

ALEXANDRE PELISSARI SANT'ANA

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE MISTURAS SOLO – ESCÓRIA DE
ALTO-FORNO GRANULADA MOÍDA PARA FINS RODOVIÁRIOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do Título de “Magister Scientiae”.

VIÇOSA

MINAS GERAIS – BRASIL

2003

ALEXANDRE PELISSARI SANT'ANA

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE MISTURAS SOLO – ESCÓRIA DE
ALTO-FORNO GRANULADA MOÍDA PARA FINS RODOVIÁRIOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do Título de “Magister Scientiae”.

APROVADA: 29 de Julho de 2003.

Prof. Dario Cardoso de Lima
(Conselheiro)

Prof. Carlos Alexandre B. de Carvalho
(Conselheiro)

Prof. Glauco Pontes Filho

Prof. Carlos Cardoso Machado

Prof. Cláudio Henrique de C. e Silva
(Orientador)

A Deus, que me sustentou e capacitou,

Aos meus pais, Rui e Maria das Graças,

Aos meus avós, Carlos (in memoriam), Odete, Mansueto e Ana,

Aos meus irmãos, Rui e Viviane,

À minha namorada, Gizele,

Aos meus tios e primos,

Aos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, pela possibilidade de desenvolvimento e formação profissional.

Ao Professor Cláudio Henrique de C. e Silva, orientador deste trabalho, pela dedicação profissional.

Aos Professores Conselheiros Dario Cardoso de Lima e Carlos Alexandre B. de Carvalho, pelos esclarecimentos e sugestões.

Ao Professor Lauro Couto Gontijo, pelo conhecimento e auxílio dispensados nas várias etapas desta pesquisa.

Aos demais professores do Curso de Mestrado em Engenharia Civil, pelo apoio e pelo incentivo dedicados durante o curso.

Ao bolsista de iniciação científica, Rodrigo Zorzal, que foi de fundamental importância no desenvolvimento desta pesquisa, por sua dedicação aos trabalhos.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia Civil da UFV, Júlio, Paulo e Tarcísio, pela orientação nos trabalhos de laboratório.

Ao estudante de Mestrado em Química, José Maurício, pelo apoio técnico.

À Valemassa Indústria e Comércio de Argamassa Ltda, pelo fornecimento da escória necessária à execução deste trabalho.

À CAPES e ao CNPq, pelo apoio financeiro.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

ALEXANDRE PELISSARI SANT'ANA, filho de Rui Sant'Ana e Maria das Graças Pelissari Sant'Ana, nasceu em 29 de Abril de 1975, na cidade de Guarapari, Espírito Santo.

Em Março de 2001, graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Viçosa - UFV.

Em Abril de 2001, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Civil na UFV, concentrando seus estudos na área de Geotecnia com ênfase em pavimentação.

CONTEÚDO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	x
RESUMO.....	xii
ABSTRACT	xiii
1. Introdução	1
1.1. Considerações gerais.....	1
1.2. Objetivo	2
1.3. Organização da tese	2
2. Revisão Bibliográfica.....	3
2.1. Introdução	3
2.2. A escória de alto-forno granulada.....	5
2.2.1. Características físicas	5
2.2.2. Composição química.....	6
2.2.3. Composição mineralógica.....	6
2.2.4. Reatividade da escória de alto-forno	7
2.2.5. Ativação da escória de alto-forno.....	9
2.3. O uso de escória de alto-forno granulada em pavimentação.....	12
3. Materiais e Métodos	15
3.1. Materiais.....	15
3.1.1. Solos utilizados no experimento	15
3.1.2. Escória de alto-forno	17
3.1.3. Cal hidratada	17
3.2. Métodos	17
3.2.1. Ensaios de caracterização e de compactação dos solos.....	18
3.2.2. Metodologia utilizada na dosagem das misturas.....	18

3.2.3. Ensaio executados com as misturas	19
3.3.2.1. Ensaio de compactação	19
3.3.2.2. Ensaio de resistência à compressão não-confinada	20
3.3.2.3. Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem	20
3.3.2.4. Ensaio de resistência à compressão diametral	21
4. Resultados e discussão	22
4.1. Caracterização e classificação dos solos	22
4.2. Caracterização da escória de alto-forno granulada moída.....	24
4.3. Ensaio de compactação.....	26
4.4. Parâmetros utilizados na obtenção dos teores ótimos de escória e cal das misturas.....	36
4.4.1. Ensaio de resistência à compressão não-confinada	36
4.4.2. Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem	45
4.4.3. Definição dos teores ótimos de escória e cal das misturas	47
4.5. Estudo da influência do tempo de cura na resistência mecânica das misturas	48
4.6. Análise da influência do envelhecimento da escória de alto-forno granulada moída na resistência mecânica da mistura solo – escória – cal	50
4.7. Estudo da influência do teor de umidade na resistência mecânica das misturas	51
4.8. Estudo da influência da energia de compactação na resistência mecânica das misturas.....	55
4.9. Estudo da influência do tempo decorrido entre a mistura e a compactação na resistência mecânica das misturas	60
4.10. Avaliação da influência da cal hidratada na resistência mecânica das misturas	63
4.11. Ensaio de resistência à compressão diametral	67
5. Conclusões e Sugestões	69
5.1. Conclusões.....	69
5.2. Sugestões para futuros trabalhos.....	70
Referências Bibliográficas	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Croqui esquemático dos diferentes tratamentos da escória à saída do alto-forno (MARQUES, 1994).	5
Figura 2 – Evolução da resistência à compressão de argamassas de escória-cal, para teores de cal relacionados com a massa de escória (CINCOTTO et al., 1992).	11
Figura 3 – Efeito da ativação química na resistência à compressão de argamassas com diferentes áreas específicas da escória (Modificado de CINCOTTO et al., 1992).	12
Figura 4 – Resistência à compressão não-confinada x teor de escória(cal) (Modificado de WILD et al., 1998).	13
Figura 5 - Resistência á compressão não-confinada x período de cura (HAGA et al, 1981).	14
Figura 6 – Local de coleta do solo ETA.	16
Figura 7 – Local de coleta do solo VS.	16
Figura 8 – Curvas granulométricas dos solos (FERRAZ et al., 1994).	23
Figura 9 – Curvas de compactação das misturas com solo ETA e 5 % de escória combinados com 5, 10 e 20 % da cal.	28
Figura 10 – Curvas de compactação das misturas com solo ETA e 10 % de escória combinados com 5, 10 e 20 % da cal.	28
Figura 11 - Curvas de compactação das misturas com solo ETA e 15 % de escória combinados com 5, 10 e 20 % da cal.	29
Figura 12 – Curvas de compactação das misturas com solo VS e 5 % de escória combinados com 5, 10 e 20 % da cal.	29
Figura 13 – Curvas de compactação das misturas com solo VS e 10 % de escória combinados com 5, 10 e 20 % da cal.	30
Figura 14 – Curvas de compactação das misturas com solo VS e 15 % de escória combinados com 5, 10 e 20 % da cal.	30
Figura 15 – Variação do peso específico seco máximo com o teor de escória – Solo ETA.	32

Figura 16 – Variação do peso específico seco máximo com o teor de escória – Solo VS.....	32
Figura 17 – Variação do peso específico seco máximo com o teor de cal – Solo ETA.....	33
Figura 18 – Variação do peso específico seco máximo com o teor de cal – Solo VS.....	33
Figura 19 – Variação do teor de umidade ótimo com o teor de escória – Solo ETA.....	34
Figura 20 – Variação do teor de umidade ótimo com o teor de escória – Solo VS.....	34
Figura 21 – Variação do teor de umidade ótimo com o teor de cal – Solo ETA.....	35
Figura 22 – Variação do teor de umidade ótimo com o teor de cal – Solo VS	35
Figura 23 – Variação da resistência à compressão não-confinada com o tempo de cura para as misturas feitas com o solo ETA.....	41
Figura 24 – Variação da resistência à compressão não-confinada com o tempo de cura para as misturas feitas com o solo VS.	42
Figura 25 – Perda de massa do corpo-de-prova devido ao período de imersão em água (1º estágio) – Solo VS.....	43
Figura 26 – Perda de massa do corpo-de-prova devido ao período de imersão em água (2º estágio) – Solo VS.....	43
Figura 27 – Perda de massa do corpo-de-prova devido ao período de imersão em água (3º estágio)– Solo VS.....	44
Figura 28 – Perda de massa do corpo-de-prova devido ao período de imersão em água (4º estágio)– Solo VS.....	44
Figura 29 – Corpos-de-prova desintegrados após o período de imersão em água – Mistura com o solo VS.	45
Figura 30 – Corpos-de-prova imersos em água durante o ensaio de durabilidade por molhagem e secagem.	46
Figura 31 – Tempo de cura x resistência à compressão não-confinada.	49
Figura 32 – Tempo de envelhecimento da escória de alto-forno moída x resistência à compressão não-confinada das misturas, após 7 dias de cura.	51
Figura 33 – Teor de umidade x resistência à compressão não-confinada – Solo ETA - Dosagem: 10% de escória e 5% de cal.	53
Figura 34 – Teor de umidade x resistência à compressão não-confinada – Solo VS - Dosagem: 10% de escória e 10% de cal.	54
Figura 35 – Curvas de compactação em diferentes energias – Solo ETA.....	56

Figura 36 – Curvas de compactação em diferentes energias – Solo VS.	57
Figura 37 – Influência da energia de compactação na resistência mecânica das misturas com o solo ETA.	59
Figura 38 – Influência da energia de compactação na resistência mecânica das misturas com o solo VS.	60
Figura 39 - Influência do tempo decorrido entre a mistura e a compactação na resistência mecânica da mistura – Solo ETA – Dosagem: 10% de escória e 5% de cal – Período de cura: 28 dias.	62
Figura 40 - Influência do tempo decorrido entre a mistura e a compactação na resistência mecânica da mistura – Solo VS – Dosagem: 10% de escória e 10% de cal – Período de cura: 28 dias.	63
Figura 41 – Curva de compactação da mistura de solo (ETA) com escória.	64
Figura 42 – Curva de compactação da mistura de solo (VS) com escória.	65
Figura 43 – Variação da resistência à compressão não-confinada com o tempo de cura – mistura solo ETA com 10% de escória.	66
Figura 44 – Tempo de cura x resistência à compressão diametral.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química de escórias básicas brasileiras (CINCOTTO et al, 1992).	6
Tabela 2 – Índices de qualidade obtidos em função da composição química de escória moída (CINCOTTO et al., 1992).....	8
Tabela 3 – Ativação física das escórias por moagem (MARQUES, 1994).....	9
Tabela 4 – Ensaio em argamassas – Resistência à compressão não-confinada (CINCOTTO et al., 1992).....	11
Tabela 5 – Composição química da cal hidratada (MENDONÇA et al., 1998).....	17
Tabela 6 – Dosagens das misturas solo – escória de alto-forno – cal.	19
Tabela 7 – Caracterização dos solos no estado natural (FERRAZ et al., 1994).....	23
Tabela 8 – Classificação dos solos no estado natural (TRINDADE et al., 2003).....	24
Tabela 9 – Características físicas da escória de alto-forno granulada moída.....	24
Tabela 10 – Composição química da escória de alto-forno granulada moída.....	25
Tabela 11 – Índices de qualidade obtidos em função da composição química da escória de alto-forno granulada moída.....	25
Tabela 12 – Peso específico seco máximo ($\rho_{dm\acute{a}x}$) e teor de umidade ótimo (w_{ot}) dos solos no estado natural.....	26
Tabela 13 – Peso específico seco máximo ($\rho_{dm\acute{a}x}$) e teor de umidade ótimo (w_{ot}) das misturas com o solo ETA.	27
Tabela 14 – Peso específico seco máximo ($\rho_{dm\acute{a}x}$) e teor de umidade ótimo (w_{ot}) das misturas com o solo VS.	27
Tabela 15 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão não-confinada para os solos no estado natural.....	37
Tabela 16 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão não-confinada das misturas com solo ETA – 1 dia de cura em câmara úmida.	38
Tabela 17 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão não-confinada das misturas com solo ETA – 7 dias de cura em câmara úmida.....	38

Tabela 18 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão não-confinada das misturas com solo ETA – 28 dias de cura em câmara úmida.....	39
Tabela 19 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão não-confinada das misturas com solo VS – 1 dia de cura em câmara úmida.....	39
Tabela 20 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão não-confinada das misturas com solo VS – 7 dias de cura em câmara úmida.....	40
Tabela 21 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão não-confinada das misturas com solo VS – 28 dias de cura em câmara úmida.....	40
Tabela 22 – Perda de massa no ensaio de durabilidade por molhagem e secagem.....	47
Tabela 23 - Influência do tempo de cura na resistência mecânica das misturas.....	49
Tabela 24 - Análise da influência do envelhecimento da escória de alto-forno granulada moída na resistência mecânica das misturas.....	51
Tabela 25 – Parâmetros obtidos nos ensaios de compactação de misturas com o solo ETA e VS.....	52
Tabela 26 - Influência do teor de umidade na resistência mecânica das misturas – Solo ETA - Dosagem: 10% de escória e 5% de cal.....	53
Tabela 27 - Influência do teor de umidade na resistência mecânica das misturas – Solo VS - Dosagem: 10% de escória e 10% de cal.....	54
Tabela 28 – Parâmetros de compactação em diferentes energias – Solo ETA.....	56
Tabela 29 – Parâmetros de compactação em diferentes energias – Solo VS.....	57
Tabela 30 - Influência da energia de compactação na resistência mecânica da mistura – Solo ETA – Dosagem: 10% de escória e 5% de cal.....	58
Tabela 31 - Influência da energia de compactação na resistência mecânica da mistura – Solo VS – Dosagem: 10% de escória e 10% de cal.....	59
Tabela 32 - Influência do tempo decorrido entre a mistura e a compactação na resistência mecânica da mistura – Solo ETA – Dosagem: 10% de escória e 5% de cal – Período de cura: 28 dias.....	61
Tabela 33 - Influência do tempo decorrido entre a mistura e a compactação na resistência mecânica da mistura – Solo VS – Dosagem: 10% de escória e 10% de cal – Período de cura: 28 dias.....	62
Tabela 34 - Parâmetros de compactação para a mistura sem cal.....	64
Tabela 35 – Resistência à compressão não-confinada de mistura solo ETA - 10% de escória.....	66
Tabela 36 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão diametral.....	67

RESUMO

SANT'ANA, Alexandre Pelissari, M. S. Universidade Federal de Viçosa, Julho de 2003.

Caracterização tecnológica de misturas solo – escória de alto-forno granulada moída para fins rodoviários. Orientador: Cláudio Henrique de Carvalho Silva.
Conselheiros: Dario Cardoso de Lima e Carlos Alexandre Braz de Carvalho.

Este trabalho tem por objetivo caracterizar tecnologicamente, em laboratório, misturas de escória de alto forno granulada moída e solos, considerando-se parâmetros de resistência mecânica, com maior ênfase, e de durabilidade para fins de aplicações em estradas. Os solos estudados são um Latossolo Vermelho Amarelo que apresenta textura argilo-areno-siltosa, de classificação TRB A-7-5(20) e um solo Saprolítico de textura areno-silto-argilosa, de classificação TRB A-2-4(0). A escória de alto forno utilizada é de procedência da Açominas (Aço Minas Gerais S/A). Um outro produto utilizado na mistura foi a cal hidratada, adicionada em pequena quantidade com a finalidade de ativar a escória de alto forno granulada moída. As misturas estudadas resultaram da combinação de três teores de escória (5, 10 e 15% em relação à massa de solo seco ao ar) e de três teores de cal hidratada (5, 10 e 20% em relação à massa de escória). Os ensaios de laboratório realizados foram: caracterização da escória e dos solos, compactação, compressão não-confinada, durabilidade e resistência à tração. Os resultados obtidos permitiram concluir que os solos se mostraram reativos a escória gerando ganhos significativos de resistência e durabilidade, contudo, os mecanismos de reação são diferentes para cada tipo de solo.

ABSTRACT

SANT'ANA, Alexandre Pelissari, M. S. Universidade Federal de Viçosa, July, 2003.
Technological characterization of mixtures of soil with ground granulated blast furnace slag for pavement design. Advisor: Cláudio Henrique de Carvalho Silva.
Committee Members: Dario Cardoso de Lima e Carlos Alexandre Braz de Carvalho.

This work was intended to carry out a detailed laboratory investigation of soil mixtures with addition of granulated blast furnace slag. Emphasis was given to technological characterization of these mixtures considering the engineering properties of interest for pavement design, i.e., mechanical strength and durability. The soils studied were a silty-sandy clay Red-Yellow Latosol, presenting a fine texture, classified as TRB A-7-5 (20), and a clayey-silty sand Saprolitic soil, a residual granular soil, classified as TRB A-2-4 (0). The blast furnace slag used was sponsored by Açominas (Aço Minas Gerais S/A). It was also added small amounts of hydrated lime for the activation of chemical reactions of granulated slag in the soil mixtures. The investigation was carried out by combinations of three contents of slag (5, 10 and 15 % of dry soil mass in air) and three contents of lime (5, 10 and 20 % of slag mass). The laboratory tests performed were: index properties of slag and soils, compaction at different compaction efforts, unconfined compressive strength, durability and splitting or indirect tensile strength. Test results shown that these soils reacted with the slag with increase in the strength and durability, though chemical reactions were affected by distinct factors associated with each soil type.

1. Introdução

1.1. Considerações gerais

O transporte rodoviário brasileiro é reconhecidamente de importância fundamental para o desenvolvimento social e econômico do país, sendo responsável por cerca de 70 a 80 % das cargas transportadas. Segundo dados da Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (GEIPOT, 1999), as rodovias públicas brasileiras totalizaram uma extensão de, aproximadamente, 1.725.000 km, dos quais apenas 9,5 % se encontravam pavimentadas. Do total da rede viária, 1,43 milhões de quilômetros correspondiam à malha municipal, com 1,2 % pavimentadas, à época (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTOS - ABEDA, 2001).

Considerando-se que parcela dessas rodovias e estradas vicinais em terra justificasse os serviços de pavimentação, seja pelo número de veículos, como pela importância regional ou estratégica, algumas centenas de milhares de quilômetros necessitariam ser pavimentados nos próximos anos.

Porém, um dos fatores essenciais em obras de pavimentação é a característica do solo a ser utilizado, que deve estar de acordo com as especificações exigidas pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) e/ou dos Departamentos Estaduais de Estradas de Rodagem (DERs), o que muitas vezes não ocorre. Portanto, é de fundamental importância envidar-se esforços incentivando a pesquisa na área de estabilização de solos empregando-se materiais alternativos visando a melhoria das propriedades geotécnicas de interesse no projeto de pavimentos.

Dentro dessa visão, o presente trabalho busca estudar como alternativa tecnológica de baixo custo, para a construção rodoviária, a escória de alto-forno granulada, que é um subproduto do processo de fabricação do gusa, cujo potencial nacional de geração pelas siderúrgicas era de aproximadamente 5,4 milhões de toneladas por ano, em 1997, segundo dados do Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS, 1997).

1.2. Objetivo

O presente trabalho teve por objetivo caracterizar tecnologicamente, em laboratório, misturas de escória de alto-forno granulada moída e solos, considerando-se parâmetros de resistência mecânica, com maior ênfase, e de durabilidade para fins de aplicações em estradas. Foram estudados diferentes tipos de solo e diferentes dosagens de misturas solo-escória de alto-forno, ativada com cal hidratada e diferentes técnicas de preparação de misturas estabilizadas.

1.3. Organização da tese

De modo a atender ao objetivo proposto, este trabalho é apresentado da seguinte forma: o capítulo 2 mostra uma revisão de literatura sobre a produção e as características da escória de alto-forno, sua reação diante dos diferentes processos de ativação, e algumas de suas aplicações em pavimentação rodoviária. O capítulo 3 aborda os materiais e os métodos empregados no presente estudo; o capítulo 4 introduz os resultados obtidos e as discussões pertinentes; e o capítulo 5 sumariza as conclusões obtidas neste trabalho e propõe algumas sugestões para futuras pesquisas.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Introdução

As escórias de alto-forno tem seu emprego difundido há mais de 100 anos, sendo que os primeiros relatos publicados datam do ano de 1862, quando Eugene Langen, demonstrou que escórias básicas moídas e misturadas com a cal hidratada davam lugar a um material, que não alcançava as qualidades do cimento Portland, mas que superava os sistemas que só utilizavam cal como ligante (LIMA, 1999).

Segundo o DNER^A (1990), a escória de alto-forno é um resíduo silicoso que se forma em alto-forno quando da fabricação de gusa. A fabricação do ferro gusa é realizada no alto-forno onde ocorre a redução dos óxidos contidos nos minerais de ferro e na separação das impurezas que os acompanham (cangas) das que trazem outras matérias primas. É introduzido no forno o minério de ferro, o combustível (Cinzas de coque ou carvão vegetal) e os fundentes (Substâncias ou materiais que tem por finalidade auxiliar a fusão dos metais, tornando mais baixo o ponto de fusão do minério, acelerar o processo e corrigir a sanilidade que o resíduo das reações químicas geraria caso se misturasse com o metal). A separação do ferro gusa e da escória ocorre na parte inferior do alto-forno, denominado cadinho, onde, por diferenciação gravimétrica, a escória é agrupada na zona superior. A escória fundida é conduzida a uma temperatura de, aproximadamente, 1400 °C, por canais até o local onde ocorre o seu resfriamento. A escória líquida pode ser submetida a diferentes processos de resfriamento que podem ser ao ar, expandida ou granulada.

