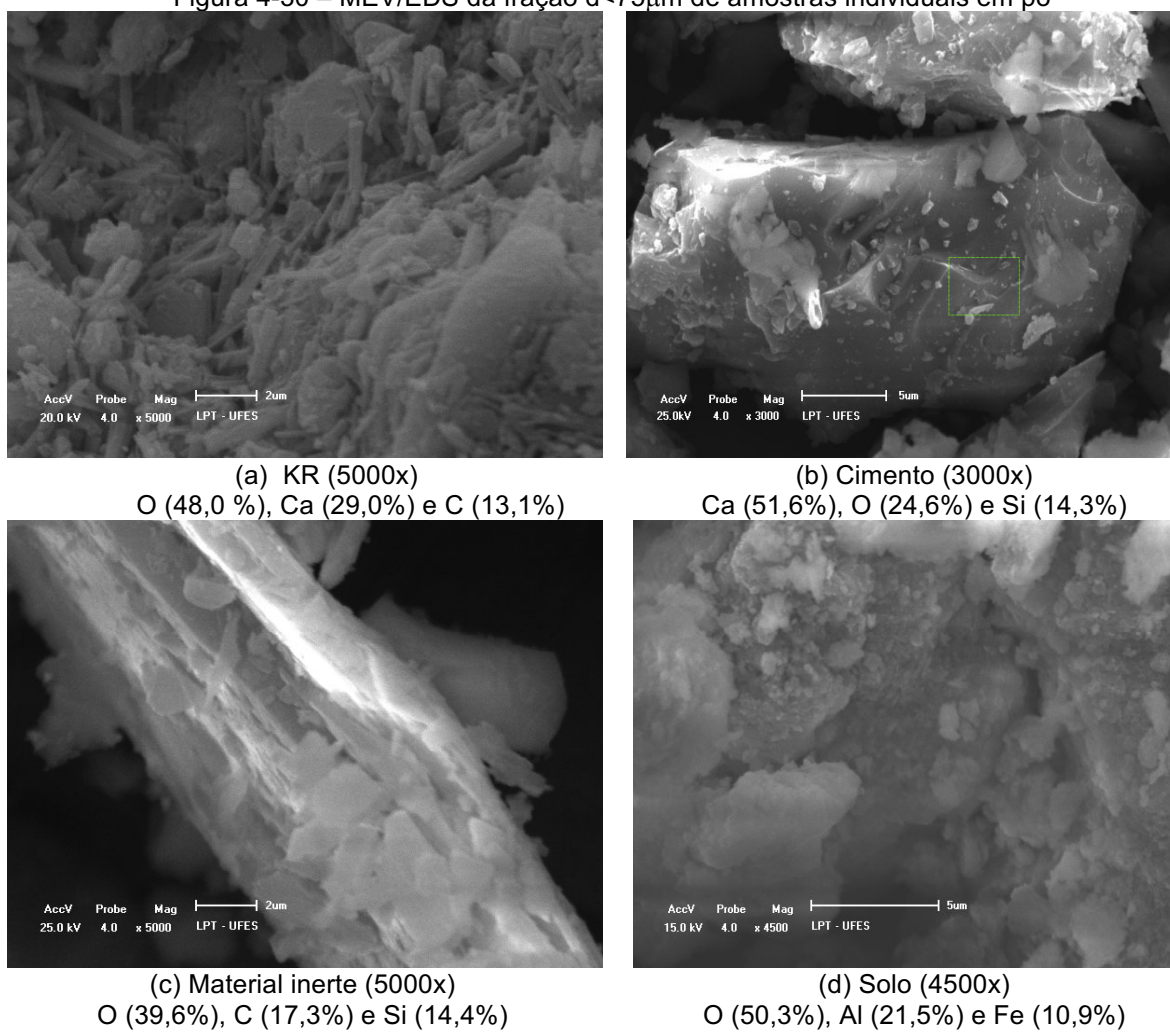
Fonte: Autora

4.3 ETAPA III: INVESTIGAÇÃO DOS MECÂNIISMOS DE ESTABILIZAÇÃO

4.3.1 Microestrutura e análise química

Durante o ensaio, procurou-se gerar imagens de magnitudes similares para todas as amostras a fim de facilitar as análises comparativas entre elas. Contudo, devido a limitações do próprio equipamento para algumas amostras isso não foi possível, pois grandes ampliações resultavam em imagens pouco nítidas ou completamente indistinguíveis. Ao todo foram geradas 79 micrografias. A Figura 4-30 apresenta as micrografias individuais e os teores em massa dos principais elementos detectados pelo EDS. Em algumas micrografias, o EDS foi aplicado a uma região específica da imagem (delimitada pelo retângulo mostrado sobre a imagem), nos demais casos, o EDS foi aplicado à imagem como um todo.

Figura 4-30 – MEV/EDS da fração $d < 75\mu\text{m}$ de amostras individuais em pó

