

## ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA ESCÓRIA DE ACIARIA TIPO LD EM BASE DE PAVIMENTOS URBANOS

### *STUDY OF THE BEHAVIOR OF LD TYPE ACIARIA SLAG BASED ON URBAN FLOORS*

<sup>1</sup>Bruna Gotardo Boldrini\*

<sup>2</sup>Ronaldo Feu Rosa Pacheco

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo.  
E-mail: bruna.gotardo@hotmail.com.

<sup>2</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo.  
E-mail: ronaldo@ifes.edu.br.

\*Autor de correspondência

Artigo submetido em 19/10/2020, aceito em 12/12/2021 e publicado em 03/06/2022.

**Resumo:** Uma das principais dificuldades encontradas pelas indústrias atualmente refere-se à destinação dos resíduos. As indústrias siderúrgicas fomentam e demonstram grande esforço para encontrar alternativas de reutilização. A escória de aciaria tipo LD (Linz Donawitz), subproduto proveniente da produção do aço, possui características mecânicas semelhantes aos materiais naturais utilizados na indústria de pavimentação, porém alguns estudos apresentam como fator limitante ao seu uso, seu alto teor de expansão. As escórias de aciaria possuem grande potencial de aplicação, por exemplo, como corretivo do solo, em lastro de ferrovias, no tratamento de águas ácidas e na indústria cimenteira. Com esta pesquisa, pretende-se dar ênfase a uma destinação de resíduos industriais na execução de obras de engenharia de terraplanagem, para substituição de materiais naturais. A escória de aciaria tipo LD utilizada neste trabalho é um coproduto denominado REVSOL, desenvolvido pela empresa ArcelorMittal, que será caracterizado física e quimicamente. Este trabalho procura analisar o desempenho físico-mecânico de misturas de solo-escória de aciaria. A primeira etapa compreendeu a caracterização física do REVSOL, do solo e da mistura solo-REVSOL, e análise química do REVSOL. Na segunda etapa, realizaram-se ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC) do solo e da mistura solo-REVSOL, e expansão da mistura pelo método PTM 130/78 (Pennsylvania Testing Method, USA), objetivando comparar os resultados obtidos com as exigências das normas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) de execução de bases granulares para pavimentos flexíveis. Os resultados obtidos demonstram que as misturas solo-REVSOL têm viabilidade de uso na execução de base para pavimentos.

**Palavras-chave:** Escória; mistura solo-REVSOL; resíduos.

**Abstract:** One of the main difficulties currently faced by industries refers to the disposal of waste. The steel industries encourage and demonstrate great effort to find alternatives for reusing their residues. The LD steel slag (Linz Donawitz), a by-product from the production of steel, has mechanical characteristics similar to natural materials used in the paving industry, but some studies show its high expansion content as a limiting factor for its use. Steel slag has great potential for

application, for example, as a soil corrector, in railroad ballast, in acid water treatment and in the cement industry. With this research, it is intended to emphasize a destination of industrial waste in the execution of earthmoving engineering, in order to replace natural materials. The type LD steel slag used in this work is a co-product called REVSOL, developed by the company ArcelorMittal, which will be characterized physically and chemically. This work aims to analyze the physical-mechanical performance of soil-slag mixtures from steelworks. The first stage comprised the physical characterization of REVSOL, the soil and the soil-REVSOL mixture, and chemical analysis of REVSOL. In the second stage, California Support Index (ISC) tests of the soil and the soil-REVSOL mixture, and expansion of the mixture by the PTM 130/78 method (Pennsylvania Testing Method, USA) were carried out, aiming to compare the results obtained with the requirements of the norms of the National Department of Transport Infrastructure (DNIT) for the execution of granular bases for flexible pavements. The results obtained demonstrate that the soil-REVSOL mixtures are viable to be used in the execution of a base for pavements.

**Keywords:** slag; soil-REVSOL mixture; waste.

## 1 INTRODUÇÃO

Os processos de fabricação do aço, em sua maioria, geram subprodutos. Um deles é escória de aciaria LD (Linz-Donawitz) ou tipo BOF (Basic Oxygen Furnace). Nesse caso, para cada tonelada de aço, gera-se na faixa de 100 Kg a 150 Kg de escória de aciaria LD. Essa variação na produção da escória de aciaria LD deve-se ao tipo de forno utilizado e à matéria-prima empregada na fabricação do aço. O reaproveitamento de resíduos mostra-se cada vez mais necessário em um planeta com recursos finitos e com constante aumento de consumo.

