

## MISTURA SOLO-RCC ESTABILIZADA COM ESCÓRIA DE ACIARIA PARA APLICAÇÃO EM CAMADAS DE PAVIMENTOS

**José Roberto Fernandes Galindo**

**Heraldo Nunes Pitanga**

**Roberto Lopes Ferraz**

**Leonardo Gonçalves Pedroti**

**Taciano Oliveira da Silva**

**Emerson Lopes Ribeiro**

**Kamili Caron Sandrini**

Departamento de Engenharia Civil

Universidade Federal de Viçosa

### RESUMO

Este estudo analisou a viabilidade do uso de uma mistura de agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil (RCC) com um solo residual jovem de textura arenosa estabilizada com escória oxidante de aciaria elétrica em pó. Preparou-se uma composição de solo com RCC de forma a atender à faixa granulométrica D especificada na norma ES 141/2010 do DNIT e, a essa composição, foram acrescentadas as proporções de 10% e 20% de escória em relação à massa seca total. A partir do ensaio CBR, na energia de compactação Proctor normal, foram avaliadas as características de resistência e expansão do solo natural e das misturas solo-RCC e solo-RCC estabilizada com escória. Os resultados indicaram que a adição de RCC e escória ao solo produziram ganho de resistência mecânica e decréscimo no valor da expansão CBR.

### ABSTRACT

The objective of this study was to analyze the feasibility of using a mixture of recycled aggregates of construction and demolition wastes (CDW) with a young residual sandy soil stabilized with powder electric arc furnace oxidizing slag. A soil composition with CDW was prepared in order to meet the grain size range D specified in standard ES 141/2010 of DNIT and to that composition was added to the proportions of 10% and 20% slag in relation to total dry mass. Then, from the CBR test, in the standard Proctor compaction effort, the resistance and expansion of the natural soil, soil-CDW mixture and soil-CDW mixture stabilized with slag were evaluated. The results indicated that the addition of CDW and slag to the soil produces a mechanical resistance gain and a decrease in the CBR expansion value.

### 1. INTRODUÇÃO

A reciclagem de resíduos sólidos vem se consolidando como uma prática importante para a sustentabilidade, pois atenua os impactos ambientais gerados, inibe a utilização de recursos naturais não renováveis e reduz custos sociais (JOHN, 2000; OLIVEIRA *et al.*, 2016).

Segundo Ângulo *et al.* (2001), no atual modelo de produção, os resíduos sempre são gerados no processo de fabricação de bens de consumo, sejam eles duráveis ou não duráveis. Neste processo, a produção quase sempre utiliza matérias-primas não renováveis de origem natural. Este modelo não apresentava problemas até recentemente, em razão da abundância de recursos naturais e menor quantidade de pessoas incorporadas à sociedade de consumo (JOHN, 2000).

Com a intensa industrialização, advento de novas tecnologias, crescimento populacional, acentuada migração de pessoas para os centros urbanos e diversificação do consumo de bens e serviços, os resíduos se transformaram em graves problemas urbanos, com um gerenciamento oneroso e complexo considerando-se volume e massa acumulados, principalmente após 1980 (ÂNGULO *et al.*, 2001). Um dos problemas que agrava a questão do volume de resíduos é o encarecimento dos processos de tratamento e destinação final, especialmente dos resíduos classificados como perigosos. Os problemas se caracterizam por escassez de áreas de

deposição de resíduos em torno de grandes cidades, altos custos sociais no gerenciamento de resíduos, problemas de saneamento público, crescentes exigências técnicas para tratamento e deposição e contaminação ambiental (PINTO, 1999; JOHN, 2000).

Com o propósito de assegurar a proteção duradoura do planeta e de seus recursos naturais, criando condições para um crescimento sustentável, inclusivo e economicamente sustentado, foram definidos, durante a Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável, realizada em setembro de 2015, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), traduzidos por 17 objetivos e 169 metas a serem atingidos até o ano de 2030 pelos países signatários, dentre os quais o Brasil.

Em linhas gerais, os 17 ODS representam um conjunto de compromissos que cada país assumiu para, até 2030, superar os desafios que afligem a humanidade. Os ODS que dependem diretamente da gestão de resíduos sólidos são os ODS 11.6 e 12.5. A ODS 12.5, em particular, estabelece a redução substancial da geração de resíduos por meio de prevenção, redução, reciclagem e reutilização (ISLU, 2018).