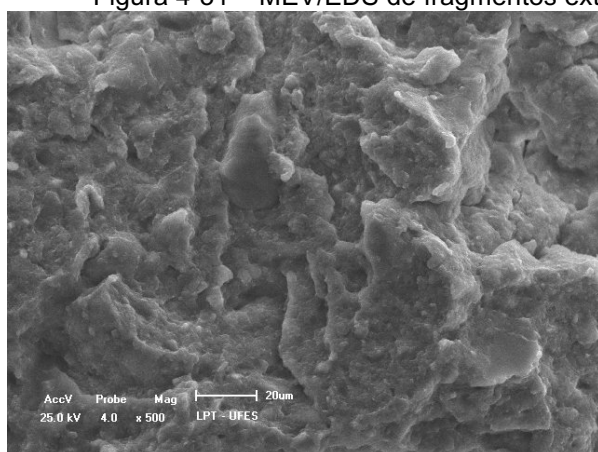


Fonte: Autora

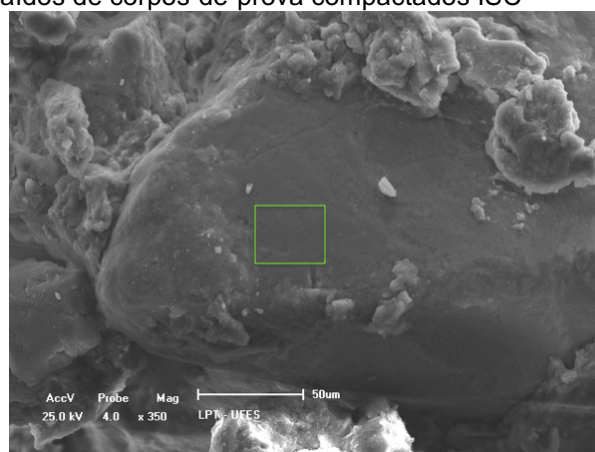
A Figura 4-30(a) permite observar o mineral etringita, anteriormente detectado pelo DRX. A presença do cálcio no resultado do EDS do coproduto KR corrobora com o difratograma obtido, o qual apontou igualmente compostos de cálcio (portlandita, calcita e etringita). O EDS aplicado à Figura 4-30(b) da amostra de cimento indica a presença majoritária de cálcio, oxigênio e silício, uma vez que o CaO e o SiO_2 são os principais composto desse material (Quadro 2-1).

A Figura 4-31 apresenta as micrografias de amostras solo compactado, sem adições e incorporado com 10% de cimento, 20% de material inerte e 30% de coproduto.

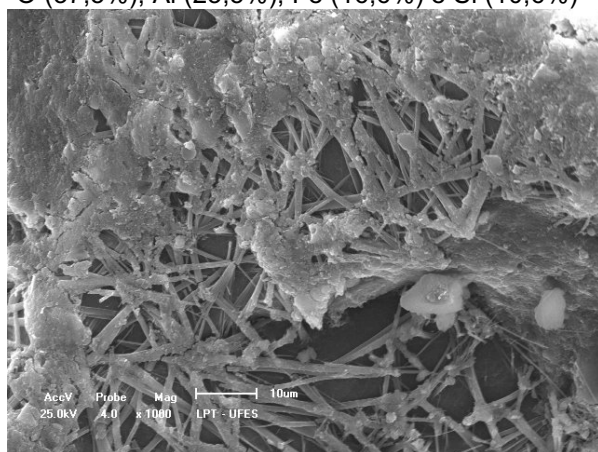
Figura 4-31 – MEV/EDS de fragmentos extraídos de corpos-de-prova compactados ISC



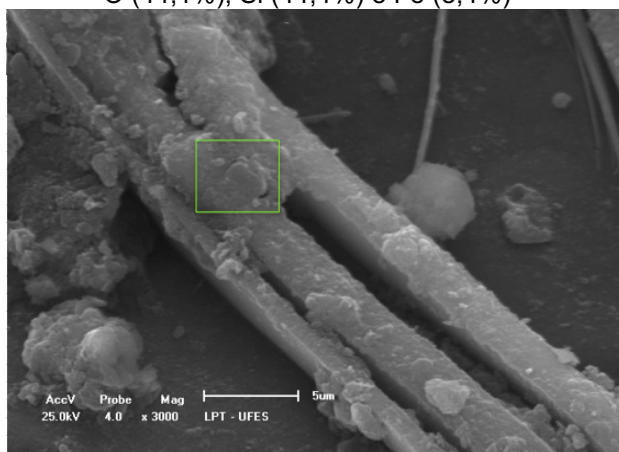
(a) S1 (500x)
O (37,5%), Al (23,5%), Fe (16,6%) e Si (10,6%)



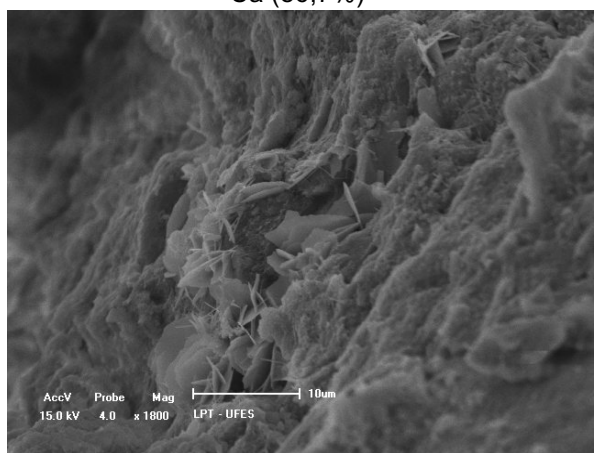
(b) S1 (350x)
O (44,1%), Si (44,4%) e Fe (8,4%)



(c) S1CP10 (1080x)
Ca (86,7%)



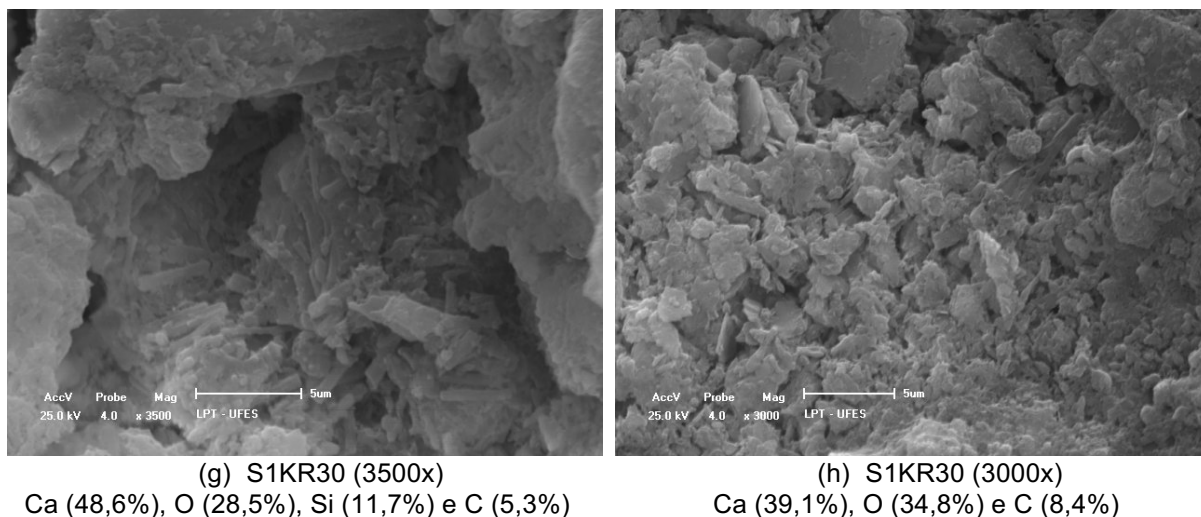
(d) S1CP10 (3000x)
Ca ($\approx 100,0\%$)