Na China, são produzidos 80 milhões de toneladas de escória de aciaria LD a cada ano, porém são reaproveitados apenas 22%. Esse percentual é muito pequeno, quando comparado com o de países desenvolvidos, como os EUA, o Japão, a Alemanha e a França, onde os índices ficam perto de 100% (QI; LIU, J.; LIU, Q., 2016).

Com este estudo, pretende-se contribuir para avaliar os agregados siderúrgicos tipo escória de aciaria LD, comercializada com o nome REVSOL pela siderúrgica da Grande Vitória em mistura com solos lateríticos para base de pavimentos urbanos. Assim, poderão ser reduzidos os impactos da extração de

agregados naturais, que são recursos não renováveis.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Segundo Kambole *et al.* (2017), os agregados de escória de aciaria LD exibem várias características técnicas e ambientais favoráveis em comparação com os agregados de pedra natural, tornando-os materiais de construção de estradas potencialmente valiosos. As misturas de escória de aciaria LD com betume têm mostrado melhores módulos de resiliência, resistência ao sulco, aderência e resistência a danos por umidade e resistência à decapagem do que as misturas com agregados naturais. Além disso, podem ser substitutos de alta qualidade para agregados naturais em camadas mais baixas do pavimento rodoviário. O excesso de cal livre (CaO) e periclase (MgO) nas escórias reagem com a água, resultando em grandes expansões de volume, que podem levar a falhas prematuras quando usadas em estradas. O tratamento de envelhecimento hidrata esses óxidos, garantindo assim a expansão permitida da escória. Os baixos teores de C<sub>3</sub>S e C<sub>2</sub>S na escória BOF tornam-no um ligante hidráulico pobre e de aceitação ambiental em pavimentos rodoviários.

Cosme *et al.* (2016) fizeram uma avaliação de subprodutos finos da indústria de pedras ornamentais (OSR) e resíduo de escória de aciaria como potencial material de pavimentação, mais especificamente, como filler em misturas asfálticas a quente. Em geral, o uso de resíduos melhorou o comportamento reológico do ligante puro, principalmente o resíduo de escória de aciaria, que contribuiu para o aumento da rigidez do material, pois proporcionou maior elasticidade em relação ao ligante, e também apresentou melhores resultados de recuperação e aderência à fluência, e sensibilidade reduzida à tensão.

Gökalp *at al.* (2016) realizaram avaliações técnicas e ambientais de escórias metalúrgicas, objetivando seu uso como agregado sustentável na camada de pavimento. Em termos de propriedades físicas e mecânicas dos agregados, foi observado que as escórias metalúrgicas aqui estudadas tinham propriedades superiores quando comparadas aos agregados naturais. As escórias apresentaram maior resistência mecânica e ao intemperismo. Em seu estudo concluiu-se que as propriedades físicas e mecânicas das escórias atenderam aos resultados dos testes de lixiviação e eram materiais inertes. Portanto, o uso de escória na construção de pavimentos traz benefícios econômicos, ambientais e técnicos como alternativa sustentável.

Como característica importante para construção de estradas, as escórias apresentam comportamento de ligantes hidráulicos, favorecendo o processo de estabilização de um solo. Essa característica está diretamente ligada ao óxido de cálcio e ao óxido de magnésio presentes na sua composição química. Esses dois compostos reagem com água e gás carbônico, formando um hidrato na superfície da escória, cimentando e ligando os grãos do solo, conferindo à estrutura um comportamento rígido (SANT'ANA, 2003; LIMA *et al.*, 2000 citado por ROHDE, 2002).

Pacheco (2017) verificou que os ensaios dos constituintes inorgânicos lixiviados da escória de aciaria LD, denominada acerita, com granulometria inferior a 0,075mm, de acordo com a NBR 10005 (ABNT, 2004), exibiram valores inferiores aos limites máximos prescritos pela NBR 10004 (ABNT, 2004), sendo considerada não perigosa. Os ensaios dos constituintes inorgânicos solubilizados da escória de aciaria natural, de acordo com a NBR 10006 (ABNT, 2004), apresentaram números inferiores aos limites máximos prescritos pela NBR 10004 (ABNT, 2004). Assim, foi considerada inerte.