Entretanto, segundo pesquisa realizada pelo Sindicato Nacional das Empresas de Limpeza Urbana, analisando 3.374 municípios brasileiros, verificou-se que: (i) 53% continuam dando destinação incorreta ao lixo coletado; (ii) a coleta domiciliar ainda não chegou à universalização, atendendo somente 76% dos lares brasileiros; (iii) 61,6% dos municípios não estabeleceram fonte de arrecadação específica para custear a atividade; e (iv) o índice médio de reciclagem no Brasil é de 3,7% (ISLU, 2018).

Importante será para o Brasil, a partir do cenário apresentado, empreender um adequado sistema de gestão para os resíduos sólidos e propiciar a adoção de práticas de reaproveitamento desses, onde a construção civil e a indústria do aço, grandes geradoras de resíduos, apresentam alto potencial de reciclagem.

Conforme levantamento da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, foram coletados no Brasil, no ano de 2017, 45 milhões de toneladas de resíduos da construção civil (RCC), o que corresponde a 58% dos resíduos sólidos urbanos. Entretanto, estes valores estão aquém do real, sendo a quantidade total ainda maior, uma vez que os municípios, via de regra, coletam apenas os resíduos lançados ou abandonados nos logradouros públicos (ABRELPE, 2018).

Já a produção mundial de aço bruto em 2016, segundo levantamento do Departamento Nacional de Produção Mineral, totalizou 1,6 bilhão de toneladas. Os países asiáticos (China, Japão, Índia e Coreia do Sul) foram responsáveis por 66,2% da produção. No Brasil, no mesmo período, essa produção foi de 31,1 milhões de toneladas de aço bruto, o que lhe garantiu a posição de nono maior produtor mundial (1,9%) e maior produtor da América Latina (52,4%). Estimativas apontam que a cada tonelada de aço produzido são gerados, em média, 100 a 150 kg de escória (WIMMER *et al.*, 2014; IABR, 2018).

Diante deste contexto, acredita-se que os setores de construção civil e da indústria do aço podem colaborar significativamente para que o Brasil consiga atingir as metas concernentes à gestão de resíduos sólidos a partir do reaproveitamento do RCC e da escória, evitando a

deposição em aterros, proporcionando redução no consumo de matérias-primas e diminuindo o gasto energético.

Com o intuito de contribuir no reaproveitamento do RCC e da escória, este estudo analisou, via ensaio CBR (*California Bearing Ratio*), a viabilidade do uso de uma mistura de agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil (RCC) com um solo residual jovem de textura arenosa estabilizada com escória oxidante de aciaria elétrica em pó. Com o objetivo de melhorar a capacidade de suporte do solo, a fim de que possa ser utilizado em camadas de pavimentos rodoviários, preparou-se uma composição de solo com RCC de forma a atender à faixa granulométrica D especificada na norma ES 141 (DNIT, 2010a) do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). A essa composição, foram acrescentadas as proporções de 10% e 20% de escória oxidante de aciaria elétrica em pó em relação à massa seca total e, a partir do ensaio CBR, na energia de compactação Proctor normal, foram avaliadas as características de resistência e expansão do solo natural, da mistura solo-RCC e da mistura solo-RCC estabilizada com escória.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. Resíduos da construção civil

Conforme a Resolução Conama nº 307/2002 (BRASIL, 2002), os chamados resíduos da construção civil são:

[...] os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

Sendo grande consumidora de recursos naturais e preponderante setor da economia mundial, a indústria da construção civil produz elevada quantidade de resíduos, provenientes de atividades de extração de matéria-prima, transporte e armazenamento inadequado de materiais, construção, reformas, reparos e demolições de obras civis. Outros fatores, como crescimento populacional, intensa migração de pessoas para os centros urbanos e o processo de desenvolvimento econômico, têm impactado diretamente a quantidade de resíduos gerados, principalmente as atividades de construção associadas à expansão de programas de urbanização e infraestrutura, características de países em desenvolvimento (JOHN, 2000; ÂNGULO *et al.*, 2001).

Areladas a esse crescimento, surgem também questões relacionadas ao desperdício de materiais da construção civil, que gera grande volume de resíduos em obras. Segundo Barros (2012), de todos os materiais que entram numa obra, boa parte sai como resíduos, tais como brita, areia, cacos cerâmicos e de tijolos, sobras de argamassa e de concreto, madeira, plástico, metal, solo, etc., podendo representar uma perda de até 30% do volume total utilizado. Esse elevado índice de perda está representado pelas altas taxas de geração de resíduos por metro quadrado de obra construída (KATZ e BAUM, 2011; SÁEZ *et al.*, 2014; COSTA *et al.*, 2014). Estas taxas elevadas de produção de RCC fazem com que, muitas vezes, esses resíduos sejam aqueles com maior participação na massa total de resíduos sólidos urbanos, podendo

representar até 70% do total gerado em uma cidade brasileira de médio ou grande porte (PINTO, 1999).