(e) S1MI20 (1800x)
O (49,9%), Si (31,9%), C (14,2%)



(f) S1MI20 (1200x)
O (50,6%), Si (29,1%) e C (13,1%)



Fonte: Autora

A Figura 4-31 permite comparar o aspecto da microestrutura das diferentes misturas. De forma geral os elementos detectados pelo EDS nas amostras de solo compactado são oxigênio, cálcio, silício e carbono. No caso da mistura com cimento e coproduto observou-se também a presença do cálcio, já observados nas amostras individuais desses materiais. Na Figura 4-31(c) e Figura 4-31(d) é possível observar a presença do C-S-H na forma de “favos de mel”, produto da hidratação do cimento. Este composto é um dos principais responsáveis pela resistência do solo-cimento.

Nas micrografias da mistura com coproduto mostradas na Figura 4-31(f) e Figura 4-31(g), observa-se a presença da etringita, já detectada pelo DRX da amostra individual do KR. Sabe-se que esse composto é gerado pelas reações de hidratação do cimento Portland e provoca aumentos volumétricos capazes de preencher poros, produzindo uma estrutura mais densa e coesa. Tal fato justifica o aspecto geral mais denso e com os grãos unidos mais intimamente, observado nas misturas com coproduto, bastante diferente do aspecto da amostra de solo-agregado (Figura 4-31(d)). Esse fato está intimamente ligado a maior massa específica aparente bem como aos resultados positivos dos parâmetros mecânicos obtidos com o coproduto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÃO

O trabalho realizou uma abordagem experimental comparativa entre o uso do coproduto dessulfuração KR e outros estabilizantes tradicionais - cimento portland e agregados pétreos. O foco principal foi uso do solo estabilizado para camadas de pavimentação. Logo, foram executados ensaios necessários para dimensionamento de pavimentos (parâmetros físicos e parâmetros mecânicos, ISC e módulo de resiliência). Adicionalmente, no sentido de investigar os ganhos de resistência obtidos, foram realizadas análises química, mineralógicas e da microestrutura dos materiais. A revisão bibliográfica e os resultados experimentais permitem concluir que:

- no quesito expansibilidade, o coproduto foi avaliado individualmente por meio do ensaio de expansão PTM, e adicionado aos solos no decorrer do ensaio de ISC. Todos os resultados de expansão atendem aos limites para pavimentos - 3% para o PTM e de 0,5% para uso como base;
- a análise de FRX apontou a presença de compostos condizentes com processo de produção siderúrgico e que vão ao encontro dos resultados encontrados na literatura. Muitos desses compostos também presentes no cimento Portland;
- o difratograma do coproduto mostrou o caráter cristalino de sua microestrutura, o que sugere baixa reatividade, em detrimento dos elevados acréscimos de resistência obtidos pelo ensaios mecânicos que apontam sua capacidade de estabilização química;
- o coproduto apresentou desempenho competitivo, promovendo melhoras na capacidade de suporte comparáveis às promovidas pelo cimento Portland no teor de 10%. O módulo de resiliência sofreu igualmente acréscimos próximos de 600%. Os limites de consistência não apresentaram grandes variações;
- a ação estabilizante do coproduto deve-se, principalmente, a sua ação química, e não granulométrica, uma vez que misturas de material inerte

pétreo de mesma granulometria que o coproduto não provocaram aumento do ISC dos solos;

- o resultado dos parâmetros de pozolanicidade descartou o uso do coproduto como adição para cimento, segundo os critérios da NBR 12653 (ABNT, 2015). Contudo, não é descartada completamente a possibilidade de que parte do ganho de resistência do solo esteja ligado em certo grau a reações pozolânicas;
- a aplicação do modelo matemático que expressa o ISC como função da razão vazios/coproduto para os solos analisados resultou em correlações com baixo valor de R^2 . Todavia, essa interpretação, bastante eficaz na dosagem de solo-cimento, deve ser aprimorada e expandida para outros materiais, pois constitui importante ferramenta na dosagem de estabilizantes para solos.
- a investigação mineralógica e microestrutural realizada permite atribuir a estabilização química promovida à presença portlandita e etringita. Tais compostos, presentes no coproduto KR, são também produzidos durante a hidratação do cimento e são responsáveis pelo enrijecimento da pasta. No caso do solo estabilizado, a etringita presente no coproduto é ativada durante o processo de compactação e é posteriormente consumida aumentando a resistência do solo e preenchendo seus poros. Adicionalmente, é possível que o cálcio da portlandita do coproduto também reaja com os compostos do solo como sílica e alumina e produza C-S-H e C-A-H, contribuindo ainda mais para o ganho de resistência. Como resultado dessas interações químicas solo-KR, o material estabilizado com o coproduto apresentou de forma geral uma microestrutura mais densa e coesa que solo puro e solo-agregado.

5.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Por se tratar de um coproduto novo e ainda pouco explorado, as publicações acerca do material são escassas. No sentido de aprofundar os conhecimentos sobre a ação do coproduto, sugere-se que sejam repetidos os ensaios de caracterização ambiental de resíduos sólidos, a fim de confirmar a presença de fenóis.