Em estudos realizados, Costa e Santos (2020) verificaram que nas misturas de escória de aciaria com solos argilosos a massa específica aparente seca aumentou e ocorreu a diminuição do teor de umidade a medida que se aumentou a adição de escória, mistura contendo 30% de escória. Para a análise do ISC notou-se uma semelhança com os resultados de compactação sendo a mistura com maior porcentagem de escória mantendo o melhor desempenho. Portanto, pode-se concluir que a mistura de solo e escória de aciaria pode ser utilizada na pavimentação em camadas de reforço de subleito e sub-base já que os parâmetros estabelecidos por normas foram atendidos. Além disso, se a execução dos serviços rodoviários for situada próxima à indústria geradora de escória, torna viável a utilização por tratar-se de um material descartado e/ou de custo bem inferior ao de materiais convencionais, além do fato de minimizar os impactos ambientais causados pelo descarte destes resíduos.

Neste trabalho, foi realizada uma mistura de escória de aciaria não tratada, com solos lateríticos, bastante usados como base de pavimento no Estado Espírito Santo, porém com baixa capacidade de suporte limitada em função da sua granulometria. O interesse foi descobrir sua capacidade de suporte com as misturas com escória de melhoria.

### 3 PROCESSOS METODOLÓGICOS: MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram o Revsol e solo granular.

O Revsol foi gerado na fabricação do aço, em um conversor a oxigênio do processo LD (Linz Donawitz) ou BOF (*Basic Oxygen Furnace*), que não precisa de fonte de calor externa, sendo comercializada como Revsol® pela empresa siderúrgica situada na grande Vitória. A empresa não promove a redução da expansão desse coproduto e recomenda a aplicação do Revsol® em misturas com argila, pois geralmente não apresenta plasticidade. Esse material é comumente utilizado em revestimento primário, elevação de cota sob camadas de argila e cobertura de pátios. O solo utilizado é proveniente da região do Contorno da Serra – ES, que apresenta características de solos lateríticos, possuindo uma grande parcela da sua granulometria menor do que 2mm de diâmetro.

A estrutura dos métodos foi desenvolvida em etapas:

a. Caracterização física e química do REVSOL;

b. Ensaios de análise granulométrica de acordo com a **NBR 7181 (2016)**, massa unitária, massa específica **NBR NM 53(2003)**, Abrasão Los Angeles, compactação, Índice de Suporte de Califórnia (ISC), microscopia de Raio-x e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

c. Classificação do solo pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

d. Estudo da mistura solo-REVSOL através dos ensaios de análise granulométrica, compactação, Índice de Suporte Califórnia (ISC) e expansão pelo método PTM-130/78.

e. Difractometria de raios X da escória de aciaria para verificar as fases cristalinas e identificar os compostos cristalinos.

f. Utiliza-se a Microscopia Eletrônica de varredura (MEV) do REVSOL para

verificar a porosidade dos grãos, textura superficial, formatos, bem como o tamanho dos grãos.

Tabela 1: ensaios realizados

Caracterização	Ensaio	Norma	Material
Física	Granulometria	NBR NM 248:2003	REVSOL e Misturas
	Massa unitária	NBR NM 45:2006	REVSOL e Solo
	Massa	NBR NM 53:2003	REVSOL
	Limite de Liquidez - LL	NBR 6459:2016	Solo e Misturas
	Limite de Plasticidade - LP	NBR 7180:2016	Solo e Misturas
	Granulometria	NBR 7181:2018	Solo
Mecânica	Compactação	DNIT - 164/2013-ME	Solo e Misturas
	Índice de Suporte califórnia - ISC	DNIT - 172/2016-ME	Solo e Misturas
	Expansão	DNIT - 172/2016-ME	Misturas
	Expansão	PTM 130/78 (adaptado pela DMA-1/DER-MG/82)	Misturas
Química	Expectometria de raio-X por EDS		REVSOL e Solo
	Difractometria de raio-X		REVSOL e Solo

Fonte: Elaborada pela Autora (2020).

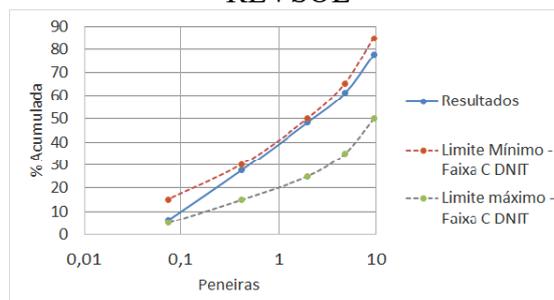
Utilizou-se, neste trabalho, o método de mistura de solo e escória de aciaria. Para executar as misturas nas proporções em volume de 50/50, 30/70 e 20/80 de solo-escória, determinou-se a Massa Unitária solta do solo e do REVSOL, utilizando o método descrito na NBR 45 (ABNT, 2006).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO REVSOL

Na figura 1, é apresentada a curva granulométrica do REVSOL.