Segue-se uma descrição sucinta desses diferentes processos de resfriamento, conforme descrito por GEYER et al. (1995).

^A No presente texto vai-se optar pelo emprego da designação “Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER)” em substituição ao nome atual deste órgão, isto é, “Departamento Nacional de Infra-estrutura e Transporte (DNIT)”.

- Escória resfriada ao ar ou cristalizada: ao resfriar-se naturalmente ao ar, os óxidos componentes da escória se cristalizam e perdem as características hidráulicas, sendo considerada inerte, com composição granulométrica variando em torno de 12,5 a 150 mm;
- Escória expandida ou pelletizada: é obtida pelo resfriamento rápido, sendo previamente expandida pela aplicação de uma quantidade controlada de água, ar ou vapor. Dessa forma a solidificação é acelerada aumentando a natureza vesicular da escória, produzindo-se assim um material leve, que é em seguida moído e classificado granulometricamente, sendo encontrada com granulometria tradicionalmente considerada para o agregado graúdo (entre 9,5 e 32,0 mm). Apresenta as mesmas características de durabilidade da escória resfriada ao ar;
- Escória resfriada com água ou granulada: é obtida por resfriamento brusco (rápido), sendo, entretanto, previamente fragmentada por jato d'água e posteriormente resfriada em tanque com água, onde se granula. Dessa forma, se obtém uma escória vítrea, resultando em pouca ou nenhuma cristalização, de granulometria semelhante à da areia de rio e com massa unitária em torno de 10 kN/m³. Apresenta estrutura porosa e textura áspera.

A figura 1 ilustra um esquema simplificado dos diferentes tipos de resfriamento experimentados pela escória durante o processo de resfriamento, segundo relata MARQUES (1994).

Segundo CHIARATTI et al. (1987), a quantidade de escória produzida é decorrente dos seguintes fatores:

- teor de ferro no “sinter”: quanto mais rico em ferro o “sinter” se apresenta, menor será a produção de escória;
- teor de cinzas no coque: a cinza do coque é composta em média de 45% de óxido de silício (SiO₂), assim, quanto maior o teor de cinzas, maior será a necessidade de cálcio, na forma de óxido de cálcio (CaO), visando manter a basicidade constante. Como consequência haverá uma maior geração de escória.

- quantidade de hematita presente na carga do alto-forno; este mineral apresenta teores de SiO_2 em sua canga variando entre 25 a 75%. O maior uso de hematita na carga do alto-forno acarretará uma geração de escória, face à necessidade de estabilização com CaO.

Em média, a produção de 1 t de ferro gusa ocasionará a geração de 300 kg de escória.

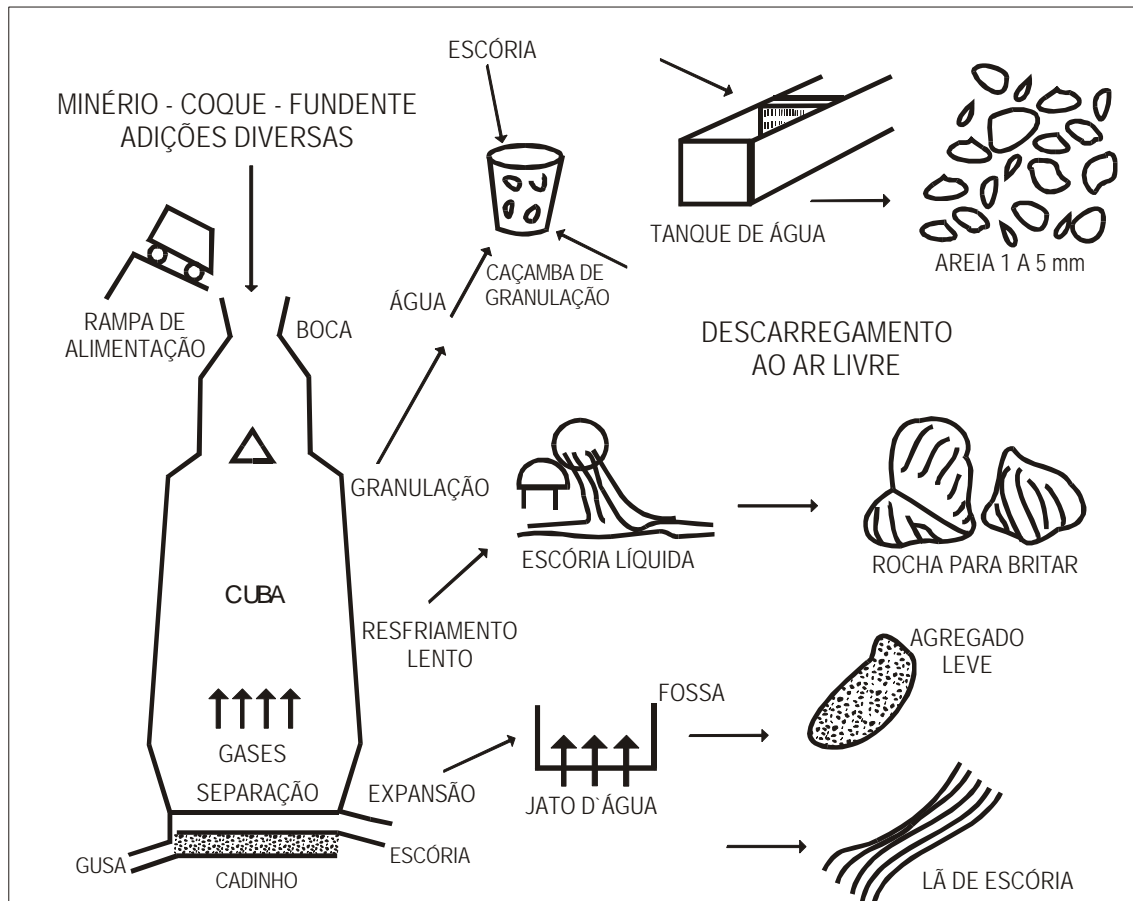


Figura 1 – Croqui esquemático dos diferentes tratamentos da escória à saída do alto-forno (MARQUES, 1994).

2.2. A escória de alto-forno granulada

2.2.1. Características físicas

A escória de alto-forno granulada, macroscopicamente, tem um aspecto de uma areia grossa, porosa, com um tamanho máximo de 5 mm, de cor branca-amarelada a marrom. A escória bem granulada é essencialmente amorfa.

A massa específica da escória líquida é da ordem de 2600 kg/m^3 . A massa específica real da escória granulada é de 1500 kg/m^3 , sendo que ao ser transportada isenta de água, adquire uma massa específica aparente de 1100 kg/m^3 (CHIARATTI et al., 1987).

2.2.2. Composição química

A composição química das escórias está ligada à qualidade do minério de ferro empregado na sua produção, à natureza do fundente, à natureza do combustível e do ativador da redução (coque ou carvão vegetal), à viscosidade, etc (MARQUES, 1994).

Uma característica importante da escória é o teor de óxido de cálcio (CaO), que a classifica como sendo básica (teor de CaO elevado) ou ácida (teor de CaO em menor quantidade). Vários autores relacionam, através de índices, a reatividade das escórias à sua basicidade, sendo que quanto mais básica forem as escórias, maiores serão as suas propriedades hidráulicas, ou seja, mais reativas. A composição química das escórias básicas brasileiras estão indicadas na tabela 1.

Tabela 1 – Composição química de escórias básicas brasileiras (CINCOTTO et al, 1992).

Componentes (% em peso)	Procedência				
	Usiminas (MG)	Cosipa (SP)	CSN (RJ)	CST (ES)	Açominas (MG)
SiO ₂	35.15	33.85	32.90	35.47	35.39
Al ₂ O ₃	12.79	13.00	15.44	13.20	13.88
CaO	43.58	42.22	40.97	41.97	40.99
Fe ₂ O ₃	0.37	0.68	0.91	0.83	1.97
FeO	0.29	0.33	0.43	-	-
MgO	5.48	7.08	5.81	5.69	6.31
K ₂ O	0.45	0.70	0.73	0.28	0.49
Na ₂ O	0.13	0.21	0.19	0.10	0.12
TiO ₂	0.54	0.48	0.49	0.53	-
Mn ₂ O ₃	0.88	0.69	0.86	0.84	-
SO ₃	0.05	0.12	-	0.07	-
S	1.1	0.67	1.03	0.87	0.87
Fe	0.07	0.13	0.25	-	-

2.2.3. Composição mineralógica

O tipo de resfriamento das escórias é um fator determinante nas suas estruturas, podendo apresentar estruturas vítrea ou cristalina. As escórias básicas brasileiras apresentam, em média, um teor de fase vítrea de 95%, sendo a porcentagem restante constituída de fase

cristalina, exibindo em sua composição mineralógica, com frequência, melilitas, composição sólida com extremos de akermanita e gehlenita, merwinita e, raramente, wollastonita ou pseudowollastonita, mais comuns em escórias cuja composição se aproxima do tipo ácido (CINCOTTO et al., 1992).

2.2.4. Reatividade da escória de alto-forno

A composição química e o processo de resfriamento da escória de alto-forno granulada são fatores determinantes da sua capacidade aglomerante. A escória quando é submetida a condições de resfriamento brusco na saída do alto-forno (processo chamado de granulação da escória), apresenta propriedades hidráulicas latentes (escória vítrea), ao contrário (resfriamento lento), origina-se uma escória sem propriedades hidráulicas, correspondente a uma forma mineralógica e química estável (escória cristalizada).

Sobre o comportamento na presença de água, a atividade hidráulica da escória de alto-forno granulada não deve ser confundida com a das pozolanas. Enquanto a pozolana consome cal para formar compostos hidráulicos, a escória é capaz de desenvolver estes compostos, desempenhando a cal o papel de ativador ou acelerador dessas reações. De fato, em água, a escória endurece e libera cal, podendo o pH atingir o valor 11, de modo análogo ao clínquer Portland; esta analogia é qualitativa mas não quantitativa (CINCOTTO e JOHN, 1990).

Do ponto de vista mineralógico, conforme relata MARQUES (1994), as escórias de composição melilíticas resfriadas rapidamente (escórias vitrificadas), são as que potencialmente apresentam as melhores propriedades hidráulicas, pois a forma vítrea, desordenada e por conseqüência rica em energia, possui uma hidraulicidade latente. Segundo esse autor, outros fatores que interferem na determinação da atividade hidráulica da escória de alto-forno granulada são: estrutura, granulometria, superfície específica, microheterogeneidade e defeitos superficiais. Em suma, a hidraulicidade das escórias depende principalmente da sua composição química (básica) e do seu grau de vitrificação, sendo essas características utilizadas rotineiramente como métodos de previsão da hidraulicidade.

Dentre os métodos de avaliação da hidraulicidade das escórias, o mais utilizado e seguro é o método comparativo de Féret, que tem por base a comparação das resistências à compressão, a diferentes idades, de argamassas de cimento e escória e de cimento e quartzo, em igual porcentagem (CINCOTTO et al., 1992). Devido ao fato de ser um ensaio relativamente

demorado, outros métodos são utilizados na classificação da atividade hidráulica da escória de alto-forno granulada. Segundo relata MARQUES (1994), esses métodos são baseados:

- na composição química, através do emprego de módulos químicos, onde o resultado de estudos correlacionam a composição química e a resistência mecânica dos cimentos com escória. Vários índices de hidráulica foram sugeridos, sendo alguns especificados para controle da qualidade da escória. A tabela 2 apresenta algumas dessas relações.

Tabela 2 – Índices de qualidade obtidos em função da composição química de escória moída (CINCOTTO et al., 1992).

Índices	Especificações	Definição
Índice de hidráulica DIN	$H \geq 1$ (satisfatório)	$H = \frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2}$
Índice de hidráulica ASTM	$I \geq 1$ (bom) $I < 1$ (ruim)	$I = \frac{CaO + MgO + 1/3 \cdot Al_2O_3}{SiO_2 + 2/3 \cdot Al_2O_3}$
Índice de DRON	$R' > 0,18$ (satisfatório)	$P_1 = \frac{CaO}{SiO_2}$
Índice de basicidade	Se P_1 e $P_2 > 1$, então a escória é básica Se P_1 e $P_2 < 1$, então a escória é ácida	$P_1 = \frac{CaO}{SiO_2}$ $P_2 = \frac{CaO + MgO}{SiO_2}$

- na microestrutura, através da verificação do grau de vitrificação por difratometria de raios-X ou microscopia. A difratometria de raios-X é uma técnica bastante difundida no meio científico, e consiste na investigação da estrutura cristalina e identificação dos componentes mineralógicos de um determinado material. Através da microscopia é possível determinar, entre outros, o grau de vitrificação, o índice de refração, a morfologia e a coloração, e a reatividade com sulfato de alumínio.
- na própria hidratação, através do ensaio acelerado com soda. O método, conhecido como método acelerado de Féret, tem por princípio a comparação das resistências à tração na flexão, a diferentes idades, de argamassa de escória moída e areia. Em substituição à água, utiliza-se uma solução aquosa de soda na concentração de 200 g/l.

2.2.5. Ativação da escória de alto-forno

A reatividade da escória está associada à sua obtenção no estado vítreo. Porém, esta condição apenas não é suficiente, pois é necessário que a escória seja solúvel em água para que os elementos formadores dos compostos hidráulicos sejam liberados. Esta solubilidade é favorecida pelo teor de óxido de cálcio presente na escória. Dessa forma, a reação é lenta, mas em meio fortemente alcalino ou através da ação de sulfatos ou de ambos torna-se acelerada, sendo a velocidade de reação ainda favorecida pela finura da escória (CINCOTTO et al., 1992).

Segundo relata JOHN (1995), a ativação da escória é classificada em química, mecânica e térmica. A ativação térmica é obtida pela elevação da temperatura da solução escória e água. Resultados experimentais mostram que a solubilidade de vidros de sílica cresce com aumento da temperatura até pelo menos esta atingir 200 °C. A ativação mecânica é obtida pela moagem da escória de maneira a atingir superfícies específicas elevadas. Isto ocorre porque a velocidade de dissolução depende da área de contato com a solução. Segundo relata MARQUES (1994), constatou-se a influência da finura na resistência mecânica da escória, como é mostrado na tabela 3. Neste trabalho pode-se observar que a influência da finura da escória nas baixas idades (3 e 7 dias) é maior.

Tabela 3 – Ativação física das escórias por moagem (MARQUES, 1994).

Idade (dias)	Resistência à compressão não- confinada (MPa)		
	Cimento I (367 m ² /kg)	Cimento II (414 m ² /kg)	Cimento III (460 m ² /kg)
3	8,3	10,4	11,5
7	18,8	22,9	23,3
28	35,5	37,4	40,6
90	47,5	49,8	50,3

Segundo GASTALDINI (1989), o ativador químico tem a função de acelerar a solvatação da escória, bem como favorecer a formação de hidratos estáveis e de uma estrutura em rede dos hidratos.

MARQUES (1994) relata que, entre os ativadores químicos usuais, estão o hidróxido de sódio (NaOH), o hidróxido de Cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e os sulfatos (SO_4^{2-}). Segundo esse autor, Atribui-se à cal e aos sulfatos o papel de ativador, pois favorecem a reatividade e participam da reação, vindo a formar novos compostos com inclusão desses componentes; por outro lado, o hidróxido de sódio é considerado um catalisador, pois embora favoreça a reação, não participa da mesma;

- na ativação com hidróxido de sódio, há a formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H)^B, aluminato tetracálcico hidratado (C_4AH_{13})^B e aluminosilicato de cálcio hidratado, gehlenita hidratada (C_2ASH_8)^B;
- na ativação cálcica, a cal é consumida durante a reação, estando presente no silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e no aluminato tetracálcico hidratado (C_4AH_{13}), ao passo que a sílica se encontra exclusivamente no C-S-H (silicato de cálcio hidratado). Não há formação de gehlenita hidratada (C_2ASH_8) como na ativação sódica, pois este é decomposto pelo $\text{Ca}(\text{OH})_2$, formando o C_4AH_{13} (aluminato tetracálcico hidratado), um componente muito rico em cal;
- a ativação sulfática conduz à formação de C-S-H (silicato de cálcio hidratado), $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ (etringita) e $\text{Al}(\text{OH})_3$ (hidróxido de alumínio).

Um estudo realizado no IPT, por SILVA et al. (1991), no qual estabeleceu-se uma finura Blaine de $600 \text{ m}^2/\text{kg}$ e utilizou-se como ativador o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em vários teores percentuais em relação à massa de escória, foram realizados ensaios em pastas e argamassas. A figura 2 e tabela 4 apresentam os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão não-confinada, podendo-se observar que para o período de cura de até 28 dias o teor de 2 % de cal apresentou o melhor desempenho, porém, acima de 28 dias, a argamassa sem a presença de cal apresentou uma resistência à compressão não-confinada maior.

^B C = CaO; A = Al_2O_3 ; M = MgO; S = SiO_2 .

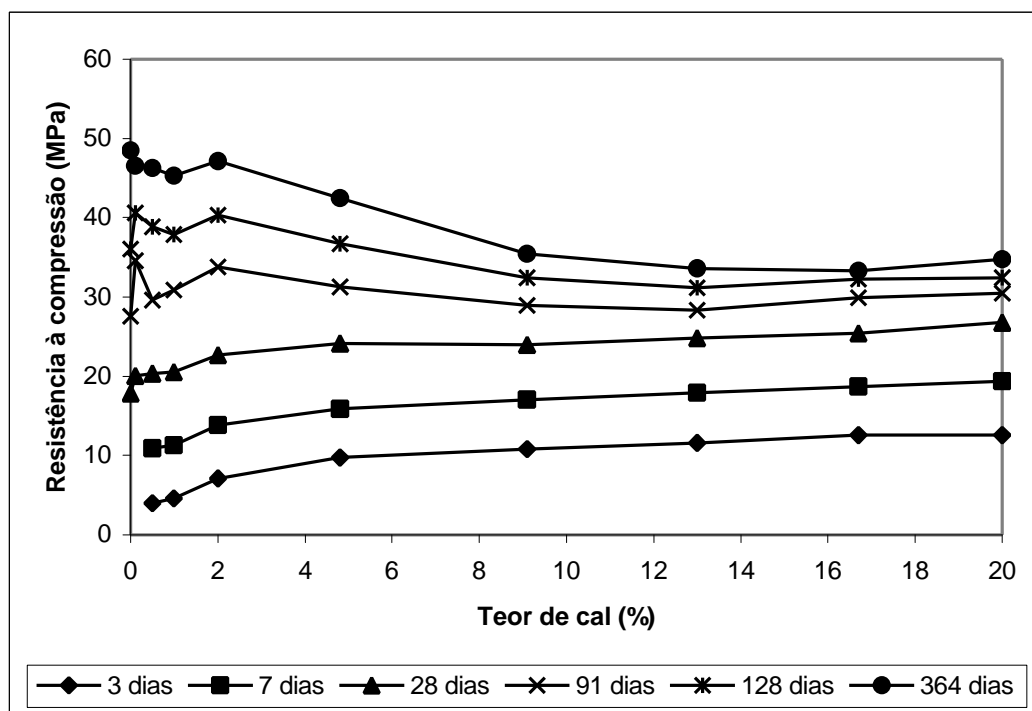


Figura 2 – Evolução da resistência à compressão de argamassas de escória-cal, para teores de cal relacionados com a massa de escória (CINCOTTO et al., 1992).

Tabela 4 – Ensaio em argamassas – Resistência à compressão não-confinada (CINCOTTO et al., 1992).

Identificação da mistura n ^o	Teor de cal na mistura (%)	Traço em massa (aglomerante : areia)	Argamassa normal		Resistência à compressão média, em MPa								
			Relação água/aglomerante	Consistência (mm)	03 dias	07 dias	09 dias	14 dias	21 dias	28 dias	91 dias	182 dias	364 dias
Referência	-	1,00:3,00	0,48	162	19,0	24,7	-	-	-	33,4	41,6	46,1	48,3
01	0,0	1,00:3,00	0,49	163	-	-	-	8,7	16,3	17,8	27,6	36,0	48,5
02	0,1	1,00:3,00	0,50	164	-	-	3,9	13,9	-	20,1	34,6	40,6	46,6
03	0,5	1,00:3,00	0,50	162	4,0	10,9	-	-	-	20,4	29,6	38,9	46,3
04	1,0	1,00:3,00	0,52	166	4,6	11,3	-	-	-	20,6	30,9	37,9	45,3
05	2,0	1,00:3,00	0,51	166	7,1	13,8	-	-	-	22,7	33,8	40,3	47,1
06	4,8	1,00:3,00	0,51	164	9,7	15,9	-	-	-	24,2	31,3	36,7	42,5
07	9,1	1,00:3,00	0,51	163	10,8	17,0	-	-	-	24,0	28,9	32,4	35,5
08	13,0	1,00:3,00	0,51	164	11,6	17,9	-	-	-	24,8	28,3	31,2	33,6
09	16,7	1,00:3,00	0,50	163	12,6	18,7	-	-	-	25,4	29,9	32,2	33,3
10	20,0	1,00:3,00	0,49	165	12,6	19,4	-	-	-	26,8	30,5	32,4	34,8

Obs.: “Referência”: Cimento Portland comum.