A atividade pozolânica do coproduto deve ser reavaliada segundo outros critérios mais apropriados para aplicação como estabilizante de solos. Este trabalho baseou-se na classificação voltada para aplicação como aditivo em cimento. Segundo este critério o coproduto mostrou-se inadequado, entretanto não se descarta a ocorrência de reações pozolânicas em menor grau que o exigido pela norma de cimento NBR 12653 (ABNT, 2015).

Sugere-se que sejam investigados fatores relacionados a mineralogia dos solos que otimizam a ação do coproduto. Para isso, um número maior de amostras de solo, estabilizados com o coproduto, deve ser submetido a ensaios de reação catiônica, FRX, DRX e MEV. Isso permitiria apontar quais solos são mais indicados para estabilização com o coproduto.

REFERÊNCIAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. **Boletim Técnico Boletim Técnico – Guia Básico da Utilização do Cimento Portland**. 2002. Disponível em: < http://www.abcp.org.br/cms/wp-content/uploads/2016/05/BT106_2003.pdf >. Acesso em: 21 jan. 2017.

_____. **Governar é abrir estradas. O concreto pavimentando os caminhos na formação de um novo país**. São Paulo, 164 p. 2009.

_____. **Folheto Estradas Concreto**. Disponível em: http://viasconcretas.com.br/wp-content/uploads/2013/02/Folheto_Estradas_Concreto.pdf. Acesso em: 21 jan. 2017.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5732: Cimento Portland Comum - Especificações. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR NM 16**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR NM 22**: Cimento Portland com adições de materiais pozolânicos - Análise química - Método de arbitragem. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR NM 23**: Cimento Portland - Determinação e massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 24**: Materiais pozolânicos - Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 25**: Materiais pozolânicos - Determinação do teor de álcalis disponíveis. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5736**: Cimento Portland pozolânico – Especificações. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro,

2016.

_____. **NBR 7181**: Análise granulométrica de solos. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7182**: Ensaio normal de compactação de solos. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 9895**: Solo - Índice de suporte Califórnia - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 12024**: Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos - Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 12025**: Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 12253**: Solo-cimento – Dosagem para emprego com camada de pavimento. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 15894-3**: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 3: Determinação da finura por meio da peneira 45 µm. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **Nota Técnica - Utilização de resíduos sólidos** – Disponível em: <http://www.ambientec.com.br/main.php?ver=artigo&id=4>. Acesso em: 18 fev. 2017.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **D 3282**: Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. West Conshohocken, PA, 2015.

_____. **C88-13**: Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate. West Conshohocken, PA, 2013.

_____. **D 4792**. Standard Test Method for Potential Expansion of Aggregates from Hydration Reactions West Conshohocken, PA, 2013.

ÄHNBERG, H.; JOHANSSON, S. E.; PIH, H.; CARLSSON, T. **Stabilising effects of different binders in some Swedish soils**. Ground Improvement. 7, No. 1, 9–23.

2003.

ArcelorMittal. **Fluxo de Produção – Usina – Quem somos – ArcelorMittal Tubarão**. Disponível em:

http://tubarao.arcelormittal.com/usina/fluxo_producao/fluxo_producao.asp. Acesso em: 02 nov. 2016.

ANDRADE, C. M. S.; TESSARI, C. L. ; OLIVEIRA, C. F. ; PIRES, P. J. M. ; VIEIRA, G. L. **Determinação das Características mecânicas da brita graduada tratada com cimento com incorporação de coproduto de aciaria KR**. In: 20ª RPU. REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 2017, Florianópolis. Anais, v. 1. 2017

AUTELITANO, F.; GIULIANI, F. **Electric arc furnace slags in cement-treated materials for road construction: Mechanical and durability properties**. Construction and Building Materials, v. 113, p. 280-289, 2016.

BENTO, P. F., 2006. **Uso de Cal e Fibras na Melhoria de Materiais para Utilização em Estruturas de Pavimentos**. Dissertação de Mestrado. Publicação, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p. 120.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro. 2008.

BRISOLA, D. F.; FERNANDES, T de L. A. P. **Otimização no preparo de amostras para análise em espectrofotômetro de fluorescência de raios-X**. XVI Jornada de Iniciação Científica – CETEM. 2009.

BRUN, D. W.; YUAN, W. C. **Caracterização e aproveitamento dos resíduos siderúrgicos principais gerados pela aciaria elétrica**. Porto Alegre: PPGEMM/UFRGS 34p. Seminário da disciplina MTMD99- Tópicos especiais- Resíduos industriais siderúrgicos: caracterização e aproveitamento, 1994.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering**. Vol. 5. NY: John Wiley & Sons, 2011.

CENTURIONE, S. L.; PECCHIO, M.; MARINGOLO, V. **Cadeia de transformações cristalográficas de minerais naturais em cimento Portland e concreto**. Anais do 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica. João Pessoa/PB, 2003.

CENTURIONE, S. L.; PECCHIO, M.; MARINGOLO, V. **Durabilidade do concreto submetido a ataques de íons de sulfato**. Anais do 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica. João Pessoa/PB, 2003.

CEPED – Centro de Pesquisas e Desenvolvimento. **Manual de construção com solo- cimento**. Camaçari. 1999. 147p. CEPED/ABCP.

CNT - Confederação Nacional do Transporte. **Anuário do Transporte: Estatísticas consolidadas**. Disponível em: <http://anuariodotransporte.cnt.org.br/2017/Inicial>.

Acesso em: jan 2018. 2016.

COKCA, E.; YAZICI, V.; OZAYDIN, V. **Stabilisation of Expansive Clays Using Granulated Blast Furnace Slag (GBFS) and GBFS-Cement.** Geotechnical and Geological Engineering, 27(4), 489-499. 2009.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **"Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil"**. - Data da legislação: 05/07/2002 - Publicação DOU nº 136, de 17/07/2002, págs. 95-96.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA Nº 420/2009 - "Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas."** - Data da legislação: 28/12/2009 - Publicação DOU nº 249, de 30/12/2009, págs. 81-84.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA Nº 430/2011 - "Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA."** - Data da legislação: 13/05/2011 - Publicação DOU nº 92, de 16/05/2011, pág. 89.