Figura 1: Curva granulométrica do REVSOL



Fonte: Elaborado pela Autora (2020).

Nos resultados apresentados, temos um coproduto que possui granulometria de solos grossos e se enquadra nos limites da faixa C, conforme classificação do DNIT (DNIT, 2006).

A massa específica do REVSOL, determinada em laboratório, de acordo com a norma NBR 53 (ABNT, 2003), apresentou resultado de  $3,31\text{g/cm}^3$ , atendendo aos limites especificados na normativa do DNER 262 (DNER, 1994). Com relação à massa unitária, apresentou o resultado de  $1,96\text{kg/dm}^3$  nos ensaios realizados através da norma NBR 45 (ABNT, 2006), não atendendo aos parâmetros especificados na normativa do DNER 262 (DNER, 1994).

Porém, uma elevada massa unitária pode ser uma vantagem com relação à estabilidade por ação da gravidade e resistência à erosão por ação da água (RAPOSO, 2005).

Em relação a absorção de água a escória de aciaria LD, em estudo, apresentou resultados de 2,6%, ficando acima do limite de 2% estabelecidos na norma do DNER 262 (DNER, 1994).

Na tabela 2, verifica-se que a máxima expansão obtida através do método PTM 130/78 foi de 3,74%, resultado acima de 3%, valor recomendado pela norma do DNER 262 (DNER, 1994) para uso da escória de aciaria em pavimentos rodoviários.

Tabela 2: Estatística descritiva ensaio de expansão – Método PTM 130/78

Energia de compactação	Número de corpos-de-prova	Expansão			
		Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Proctor Normal	15	2,27	3,74	2,86	0,38

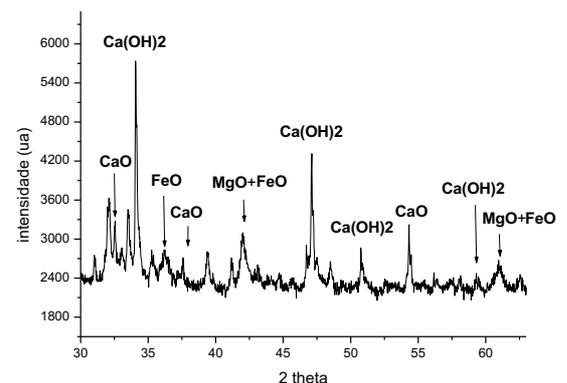
Fonte: Raposo (2005).

Na difratometria de raios X, figura 2, realizada na amostra, verificou-se os picos cristalinos dos compostos  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  e  $\text{FeO}$ , presentes na estrutura do REVSOL. Segundo Pacheco (2017), os picos cristalinos fazem com que a escória de aciaria não apresente propriedades aglomerantes, não sendo aconselhado seu

uso como agregado miúdo em concreto, pois reagiria muito pouco com a água da mistura.

No caso de solos, por se tratar de um material que possui vazios, ao se misturar com a escória, possibilita que as tensões de expansão sejam absorvidas.

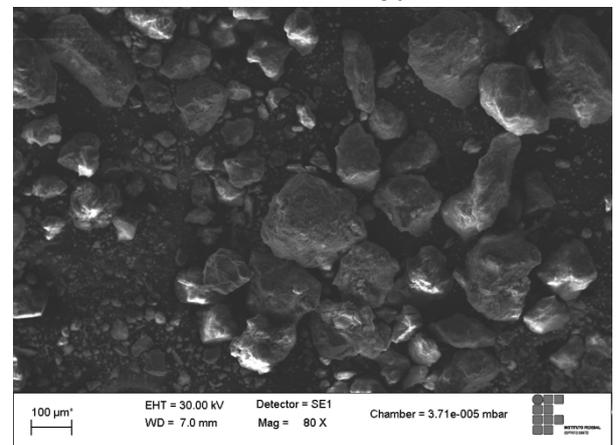
Figura 2: Difratoograma de raio X do REVSOL



Fonte: Elaborado pela Autora (2020).

Na figura 3, apresentam-se as imagens de MEV do REVSOL. Verifica-se a porosidade dos grãos, textura superficial grosseira, formatos angulares, bem como a grande variabilidade do tamanho, características que facilitam o intertravamento da REVOL com solos.