Reciclar os resíduos provenientes do setor de construção civil contribui na redução da quantidade de materiais a serem extraídos da natureza e minimiza os impactos ocasionados pela disposição destes resíduos em aterros. Na construção de pavimentos, o emprego dos RCC em camadas de base ou sub-base aparece como possibilidade viável para seu reaproveitamento. Pesquisas desenvolvidas no Brasil e no mundo têm confirmado a viabilidade de utilização destes resíduos como substitutos totais ou parciais da brita natural em obras de pavimentação (GÓMEZ, 2011; LEITE *et al.*, 2011; JIMÉNEZ *et al.*, 2012; FARIAS *et al.*, 2013; DELONGUI, 2016; MATUELLA, 2017).

## 2.2. Resíduos Sólidos Industriais: Escória de Aciaria

Por muitos anos, a escória foi classificada como um resíduo sólido da produção siderúrgica. Atualmente, países como EUA, Canadá e Alemanha passaram a classificar a escória como um coproduto da siderurgia (FREITAS, 2018). Ela é também conhecida como agregado siderúrgico, e sua geração, na faixa de 100 a 150 kg por tonelada de aço produzido, dá uma ideia do grande volume de material gerado no Brasil e no mundo (IABR, 2018).

A indústria siderúrgica, durante seu processo de obtenção do ferro-gusa e produção do aço, é responsável por uma significativa geração de escória, caracterizada por ser um resíduo sólido destituído de serventia para tais empresas. Grande parte dessa escória fica armazenada em pilhas, assentada em pátios de estocagem abertos e exposta às intempéries. Em termos econômicos, este resíduo ocupa grandes áreas de estocagem das usinas, ao custo de US\$20 a US\$30 por tonelada de resíduo depositado (SILVA e PEREIRA, 2013). Sua aplicação restrita está relacionada com a variabilidade das suas características físicas, químicas e mineralógicas. Essa variabilidade é influenciada pela qualidade e tipo de matéria prima, tipo de processo e, principalmente, pelo tipo de aço produzido (FERNANDES, 2010; FREITAS, 2018).

O processo produtivo empregado por esse ramo industrial é capaz de gerar dois diferentes tipos de escória: a de alto-forno e a de aciaria. A escória proveniente da obtenção do ferro-gusa, originada a partir da fusão redutora do minério de ferro, é classificada como de alto-forno, enquanto a obtida durante a produção do aço é denominada escória de aciaria (MASUERO *et al.*, 2004).

Dentre os processos produtivos para a obtenção do aço, os dois mais utilizados são: o método de fusão e refino da sucata em fornos elétricos à arco (EAF – *Electric Arc Furnace*) e o método de refino do ferro-gusa líquido em conversores à oxigênio (forno conversor LD - *Linz Donawitz* ou BOF – *Basic Oxygen Furnace*). Devido a esses distintos métodos de produção, as escórias de aciaria são subdivididas em escória de aciaria elétrica e escória de aciaria LD (MASUERO *et al.*, 2004; FERNANDES, 2010; FREITAS, 2018). Destaca-se que o conversor LD gera entre 45 a 150 kg de escória oxidante por tonelada de aço bruto produzido, dependendo do tipo de conversor LD utilizado. Com relação ao EAF utilizado, podem ser geradas entre 80 a 150 kg de escória oxidante por tonelada de aço bruto produzido (CANTARINO, 2007).

Em 2017, segundo dados do Instituto Aço Brasil (2018), para cada tonelada de aço produzido no Brasil foram gerados 607 kg de resíduos e coprodutos diretos (pós, lamas, escórias,

carepas, refratários, fluff, etc.). A geração de agregado siderúrgico de alto-forno representou 42% do volume total, e a de escória de aciaria, 27%.

Dentro da perspectiva de aplicação da escória de aciaria na engenharia rodoviária, estudos têm apontado para a possibilidade de mobilização de suas boas propriedades mecânicas e hidráulicas quando utilizada moída (em pó) e na presença de umidade, onde reage quimicamente e ajuda na formação de compostos com propriedades cimentantes. Balbo (2007) relata que é recorrente em obras de pavimentação que os solos utilizados necessitem de uma estabilidade mecânica adicional, onde o agente estabilizador geralmente utilizado é um aglomerante hidráulico (cal, cimento Portland ou outro). O aglomerante irá propiciar aumento da rigidez e de resistência à flexão do material estabilizado, melhorando assim suas características físicas e mecânicas.