CONSOLI, N. C.; WINTER, D.; RILHO, A. S.; FESTUGATO, L.; TEIXEIRA, B. DOS S. **A testing procedure for predicting strength in artificially cemented soft soils.** Engineering Geology, 195, p. 327–334. 2015.

CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. 2007. **Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 133, No. 2, February 1, 2007.

CONSOLI, N. C.; ROSA, D. A.; CRUZ, R. C. **Water content, porosity and cement content as parameters controlling strength of artificially cemented silty soil.** Engineering Geology 122, p. 328–333. 2011.

DER-PR - Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná. **ES-P 11:** Pavimentação: solo-cimento e solo tratado com cimento. Curitiba, 2005.

DER-MG - Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais. **DMA 1.** Método de ensaio para avaliação do potencial de expansão da escória de aciaria – Adaptação do PTM 130. 1982. Pennsylvania Testing Method. 1982.

Diamond, S., Kinter, E.B., 1965. **Mechanisms of soil-lime stabilization.** Highw. Res. Rec. 92, 83–102. Disponível: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/hrr/1965/92/92-006.pdf>. Acesso em 20 dez 2017.

DINIZ, D. H., de CARVALHO, J. M. F., MENDES, J. C., & PEIXOTO, R. A. F. **Blast oxygen furnace slag as chemical soil stabilizer for use in roads.** Journal of Materials in Civil Engineering, 29(9), 04017118. 2017.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **EM 262:** Escória de aciaria para pavimentos rodoviários – Especificação de Material. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **PRO 263:** Emprego de escória de aciaria em pavimentos rodoviários – Procedimento. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transporte. **ME 113:** Pavimentação rodoviária – Agregado artificial – Avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **ME 134:** Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **Manual de pavimentação.** 3 ed. Rio de Janeiro, 2006.

International Trade Administration – ITA. US Department of Commerce. **Global Steel Report.** 2016. Disponível em: <http://trade.gov/steel/pdfs/07192016global-monitor-report.pdf>. Acesso em: 30/09/2016.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo** / Centro Nacional de Pesquisa de Solos. – 2. ed. rev. atual. – Rio de Janeiro, 1997.

EMMERT, F. **Avaliação do emprego de técnicas de estabilização de solos na melhoria de estradas florestais da região de Niquelândia** Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília. 2010.

EuroSoilStab. **Development of Design and Construction Methods to Stabilize Soft Organic Soils: Design Guide for soft soil stabilization.** CT97-0351, European Commission, Industrial and Materials Technologies Programme (Rite-EuRam III), Bruxelas. 2002.

FERRARO, B. B. **Estudo das Propriedades Termofísicas de Escória Metalúrgica e de Escórias Sintéticas de CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO.** Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2014.

FERREIRA, J. G, H, M. **Elaboração e Análise da Base de Dados de Ensaios Triaxiais Dinâmicos da COPPE/UFRJ.** Dissertação de Mestrado. PEC. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro/RJ. 2002.

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave do controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2001.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SisPav.** Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ,

Brasil. 2007.

GIDIGASU, M. D. **Laterite soil engineering**. 1976. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company.

GONÇALVES, R. De. M. **Incorporação de Coproduto de Aciaria KR e Polímero PDC em Solos para Base de Pavimentos**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2016.

GUMIERI, A. G. **Estudo da Viabilidade Técnica da Utilização de Escórias de Aciaria do Processo LD como Adição em Cimentos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal Rio Grande Sul. Porto Alegre. 2002.

HUANG, D. S.; HUANG, F. C. **Coupled thermo-fluid stress analysis of Kambara Reactor with various anchors in the stirring of molten iron at extremely high temperatures**. Applied Thermal Engineering, 73(1), 222-228. 2014.

INGLES, O G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization – Principles and Practice**. Austrália: Butterworths Pty. Limited, p. 366. 1972.

IAB - Instituto Aço Brasil. **Relatório de Sustentabilidade Sectorial**. 2016.

Disponível em:

http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/Folder_Sustentabilidade_AcoBrasil_2016.pdf. Acesso em: 10 dez. 2016.

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARDS - JIS. **Esclarecimento da norma JIS A 5015/ 92 – Escória siderúrgica para construção de estradas**, 1992.

JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. Tese de Doutorado. São Paulo: EP USP, 1995.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. (2000). **Reciclagem de escória de alto-forno no Brasil**. Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais. São Paulo: SEMA-SP/FIESP/CETESB.

KIRMSE, O. J. **Estudo do Comportamento Metalúrgico do “Reator Kambara” através de Modelagem Física**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Rede Temática em Engenharia de Materiais - REDEMAT. Ouro Preto, 2006.

KUO, W. **Properties of Compressed Concrete Paving Units Made Produced Using Desulfurization Slag**. Environmental Progress & Sustainable Energy. Vol.34, No.5. 2015.

LAMBE, T. W.; R. V. WHITMAN. **Series in Soil Engineering**. Massachusetts Institute of Technology. 1969.

LE MOS, L. R. **Maximização da eficiência de dessulfuração do gusa líquido num reator Kanbara**. 2011.

ORTEGA-LÓPEZ, V.; MANSO, J. M.; CUESTA, I. I.; GONZÁLEZ, J. J. (2014). **The long-term accelerated expansion of various ladle-furnace basic slags and their soil-stabilization applications**. Construction and Building Materials, 68, 455-464.

LOCHER, F.W.; RICHARTZ, W.; SPRUNG, S. **Zement-Kalk-Gips**, 29. 1976, p. 257-261.

LIU, C.; EVETT, J. B. **Soils and foundations**. 6th edition. New Jersey, Ohio. 2004

MACEDO, J. A. G. **Interpretação de Ensaio Deflectométricos para Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis – A Experiência com FWD no Brasil**. Tese de Doutorado. PEC. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro/RJ. 1996.