Figura 3: Imagem de MEV na amostra de escória de aciaria beneficiada (REVSOL) com aumento de 80X

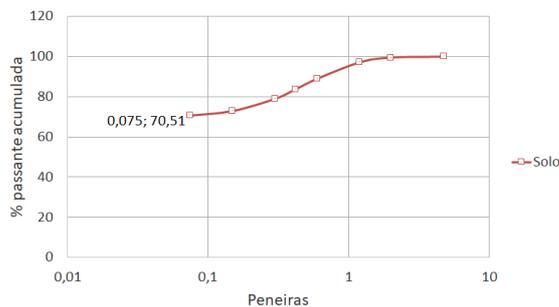


Fonte: Elaborado pela Autora (2020).

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

A figura 4 apresenta a curva granulométrica do solo utilizado para mistura. Verifica-se que o solo possui 70,94% de seu peso, passando na peneira 200 (0.075mm) de abertura de malha, sendo considerado solo fino pelo sistema unificado de classificação dos solos (SUCS).

Figura 4: Análise granulométrica do solo



Fonte: Elaborado pela Autora (2020).

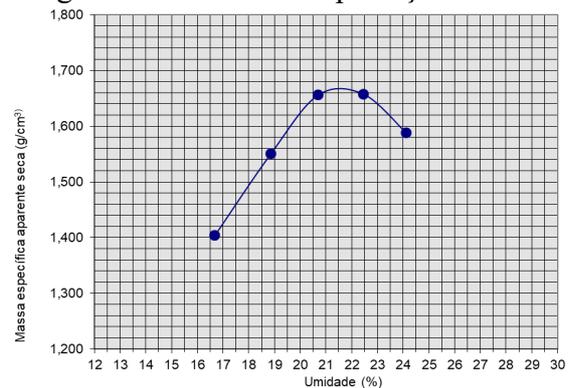
O solo apresentou limite de liquidez de  $LL = 49\%$ , e limite de plasticidade  $LP = 27\%$ , de acordo com NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016), respectivamente. O índice de plasticidade apurado foi de  $IP = 22\%$ .

Utilizando o sistema unificado de classificação dos solos (SUCS), classifica-se o solo como uma argila de alta plasticidade e de média/alta compressibilidade. A Massa Unitária solta do solo foi determinada, utilizando o método descrito na NBR 45 (ABNT, 2006), obtendo o resultado  $1,190\text{kg/dm}^3$ .

Verifica-se, na figura 5, que o solo apresenta umidade ótima de  $21,60\%$ , e massa específica aparente seca máxima de  $1,67\text{g/cm}^3$ .

Na tabela 3, temos as leituras correspondentes à penetração de  $2,54\text{mm}$  e  $5,08\text{mm}$ , que são expressas em termos de porcentagem de uma pressão padrão, em que se adotara o valor do Índice de Suporte Califórnia (ISC) o maior valor lido.

Figura 5: Curva de compactação do solo



Fonte: Elaborado pela Autora (2020).

Tabela 3: ISC x Leitura de penetração

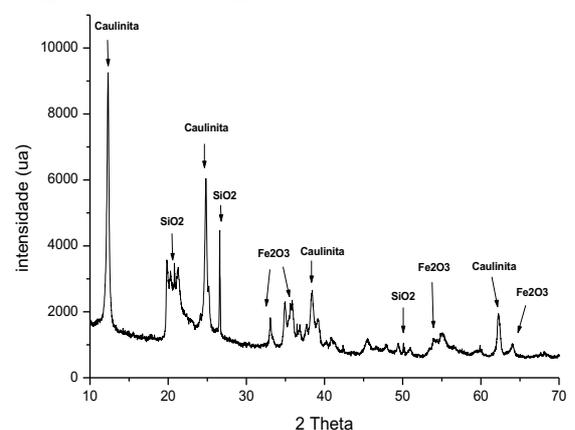
Amostra	ISC (%) para penetração em mm	
	2,54	5,08
1	8,30	7,30
2	15,20	13,80
3	5,30	4,40

Fonte: Elaborada pela Autora (2020).

Assim, verifica-se que ISC máximo do solo é de  $15,20\%$ .