A ativação química é usualmente empregada em combinação com os processos de ativação mecânicos e/ou térmicos. Um bom exemplo é o estudo do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), relatado por CINCOTTO et al. (1992), onde analisou-se o efeito da ativação das escórias brasileiras através da determinação da resistência à compressão não-confinada de argamassas de escórias com diferentes áreas específicas e ativadas com Ca(OH)_2 . A cal hidratada foi misturada à água de amassamento em quantidade suficiente para a saturação. De acordo com os resultados apresentados na figura 3, observa-se que o uso da escória ativada resultou em resistências à compressão iguais ou maiores que as não ativadas.

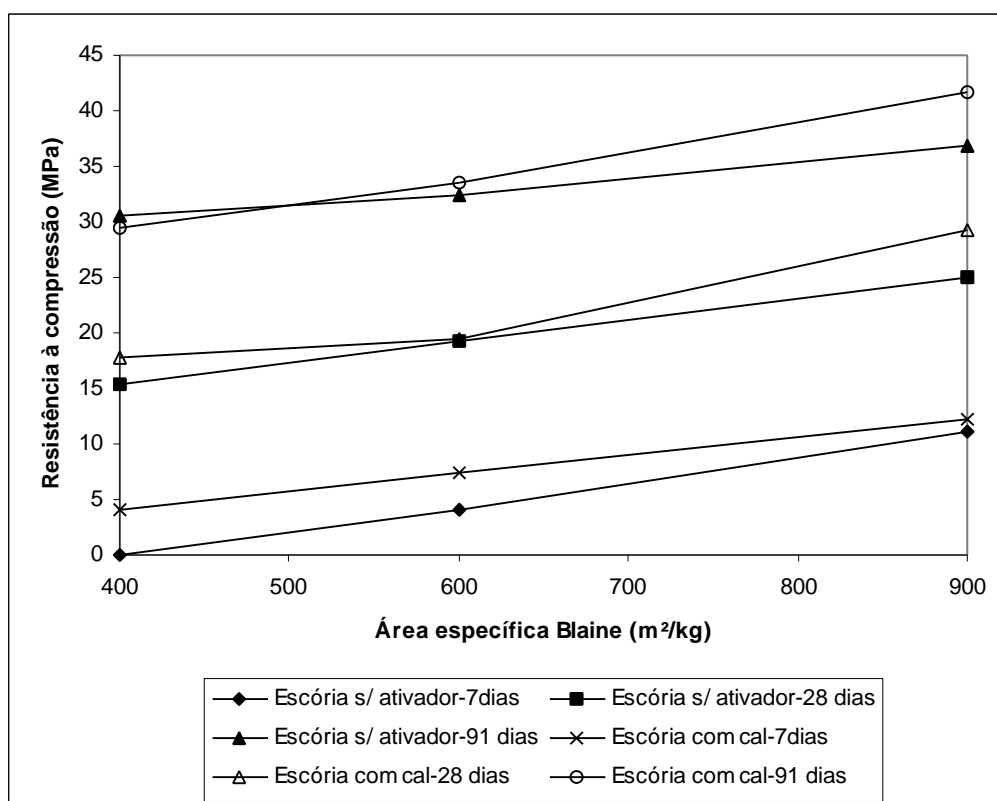


Figura 3 – Efeito da ativação química na resistência à compressão de argamassas com diferentes áreas específicas da escória (Modificado de CINCOTTO et al., 1992).

2.3. O uso de escória de alto-forno granulada em pavimentação

Segundo SENÇO (2001), a utilização da escória de alto-forno granulada em pavimentação, embora não possa ser considerada rotineira, já é bastante freqüente em países em que a produção do aço atingiu níveis elevados, como os Estados Unidos, Alemanha, Japão, França e Reino Unido. Na Austrália e na Hungria, também, existe menção do uso deste material,

porém com menor frequência. No Brasil, a utilização da escória de alto-forno granulada em pavimentação ainda é incipiente. Seu grande emprego é na produção de cimento Portland.

Um trabalho interessante foi o desenvolvido por WILD et al (1998), onde foi analisado o efeito da substituição parcial da cal por escória de alto-forno granulada moída sobre as propriedades de resistência de um solo argiloso estabilizado com cal. Esse autor relata que, após a moldagem, os corpos-de-prova foram colocados em câmara úmida para cura por períodos de 7 e 28 dias, à temperatura de 30 °C e umidade relativa de 100 %. Os resultados da resistência à compressão não-confinada estão apresentados na figura 4. De acordo com os resultados obtidos pode-se concluir que a mistura contendo 6 % de escória e 0 % de cal apresentou resistência à compressão não-confinada extremamente baixa em ambas as idades (7 e 28 dias), mostrando que a cal é necessária para a ativação da escória de alto-forno moída; e que a máxima resistência alcançada foi para a a mistura contendo 5 % de escória moída e 1 % de cal em ambas as idades (WILD et al, 1998).

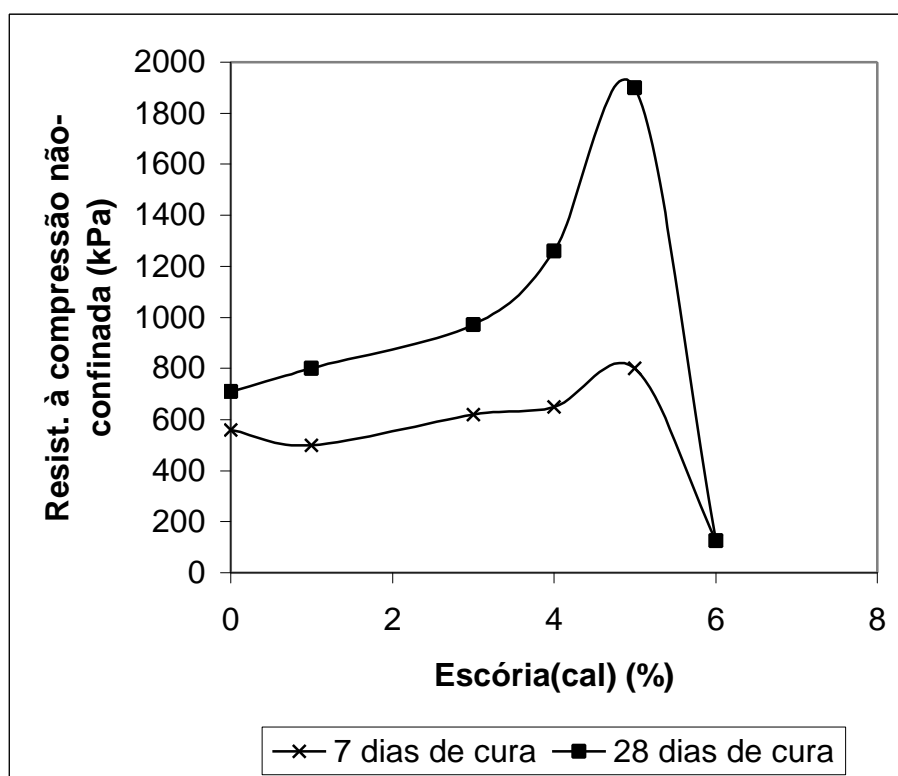


Figura 4 – Resistência à compressão não-confinada x teor de escória(cal) (Modificado de WILD et al., 1998).

Outra possível utilização da escória de alto-forno granulada, estudada por HAGA et al (1981), consistiu em se misturar escória de aciaria britada e escória de alto-forno granulada, com a

finalidade de servir como material de construção de aterros sobre solos de baixa capacidade de suporte. Nesse estudo, apresenta-se a resistência à compressão não-confinada em função do tempo, observando-se o crescimento da resistência com o aumento do período de cura, como é apresentado na figura 5.

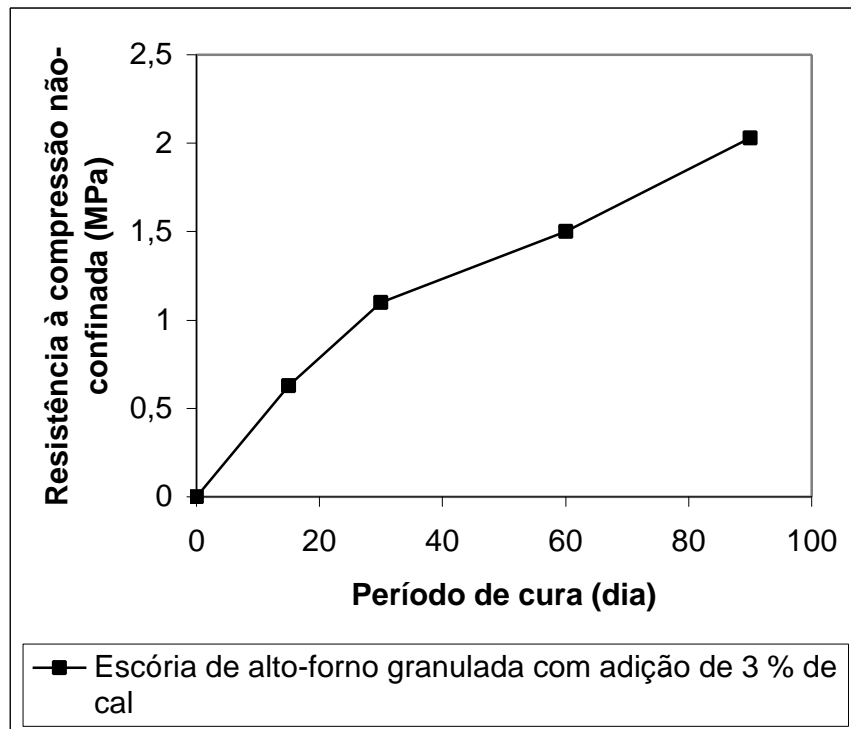


Figura 5 - Resistência á compressão não-confinada x período de cura (HAGA et al, 1981).

3. Materiais e Métodos

3.1. Materiais

São apresentados, a seguir, os principais materiais utilizados no experimento com misturas solo – escória de alto-forno granulada moída – cal hidratada.

3.1.1. Solos utilizados no experimento

Foram utilizados dois solos da região de Viçosa-MG. Os critérios de seleção utilizados na definição dos mesmos baseou-se nos seguintes aspectos: diversidade e extensão das jazidas; esses materiais foram objetos de estudos geotécnicos prévios conduzidos pelo grupo de Geotecnia da Universidade Federal de Viçosa; e devido à não recomendação desses solos, em estado natural, para as camadas de sub-base e base de pavimentos rodoviários por não satisfazerem às exigências mínimas do DNER.

As duas amostras foram extraídas de taludes de corte já existentes, eliminando-se o material superficial, que poderia estar alterado por contaminação. Posteriormente as amostras foram secas ao ar, destorroadas, passadas na peneira número 4 e armazenadas de maneira adequada. Os dois solos utilizados possuem as seguintes características:

- a) Solo residual maduro – designado como ETA (Figura 6), a amostra deste solo foi coletada no horizonte B, em um talude da Rodovia que liga Viçosa à Paula Cândido, próximo à estação de tratamento de água da cidade. Pedologicamente, este solo é classificado como latossolo Vermelho-amarelo.
- b) Solo residual jovem – é um solo residual de gnaiss. Designado como VS (Figura 7), a amostra deste solo foi coletada no horizonte C, em um talude existente próximo à Vila Secundino, dentro do Campus da Universidade Federal de Viçosa.



Figura 6 – Local de coleta do solo ETA.



Figura 7 – Local de coleta do solo VS.

3.1.2. Escória de alto-forno

A amostra de escória de alto-forno empregada é proveniente da Aço Minas Gerais S. A. – Açominas. O respectivo material foi resfriado bruscamente, dando origem a uma escória granulada. Após o processo de resfriamento, a escória foi moída, em moíño de bolas, pela Valemassa Indústria e Comércio de Argamassa Ltda e acondicionada em sacos plásticos, para o posterior transporte até o Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG, onde foram realizados os experimentos.

3.1.3. Cal hidratada

A cal hidratada comercial, fabricada pela Indústria de Calcinação S.A. (ICAL) e adquirida no comércio da cidade de Viçosa-MG, foi utilizada nesta pesquisa como substância ativadora da escória de alto-forno granulada moída. A respectiva cal foi selecionada por ter sido empregada em várias pesquisas desenvolvidas pelo grupo geotécnico da Universidade Federal de Viçosa. A tabela 5 apresenta a composição química da cal.

Tabela 5 – Composição química da cal hidratada (MENDONÇA et al., 1998).

Componente	Teor (%)
CaO (total)	71,88
MgO	0,58
SiO ₂	1,14
Perda por calcinação	25,75
CaO (disponível)	66,53
Ca(OH) ₂ (disponível)	87,80
Umidade	1,31
Fe ₂ O ₃	0,11
Al ₂ O ₃	0,39
SO ₃	0,16
CO ₃	2,85

3.2. Métodos

A seguir, são apresentados os principais procedimentos experimentais executados em laboratório, bem como a metodologia utilizada na definição da dosagem das misturas.

3.2.1. Ensaio de caracterização e de compactação dos solos

Os ensaios de caracterização e de compactação, dos solos no estado natural foram conduzidos segundo as seguintes metodologias:

- Ensaio de granulometria: executado conforme norma NBR 7181/82 – Análise granulométrica;
- Ensaio para a determinação da massa específica dos grãos de solo: executado conforme a norma NBR 6508/80 – Determinação da massa específica dos grãos dos solos;
- Ensaio para a determinação dos limites de Atterberg: executados conforme as normas NBR 6459/80 – Solo – Determinação do limite de liquidez e NBR 7180/82 – Solo – Determinação do limite de plasticidade;
- Ensaio de compactação: executado conforme a norma NBR 7182/86 – Solo – Ensaio de compactação.

3.2.2. Metodologia utilizada na dosagem das misturas

As dosagens das misturas solos - escória de alto-forno granulada moída - cal, foram definidas de acordo com os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão não-confinada, considerado-se, também, aspectos econômicos. A tabela 6 apresenta os teores utilizados na pesquisa. As referidas combinações foram definidas para a mistura com os dois solos estudados.

Diante dos teores de escória de alto-forno e cal definidos, foram realizados os ensaios de durabilidade por molhagem e secagem, com corpos-de-prova moldados na energia do ensaio de compactação Proctor intermediário, curados em câmara úmida por 7 dias, bem como os ensaios de resistência à compressão não-confinada, onde os corpos-de-prova foram, também, moldados na energia de compactação já referida, porém, curados em câmara úmida durante os períodos de 1, 7 e 28 dias. De posse dos resultados, selecionou-se dois teores ótimos da mistura, um para cada solo, sendo estes utilizados em todos os experimentos a partir desse ponto da pesquisa.

Tabela 6 – Dosagens das misturas solo – escória de alto-forno – cal.

Mistura	Escória de alto-forno (%) *	Cal hidratada (%) **
1	5	5
2		10
3		20
4	10	5
5		10
6		20
7	15	5
8		10
9		20

* Porcentagem em relação à massa de solo seco ao ar.

** Porcentagem em relação à massa de escória.

3.2.3. Ensaio executados com as misturas

As misturas solo – escória de alto-forno – cal foram submetidas aos ensaios: compactação, durabilidade por molhagem e secagem, resistência à compressão não-confinada e resistência à compressão diametral. Porém, previamente à moldagem dos corpos-de-prova, as misturas foram feitas de acordo com os seguintes procedimentos:

- o primeiro passo foi a preparação da mistura, onde foi adicionado ao solo a escória de alto-forno granulada moída e a cal hidratada, seguindo-se de uma homogeneização. Posteriormente, foi adicionado a água para que a mistura alcançasse a umidade desejada e procedeu-se a uma nova homogeneização;
- o passo seguinte foi a imediata moldagem dos corpos-de-prova, visando-se, com esse procedimento, evitar as reações de hidratação que poderiam ocorrer entre a mistura e a compactação, reduzindo, assim, a resistência mecânica do produto final..

3.3.2.1. Ensaio de compactação

A primeira etapa realizada com as misturas foi a determinação, em laboratório, dos parâmetros ótimos de compactação, ou seja, da massa específica seca máxima e do teor de umidade ótimo, com o objetivo de se analisar o efeito das misturas sobre os mesmos. O ensaio foi executado de acordo com a norma NBR 7182/86 – Solo – Ensaio de compactação. A energia utilizada nos ensaios de compactação, com todos os teores apresentados, foi a do Proctor Intermediário; porém, com os dois teores selecionados segundo o tópico 3.2.2, foram,

também, realizados ensaios de compactação nas energias dos ensaios Proctor Normal e Modificado.

3.3.2.2. Ensaio de resistência à compressão não-confinada

O ensaio de resistência à compressão não-confinada foi realizado segundo a norma DNER-ME 201/94 (Solo-cimento – compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos). O objetivo deste ensaio é determinar a máxima resistência do corpo-de-prova, quando submetido a uma carga axial.

Os corpos-de-prova foram moldados com 36,30 mm de diâmetro e 80,00 mm de altura, em três camadas compactadas dinamicamente, nos teores de umidades ótimos e massas específicas secas máximas, conforme é apresentado na tabela 6.

Após a moldagem, os corpos-de-prova foram colocados em sacos plásticos, para evitar troca de umidade com o ambiente, identificados e permaneceram 1, 7 e 28 dias em cura na câmara úmida. Terminado o período de cura, os corpos-de-prova foram colocados em câmara de imersão por um período de 4 horas e, posteriormente, rompidos à uma velocidade de 1 mm/min. Foi adotado, para o valor da resistência à compressão não-confinada das misturas, a média da determinação de três corpos-de-prova.

3.3.2.3. Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem

O ensaio de durabilidade por molhagem e secagem foi executado segundo a norma do DNER (DNER 203/94 – Solo-cimento – Determinação da durabilidade através da perda de massa por molhagem e secagem), relativo à metodologia utilizada em solo-cimento, mas empregando-se, na compactação dos corpos-de-prova, a energia do ensaio Proctor Intermediário. O ensaio consiste na determinação da perda de massa dos corpos-de-prova, quando submetidos a ciclos de molhagem e secagem. A razão para o emprego deste ensaio deve-se à semelhança de comportamento mecânico das misturas solo-escória de alto-forno granulada moída e solo-cimento.

Os corpos-de-prova foram moldados com as misturas nos teores apresentados na tabela 6, em suas respectivas massas específicas secas máximas e teores de umidades ótimos, determinadas previamente nos ensaios de compactação. A moldagem dos corpos-de-prova seguiu os procedimentos do DNER (DNER 202/94 – Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos).

Posteriormente à moldagem, os corpos-de-prova foram colocados em sacos plásticos, para evitar troca de umidade com o ambiente e identificados e permaneceram sete dias em cura na câmara úmida. Após esse período de cura, os corpos-de-prova foram colocados na câmara de imersão, onde permaneceram durante 5 horas, e, a seguir, numa estufa a 71 °C, onde permaneceram durante 42 horas. Ao fim deste período, os corpos-de-prova foram escovados, em toda a sua área, com uma escova de fios metálicos. A escova foi aplicada em toda a área superficial do corpo-de-prova com uma força correspondente à massa de 1,5 kg. As operações de molhagem, secagem e escovação foram repetidas durante 12 ciclos. Finalizados os 12 ciclos, os corpos-de-prova foram colocados na estufa à temperatura de 105 a 110 °C até constância de massa, para a determinação de suas massas secas. A partir destes dados coletados, determinou-se a perda de massa dos corpos-de-prova.

3.3.2.4. Ensaio de resistência à compressão diametral

O ensaio de resistência à compressão diametral foi executado baseado na norma do DNER (DNER-ME 181/94 - Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à tração por compressão diametral). Este ensaio tem como objetivo determinar a máxima resistência à tração do corpo-de-prova, quando submetido a uma carga diametral.

As fases de moldagem, acondicionamento, período de cura e imersão dos corpos-de-prova foram as mesmas realizadas nos ensaios de resistência à compressão não-confinada, com exceção dos teores utilizados, que foram apenas os teores ótimos das misturas determinados para cada tipo de solo.

O ensaio propriamente dito foi executado de maneira que o contato entre o corpo-de-prova e os pratos da máquina ocorresse ao longo de duas geratrizes diametralmente opostas no corpo-de-prova. A carga foi aplicada continuamente e sem choque, a uma velocidade de 1,25 mm/min. Adotou-se, para o valor da resistência à compressão diametral das misturas, a média da determinação de três corpos-de-prova.

4. Resultados e discussão

Neste capítulo, apresentam-se os resultados, bem como as discussões pertinentes dos estudos realizados com misturas solo - escória de alto-forno granulada moída – cal, onde foram feitos ensaios de caracterização, compactação, durabilidade, resistência à compressão não-confinada e resistência à compressão diametral.

4.1. Caracterização e classificação dos solos

Devido ao fato dos solos utilizados neste trabalho terem sido objeto de vários estudos realizados pela equipe de Geotecnia da Universidade Federal de Viçosa, os resultados dos ensaios de caracterização dos solos, no estado natural, foram extraídas do trabalho realizado por FERRAZ et al. (1994), onde foram executados os ensaios de Limite de liquidez, Limite de plasticidade, determinação do peso específico dos sólidos e granulometria. Os resultados estão apresentados na tabela 7 e na figura 8.