Portanto, considerando o grande volume de escória gerado e o potencial de uso desses materiais, justifica-se avaliar a viabilidade técnica do emprego do resíduo industrial escória oxidante de aciaria elétrica em pó, dentro do contexto de sua aplicação como agente estabilizante de solos. Alguns trabalhos científicos já atestam a viabilidade do uso da escória em pó como agente estabilizante em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários (ORTEGA-LÓPEZ *et al.*, 2014; PARREIRA *et al.*, 2014; PITANGA *et al.*, 2016; SANTOS *et al.*, 2018).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizada amostra de um solo arenoso residual jovem da Zona da Mata Norte de Minas Gerais, coletada na zona rural do Município de Cajuri-MG, proveniente da jazida de empréstimo denominada “Nô da Silva”, localizada nas coordenadas geográficas latitude 20°46’46,23”S e longitude 42°49’12,68”WGr. O solo foi coletado em um talude de corte à beira da estrada, na condição deformada, em conformidade com as orientações constantes na norma DNER-PRO 003 (1994a) do DNIT. Por fim, a amostra foi disposta em sacos plásticos devidamente vedados e transportada até o laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (UFV), onde foi seca ao ar e destorroada.

O solo estudado se caracteriza por ser um solo residual proveniente do intemperismo de rochas gnáissicas, correspondente ao horizonte pedológico C. A escolha é justificada pelo fato de que tais solos são mais susceptíveis à erosão e possuem menor capacidade de suporte, quando comparados a outros com menor grau de intemperismo. Essas características reforçam a necessidade de algum tipo de adequação ou melhoria destes materiais para emprego em engenharia rodoviária.

A amostra de solo coletada no campo foi reduzida e preparada segundo as orientações constantes nas normas NBR 9941 (ABNT, 1987a) e NBR 6457 (ABNT, 1986), visando à realização dos ensaios previstos no programa experimental. Os ensaios de caracterização geotécnica realizados foram: i) Granulometria conjunta - NBR 7181 (ABNT, 1984a); ii) Limites de Atterberg: limite de liquidez - NBR 6459 (ABNT, 2016a) e limite de plasticidade - NBR 7180 (ABNT, 1984b); iii) Massa específica dos grãos do solo - NBR 6508 (ABNT, 1984c).

A amostra de solo foi classificada segundo os sistemas TRB, USCS e MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), este último com a realização dos ensaios de Mini-MCV e perda de

massa por imersão, conforme os procedimentos prescritos nas normas DNIT-CLA 259 (DNIT, 1996a), DNER-ME 258 de Mini-MCV (DNER, 1994c) e DNER-ME 256 (DNER, 1994b).

O RCC é proveniente da usina de beneficiamento Ecovia Reciclagem de Resíduos da Construção Civil, localizada na cidade de Varginha-MG, e foi coletado segundo as normas DNER-PRO 120 (DNER, 1997) e NBR 10007 (ABNT, 2004b). O material apresenta coloração fortemente cinza (grande quantidade de resíduos de concreto e mármore), média presença de material vermelho e pouca presença de resíduos de madeira, plástico ou metal. A amostra foi disposta em sacos plásticos vedados e transportada até o laboratório de Engenharia Civil da UFV, onde foi acondicionada em tonéis.

A amostra de RCC foi reduzida e preparada segundo as orientações constantes na norma DNER-PRO 199 (DNER, 1996b). Para fins de caracterização tecnológica do RCC, foram realizados os seguintes ensaios: i) Granulometria conjunta - NBR 7181 (ABNT, 1984a); ii) Determinação do índice de forma do agregado - NBR 7809 (ABNT, 2006); iii) Abrasão "Los Angeles" do agregado graúdo - DNER-ME 035 (DNER, 1998a); e iv) Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman - DNER-ME 194 (DNER, 1998c).

A escória de aciaria utilizada foi cedida pela unidade siderúrgica da VSB (Vallourec & Sumitomo Tubos do Brasil), localizada no município de Jeceaba-MG, proveniente do forno elétrico à arco (escória oxidante) e coletada no pátio de estocagem à céu aberto. A amostra foi fornecida em pedregulhos e acondicionada em tonéis adequadamente vedados, em quantidade suficiente para a realização de todos os ensaios de laboratório previstos. Posteriormente, o material foi fragmentado em um moinho de bolas para redução da granulometria inicial, até que todo o material passasse na peneira nº 100 (#0,15 mm).

Os ensaios de caracterização física realizados para a amostra de escória oxidante de aciaria elétrica em pó foram: i) Índice de finura por peneiramento, por meio da peneira nº 200 (#0,075 mm) - NBR 11579 (ABNT, 2012); ii) Determinação da superfície específica (método de Blaine) - NBR 16372 (ABNT, 2015); e iii) Determinação da massa específica - NBR 16605 (ABNT, 2017).