Na difratometria de raio-x, figura 6, foram detectadas a presença de hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e a caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ ), que, segundo Santos (2006), são indicadores de solos que apresentam comportamento laterítico. Os solos lateríticos apresentam alta capacidade de suporte, sendo utilizados em bases de pavimentos, misturados com brita. Neste trabalho, a brita foi substituída pela escória de aciaria.

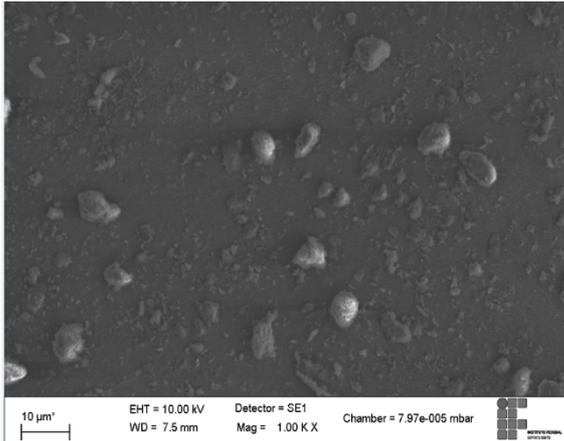
Figura 6: Difratoograma de Raio X do solo



Fonte: Elaborado pela Autora (2020).

Nas imagens realizadas através do MEV, figura 7, podemos observar com nitidez os contornos dos argilominerais que constituem o solo, características essas também apresentadas por solos de comportamento laterítico (SANTOS, 2006).

Figura 7: Imagem de MEV da amostra de solo com aumento de 1000X.



Fonte: Elaborado pela Autora (2020).

#### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA SOLO-REVSOL

Através da análise granulométrica das misturas, verificou-se que a mistura 1 está enquadrada na faixa D, e as misturas 2 e 3, na Faixa C, conforme limites estabelecidos na tabela granulométrica para base granular do DNIT.

Os ensaios para determinação do limite de liquidez e índice de plasticidade apresentaram os resultados descritos na tabela 4.

Tabela 4: Limite de Atterberg

Mistura	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)
1	30	26	4
2	26	23	3
3	-	NP	-

Fonte: Elaborada pela Autora (2020).

Nos resultados, verificamos que as misturas 1 e 2 atendem aos limites apontados na norma NBR 16364 (ABNT, 2015), apresentando LL de 30% e 26% e IP de 4% e 3%, respectivamente, sendo classificadas como misturas pouco plásticas. Na mistura 3, não foi possível a realização do ensaio, pois essa mistura apresentou características não plásticas.

Com relação à compactação das amostras das misturas, obteve-se para a mistura 1, constituída de 50% de solo e 50% de REVSOL, uma massa específica seca máxima de  $1,958\text{g/cm}^3$  para uma umidade ótima de 18,3%, a mistura 2, composta por 30% de solo e 70% de escória de aciaria, apresentou massa específica seca máxima de  $2,275\text{g/cm}^3$  para uma umidade ótima de 14,5%, e a mistura 3, desenvolvida com 20% de solo e 80% de escória de aciaria, exibiu uma massa específica seca máxima de  $2,327\text{g/cm}^3$  para uma umidade ótima de 13,6%.

O aumento do teor de REVSOL nas misturas 1, 2 e 3 foi responsável pelo aumento da massa específica seca máxima  $1,958\text{g/cm}^3$ ,  $2,275\text{g/cm}^3$  e  $2,327\text{g/cm}^3$ , respectivamente. O solo, que possui granulometria inferior ao do REVSOL, contribuiu para uma redução de vazios na mistura. Essa redução de vazios influencia diretamente no aumento da massa específica seca e promove o intertravamento das partículas e estabilização mecânica.

Verifica-se que as misturas 2 e 3 apresentaram valores de massa específica seca máxima próximos dos materiais naturais utilizados para base de pavimentos comercializados na região da Grande Vitória - ES, que possuem média de massa específica aparente seca máxima de  $2,21\text{g/cm}^3$ .

Nas figuras 8, 9 e 10, são apresentados os valores de ISC em função da umidade dos corpos de prova das misturas 1, 2 e 3, respectivamente.