Texturalmente, o solo ETA é uma argila areno-siltosa e o solo VS é uma areia silto-argilosa. De acordo com os resultados apresentados, observa-se que o solo ETA possui alto percentual de fração argila (50 %), plasticidade elevada ($LL = 63\%$ e $IP = 30\%$) e peso específico dos sólidos de $27,25 \text{ kN/m}^3$. O solo VS, é arenoso, possuindo apenas 5 % de fração argila. Sobre a curva granulométrica deste solo destaca-se um dado interessante, que é o fato desta se aproximar da curva granulométrica ideal de “Fuller-Talbot” para misturas densas, adotando-se um diâmetro máximo dos grãos de 2 mm (LIMA et al., 1993). Sobre os demais ensaios, os resultados demonstraram que o solo VS é moderadamente plástico ($LL = 29\%$ e $IP = 10\%$) e que apresenta um peso específico dos sólidos de $26,15 \text{ kN/m}^3$.

Do ponto de vista de classificação dos solos, foram utilizados sistemas com o emprego de índices gerais, que são facilmente determináveis e obtidos na fase de caracterização dos solos em laboratório. Portanto, de posse dos dados de caracterização os solos estudados foram classificados segundo o “Transportation Research Board (TRB)”, o “Miniatura Compactado Tropical (MCT)” e o “Unified Soil Classification System (USCS)”. Na tabela 8 estão

descritos os resultados da classificação dos solos pelos três sistemas apresentados (TRINDADE et al., 2003).

Tabela 7 – Caracterização dos solos no estado natural (FERRAZ et al., 1994).

Parâmetro analisado	Solo	
	ETA	VS
Limites de Atterberg		
Limite de liquidez-LL (%)	63	29
Limite de plasticidade-LP (%)	33	19
Índice de plasticidade-IP (%)*	30	10
Peso específico das partículas		
γ_s (kN/m ³)	27,25	26,15
Granulometria		
Argila (%)	50	5
Silte (%)	15	17
Areia (%)	35	78
Pedregulho (%)	0	0

* IP = LL – LP

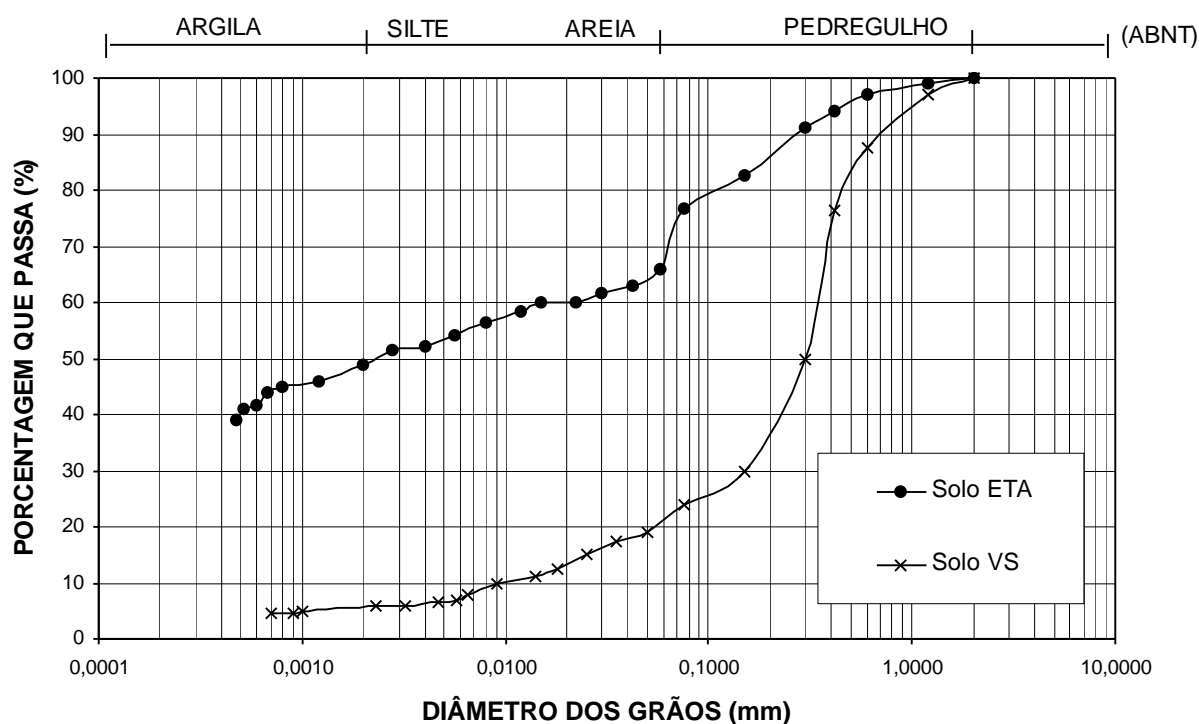


Figura 8 – Curvas granulométricas dos solos (FERRAZ et al., 1994).

Tabela 8 – Classificação dos solos no estado natural (TRINDADE et al., 2003).

Classificação	Solo	
	ETA	VS
TRB	A-7-5 (20)	A-2-4 (0)
USCS	MH	SC
MCT	LG'	NG'

4.2. Caracterização da escória de alto-forno granulada moída

Os ensaios de caracterização física realizados com a escória de alto-forno granulada moída foram os de determinação da massa específica, do teor de umidade, da área específica e da finura.

A tabela 9 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização física, realizados nos laboratórios de Engenharia Civil e de Solos da Universidade Federal de Viçosa (UFV), dos Departamento de Engenharia Civil e Solos, respectivamente.

Tabela 9 – Características físicas da escória de alto-forno granulada moída.

Método de ensaio	Característica física	Resultado
NBR – 6474/84 da ABNT	Peso específico	29,63 kN/m ³
NBR – 7224/84 da ABNT	Área específica Blaine	396 m ² /kg
NBR – 11579/91 da ABNT	Finura – Peneira 75 µm (nº 200)	1,4 %
Projeto 18:106.01-004	Determinação do teor de umidade	0,5 %

A determinação da composição química da escória foi realizada no Laboratório de Química, do Departamento de Química da UFV, exceto a determinação do teor de sílica, que foi realizado no Laboratório de Química da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

Através dos resultados apresentados na tabela 10, pode-se verificar a proximidade desses valores com os apresentados na literatura, tabela 1 (CINCOTTO et al., 1992).

Para fins de determinação da atividade hidráulica da escória de alto-forno granulada moída foram utilizadas correlações com a composição química, onde os resultados são apresentados através de índices utilizados pela indústria, sendo avaliada a qualidade da escória para o uso na produção de cimento Portland. Outra correlação obtida foi em relação à basicidade da

escória. A tabela 11 apresenta os resultados. Conclui-se, pois, que a escória apresenta índice de hidraulicidade DIN e ASTM satisfatórios, índice de DRON satisfatório, sendo classificada como uma escória básica.

Tabela 10 – Composição química da escória de alto-forno granulada moída.

Característica química	Resultados (%)
SiO ₂	34,3
Al ₂ O ₃	11,9
CaO	42,0
Fe ₂ O ₃	0,4
FeO	0,2
MgO	3,2
K ₂ O	0,7
Na ₂ O	0,1
Mn ₂ O ₃	0,9
SO ₃	0,03
S	0,06

Tabela 11 – Índices de qualidade obtidos em função da composição química da escória de alto-forno granulada moída.

Índices	Resultados	Especificações
Índice de hidraulicidade DIN $H = \frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2}$	1,7	$H \geq 1$ (satisfatório)
Índice de hidraulicidade ASTM $I = \frac{CaO + MgO + 1/3 \cdot Al_2O_3}{SiO_2 + 2/3 \cdot Al_2O_3}$	1,2	$I \geq 1$ (bom) $I < 1$ (ruim)
Índice de DRON $P_1 = \frac{CaO}{SiO_2}$	0,23	$R' > 0,18$ (satisfatório)
Índice de basicidade $P_1 = \frac{CaO}{SiO_2}$ $P_2 = \frac{CaO + MgO}{SiO_2}$	1,2 1,3	Se P_1 e $P_2 > 1$, então a escória é básica Se P_1 e $P_2 < 1$, então a escória é ácida

4.3. Ensaio de compactação

Os resultados dos ensaios realizados com os solos no estado natural e suas respectivas misturas com escória de alto-forno granulada moída e cal hidratada estão apresentados nas tabelas 12 a 14, e nas figuras 9 a 14. Todos os resultados apresentados foram obtidos utilizando-se amostras compactadas com a energia do ensaio de compactação Proctor Intermediário.

Comparando-se os parâmetros de compactação das misturas com os solos no estado natural, nota-se, respectivamente, uma redução e um aumento da $\gamma_{dm\acute{a}x}$ e da w_{ot} , para o solo ETA; ao contrário, constata-se, respectivamente, um aumento e uma diminuição da $\gamma_{dm\acute{a}x}$ e da w_{ot} para o solo VS.

A partir dos dados obtidos nota-se que, o peso específico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) das misturas, varia na faixa de 15,29 kN/m³ a 15,90 kN/m³, para o solo ETA, e 18,43 kN/m³ a 18,66 kN/m³, para o solo VS; e o teor de umidade ótimo (w_{ot}) apresenta uma variação de, aproximadamente, 2,5 % e 0,7 % para as misturas com os solos ETA e VS, respectivamente.

Tabela 12 – Peso específico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e teor de umidade ótimo (w_{ot}) dos solos no estado natural.

Solo	Peso específico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e teor de umidade ótimo (w_{ot})
ETA	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 14,71 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 28,09 \%$
VS	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 18,84 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 11,93 \%$

Tabela 13 – Peso específico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e teor de umidade ótimo (w_{ot}) das misturas com o solo ETA.

% Cal	% de Escória		
	5 %	10 %	15 %
5 %	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 15,46 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 27,42 \%$	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 15,58 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 26,40 \%$	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 15,90 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 25,26 \%$
10 %	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 15,38 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 27,67 \%$	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 15,48 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 26,95 \%$	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 15,78 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 26,03 \%$
20 %	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 15,29 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 27,75 \%$	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 15,34 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 27,69 \%$	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 15,44 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 27,62 \%$

Tabela 14 – Peso específico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e teor de umidade ótimo (w_{ot}) das misturas com o solo VS.

% Cal	% de Escória		
	5 %	10 %	15 %
5 %	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 18,51 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 13,14 \%$	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 18,62 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 13,25 \%$	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 18,65 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 13,52 \%$
10 %	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 18,44 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 13,43 \%$	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 18,55 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 13,34 \%$	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 18,56 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 13,77 \%$
20 %	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 18,43 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 13,80 \%$	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 18,60 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 13,29 \%$	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 18,66 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 13,41 \%$

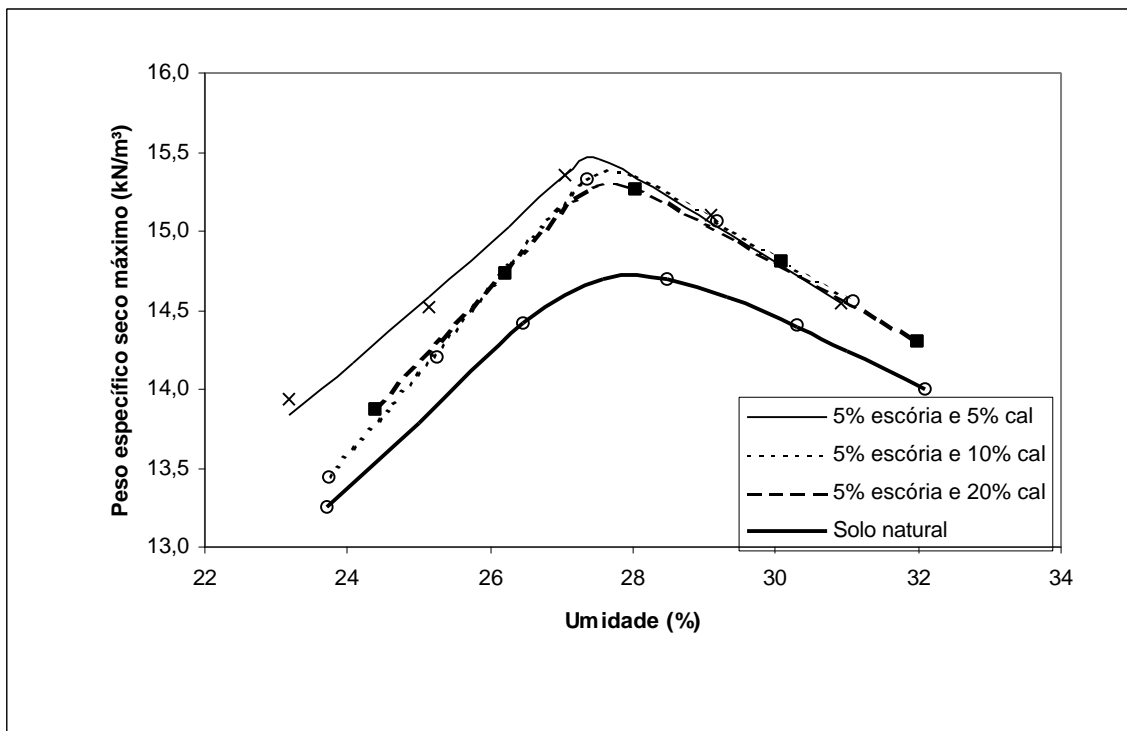


Figura 9 – Curvas de compactação das misturas com solo ETA e 5 % de escória combinados com 5, 10 e 20 % da cal.

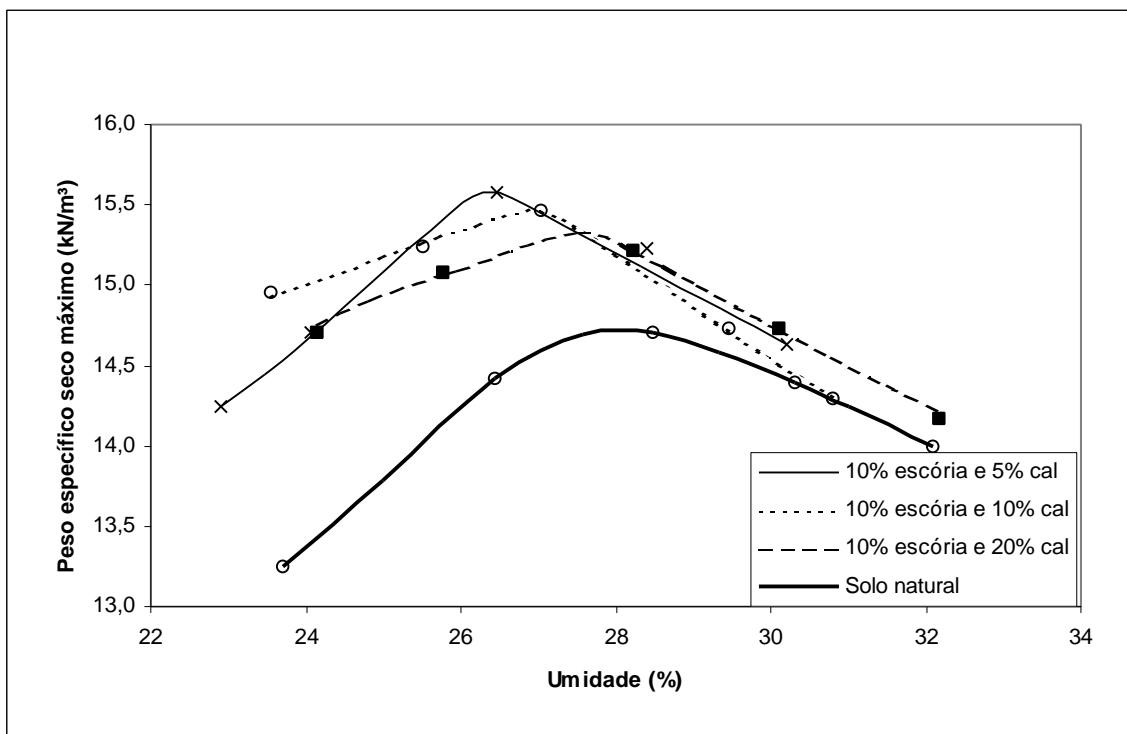


Figura 10 – Curvas de compactação das misturas com solo ETA e 10 % de escória combinados com 5, 10 e 20 % da cal.

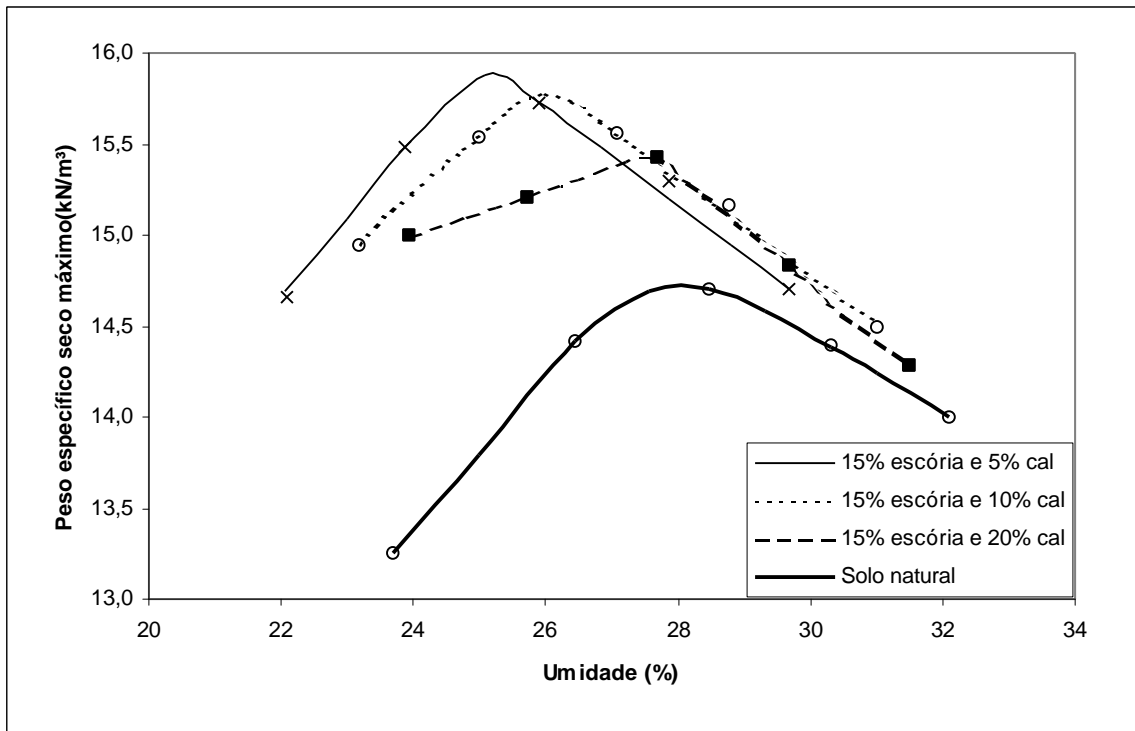


Figura 11 - Curvas de compactação das misturas com solo ETA e 15 % de escória combinados com 5, 10 e 20 % da cal.

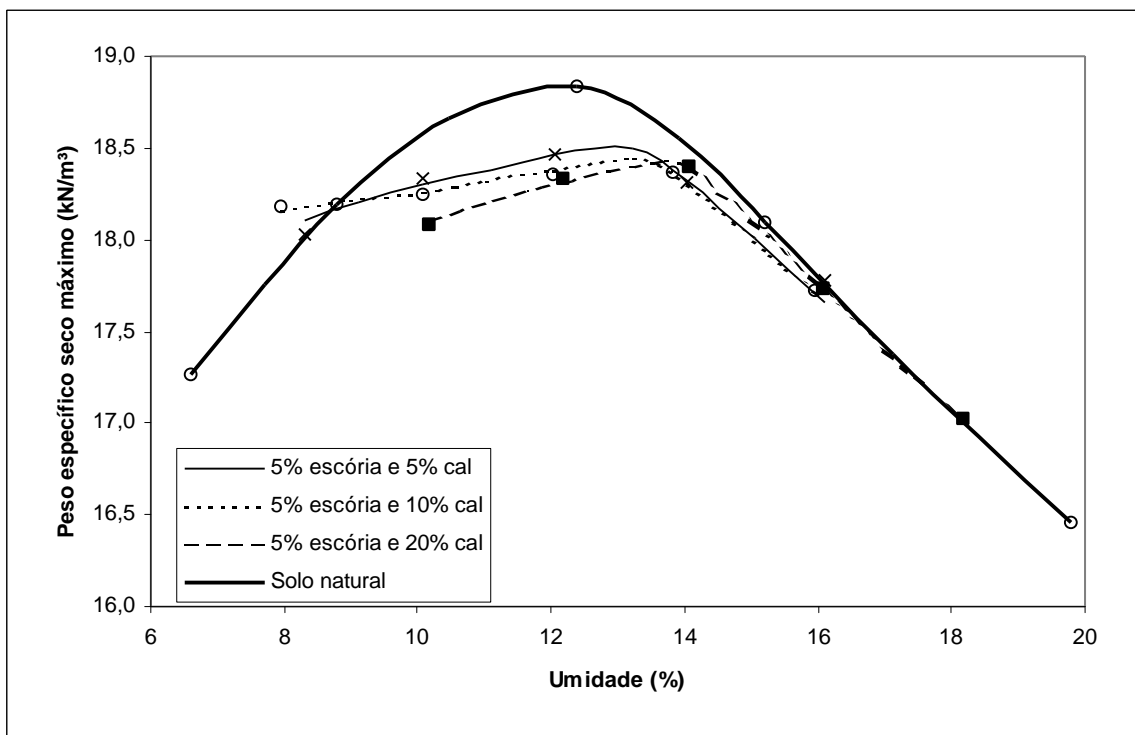


Figura 12 – Curvas de compactação das misturas com solo VS e 5 % de escória combinados com 5, 10 e 20 % da cal.