Com o objetivo de melhorar a capacidade de suporte do solo a fim de estudar sua utilização em camadas de pavimentos rodoviários, foi realizada uma mistura solo-RCC em proporções que atendessem à faixa granulométrica D especificada na norma ES 141 do DNIT (DNIT, 2010a). A mistura solo-RCC necessária para atender à faixa granulométrica foi de 55% de solo e 45% de RCC, calculadas em relação à massa seca dos materiais (Figura 1). Para essa mistura, os ensaios de caracterização geotécnica realizados foram: i) Granulometria conjunta - NBR 7181 (ABNT, 1984a); ii) Limites de Atterberg: limite de liquidez - NBR 6459 (ABNT, 2016a) e limite de plasticidade - NBR 7180 (ABNT, 1984b); e iii) Massa específica dos grãos do solo - NBR 6508 (ABNT, 1984c).



**Figura 1:** Mistura de solo com RCC.

À mistura solo-RCC assim obtida, foram acrescentadas as proporções de 10% e 20% de escória oxidante de aciaria elétrica em pó em relação à massa seca total, e, a partir do ensaio de compactação na energia do Proctor normal segundo a NBR 7182 (ABNT, 2016b), foram determinados os parâmetros ótimos de compactação (teor ótimo de umidade –  $W_{ot}$  e peso específico aparente seco máximo –  $\gamma_{dmáx}$ ) para o solo natural, a mistura solo-RCC e a mistura solo-RCC estabilizada com escória. Por fim, a partir do ensaio CBR segundo a NBR 9895 (ABNT, 1987b), foram avaliadas as características de resistência e expansão das composições acima descritas.

Os corpos-de-prova não passaram por período de cura em câmara úmida e, imediatamente depois de compactados, foram submetidos a 96 horas de imersão em água. Após esse período, foram realizados os ensaios de índice e expansão CBR.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 1, estão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização do solo.

**Tabela 1:** Propriedades físicas do solo utilizado na pesquisa.

Granulometria				Limites de Atterberg			Peso Específico dos Sólidos
Argila	Silte	Areia	Pedregulho	LL	LP	IP	
15%	11%	60%	14%	38%	23%	15%	26,70 kN/m <sup>3</sup>

Conforme sua granulometria, o solo é caracterizado como areno-argilo-siltoso. Para o sistema de classificação TRB, o solo foi classificado como pertencente ao grupo A-2-7 e, pelo sistema USCS, foi classificado como SC. Segundo a metodologia MCT, foi caracterizado como NA' (arenoso não-laterítico). Solos na classificação NA' da metodologia MCT não se enquadram dentre os prioritários para utilização em obras viárias, pois tendem a não possuir as características técnicas exigidas para essa utilização.

Na Tabela 2, estão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização do RCC.

**Tabela 2:** Propriedades físicas do RCC utilizado na pesquisa.

Granulometria				Abrasão Los Angeles	Índice de Forma (agregado graúdo)	Peso Específico dos Sólidos
Argila	Silte	Areia	Pedregulho			
2%	4%	34%	60%	42%	2,9	28,94 kN/m <sup>3</sup>

Segundo a norma NBR 15116 (ABNT, 2004a), a amostra de RCC foi identificada como agregado de resíduo de concreto (ARC) que, de acordo com a classificação, é predominantemente originado de concreto, com teor de fragmentos a base de rocha e cimento acima de 90%.

Em relação aos contaminantes, o agregado reciclado apresentou 0,8% de materiais não minerais de características distintas, ficando abaixo do limite de 3% estabelecido pela NBR 15116 (ABNT, 2004a).

O RCC não apresentou limites de liquidez e plasticidade e, portanto, não possui índice de plasticidade. O comportamento não plástico do RCC também foi observado nos trabalhos de Santos (2007), Moreira *et al.* (2007) e Gómez (2011). Santos (2007) verificou que esse comportamento ocorre devido à presença de partículas de material cimentício no agregado reciclado.

Na Tabela 3, apresentam-se os resultados da caracterização física da escória oxidante de aciaria elétrica em pó empregada na pesquisa.

**Tabela 3:** Propriedades físicas da escória oxidante de aciaria elétrica em pó utilizada na pesquisa.

Superfície Específica	Índice de Finura	Peso Específico dos Sólidos
263 m <sup>2</sup> /kg	21%	36,23 kN/m <sup>3</sup>

No que concerne ao índice de finura e à superfície específica, espera-se que quanto maior a magnitude desses parâmetros físicos para a escória, maior seja a sua atividade pozolânica e, conseqüentemente, maior seja o seu potencial de estabilização da mistura solo-RCC, garantindo assim um melhor desempenho mecânico a esse arranjo.