Figura 8: Curva de ISC  
ISC (%) x Umidade (%)

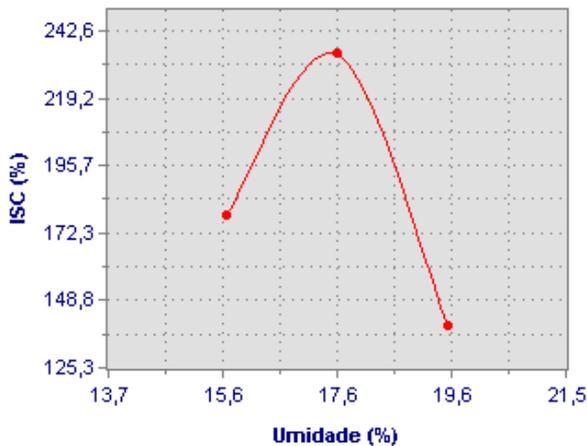


Figura 9: Curva de ISC  
ISC (%) x Umidade (%)

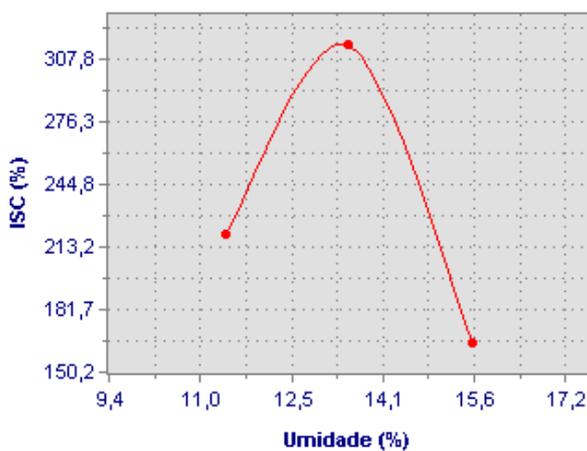
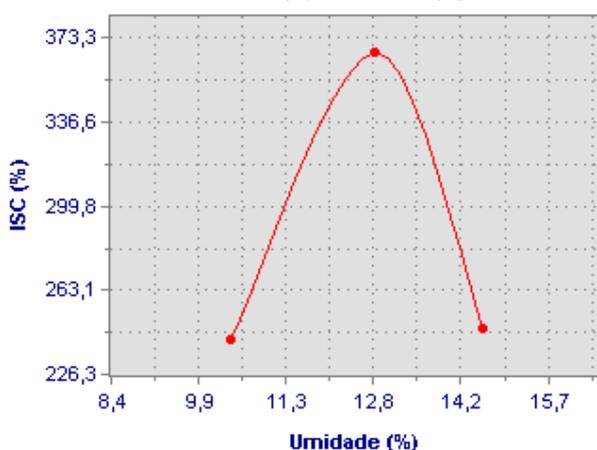


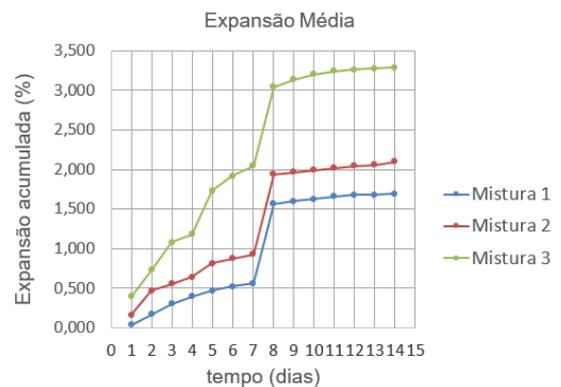
Figura 10: Curva de ISC  
ISC (%) x Umidade (%)



Verifica-se que a mistura 1 exibiu ISC de 234,60%, a mistura 2 atingiu 315,10% e a mistura 3 apresentou 367,5%. Com relação à expansão, todas as misturas apresentaram resultado de 0% pelo método DNIT 172 (DNIT, 2016).

Na figura 11, temos a média das expansões das amostras apresentadas pelas misturas 1, 2 e 3, utilizando o método PTM 130 adaptado pela DMA-1/DER-MG/82, sendo os resultados, respectivamente, 1,69%, 2,09% e 3,29%.

Figura 11: Expansão média das misturas 1, 2 e 3.



Fonte: Elaborado pela Autora (2020).

As misturas 1 e 2 atenderam ao limite de 3% para expansão exigidos pela norma DNER 262 (DNER, 1994), porém não atenderam aos padrões de expansão determinados pela norma DNIT 406 (DNIT, 2017).

A norma DNIT 406 (DNIT, 2017), recomenda a expansão máxima de 1,5%, obtida pelo método PTM-130/78, para misturas de Açobrita (coproduto proveniente da produção e refino do aço) e solo, destinadas a confecção de bases para pavimentos betuminosos. Assim, o uso de misturas de solo-REVSOL para base de pavimentos betuminosos não é indicado.