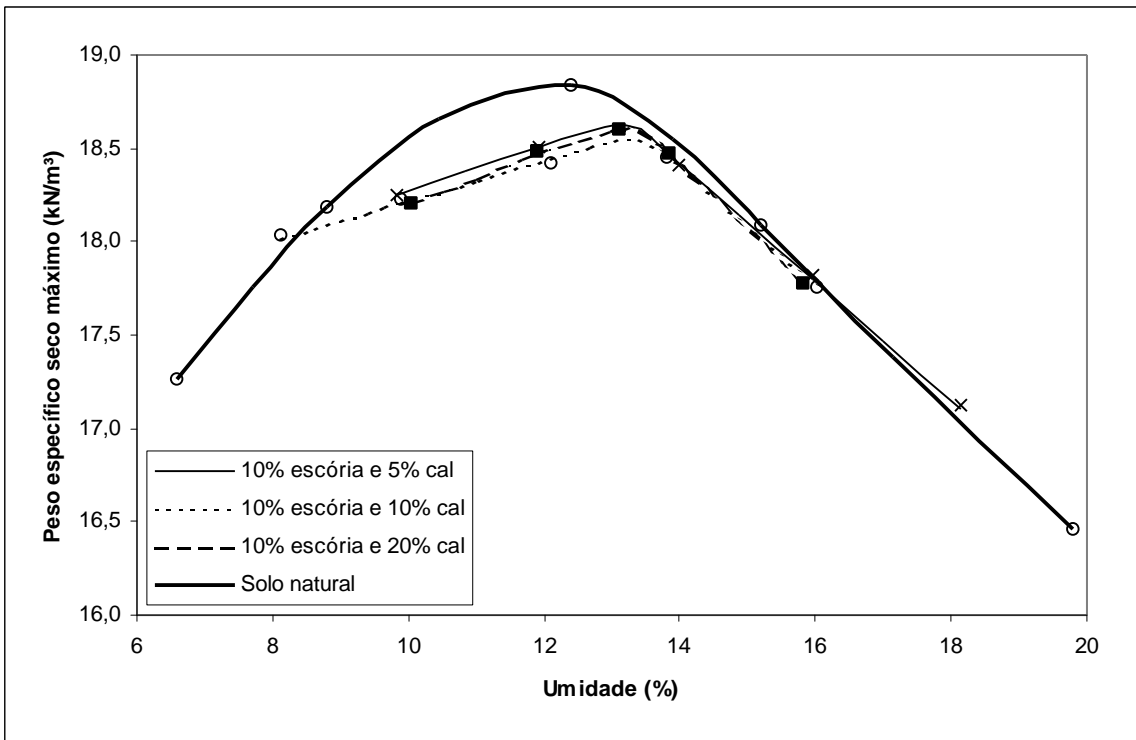


Figura 13 – Curvas de compactação das misturas com solo VS e 10 % de escória combinados com 5, 10 e 20 % da cal.

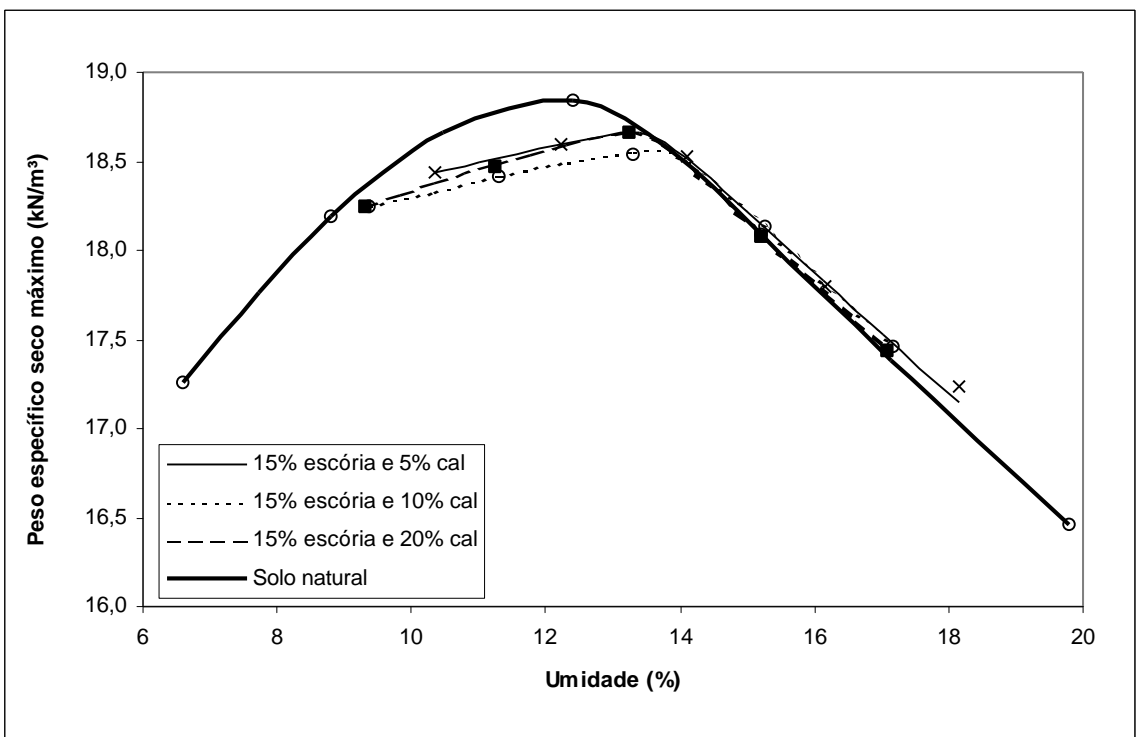


Figura 14 – Curvas de compactação das misturas com solo VS e 15 % de escória combinados com 5, 10 e 20 % da cal.

Analisando-se a influência da quantidade de escória sobre o peso específico seco máximo das misturas (Figuras 15 e 16), pode-se constatar que houve um pequeno aumento do $\gamma_{dm\acute{a}x}$ na mistura com o solo ETA. Diferentemente, a mistura com o solo VS apresentou valores praticamente constantes com o aumento do teor de escória. Certamente, este comportamento deve-se ao fato de que o peso específico da escória é bastante superior ao do solo ETA e, em menor escala, ao do solo VS.

Quando se considerou a variação do $\gamma_{dm\acute{a}x}$ com o aumento da quantidade de cal hidratada, para o solo ETA, observou-se uma ligeira diminuição devido ao fato de que se está adicionando cal à mistura que apresenta peso específico menor do que o do solo. Para a mistura com o solo VS, os valores permaneceram, praticamente, constantes com o aumento do teor de cal (Figuras 17 e 18).

Outro fator analisado foi a influência do aumento da quantidade de escória e cal sobre o teor de umidade ótimo (w_{ot}) das misturas. A partir dos resultados apresentados nas figuras 19 a 22, conclui-se que, a variação do valor da w_{ot} , para a mistura com o solo VS pode ser considerada constante com o aumento de escória e da cal. Para as misturas com o solo ETA, o aumento do teor de escória, resultou em uma tendência de diminuição da w_{ot} e um aumento da w_{ot} , com o aumento da quantidade de cal, com exceção das misturas com 5 % de escória.

Portanto, analisando-se a adição de escória e cal separadamente, pode-se concluir que o aumento dos teores de escória e cal ao solo ETA, de textura argilosa, influenciam na determinação de seus parâmetros de compactação, o que não acontece para o solo VS, de textura granular.

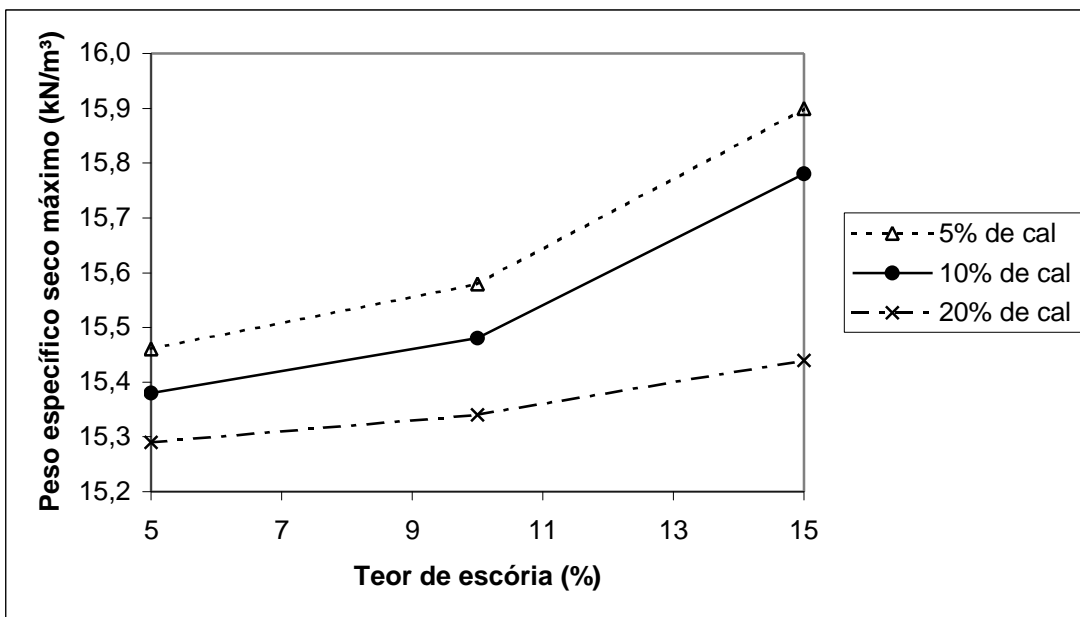


Figura 15 – Variação do peso específico seco máximo com o teor de escória – Solo ETA.

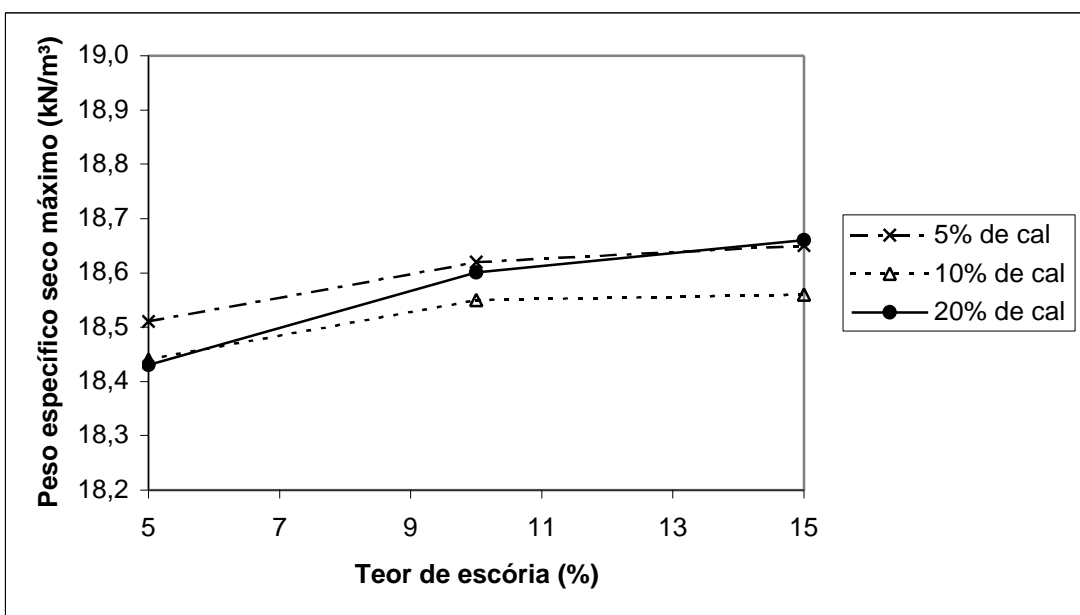


Figura 16 – Variação do peso específico seco máximo com o teor de escória – Solo VS.

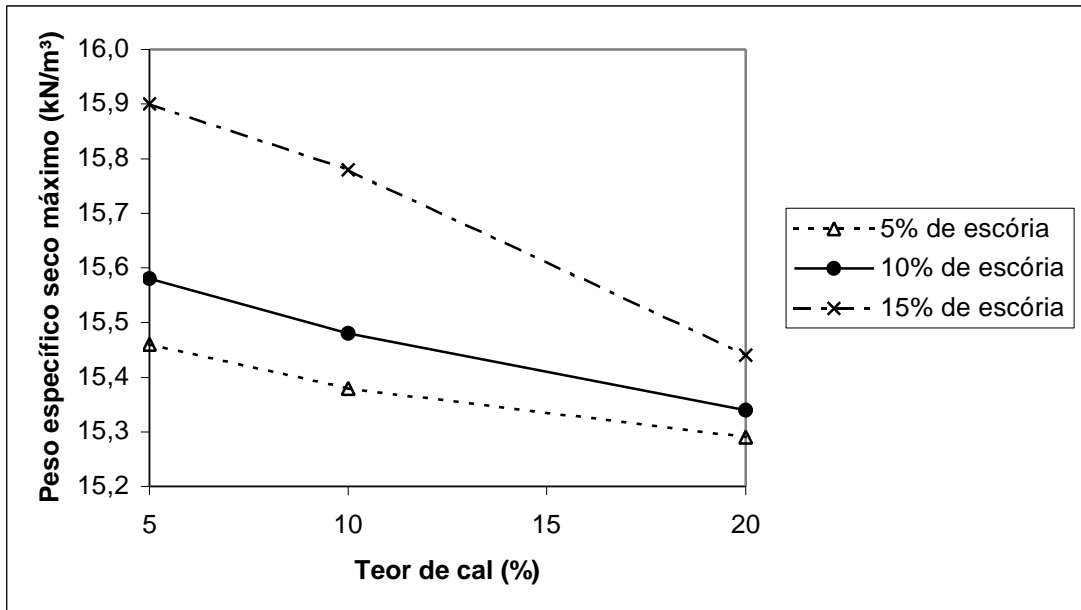


Figura 17 – Variação do peso específico seco máximo com o teor de cal – Solo ETA.

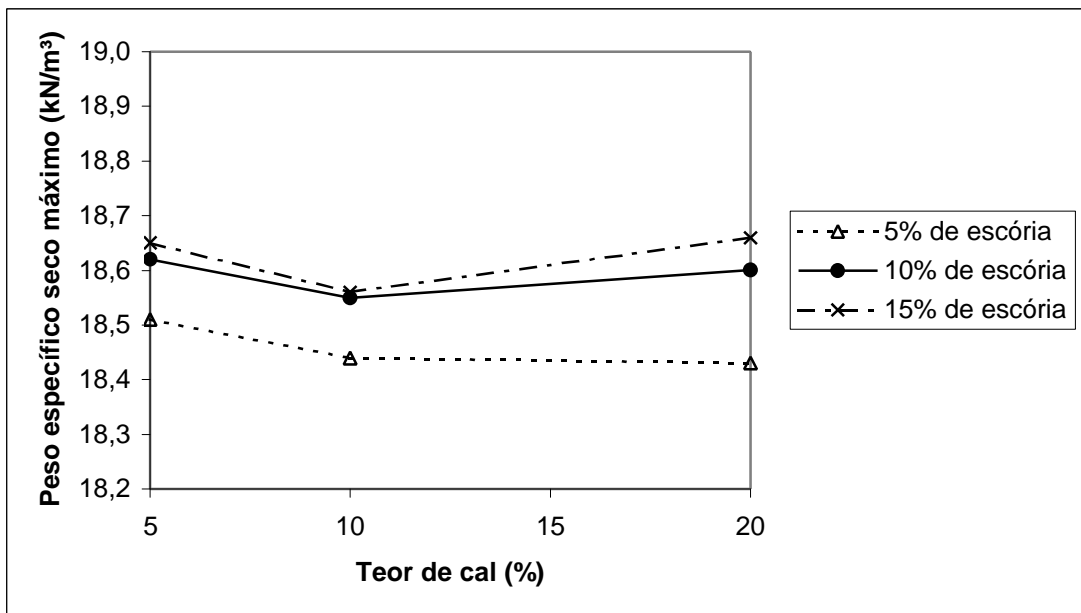


Figura 18 – Variação do peso específico seco máximo com o teor de cal – Solo VS.

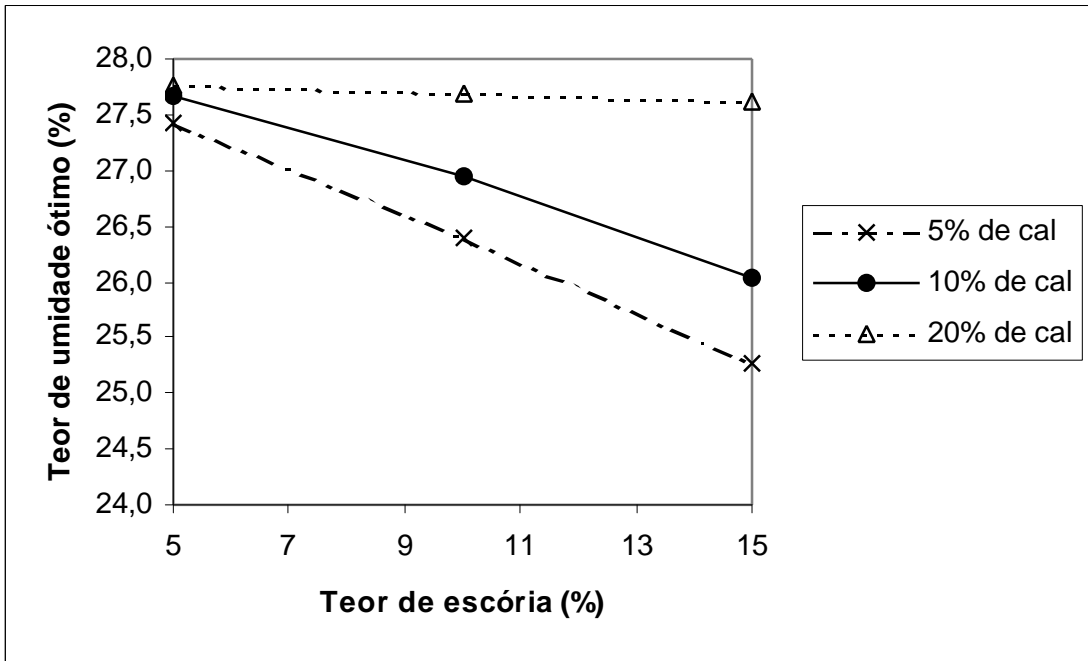


Figura 19 – Variação do teor de umidade ótimo com o teor de escória – Solo ETA.

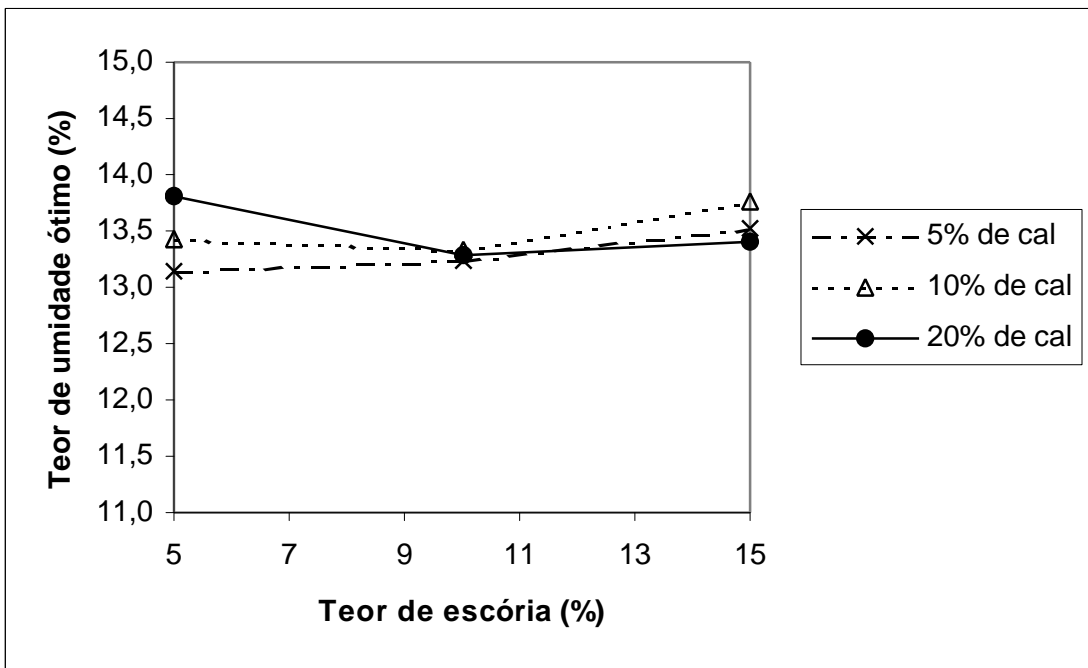


Figura 20 – Variação do teor de umidade ótimo com o teor de escória – Solo VS.