Uma avaliação química qualitativa da escória foi realizada, em amostras com tamanho de partícula inferior a 0,075 mm, pela técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX). A caracterização química da escória apresentou grande presença de CaO (40,62%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (32,17%) e SiO<sub>2</sub> (11,76%). Importante observar que cal, óxido de ferro e sílica são elementos usuais da composição química do cimento Portland.

Em relação à mistura solo-RCC, a Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização realizados.

**Tabela 4:** Propriedades físicas da mistura solo-RCC utilizada na pesquisa.

Granulometria				Limites de Atterberg			Peso Específico dos Sólidos
Argila	Silte	Areia	Pedregulho	LL	LP	IP	
8%	11%	39%	42%	29%	11%	18%	27,61 kN/m <sup>3</sup>

A partir das curvas de compactação das misturas, na energia do Proctor normal, foram obtidos os correspondentes parâmetros de ótimo de compactação, os quais foram adotados como referência para a moldagem dos corpos-de-prova destinados à realização dos ensaios de determinação de índice e expansão CBR.

Todos os corpos-de-prova foram moldados em triplicata para possibilitar a aplicação de análise estatística na determinação dos valores de teor de umidade e peso específico aparente seco de compactação, índice e expansão CBR. A Tabela 5 apresenta os parâmetros ótimos ( $W_{ot}$  e  $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) obtidos das curvas de compactação dos materiais e utilizados como parâmetros para moldagem dos corpos-de-prova ensaiados. Os valores médios de umidade e peso específico aparente seco determinados a partir dos 3 corpos-de-prova ensaiados para cada material também são apresentados.

**Tabela 5:** Dados dos ensaios de compactação, na energia Proctor normal, realizados nas amostras de solo, solo-RCC e solo-RCC com escória oxidante de aciaria elétrica em pó.

Material	W <sub>ot</sub> (%)	W média (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ kN/m <sup>3</sup>	$\gamma_d$ médio kN/m <sup>3</sup>
Solo	15,1	14,9	17,75	17,81
Solo-RCC	12,8	12,8	18,87	18,90
Solo-RCC + 10% E*	12,7	12,3	19,10	19,02
Solo-RCC + 20% E*	12,6	12,5	19,68	19,28

\*E:Escória

Constata-se que houve queda da  $W_{ot}$  e aumento no valor de  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  para os materiais solo-RCC e solo-RCC com adição de escória, quando comparados com os respectivos valores do solo natural. O maior valor de  $\gamma_d$  foi obtido na composição solo-RCC com adição de 20% de escória.

A Tabela 6 apresenta o valor médio e desvio padrão (DP) para o índice e a expansão CBR determinados a partir de 3 corpos-de-prova ensaiados, para cada um dos materiais, após período de 96h de imersão em água.

**Tabela 6:** Dados dos ensaios CBR, na energia Proctor normal, realizados nas amostras de solo, solo-RCC e solo-RCC com escória oxidante de aciaria elétrica em pó.

Material	CBR médio (%)	DP <sub>CBR</sub> (%)	Expansão média (%)	DP <sub>Expansão</sub> (%)
Solo	17	± 0,0	0,14	± 0,010
Solo-RCC	28	± 1,2	0,01	± 0,048
Solo-RCC + 10% E*	48	± 3,6	0,04	± 0,017
Solo-RCC + 20% E*	81	± 1,5	0,01	± 0,007

\*E: Escória

Observa-se que a adição dos resíduos ao solo propiciou ganho de índice e expansão CBR.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados apresentaram ganho de resistência mecânica e decréscimo na expansão CBR para as misturas solo-RCC e solo-RCC com adição de escória. A adição de RCC ao solo areno-argilo-siltoso em proporções que atendessem à faixa granulométrica D especificada pelo DNIT implicou em ganho de 65% no CBR e, praticamente, não resultou em expansão durante o período de imersão, quando comparados ao índice e à expansão CBR do solo natural. No que se refere à adição de escória nas proporções de 10% e 20% à mistura solo-RCC, foram observados ganhos da ordem de 71% e 190% no índice CBR, respectivamente.