Os resultados mostram que existe uma relação direta entre o teor de REVSOL nas misturas e o valor de ISC apresentados. As escórias de aciaria apresentam características de hidráulidade, que é o processo pelo qual a escória endurece através da reação com a

água, contribuindo para o crescimento do valor do ISC, além do aumento do tamanho dos grãos devido a um maior teor escória de aciaria na mistura.

## 5 CONCLUSÕES

A resistência do solo com a incorporação do Revsol, em todas as misturas realizadas, apresentou resultados do ISC bem superior ao valor apresentado pela amostra do solo sem adição do Revsol. Entretanto, as características expansivas do Revsol, torna um fator limitante para algumas aplicações em pavimentação, como base e sub base de pavimentos betuminosos.

Para bases de pavimentos flexíveis, como blocos de concreto intertravados, nos quais as juntas são preenchidas pelo próprio material do colchão de regularização, as expansões apresentadas pelas misturas 1 e 2 atendem as exigências da norma.

Para contribuir com a maior utilização e busca de conhecimento sobre o assunto, sugere-se alguns temas para continuidade de futuras pesquisas, como estudo das reações e combinações químicas das misturas REVSOL e solo, execução de trecho experimental para monitoramento da expansão das misturas e ampliação dos estudos para definição de parâmetros de expansão para emprego de misturas de solo e escória de aciaria em base para pavimentos flexíveis.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solos – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016. 5p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180**: Solos – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016. 3p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181**: Solos – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016. 12p

\_\_\_\_\_. **NBR 10004**: Resíduos sólidos: Classificação. Rio de Janeiro, novembro 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, novembro 2004. 3p.

\_\_\_\_\_. **NBR 16364**: Execução de sub-base e base estabilizadas granulometricamente com agregado siderúrgico para pavimentação rodoviária - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015. 16 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 8p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003. 8p.

COSME, R. L.; TEIXEIRA, J. E. S. L.; CALMON, J. L.; **Construction and Building Materials**, Sept 30, 2016, Vol.122, p.556(11).

COSTA, S. N.; SANTOS, R. O. G.; **Utilização da escória de aciaria em combinação com solo para uso em camadas de pavimentação rodoviária**. v. 8 n. 1 (2020): Engineering Sciences - Dez 2019, Jan, Fev, Mar 2020.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **DNIT 172/2016-ME**. Solos - Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas - Método de ensaio, 2016.

\_\_\_\_\_. **DNER-EM 262/94**. Escória de Aciaria para Pavimentos Rodoviários.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. 1994.

GÖKALP, I.; UZ, E. V.; SALTAN, E.; TUTUMLUER, E. **Technical and environmental evaluation of metallurgical slags as aggregate for sustainable pavement layer applications** – Science Direct. Volume 14, March 2018, Pages 61-69.

KAMBOLE, C.; PAIGE-GREEN, P.; KUPOLATI, W.K.; NDAMBUKI, J.M.; **Adeboje, A.O. Construction and Building Materials**, Sept 1, 2017, Vol.148, p.618(14).

PACHECO, R.F.R. **Estudo sobre a utilização das escórias de aciaria LD naturais ou modificadas para substituição parcial do cimento ou como adição ao clínquer**. 2017. Tese – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2017.

PENNSYLVANIA TESTING METHOD - PTM 130. **Método de ensaio para avaliação do potencial de expansão da escória de aciaria** - Departamento de Transportes da Pensilvânia. 1978. (método adaptado pelo DER/MG).

RAPOSO, O. L. **Estudo experimental de compactação e expansão de uma escória de aciaria LD para uso em pavimentação**. 2005. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2005.

ROHDE, L. **Escória de Aciaria Elétrica em Camadas Granulares de Pavimentos** – Estudo Laboratorial. Dissertação de M.Sc., UFRGS, Porto Alegre, Brasil. 2002.

SANT'ANA, A. P. **Caracterização tecnológica de misturas de solo-escória de alto-forno granulada moída para fins rodoviários**. 2003. Dissertação de

Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 88 p.

SANTOS, E. F. **Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicada aos solos tropicais**. 2006. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia São Carlos, Universidade de São Paulo.

QI, L.; LIU, J.; LIU, Q. **Compound Effect of CaCO<sub>3</sub> and CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O on the Strength of Steel Slag** – Cement Binding Materials. Materials Research. v. 19, n. 2, 2016. p. 269-275.