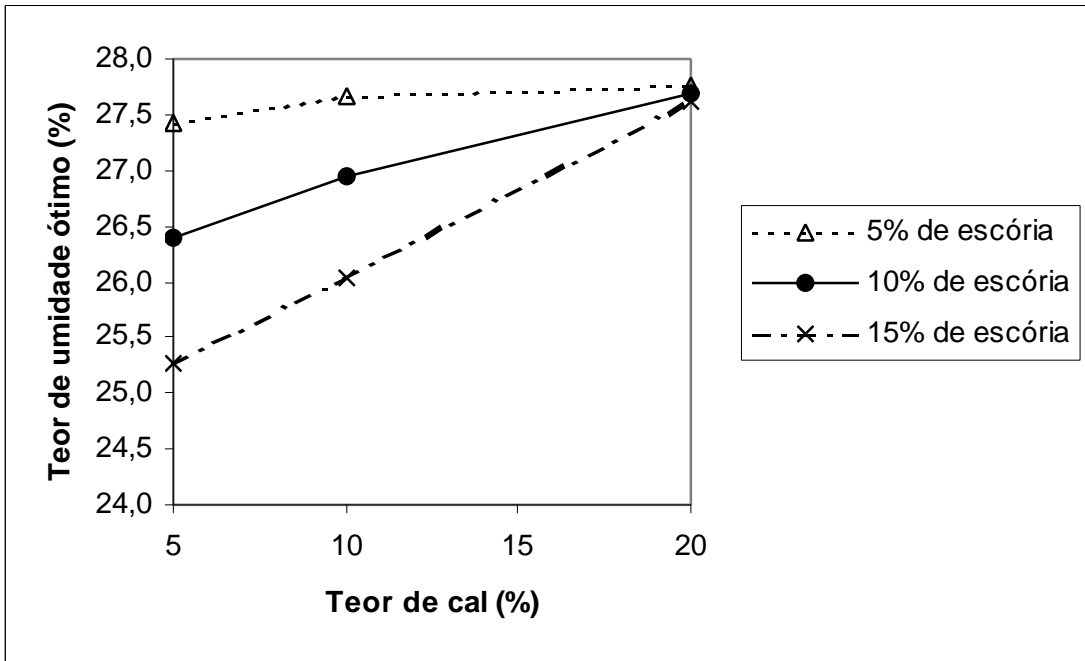


Figura 21 – Variação do teor de umidade ótimo com o teor de cal – Solo ETA

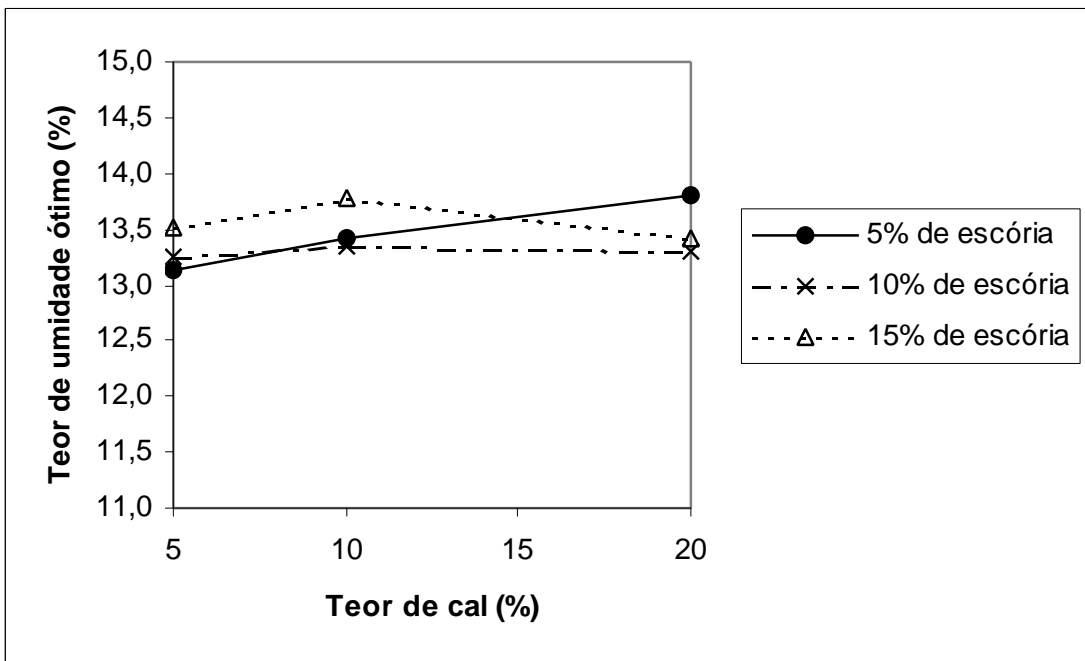


Figura 22 – Variação do teor de umidade ótimo com o teor de cal – Solo VS

4.4. Parâmetros utilizados na obtenção dos teores ótimos de escória e cal das misturas

Devido ao grande número de combinações dos materiais utilizados nas misturas, aliado ao fator tempo, optou-se por realizar somente os ensaios de resistência à compressão não-confinada e de durabilidade por molhagem e secagem, com as combinações conforme apresentadas na tabela 6, visando, assim, a obtenção de um número satisfatório de ensaios e, conseqüentemente, uma possível qualidade dos resultados obtidos. De posse dos resultados, determinaram-se as combinações ótimas para os dois tipos de solo. A partir desta seleção, a pesquisa teve seguimento com a execução dos demais ensaios.

4.4.1. Ensaio de resistência à compressão não-confinada

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão não-confinada, realizados com as misturas solo-escória-cal, estão apresentados nas tabelas 16 a 21 e figuras 23 e 24. Os corpos-de-prova foram moldados segundo a energia do ensaio de compactação Proctor Intermediário, e posteriormente, permaneceram em câmara úmida pelos períodos de cura de 1, 7 e 28 dias até a realização dos ensaios de resistência à compressão não-confinada.

Durante a realização dos ensaios, observou-se que os corpos-de-prova relativos a algumas combinações de escória de alto-forno granulada moída – cal hidratada, para misturas feitas com o solo VS, não apresentaram resultados pelo fato dos mesmos não terem resistido ao período de 4 horas de imersão em água que antecede o ensaio. As figuras 25 a 28 mostram uma seqüência da perda gradativa de massa dos corpos-de-prova. O tempo gasto, para a destruição do corpo-de-prova, quando ocorrido, variou de, aproximadamente, 15 a 40 minutos após a imersão em água, dependendo da dosagem da mistura. A figura 29 apresenta dois corpos-de-prova desintegrados após o período de imersão em água. Analisando-se a dosagem dos corpos-de-prova que não resistiram à imersão em água, nota-se a importância da combinação entre a escória e a cal, pois, para um baixo teor de escória (5%) foi necessário uma quantidade maior de cal (20%). O mesmo comportamento também ocorreu para o teor de 10% de escória e 5% de cal. As tabelas 19, 20 e 21 apresentam os resultados discutidos acima.

Porém, a mistura feita com o solo VS, nos teores de 15 % de escória e 20 % de cal, apresentou a máxima resistência à compressão não-confinada, de 7032 kPa aos 28 dias de cura, para os valores obtidos neste experimento. A grandeza deste valor é melhor identificada quando

comparado ao solo no estado natural, onde apresenta uma resistência de 310 kPa (Tabela 15). Em relação às misturas feitas com o solo ETA, a máxima resistência encontrada foi de 1617 kPa, para a combinação de 15 % de escória e 5 % de cal, sendo que, para o solo no estado natural, obteve-se 705 kPa (Tabela 15).

Analisando-se a variação da resistência à compressão não-confinada das misturas, tabelas 16 a 21 e figuras 23 e 24, com os dois tipos de solo, verificou-se o aumento gradativo com o aumento do teor de escória. Porém, o mesmo não se pode afirmar sobre a quantidade de cal, que mostrou ser de vital importância para a mistura com o solo VS, de modo que, aumentando-se a porcentagem de cal na mistura, aumentou-se o valor da resistência à compressão não-confinada. Diferentemente, para a mistura com o solo ETA, o aumento da quantidade de cal não apresentou uma variação considerável na resistência à compressão não-confinada. Portanto, pode-se concluir que a presença da cal hidratada no processo de ativação da escória é essencial na mistura com o solo VS; já para a mistura com o solo ETA, a presença da cal, para os teores utilizados nesta pesquisa, mostrou-se pouco significativo. Outro aspecto de interesse que se pode observar nestas figuras é o fato de que ocorre-se um crescimento maior da resistência mecânica para o período de 1 a 7 dias de cura, com menor inclinação para o período de cura de 7 a 28 dias. Certamente, este comportamento baseia-se no fato de que as reações que ocorrem entre a escória e o solo são, predominantemente, de hidratação, os quais apresentam maior taxa de ocorrência para os menores períodos de cura.

Tabela 15 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão não-confinada para os solos no estado natural.

Solo	Tensão de Ruptura (kPa)				
	Corpo-de-prova			Média	Desvio Padrão
	1	2	3		
ETA	701	708	707	705	4
VS	314	295	321	310	13

Tabela 16 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão não-confinada das misturas com solo ETA – 1 dia de cura em câmara úmida.

Escória (%)	Cal (%)	Tensão de Ruptura (kPa)				
		Corpo-de-prova			Média	Desvio Padrão
		1	2	3		
	5	353	335	325	338	14
5	10	504	550	544	533	25
	20	524	524	571	540	27
	5	547	480	528	518	35
10	10	563	619	507	563	56
	20	504	580	x	542	54
	5	691	650	584	642	54
15	10	741	631	732	701	61
	20	862	824	x	843	27

x Resultado não considerado devido ao elevado desvio do valor da resistência em relação aos demais corpos-de-prova.

Tabela 17 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão não-confinada das misturas com solo ETA – 7 dias de cura em câmara úmida.

Escória (%)	Cal (%)	Tensão de Ruptura (kPa)				
		Corpo-de-prova			Média	Desvio Padrão
		1	2	3		
	5	800	704	x	752	68
5	10	760	670	652	694	58
	20	839	819	x	829	14
	5	945	968	934	949	17
10	10	942	881	968	930	45
	20	933	915	872	907	31
	5	1072	1078	x	1075	4
15	10	1076	1034	980	1030	48
	20	983	1001	1057	1014	39

x Resultado não considerado devido ao elevado desvio do valor da resistência em relação aos demais corpos-de-prova.

Tabela 18 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão não-confinada das misturas com solo ETA – 28 dias de cura em câmara úmida.

Escória (%)	Cal (%)	Tensão de Ruptura (kPa)				
		Corpo-de-prova			Média	Desvio Padrão
		1	2	3		
	5	953	1026	1217	1065	136
5	10	1207	1098	907	1071	152
	20	1102	1048	x	1075	38
	5	1003	1168	x	1086	117
10	10	1040	1322	964	1109	189
	20	1243	1006	1064	1104	124
	5	1542	1682	1628	1617	71
15	10	1542	1542	1546	1543	2
	20	1595	1593	1314	1501	162

x Resultado não considerado devido ao elevado desvio do valor da resistência em relação aos demais corpos-de-prova.

Tabela 19 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão não-confinada das misturas com solo VS – 1 dia de cura em câmara úmida.

Escória (%)	Cal (%)	Tensão de Ruptura (kPa)				
		Corpo-de-prova			Média	Desvio Padrão
		1	2	3		
	5	*	*	*	*	*
5	10	*	*	*	*	*
	20	396	406	434	412	20
	5	*	*	*	*	*
10	10	469	434	489	464	28
	20	1782	1747	1748	1759	20
	5	*	*	*	*	*
15	10	1282	1378	1506	1389	112
	20	2371	2126	2023	2173	179

* Corpo-de-prova que não resistiu durante o período de imersão em água, desintegrando-se.

Tabela 20 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão não-confinada das misturas com solo VS – 7 dias de cura em câmara úmida.

Escória (%)	Cal (%)	Tensão de Ruptura (kPa)				
		Corpo-de-prova			Média	Desvio Padrão
		1	2	3		
	5	*	*	*	*	*
5	10	*	*	*	*	*
	20	668	707	735	703	34
	5	*	*	*	*	*
10	10	1974	2026	2106	2035	66
	20	4467	4425	3968	4287	277
	5	424	424	415	421	5
15	10	3421	3251	3160	3277	132
	20	5205	5144	4116	4822	612

* Corpo-de-prova que não resistiu durante o período de imersão em água, desintegrando-se.

Tabela 21 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão não-confinada das misturas com solo VS – 28 dias de cura em câmara úmida.

Escória (%)	Cal (%)	Tensão de Ruptura (kPa)				
		Corpo-de-prova			Média	Desvio Padrão
		1	2	3		
	5	*	*	*	*	*
5	10	*	*	*	*	*
	20	1471	1608	x	1540	97
	5	*	*	*	*	*
10	10	2420	2736	2675	2610	168
	20	5424	5561	5377	5454	96
	5	494	529	500	508	19
15	10	5193	5322	5852	5456	349
	20	6944	7119	x	7032	124

* Corpo-de-prova que não resistiu durante o período de imersão em água, desintegrando-se.

x Resultado não considerado devido ao elevado desvio do valor da resistência em relação aos demais corpos-de-prova.

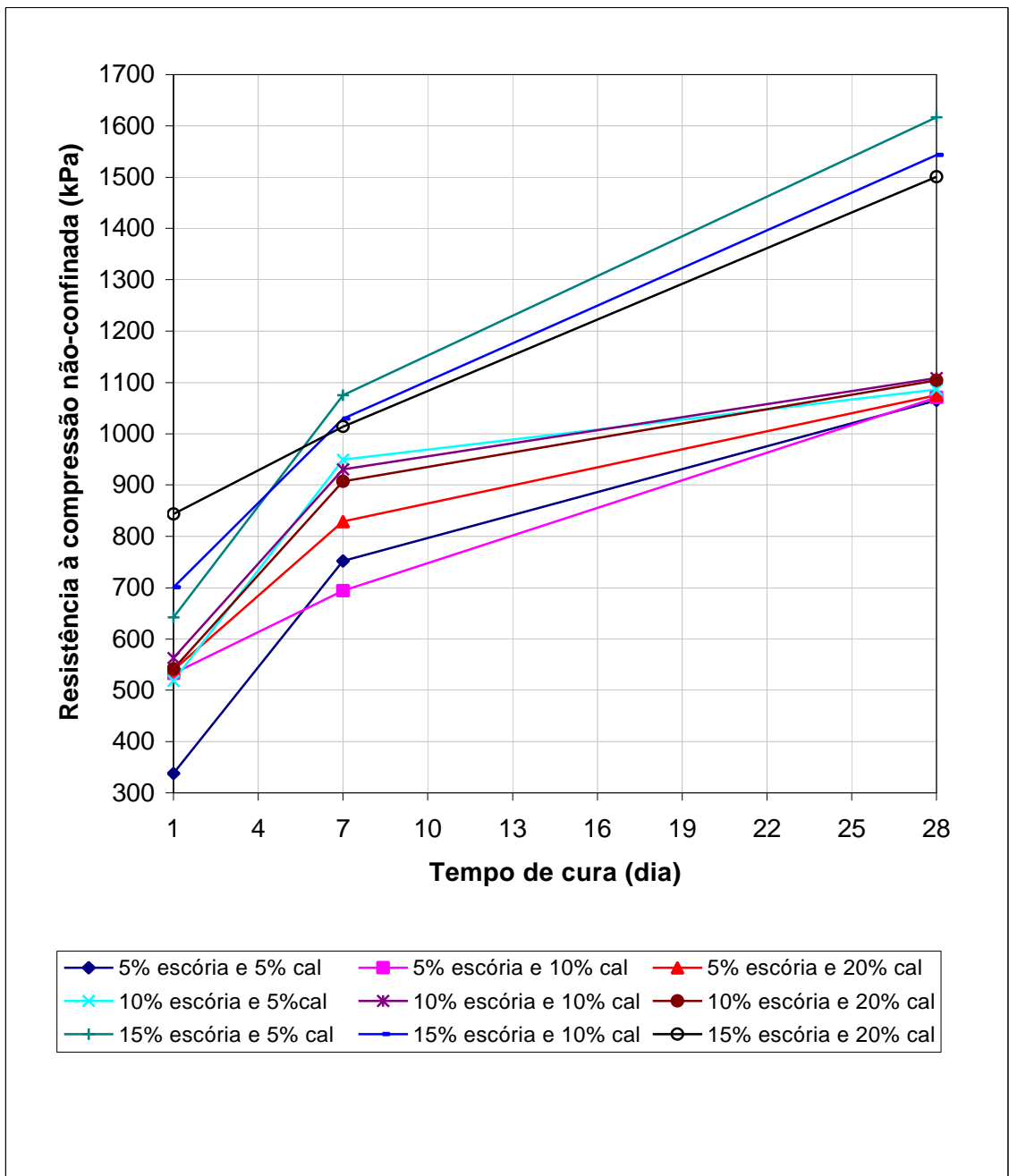


Figura 23 – Variação da resistência à compressão não-confinada com o tempo de cura para as misturas feitas com o solo ETA.

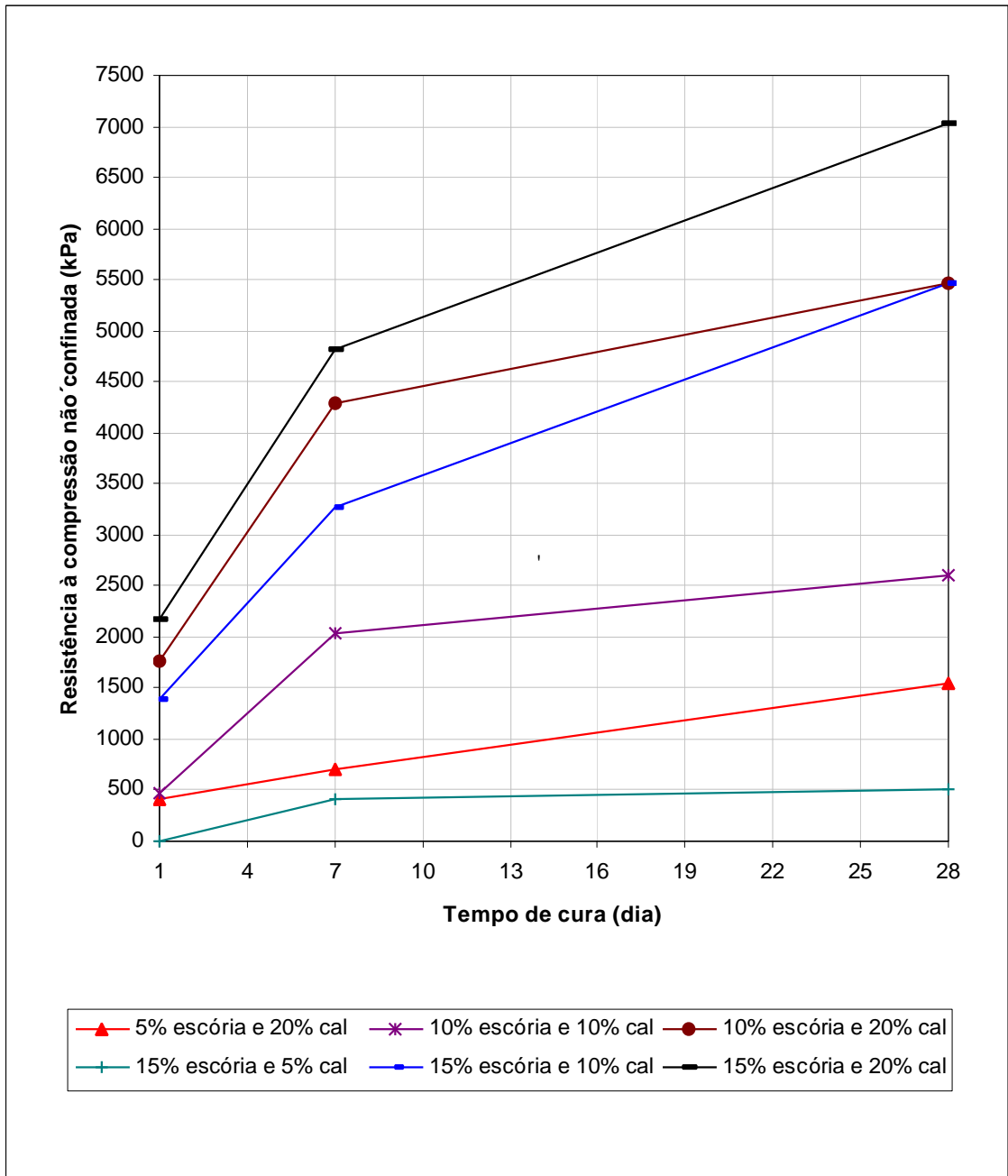


Figura 24 – Variação da resistência à compressão não-confinada com o tempo de cura para as misturas feitas com o solo VS.



Figura 25 – Perda de massa do corpo-de-prova devido ao período de imersão em água (1º estágio)
– Solo VS.



Figura 26 – Perda de massa do corpo-de-prova devido ao período de imersão em água (2º estágio)
– Solo VS.