Segundo as normas do DNIT, os materiais empregados no pavimento com valores de CBR  $\geq 20\%$  e expansão  $\leq 1\%$  atendem aos requisitos concernentes à mistura de solos e materiais britados para execução de camadas de sub-base de pavimentos estabilizadas granulometricamente. Valores de CBR  $\geq 80\%$  e expansão  $\leq 0,5\%$  atendem aos requisitos para execução de camadas de base de pavimentos. Portanto, os materiais solo-RCC (CBR = 28%; expansão = 0,01%) e solo-RCC com 10% escória (CBR = 48%; expansão = 0,04%) apresentaram valores dos parâmetros CBR e expansão que os qualificam como camadas de sub-base de pavimentos rodoviários flexíveis. O material solo-RCC com 20% de escória (CBR = 81%; expansão = 0,01%) apresenta parâmetros CBR e expansão que o qualificam para ser empregado na execução de camadas de base de pavimentos rodoviários flexíveis, segundo os métodos de dimensionamento do DNIT.

O RCC e a escória oxidante de aciaria elétrica em pó apresentaram grande potencial para as misturas analisadas, visto que os resultados foram obtidos para corpos-de-prova não submetidos a períodos de cura. Em estudos de estabilização química de solos, é comum trabalhar com períodos de cura de 7 dias, no caso de misturas solo-cimento, e de 28 dias, em misturas solo-cal.

Ressalta-se a relevância do estudo quanto à necessidade em conferir um uso sustentável aos RCC e escória, permitindo uma alternativa de baixo custo para a demanda de execução de camadas de pavimentos rodoviários. Para trabalhos futuros, recomenda-se, para as misturas aqui propostas, realizar ensaios para determinação da perda de massa por imersão, resistência à tração por compressão diametral e compressão axial via corpos-de-prova cilíndricos.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa Ecovia Reciclagem de Resíduos da Construção Civil, pelo fornecimento do RCC, e ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, por permitir a utilização das instalações dos laboratórios de Geotecnia e de Materiais Asfálticos e Misturas para a execução deste trabalho.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1984a) *NBR 7181 – Solo - Análise granulométrica*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (1984b) *NBR 7180 – Solo - Determinação do Limite de Plasticidade*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (1984c) *NBR 6508 - Solo - Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (1986) *NBR 6457: Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (1987a) *NBR 9941 - Redução de amostras de agregados para ensaio de laboratório*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (1987b) *NBR 9895 - Solo: Índice de Suporte Califórnia – Método de ensaio*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

- ABNT (2004a) NBR 15116 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – requisitos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2004b) NBR 10007 - Amostragem de resíduos sólidos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2006) NBR 7809 - Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2012) NBR 11579 - Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2015) NBR 16372 - Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2016a) NBR 6459 – Solo - Determinação do limite de liquidez. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2016b) NBR 7182 - Solo – ensaio de compactação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2017) NBR 16605 - Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABRELPE (2018) - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2017*. São Paulo: ABRELPE.
- Ângulo, S. C.; S. E. Zordan e V. M. John (2001) *Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil*. Anais. São Paulo: IBRACON. Disponível em: <http://www.casoi.com.br/hjr/pdfs/rdc.pdf>. Acessado em 10/04/2019.
- Balbo, J. T. (2007) *Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração* (1ª ed.). Oficina de Textos, São Paulo.
- Barros, R. T. V. (2012) *Elementos de gestão de resíduos sólidos*. Belo Horizonte: Tessitura.
- Brasil (2002) Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n. 307, de 5 de julho de 2002. *Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil*. Brasília-DF.
- Cantarino, M. V. (2007) *Estudo sobre o uso de escória de aciarias elétrica e LD para aplicações como base e sub-base asfálticas*. Monografia (Pós- Graduação em Tecnologia Ambiental), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.
- Costa, R. V. G. DA; G. B. Athayde Júnior e M. M. de Oliveira (2014) Taxa de geração de resíduos da construção civil em edificações na cidade de João Pessoa. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 14, p. 127-137.
- Delongui, L. (2016) *Determinação de parâmetros mecânicos para dimensionamento de pavimentos com resíduos de construção e demolição*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, RS.
- DNER (1994a) Norma DNER-PRO 003: Coleta de amostras deformadas de solos. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNER (1994b) Norma DNER-ME 256: Solos compactados com equipamento miniatura - determinação da perda de massa por imersão, Solos, Método de Ensaio. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNER (1994c) Norma DNER-ME 258: Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV, Solos, Métodos de Ensaio. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNER (1996a) Norma DNER-CLA 259: Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNER (1996b) Norma DNER-PRO 199: Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNER (1997) Norma DNER-PRO 120: Procedimento - coleta de amostra de agregado. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNER (1998a) Norma DNER-ME 035: Agregados - determinação da abrasão "Los Angeles". Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNER (1998c) Norma DNER-ME 194: Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNIT (2010a) Norma 141-ES: Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- DNIT (2010b) Norma 139-ES: Pavimentação - Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.