MACHADO, C. C.; PEREIRA, A. R. S.; PIRES, J. M. M. **Influência do tratamento térmico do resíduo sólido industrial (Grits) na resistência mecânica de um latossolo para pavimentos de estradas florestais**. Revista Árvore, v.27, n.4, p. 543-550. 2003. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rarv/v27n4/a15v27n.pdf>>. Acesso em: 16 março 2015.

MARANGON, M. **Utilização de Solo-Cimento em uma Solução Alternativa de Estrutura de Arrimo**. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro. 1992.

MARANGON, M.; MOTTA, L. M. G. **Valores Típicos para Módulos de Resiliência de Solos Lateríticos Argilosos da Zona da Mata de Minas Gerais**. In: II Simpósio de Jovens Engenheiros Geotécnicos/Mesa Redonda Estabilização de Encostas, 2006, Nova Friburgo/RJ. II Simpósio de Jovens Engenheiros Geotécnicos/Mesa Redonda Estabilização de Encostas. Rio de Janeiro/RJ: ABMS, 2006.

MARQUES, S. F. V.; CONSOLI, N. C.; FESTUGATO, L. **Comportamento e normalização de uma mistura areia-cimento em função do tempo de cura**. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica O Futuro Sustentável do Brasil passa por Minas COBRAMSEG 2016 — 19-22 Outubro, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. 2016.

MARTINI, Mateus. **Avaliação do potencial de expansão de agregados siderúrgicos através da difratometria de raio-X e método de Rietveld**. Dissertação de Mestrado em Ciências. Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Materiais na área de materiais metálicos. Universidade de São Paulo. 2015.

MAUBEC, N.; DENELEE, D.; OUVREARD, G. **Influence of the clay type on the strength evolution of lime treated material**. Applied Clay Science 137 (2017) 107–114.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3 ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MOORE, R. K., KENNEDY, T. W.; HUDSON, W. R. **Factors affecting the tensile strength of cement-treated materials**. Highway Research Record: Soil Stabilization: Multiple Aspects, Washington, D.C., HRB, 315, 64–80. 1970.

MORATTI, D. G.; SCOTÁ, N. M. D. **ESTABILIZAÇÃO DE SOLO ARGILOSO COM INCORPORAÇÃO DE ESCÓRIA DE ACIARIA**. Projeto de Graduação. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2016.

NASCIMENTO FILHO, V. F. **Técnicas analíticas nucleares de fluorescência de raios-X por dispersão de energia (ED-XRF) e por reflexão total (TXRF)**. Departamento de Ciências Exatas/ESALQ, USP, SP. Julho. 1999.

Nippon Slag Association. **Characteristics and applications of iron and steel slag**. Disponível em: <http://www.slg.jp/e/slag/usage.html>. Acesso em: 02 nov. 2016.

OBUZOR, G.N.; KINUTHIA, J.M.; ROBINSON, R.B. **Enhancing the durability of flooded low-capacity soils by utilizing lime-activated ground granulated blast-furnace slag (GGBS)**. Engineering Geology, 2011.

OLIVEIRA, E. A. de. **Confiabilidade metrológica na determinação de espécies químicas em materiais siderúrgicos por espectrometria de fluorescência de raios-X**. Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação, 2011.

RAPOSO, C. O. L. **Experimental study of compaction and expansion of a basic oxygen furnace slag for paving use**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Espírito Santo, Vitória. 2005.

RIBEIRO, L. F. M. **Análise da cadeia produtiva do setor de mineração de rochas para produção de agregados no Estado de Goiás, com vistas ao aproveitamento dos resíduos em aplicações geotécnicas**. Projeto de Pesquisa - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília. 2008.

RODRIGUES, G. L. C. **Caracterização e avaliação da expansibilidade de escórias de aciaria LD não tratada e tratadas**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico. 2007.

ROHDE, L. **Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos – Estudo Laboratorial**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2002.

SABAT, A. K.; PATI, S. **A Review of Literature on Stabilization of Expansive Soil Using Solid Wastes**. Electronic Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 19. U. 9, p. 6251-6267. 2014.

SENÇO, W. de. **Pavimentação**. 3ª edição. São Paulo: Grêmio Politécnico. 1980.

SHENG, G.; HUAND, P.; WANG, S.; CHENN, G. **Potential Reuse of Slag from the Kambara Reactor Desulfurization Process of Iron in an Acidic Mine Drainage Treatment**. Journal of Environmental Engineering. 140(7). 2014.

SVENSON, M. **Ensaio Triaxiais Dinâmicos de Solos Argilosos**. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro/RJ, 1980.

SOUZA, E. B. DE O. **Escórias De Aciaria e Resíduos de Concretos Refratários em Componentes de Pavimentação**. Dissertação. Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte. 2007.

TARAZONA, N. **Aplicabilidade agregado siderúrgico açobrita misturado com solo em camadas de pavimentos rodoviários**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-270/16, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 85 p. 2016.

TESSARI, C. L.; COBE, R. P.; PIRES, P. J. M. **Melhoramento de Solo com Incorporação de Resíduos de Siderurgia**. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica O Futuro Sustentável do Brasil passa por Minas COBRAMSEG 2016 — 19-22 Outubro, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. 2016.

TONG, ZHIBO; MA, GUOJUNL; CAI, XUN; XUE, ZHENGLIANG; WANG, WEI; ZHANGL, XIANG. **Characterization and Valorization of Kanbara Reactor Desulfurization Waste Slag of Hot Metal Pretreatment**. Waste Biomass Valor 7:1–8. 2016.

TAYLOR, H.F.W. **Cement chemistry**. London: Academic Press, 1990. 474 p.

United States Department of Commerce – International Trade Administration, 2016. **Global Steel Report**. Julho, 2016.

World Steel Association. **World Steel in Figures 2016**. Disponível em: <http://www.worldsteel.org/publications/bookshop/product-details.~World-Steel-in-Figures-2016~PRODUCT~World-Steel-in-Figures-2016~.html>. Acesso em: 30 set. 2016.