Figura 27 – Perda de massa do corpo-de-prova devido ao período de imersão em água (3º estágio)– Solo VS.



Figura 28 – Perda de massa do corpo-de-prova devido ao período de imersão em água (4º estágio)– Solo VS.



Figura 29 – Corpos-de-prova desintegrados após o período de imersão em água – Mistura com o solo VS.

4.4.2. Ensaios de durabilidade por molhagem e secagem

Os corpos-de-prova foram moldados segundo a energia do ensaio de compactação Proctor Intermediário, sendo que, posteriormente, permaneceram em câmara úmida por um período de cura de 7 dias até o início dos ciclos de molhagem, secagem e escovação. A figura 30 apresenta os corpos-de-prova imersos em água durante o ensaio de durabilidade por molhagem e secagem.

A tabela 22 apresenta os resultados relativos aos ensaios de durabilidade por molhagem e secagem, realizado com as misturas com os solos ETA e VS. De posse dos resultados, pode-se observar que a máxima perda de massa obtida para as misturas com o solo ETA foi de 7,3 %. As misturas feitas com o solo VS, apresentaram perda de massa de 100 % para as combinações de 5 % de escória com 5 e 10 % de cal, e 10 % de escória com 5 % de cal. Este comportamento já era previsto de acordo com os resultados obtidos com os corpos-de-prova colocados imersos em água previamente aos ensaios de resistência à compressão não-confinada (figuras 25 a 29). As demais misturas com o solo VS apresentaram a perda de massa máxima de 15,4 %.



Figura 30 – Corpos-de-prova imersos em água durante o ensaio de durabilidade por molhagem e secagem.

Diante destes resultados, deve-se destacar que, os dois solos no estado natural, não apresentam resistência quando imersos em água, ou seja, sua perda de massa é de 100 %. Portanto, a estabilização destes solos, com a mistura solo-escória-cal, mostra-se viável do ponto de vista da durabilidade.

Tabela 22 – Perda de massa no ensaio de durabilidade por molhagem e secagem.

Solo	Classificação TRB	Escória (%)	Cal (%)	Perda de massa no ensaio de durabilidade (%)		
ETA	A-7-5	5	5	5,1		
			10	5,9		
			20	7,3		
		10	5	4,9		
			10	6,1		
			20	4,9		
		15	5	4,6		
			10	5,1		
			20	3,9		
		VS	A-2-4	5	5	100,0
					10	100,0
					20	15,4
10	5			100,0		
	10			8,4		
	20			4,9		
15	5			7,4		
	10			3,8		
	20			3,0		

4.4.3. Definição dos teores ótimos de escória e cal das misturas

Determinados os valores de resistência à compressão não-confinada e de durabilidade, definiu-se para a mistura com o solo VS a adição de 10 % de escória e 10 % de cal. A escolha destes teores deveu-se ao fato dessa composição ter apresentado 2035 kPa para a resistência à compressão não-confinada e 8,4 % para a durabilidade. Para a mistura com o solo ETA, os teores adotados foram de 10 % de escória e 5 % de cal. O valor da resistência à compressão não-confinada e da durabilidade obtidos para essa mistura foram de 949 kPa e 4,9 %, respectivamente. Em relação ao tempo de cura, optou-se pelo período de 7 dias para as misturas com ambos os solos.

Os fatores que levaram a estas escolhas foram: de ordem econômica, pois os percentuais escolhidos são praticáveis e de ordem prática, pois o tempo de liberação ao tráfego, após a execução da obra, seria de sete dias, o que é considerado um tempo pequeno.

A partir deste ponto da pesquisa, onde foram determinados os teores ótimos, todos os ensaios que se sucederam foram realizados com base nestas definições.

4.5. Estudo da influência do tempo de cura na resistência mecânica das misturas

No item 4.4.1, foram apresentados os resultados referentes aos ensaios de resistência à compressão não-confinada para os corpos-de-prova mantidos em câmara úmida por um período de 1, 7 e 28 dias de cura. Com o intuito de aproveitar estes dados e visando ao maior conhecimento da resistência da mistura ao longo do tempo, deu-se continuidade, executando-se ensaios após 90, 120 e 180 dias de cura, para os teores ótimos definidos no item 4.4.3. Os resultados estão apresentados na tabela 23 e na figura 31.

Observa-se, na figura 31, para o solo VS, a ocorrência de um número significativo de reações de hidratação no período de até 7 dias de cura, com queda na taxa de ganho de resistência para os períodos de cura de 7 a 28 dias. Essa constatação pode ser explicada pela composição granulométrica do solo VS, de textura arenosa.

No caso do solo ETA, depreende-se da figura 31 que, para os períodos de cura de até 90 dias tem-se a ocorrência predominante de reações de hidratação e pozolânicas, devido à existência de fração sílica-alumina no solo em análise, à semelhança do que ocorre com as misturas solo-cal. A partir de 90 dias de cura, provavelmente, observa-se a ocorrência de reações pozolânicas de pequena monta entre o solo, a escória e a cal, atingindo-se um máximo a 120 dias de cura.

Contudo, nota-se um comportamento anômalo na resistência mecânica, respectivamente, para períodos de cura superiores a 28 dias, no caso do solo VS, e a 120 dias, para o solo ETA que deverá merecer um estudo mais detalhado no futuro.

Destacando-se o fato de que os corpos-de-prova, curados por 90, 120 e 180 dias, terem sido moldados com um mês de diferença em relação aos demais, e com o intuito de encontrar uma resposta plausível para o comportamento das misturas, foi realizado um breve estudo, onde analisou-se a influência do envelhecimento da escória de alto-forno granulada moída na resistência mecânica. Este estudo está apresentado no tópico seguinte deste trabalho.

Tabela 23 - Influência do tempo de cura na resistência mecânica das misturas.

Solo	Teores de estabilizantes (%)	Tempo de cura (dia)	Tensão de Ruptura (kPa)				
			Corpo-de-prova			Média	Desvio Padrão
			1	2	3		
VS	10% de escória e 10% de cal	1	469	434	489	464	28
		7	1974	2026	2106	2035	66
		28	2420	2736	2675	2610	168
		90	948	986	940	958	25
		120	1192	1224	1287	1234	48
		180	760	850	775	795	48
ETA	10% de escória e 5% de cal	1	547	480	528	518	35
		7	945	968	934	949	17
		28	1003	1168	x	1086	117
		90	2039	1751	1960	1917	149
		120	2025	1918	2452	2132	283
		180	1482	1333	1491	1435	89

x Resultado não considerado devido ao elevado desvio do valor da resistência em relação aos demais corpos-de-prova.

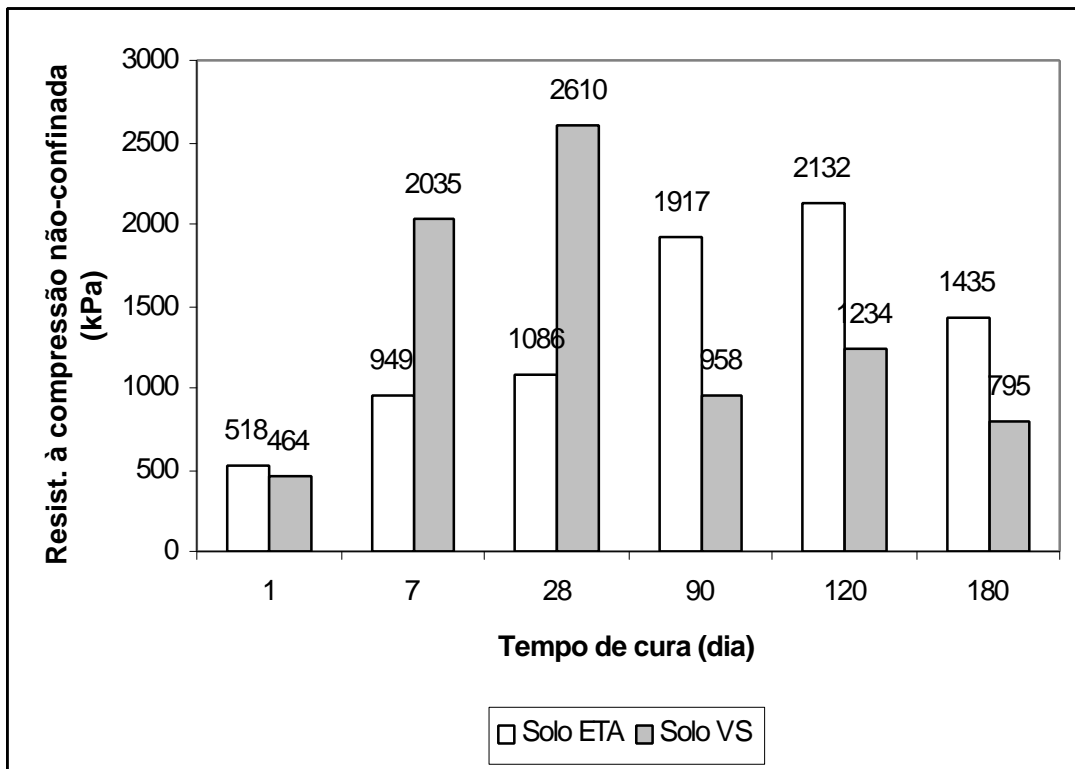


Figura 31 – Tempo de cura x resistência à compressão não-confinada.

4.6. Análise da influência do envelhecimento da escória de alto-forno granulada moída na resistência mecânica da mistura solo – escória – cal

O envelhecimento da escória moída já havia sido observado por REGOURD et al. (1983), quando se observou que a taxa de hidratação da escória era afetada quando o corpo-de-prova era moldado com escória moída armazenada pelo período de um mês.

Como citado no tópico anterior, este estudo teve como objetivo tentar sanar algumas dúvidas referentes a vários resultados obtidos neste trabalho. A metodologia seguida foi a moldagem de corpos-de-prova ao longo do tempo em relação a data de moagem da escória. Após a cura de 7 dias em câmara úmida e a posterior imersão em água (período de 4 horas), estes foram levados á prensa e rompidos, obtendo-se os respectivos resultados de resistência à compressão não-confinada, como apresentados na tabela 24 e na figura 32.

Visando a apresentação de resultados convincentes, deve-se destacar que a escória utilizada em toda a pesquisa foi procedente de um único lote e manteve-se armazenada em sacos plásticos durante todo o período da pesquisa, exceto a utilizada na moldagem dos corpos-de-prova logo após a moagem.

Analisando-se a figura 32, nota-se uma queda de, aproximadamente, 86 % no valor da resistência à compressão não-confinada após 11 meses de envelhecimento da escória de alto-forno granulada moída. Portanto, a resposta para o problema em questão teria sido encontrada se não fosse o fato da escória utilizada, na mistura com o solo ETA, também ter sofrido o mesmo processo de envelhecimento, não resultando porém, em queda no valor da resistência. Isto abre precedente para uma nova discussão, onde deve-se levar em consideração as características dos dois solos estudados.

Portanto, não é possível apontar com convicção, através deste estudo, os reais fatores do comportamento das misturas; entretanto, a questão do envelhecimento da escória moída parece ser de grande importância na estabilização do solo VS, de natureza granular, e de pouca ou nenhuma significância no caso do solo ETA, de textura argilosa. Recomenda-se que este comportamento seja analisado em pesquisa futura, considerando-se a influência do tipo de solo nas reações de hidratação e pozolânicas das misturas.

Tabela 24 - Análise da influência do envelhecimento da escória de alto-forno granulada moída na resistência mecânica das misturas.

Solo	Teores de estabilizantes (%)	Tempo de envelhecimento (mês)	Tensão de Ruptura (kPa)				
			Corpo-de-prova			Média	Desvio Padrão
			1	2	3		
VS	10% de escória e 10% de cal	0	3455	3695	3711	3620	143
		7	1974	2026	2106	2035	66
		11	486	490	497	491	6
ETA	10% de escória e 5% de cal	5	945	968	934	949	17
		11	995	958	843	932	79

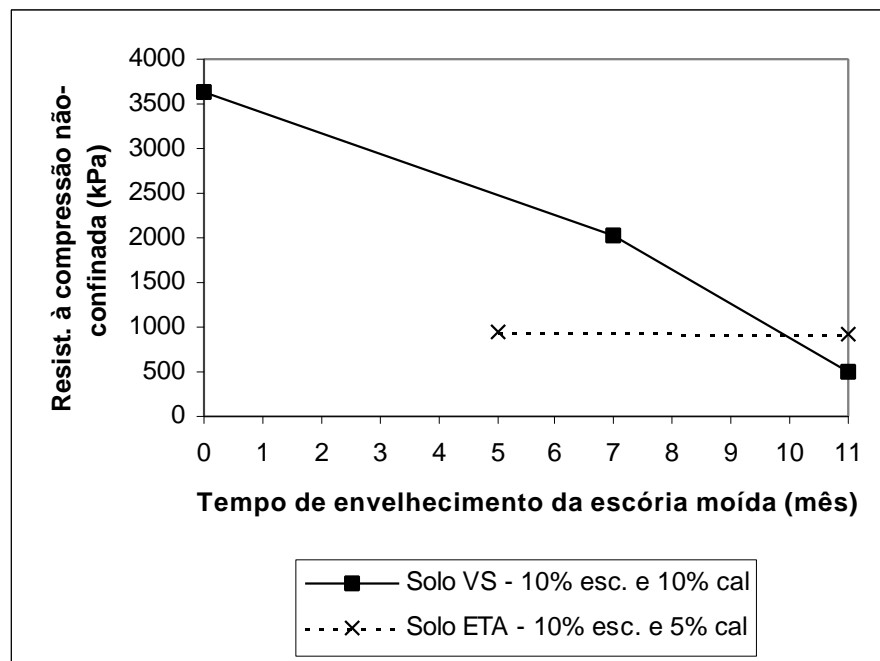


Figura 32 – Tempo de envelhecimento da escória de alto-forno moída x resistência à compressão não-confinada das misturas, após 7 dias de cura.

4.7. Estudo da influência do teor de umidade na resistência mecânica das misturas

Devido às características hidráulicas da escória de alto-forno granulada moída, é justificável que se fizesse um estudo da influência do teor de umidade na resistência mecânica das misturas solo –

escória – cal. Portanto, este estudo seguiu os mesmos procedimentos, relativos ao ensaio de resistência à compressão não-confinada, anteriormente citado. A diferença deu-se nos parâmetros de compactação, onde, para cada teor de umidade utilizado foi determinado, de acordo com a curva de compactação (Figuras 10 e 13), o respectivo peso específico seco máximo. Os parâmetros de compactação, utilizados na moldagem dos corpos-de-prova, estão apresentados na tabela 25.

Tabela 25 – Parâmetros obtidos nos ensaios de compactação de misturas com o solo ETA e VS.

Solo	Dosagem	Peso específico seco máximo e teor de umidade ótimo
ETA	10% de escória e 5% de cal	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 14,83 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} - 2\% = 24,40 \%$
		$\gamma_{dm\acute{a}x} = 15,58 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 26,40 \%$
		$\gamma_{dm\acute{a}x} = 15,10 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} + 2\% = 28,40 \%$
		$\gamma_{dm\acute{a}x} = 14,59 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} + 4\% = 30,40 \%$
VS	10% de escória e 10% de cal	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 18,37 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} - 2\% = 11,34 \%$
		$\gamma_{dm\acute{a}x} = 18,55 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 13,34 \%$
		$\gamma_{dm\acute{a}x} = 17,97 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} + 2\% = 15,34 \%$
		$\gamma_{dm\acute{a}x} = 17,34 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} + 4\% = 17,34 \%$

Nas tabelas 26 e 27 e nas figuras 33 e 34 estão apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão não-confinada com a variação da umidade das misturas com os solos ETA e VS.

Tabela 26 - Influência do teor de umidade na resistência mecânica das misturas – Solo ETA - Dosagem: 10% de escória e 5% de cal.

Tempo de cura (dia)	Umidade (%)	Tensão de Ruptura (kPa)				
		Corpo-de-prova			Média	Desvio Padrão
		1	2	3		
1	Wot-2%	*	*	*	*	*
	Wot	547	480	528	518	35
	Wot+2%	411	430	420	420	10
	Wot+4%	329	290	283	301	25
7	Wot-2%	314	323	354	330	21
	Wot	945	968	934	949	17
	Wot+2%	427	438	535	467	59
	Wot+4%	351	340	378	356	20
28	Wot-2%	663	606	577	615	44
	Wot	1003	1168	x	1086	117
	Wot+2%	669	701	679	683	16
	Wot+4%	445	377	413	412	34

* Corpo-de-prova que não resistiu durante o período de imersão em água, desintegrando-se.

x Resultado não considerado devido ao elevado desvio do valor da resistência em relação aos demais corpos-de-prova.

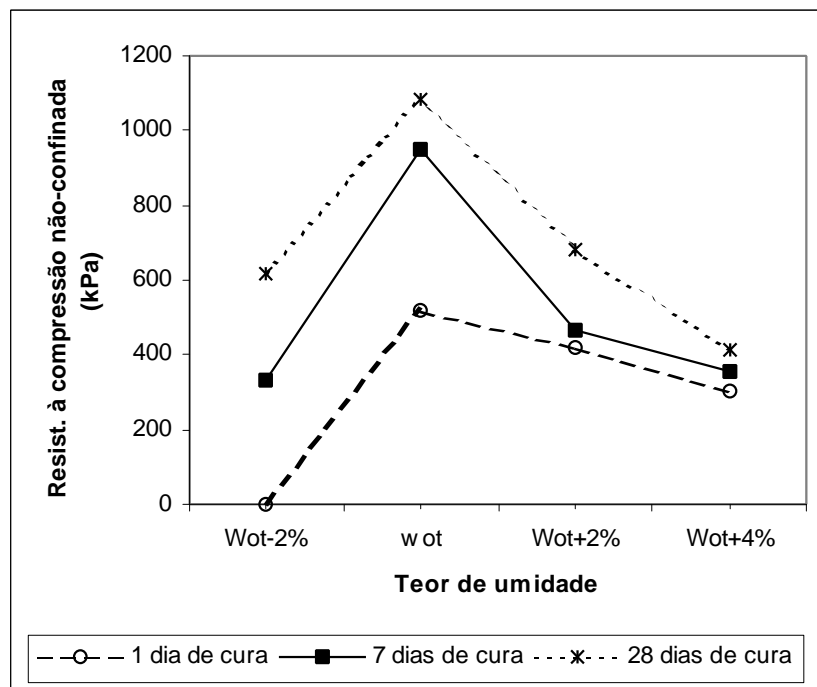


Figura 33 – Teor de umidade x resistência à compressão não-confinada – Solo ETA - Dosagem: 10% de escória e 5% de cal.

Tabela 27 - Influência do teor de umidade na resistência mecânica das misturas – Solo VS - Dosagem: 10% de escória e 10% de cal.

Tempo de cura (dia)	Umidade (%)	Tensão de Ruptura (kPa)				
		Corpo-de-prova			Média	Desvio Padrão
		1	2	3		
1	Wot-2%	391	383	372	382	10
	Wot	469	434	489	464	28
	Wot+2%	250	241	214	235	19
	Wot+4%	159	159	169	162	6
7	Wot-2%	542	570	616	576	37
	Wot	1974	2026	2106	2035	66
	Wot+2%	225	227	233	228	4
	Wot+4%	195	204	176	192	14
28	Wot-2%	813	851	877	847	32
	Wot	2420	2736	2675	2610	168
	Wot+2%	578	559	640	592	42
	Wot+4%	414	478	535	476	61

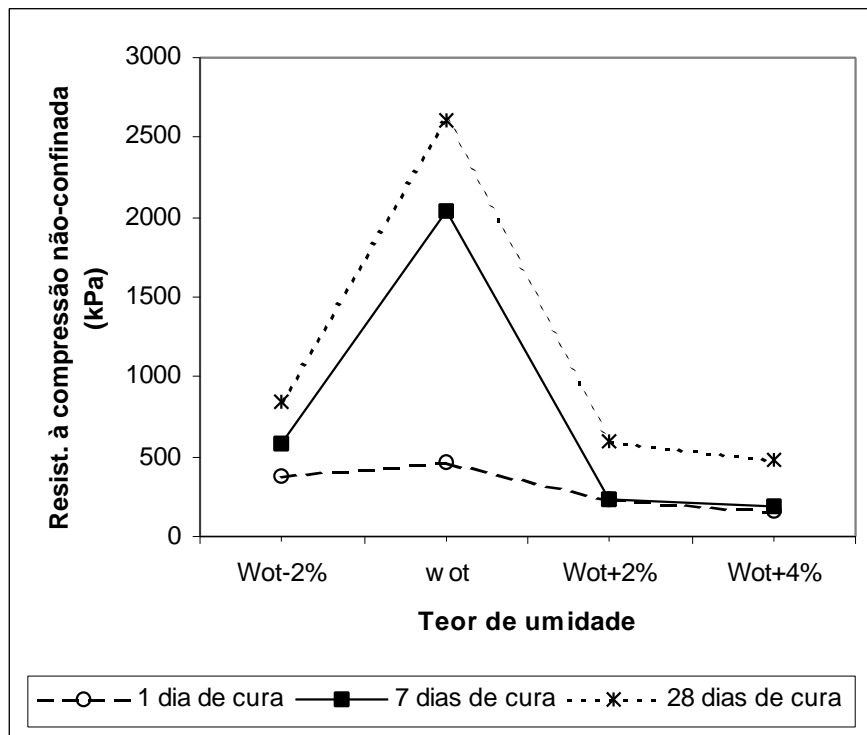


Figura 34 – Teor de umidade x resistência à compressão não-confinada – Solo VS - Dosagem: 10% de escória e 10% de cal.