- Farias, M. M.; A. M. J. Gómez e F. S. Quiñones (2013) Use of recycled aggregates from construction and demolition wastes for the construction of flexible pavements. *Third International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment*, Nagoya, Japan.
- Fernandes, D. P. (2010) *Estudo de estabilização química, geo-mecânica e ambiental das escórias de aciaria LD para fins de aplicação como material de lastro ferroviário em vias sinalizadas*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto-MG.
- Freitas, S. M. A. C. (2018) *Escória de Aciaria: caminhos para uma Gestão Sustentável*. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto-MG.
- Gómez, A. M. J. (2011) *Estudo experimental de um resíduo de construção e demolição (RCD) para utilização em pavimentação*. Dissertação (Mestrado), Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- IABR (2018) - Instituto Aço Brasil: *Relatório de Sustentabilidade 2018*. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>>. Acesso em: 28 de junho 2019.
- ISLU (2018) - Índice de Sustentabilidade da Limpeza Urbana: *Edição 2018*. Disponível em: <<https://selur.org.br/wp-content/uploads/2018/12/ISLU-2018.pdf>>. Acesso em: 15 de junho 2019.
- Jiménez, J. R.; J. Ayuso; F. Agrela; M. López e A. P. Galvín (2012) Utilization of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 58, p. 88-97.
- John, V. M. (2000) *Reciclagem de resíduos na construção civil - contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento*. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.
- Katz, A. e H. Baum (2011) A Novel Methodology to Estimate the Evolution of Construction Waste in Construction Site. *Journal of Waste Management*, v. 31, n. 2, p. 353-358.
- Leite, F. C.; R. S. Motta; K. L. Vasconcelos e L. Bernucci (2011) Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Construction and Building Materials*, v. 25, p. 2972-2979.
- Masuro, A. B.; D. C. C. Dal Molin e A. C. F. Vilela (2004) Estabilização e viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria elétrica. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p. 1-25.
- Matuella, M. F. (2017) *Efeito da composição de resíduos de construção e demolição em seu comportamento mecânico para utilização em pavimentação*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre., RS.
- Moreira, J. F.; J. F. Dias e M. E. B. Rezende (2007) Utilização de resíduos de construção e demolição em base de pavimentos na cidade de Uberlândia-MG. *Vias Gerais*, n. 6, p. 49-54.
- Oliveira, M. M.; M. H. A. S. Medeiros; R. L. Silva e G. A. Pampanelli Lucas (2016) Desenvolvimento sustentável nas organizações como oportunidade de novos negócios. *Revista Valore*, Volta Redonda, v. 1, n. 1, p. 42-66.
- Ortega-López, V.; J. M. Manso; I. I. Cuesta e J. J. Gonzalez (2014) The long-term accelerated expansion of various ladle-furnace basic slags and their soil-stabilization applications. *Construction and Building Materials*, v. 68, p. 455-464.
- Parreira, C. E. C.; T. O. Silva; H. N. Pitanga; K. H. P. Rodrigues e R. S. Marinho (2014) Resistência mecânica de misturas de solo-escória de aciaria-cinza volante visando aplicação em pavimentação. In: *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, 17., Goiânia-GO.
- Pinto, T. P. (1999) *Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana*. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- Pitanga, H. N.; T. O. Silva; A. L. Santos; A. C. B. Silva e D. C. Lima (2016) MCT classification for compacted mixtures of soil-steel slagfly ash for application in forest roads. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v. 40, n. 5, p. 911-919.
- Sáez, P. V.; M. D. R. Merino; C. P. Amores e A. S. A. González (2014) Assessing the accumulation of construction waste generation during residential building construction works. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 93, p. 67-74.
- Santos, E. C. G. (2007) *Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado*. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP.
- Santos, A. D; H. N. Pitanga; A. C. B. Silva e T. O. Silva (2018) Caracterização do comportamento mecânico de misturas de solo-escória de aciaria-cinza volante visando à aplicação em pavimentação. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 7, n. 1, p. 16-29.
- Silva, V. C. e A. F. Pereira (2013) Estudo dos aspectos de avaliação do ciclo de vida para reaproveitamento de resíduos sólidos industriais de aciaria. In: *Congresso Internacional Interdisciplinar em Sociais e Humanidades*, II, Anais. Belo Horizonte, p. 01-17.
- Wimmer G.; H. Wulfert; A. Fleischanderl; A. Werner e T. Fenzl (2014) BOF converter slag valorization. In: *Conference, Iron and steel technology*, AISTech 2014, Indianapolis, p. 297-303.