ZETTERMANN, L. F. **Caracterização da escória de aço inoxidável com visitas a seu reaproveitamento do processo de produção do aço**. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre. 2001.

ZHU, Z.; LIU, S. **Utilization of a new soil stabilizer for silt subgrade**. Engineering Geology, 2008.

APÊNDICE A – Dados para aplicação da metodologia Consoli *et al.* (2007)

(continua)

Composição	Teor KR em massa	Energia	Densidade Relativa	Civ	Massa esp. aparente seca (g/cm³)	CBR (%)	η	$\times$	$\eta/(Cvix)$
S1	0%	EN	2,67	0	1,565	4,00	0,414	0,34	-
S1	0%	EN	2,67	0	1,684	12,90	0,369	0,34	-
S1	0%	EN	2,67	0	1,770	18,00	0,337	0,34	-
S1	0%	EN	2,67	0	1,691	5,20	0,367	0,34	-
S1	0%	EN	2,67	0	1,650	-	0,382	0,34	-
S1	0%	EI	2,67	0	1,549	4,40	0,420	0,34	-
S1	0%	EI	2,67	0	1,714	7,10	0,358	0,34	-
S1	0%	EI	2,67	0	1,821	30,20	0,318	0,34	-
S1	0%	EI	2,67	0	1,775	21,10	0,335	0,34	-
S1	0%	EI	2,67	0	1,734	2,40	0,351	0,34	-
S1	0%	EM	2,67	0	1,680	2,70	0,371	0,34	-
S1	0%	EM	2,67	0	1,870	5,80	0,300	0,34	-
S1	0%	EM	2,67	0	1,890	31,90	0,292	0,34	-
S1	0%	EM	2,67	0	1,793	34,10	0,328	0,34	-
S1	0%	EM	2,67	0	1,701	6,80	0,363	0,34	-
S1	10%	EN	2,72	0,05	1,565	4,00	0,425	0,34	1,179
S1	10%	EN	2,72	0,05	1,684	12,90	0,381	0,34	1,032
S1	10%	EN	2,72	0,06	1,770	18,00	0,349	0,34	0,930
S1	10%	EN	2,72	0,05	1,691	5,20	0,378	0,34	1,023
S1	10%	EI	2,72	0,05	1,549	4,40	0,431	0,34	1,200
S1	10%	EI	2,72	0,05	1,714	7,10	0,370	0,34	0,995
S1	10%	EI	2,72	0,06	1,821	30,20	0,331	0,34	0,872
S1	10%	EI	2,72	0,06	1,775	21,10	0,348	0,34	0,924
S1	10%	EI	2,72	0,06	1,734	2,40	0,363	0,34	0,972
S1	10%	EM	2,72	0,05	1,680	2,70	0,382	0,34	1,036
S1	10%	EM	2,72	0,06	1,870	5,80	0,313	0,34	0,816
S1	10%	EM	2,72	0,06	1,890	31,90	0,305	0,34	0,794
S1	10%	EM	2,72	0,06	1,793	34,10	0,341	0,34	0,903
S1	10%	EM	2,72	0,05	1,701	6,80	0,375	0,34	1,011
S1	20%	EN	2,77	0,10	1,617	18,30	0,416	0,34	0,902
S1	20%	EN	2,77	0,11	1,683	55,90	0,392	0,34	0,840
S1	20%	EN	2,77	0,11	1,777	68,80	0,358	0,34	0,752
S1	20%	EN	2,77	0,12	1,828	51,90	0,340	0,34	0,707
S1	20%	EN	2,77	0,11	1,753	17,40	0,367	0,34	0,774
S1	20%	EI	2,77	0,11	1,774	35,60	0,360	0,34	0,755
S1	20%	EI	2,77	0,11	1,811	107,60	0,346	0,34	0,723

(continuação)

Composição	Teor KR em massa	Energia	Densidade Relativa	C _{iv}	Massa esp. aparente seca (g/cm ³)	CBR (%)	η	x	η/(C _{vi} ^x)
S1	20%	EI	2,77	0,12	1,884	131,10	0,320	0,34	0,658
S1	20%	EI	2,77	0,12	1,818	87,10	0,344	0,34	0,716
S1	20%	EI	2,77	0,11	1,703	31,00	0,385	0,34	0,820
S1	20%	EM	2,77	0,11	1,732	95,60	0,375	0,34	0,794
S1	20%	EM	2,77	0,12	1,846	142,30	0,333	0,34	0,691
S1	20%	EM	2,77	0,13	1,978	104,10	0,286	0,34	0,579
S1	20%	EM	2,77	0,12	1,942	43,10	0,299	0,34	0,609
S1	20%	EM	2,77	0,12	1,863	9,50	0,327	0,34	0,676
S1	30%	EN	2,81	0,16	1,628	32,00	0,420	0,34	0,792
S1	30%	EN	2,81	0,17	1,748	91,00	0,378	0,34	0,695
S1	30%	EN	2,81	0,17	1,798	99,00	0,360	0,34	0,656
S1	30%	EN	2,81	0,17	1,787	47,00	0,364	0,34	0,665
S1	30%	EN	2,81	0,16	1,729	13,00	0,385	0,34	0,710
S1	30%	EI	2,81	0,17	1,794	99,00	0,362	0,34	0,659
S1	30%	EI	2,81	0,18	1,865	157,00	0,336	0,34	0,605
S1	30%	EI	2,81	0,18	1,872	109,00	0,334	0,34	0,600
S1	30%	EI	2,81	0,17	1,753	14,00	0,376	0,34	0,691
S1	30%	EM	2,81	0,18	1,879	169,00	0,331	0,34	0,595
S1	30%	EM	2,81	0,18	1,921	239,00	0,316	0,34	0,564
S1	30%	EM	2,81	0,19	1,951	108,00	0,306	0,34	0,542
S1	30%	EM	2,81	0,18	1,872	41,00	0,334	0,34	0,600
S1	30%	EM	2,81	0,17	1,770	15,00	0,370	0,34	0,678
S1	0%	EN	2,67	0,00	1,532	11,70	0,426	0,15	-
S1	0%	EN	2,67	0,00	1,603	16,70	0,400	0,15	-
S1	0%	EN	2,67	0,00	1,628	22,10	0,390	0,15	-
S1	0%	EN	2,67	0,00	1,621	13,70	0,393	0,15	-
S1	0%	EN	2,67	0,00	1,571	4,50	0,412	0,15	-
S1	0%	EI	2,67	0,00	1,678	25,80	0,372	0,15	-
S1	0%	EI	2,67	0,00	1,701	34,50	0,363	0,15	-
S1	0%	EI	2,67	0,00	1,716	24,50	0,357	0,15	-
S1	0%	EI	2,67	0,00	1,664	10,70	0,377	0,15	-
S1	0%	EI	2,67	0,00	1,563	2,40	0,414	0,15	-
S1	0%	EM	2,67	0,00	1,730	44,30	0,352	0,15	-
S1	0%	EM	2,67	0,00	1,775	75,00	0,335	0,15	-
S1	0%	EM	2,67	0,00	1,774	44,30	0,336	0,15	-
S1	0%	EM	2,67	0,00	1,716	18,40	0,357	0,15	-
S1	0%	EM	2,67	0,00	1,716	7,50	0,357	0,15	-
S2	10%	EN	2,72	0,05	1,590	34,60	0,416	0,15	0,650

(continuação)

Composição	Teor KR em massa	Energia	Densidade Relativa	C _{iv}	Massa esp. aparente seca (g/cm ³)	CBR (%)	η	x	η/(C _{vi} ^x)
S2	10%	EN	2,72	0,05	1,637	45,80	0,398	0,15	0,620
S2	10%	EN	2,72	0,05	1,663	35,10	0,388	0,15	0,604
S2	10%	EN	2,72	0,05	1,630	16,70	0,401	0,15	0,625
S2	10%	EN	2,72	0,05	1,575	7,30	0,421	0,15	0,660
S2	10%	EI	2,72	0,05	1,648	35,90	0,394	0,15	0,614
S2	10%	EI	2,72	0,05	1,730	73,70	0,364	0,15	0,562
S2	10%	EI	2,72	0,06	1,746	71,10	0,358	0,15	0,553
S2	10%	EI	2,72	0,05	1,723	30,10	0,366	0,15	0,567
S2	10%	EI	2,72	0,05	1,664	14,50	0,388	0,15	0,604
S2	10%	EM	2,72	0,06	1,751	79,10	0,356	0,15	0,550
S2	10%	EM	2,72	0,06	1,811	119,90	0,334	0,15	0,513
S2	10%	EM	2,72	0,06	1,821	60,30	0,331	0,15	0,507
S2	10%	EM	2,72	0,06	1,738	26,70	0,361	0,15	0,558
S2	10%	EM	2,72	0,05	1,669	12,30	0,386	0,15	0,600
S2	20%	EN	2,77	0,10	1,583	53,60	0,429	0,15	0,605
S2	20%	EN	2,77	0,10	1,640	62,40	0,408	0,15	0,573
S2	20%	EN	2,77	0,11	1,688	55,90	0,391	0,15	0,546
S2	20%	EN	2,77	0,10	1,642	33,70	0,407	0,15	0,572
S2	20%	EN	2,77	0,10	1,618	13,40	0,416	0,15	0,585
S2	20%	EI	2,77	0,11	1,675	60,90	0,395	0,15	0,553
S2	20%	EI	2,77	0,11	1,692	87,70	0,389	0,15	0,544
S2	20%	EI	2,77	0,11	1,764	117,50	0,363	0,15	0,505
S2	20%	EI	2,77	0,11	1,745	74,30	0,370	0,15	0,515
S2	20%	EI	2,77	0,11	1,695	38,00	0,388	0,15	0,542
S2	20%	EM	2,77	0,11	1,721	76,50	0,379	0,15	0,528
S2	20%	EM	2,77	0,11	1,759	138,60	0,365	0,15	0,507
S2	20%	EM	2,77	0,12	1,817	129,10	0,344	0,15	0,476
S2	20%	EM	2,77	0,11	1,770	68,80	0,361	0,15	0,501
S2	20%	EM	2,77	0,11	1,725	35,70	0,377	0,15	0,526
S2	30%	EN	2,81	0,16	1,633	66,00	0,419	0,15	0,553
S2	30%	EN	2,81	0,16	1,652	57,70	0,412	0,15	0,544
S2	30%	EN	2,81	0,16	1,695	73,90	0,397	0,15	0,522
S2	30%	EN	2,81	0,16	1,691	47,10	0,398	0,15	0,524
S2	30%	EN	2,81	0,16	1,646	13,20	0,414	0,15	0,547
S2	30%	EI	2,81	0,16	1,674	65,60	0,404	0,15	0,533
S2	30%	EI	2,81	0,17	1,742	121,10	0,380	0,15	0,498
S2	30%	EI	2,81	0,17	1,788	104,90	0,364	0,15	0,474
S2	30%	EI	2,81	0,17	1,776	85,70	0,368	0,15	0,480

(conclusão)									
Composição	Teor KR em massa	Energia	Densidade Relativa	C _{iv}	Massa esp. aparente seca (g/cm ³)	CBR (%)	η	x	η/(C _{vi} ^x)
S2	30%	EI	2,81	0,17	1,753	36,20	0,376	0,15	0,492
S2	30%	EM	2,81	0,17	1,826	162,70	0,350	0,15	0,455
S2	30%	EM	2,81	0,18	1,852	193,60	0,341	0,15	0,442
S2	30%	EM	2,81	0,18	1,858	168,60	0,339	0,15	0,439
S2	30%	EM	2,81	0,17	1,822	71,90	0,352	0,15	0,457
S2	30%	EM	2,81	0,17	1,773	31,20	0,369	0,15	0,482