Em comparação com as tabelas 26 e 27, as figuras 33 e 34, apresentam com maior nitidez, a variação do teor de umidade com a resistência das misturas. Analisando-se essas figuras, observa-se que a máxima resistência é sempre alcançada na umidade ótima (w_{ot}). Entretanto, deve-se destacar que a resistência relativa ao teor de umidade ótimo para a mistura com o solo VS, foi determinada através de corpos-de-prova moldados, aproximadamente, dois meses antes dos demais; portanto, o fator envelhecimento pode ter influenciado os resultados.

A conclusão sobre o respectivo estudo é que, a compactação das misturas nos ramos secos e úmidos da curva apresentam valores de resistência inferiores à umidade ótima; portanto, o aumento ou a redução da umidade, juntamente com os seus respectivos valores de massa específica seca máxima, não levou a melhora na resistência mecânica das misturas, prevalecendo, neste caso, a maior influência do peso seco máximo em relação ao teor de umidade.

4.8. Estudo da influência da energia de compactação na resistência mecânica das misturas

A estabilização mecânica por compactação pode ser, em muitos casos, a solução para problemas envolvendo solos com baixa resistência mecânica; portanto, é de interesse avaliar a influência da energia de compactação na resistência das misturas.

A base do funcionamento deste processo está no aumento da energia mecânica aplicada, cujos parâmetros de compactação são alterados (massa específica seca máxima e teor de umidade ótimo).

As tabelas 28 e 29 apresentam os valores obtidos de massa específica seca máxima e teor de umidade ótimo, relativo às energias dos ensaios Proctor Normal, Intermediário e Modificado, para as misturas com os solos ETA e VS, respectivamente.

Analisando-se as curvas de compactação das misturas, figuras 35 e 36, constata-se o que já fora demonstrado na bibliografia, onde, com o aumento da energia de compactação ocorre a redução da porosidade, aumentando o peso específico seco máximo e reduzindo o teor de umidade ótimo.

Tabela 28 – Parâmetros de compactação em diferentes energias – Solo ETA.

Dosagem	Energia	Peso específico seco máximo e teor de umidade ótimo
10 % esc e 5 % cal	Normal	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 14,67 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 29,58 \%$
	Intermediária	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 15,58 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 26,40 \%$
	Modificada	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 15,87 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 25,00 \%$

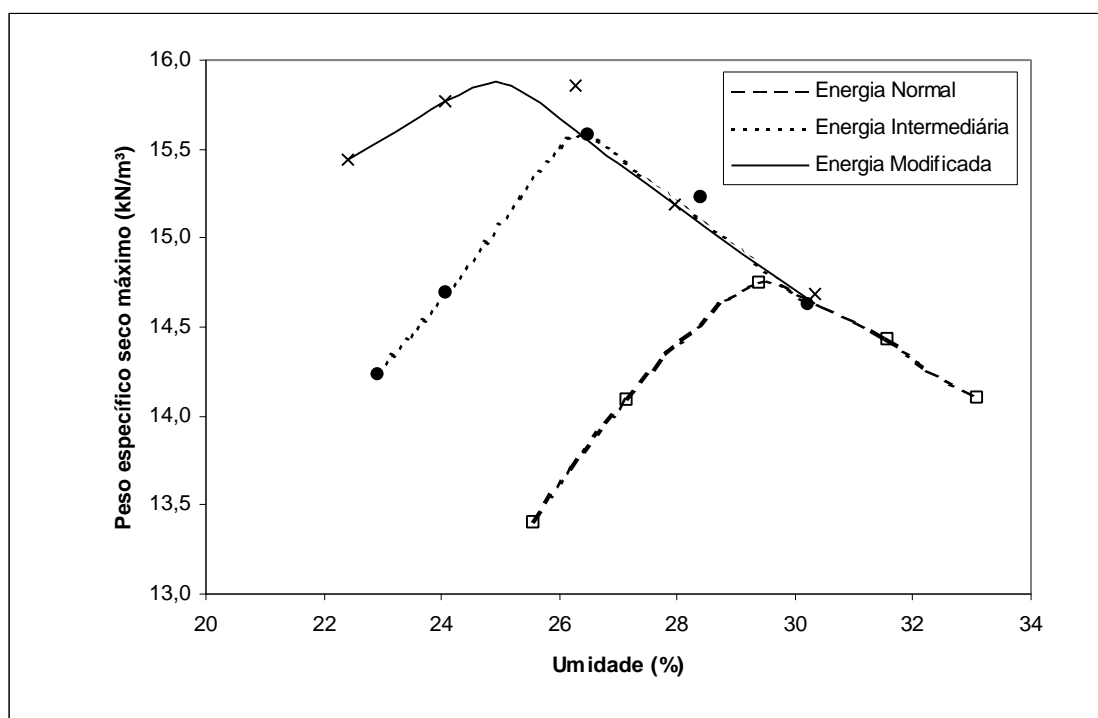


Figura 35 – Curvas de compactação em diferentes energias – Solo ETA.

Tabela 29 – Parâmetros de compactação em diferentes energias – Solo VS.

Dosagem	Energia	Peso específico seco máximo e teor de umidade ótimo
10 % esc e 10 % cal	Normal	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 17,11 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 16,63 \%$
	Intermediária	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 18,55 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 13,34 \%$
	Modificada	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 19,12 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 12,62 \%$

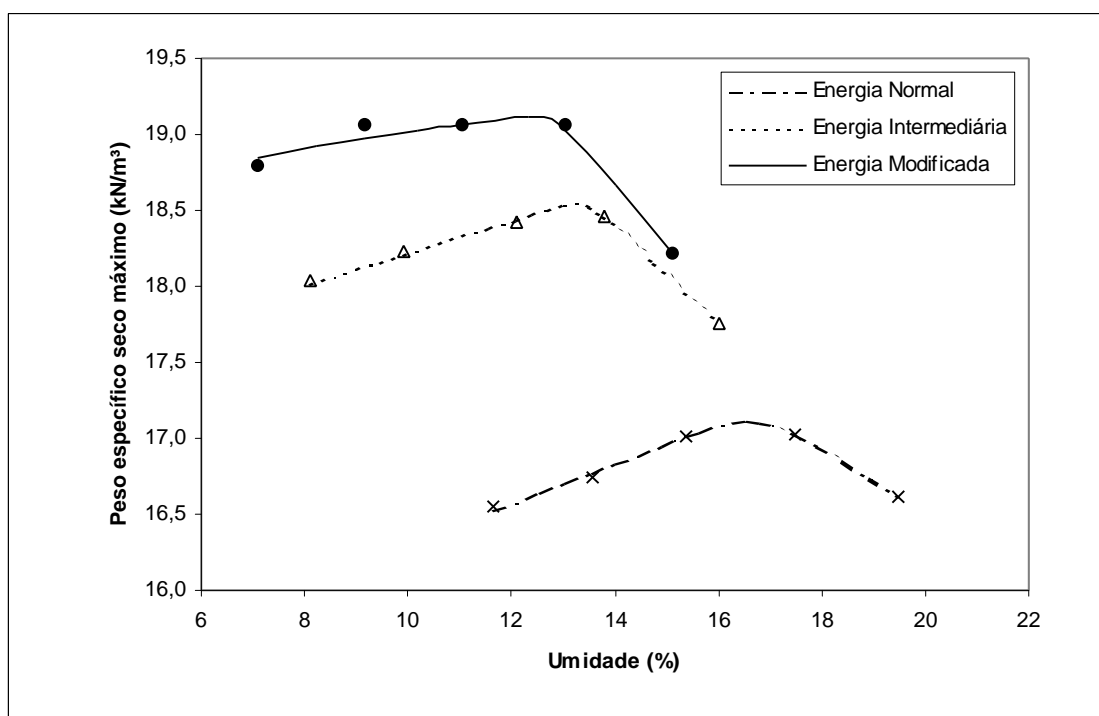


Figura 36 – Curvas de compactação em diferentes energias – Solo VS.

Do ponto de vista da resistência à compressão não-confinada, a mistura com o solo ETA apresentou um aumento crescente, atingindo 1720 kPa, para os corpos-de-prova moldados na energia modificada (Tabela 30 e figura 37). Para a mistura com o solo VS, a energia modificada apresentou resultados menores que a intermediária (Tabela 31 e figura 38). Este comportamento pode ser explicado por fenômeno de quebra dos grãos dos solos pela ação da energia do ensaio Proctor Modificado, que é muito elevada, alterando assim, a granulometria original do solo.

Deve-se destacar, novamente, o fato dos valores de resistência, relativo à energia intermediária, terem sido obtidos dos ensaios realizados com os corpos-de-prova moldados no início da pesquisa, ou seja, uma diferença de um a três meses em relação aos demais.

Tabela 30 - Influência da energia de compactação na resistência mecânica da mistura – Solo ETA – Dosagem: 10% de escória e 5% de cal.

Tempo de cura (dia)	Energia	Tensão de Ruptura (kPa)				
		Corpo-de-prova			Média	Desvio Padrão
		1	2	3		
1	Normal	248	229	286	254	29
	Intermediária	547	480	528	518	35
	Modificada	619	668	629	639	26
7	Normal	220	247	266	244	23
	Intermediária	945	968	934	949	17
	Modificada	1370	1332	1266	1323	53
28	Normal	495	450	459	468	24
	Intermediária	1003	1168	x	1086	117
	Modificada	1678	1784	1698	1720	56

x Resultado não considerado devido ao elevado desvio do valor da resistência em relação aos demais corpos-de-prova.

Tabela 31 - Influência da energia de compactação na resistência mecânica da mistura – Solo VS
 – Dosagem: 10% de escória e 10% de cal.

Tempo De cura (dia)	Energia	Tensão de Ruptura (kPa)				
		Corpo-de-prova			Média	Desvio Padrão
		1	2	3		
1	Normal	*	*	*	*	*
	Intermediária	469	434	489	464	28
	Modificada	138	157	x	148	13
7	Normal	188	188	188	188	0
	Intermediária	1974	2026	2106	2035	66
	Modificada	171	170	139	160	18
28	Normal	349	385	340	358	24
	Intermediária	2420	2736	2675	2610	168
	Modificada	1224	1154	x	1189	49

* Corpo-de-prova que não resistiu durante o período de imersão em água, desintegrando-se.

x Resultado não considerado devido ao elevado desvio do valor da resistência em relação aos demais corpos-de-prova.

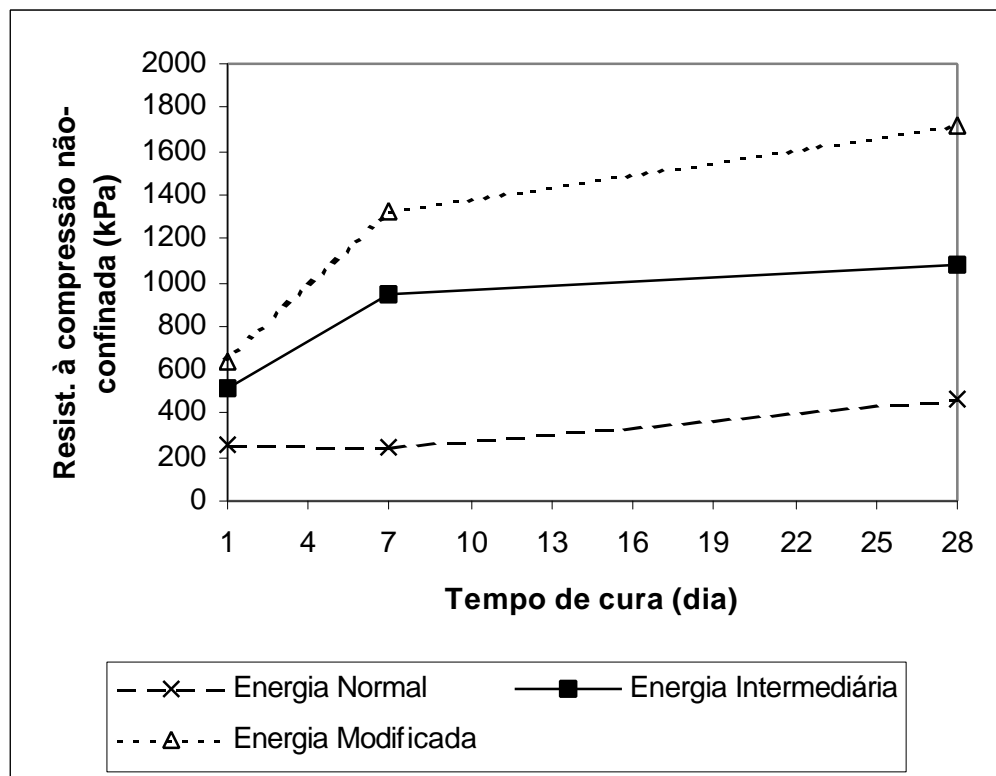


Figura 37 – Influência da energia de compactação na resistência mecânica das misturas com o solo ETA.

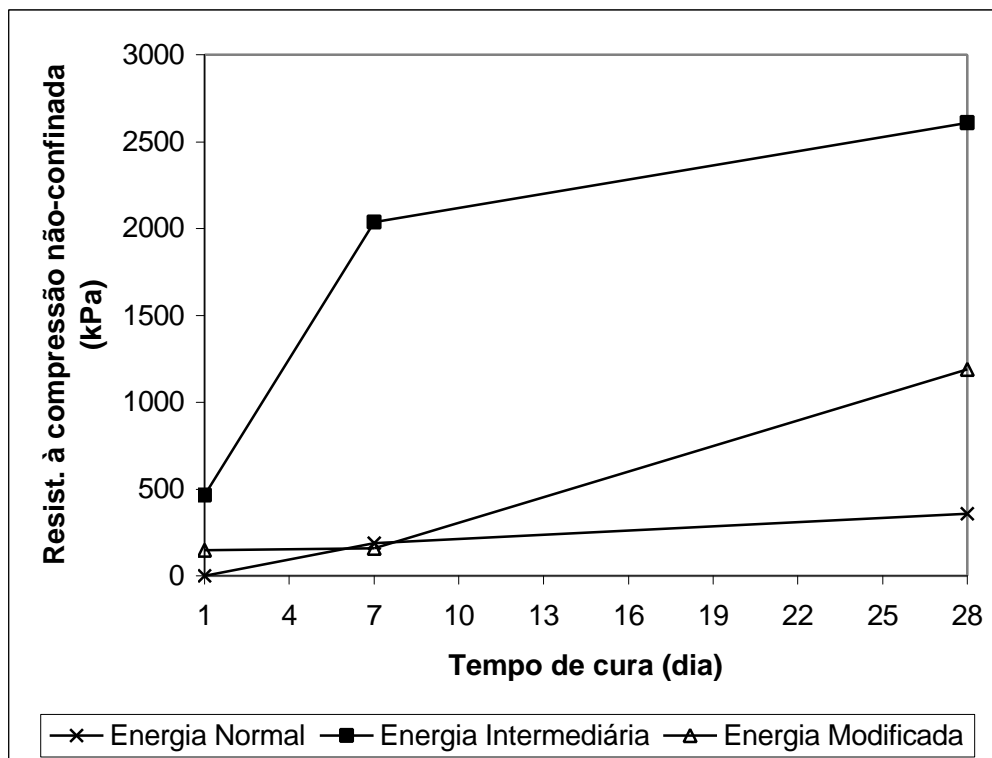


Figura 38 – Influência da energia de compactação na resistência mecânica das misturas com o solo VS.

4.9. Estudo da influência do tempo decorrido entre a mistura e a compactação na resistência mecânica das misturas

Devido às questões de ordem prática como o preparo da mistura e o tempo de execução da camada do pavimento, foi realizado um estudo onde analisou-se a influência do tempo decorrido entre a mistura e a compactação na resistência mecânica das misturas.

A execução deste estudo teve a seguinte seqüência: 1º etapa – preparo da mistura; 2º etapa – acondicionamento do material misturado em saco plástico; 3º etapa – compactação da mistura imediatamente, após 4 e após 8 horas de descanso; 4º etapa – os corpos-de-prova foram colocados em câmara úmida por um período de 28 dias, para a posterior execução do ensaio de resistência à compressão não-confinada. Os parâmetros de compactação (massa específica seca máxima e teor de umidade ótimo) utilizados, foram os determinados no início da pesquisa, para os teores ótimos definidos (Tabelas 13 e 14).

Os resultados estão apresentados nas tabela 32 e 33 e nas figuras 39 e 40. Analisando-se os resultados tem-se que, a mistura com o solo ETA apresentou um resultado interessante, onde a máxima resistência obtida foi após ter transcorrido 4 horas de descanso da mistura, cujo valor foi de 1446 kPa. A mistura com o solo VS apresentou a máxima resistência quando imediatamente compactado, ou seja, com o passar do tempo após o preparo da mistura (4 e 8 horas), a resistência diminuiu. Estes comportamentos podem ser devido a diferença de ligações formada entre os grãos, onde, provavelmente, para o solo argiloso houve a ocorrência de reações de trocas catiônicas entre os aditivos e o solo anteriormente à formação de ligações de cimentação. Para o solo arenoso a reatividade solo-escória apresenta-se através de ligações de cimentação intergrãos ocasionados pelas reações de hidratação entre o solo e a escória de alto-forno granulada moída.

Porém, deve-se ressaltar que, o valor da resistência relativa aos corpos-de-prova moldados imediatamente após a mistura, foram obtidos do início da pesquisa, ou seja, a moldagem ocorreu com a diferença de um mês, portanto, o fator envelhecimento da escória pode ter influenciado os resultados.

Sobre este estudo pode-se concluir que o tempo decorrido entre a mistura e a compactação interfere significativamente na resistência das misturas de ambos os solos analisados.

Tabela 32 - Influência do tempo decorrido entre a mistura e a compactação na resistência mecânica da mistura – Solo ETA – Dosagem: 10% de escória e 5% de cal – Período de cura: 28 dias.

Tempo decorrido entre mistura e compactação (h)	Tensão de Ruptura (kPa)				
	Corpo-de-prova			Média	Desvio Padrão
	1	2	3		
0	1003	1168	x	1086	117
4	1387	1476	1474	1446	51
8	938	1035	1005	993	50

x Resultado não considerado devido ao elevado desvio do valor da resistência em relação aos demais corpos-de-prova.

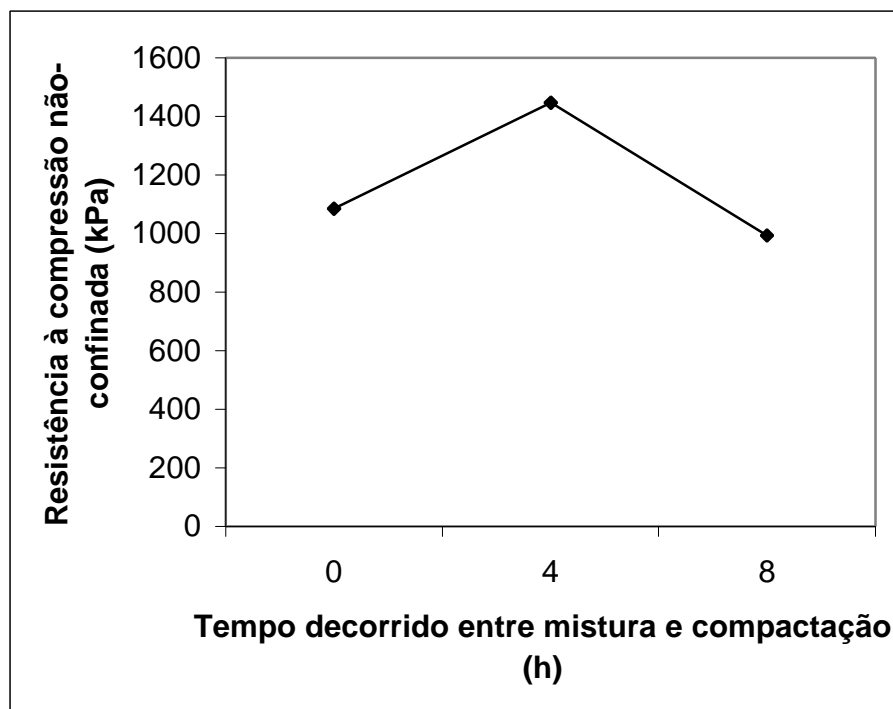


Figura 39 - Influência do tempo decorrido entre a mistura e a compactação na resistência mecânica da mistura – Solo ETA – Dosagem: 10% de escória e 5% de cal – Período de cura: 28 dias.

Tabela 33 - Influência do tempo decorrido entre a mistura e a compactação na resistência mecânica da mistura – Solo VS – Dosagem: 10% de escória e 10% de cal – Período de cura: 28 dias.

Tempo decorrido entre mistura e compactação (h)	Tensão de Ruptura (kPa)				
	Corpo-de-prova			Média	Desvio Padrão
	1	2	3		
0	1974	2026	2106	2035	66
4	1090	1042	1093	1075	29
8	659	677	670	669	9

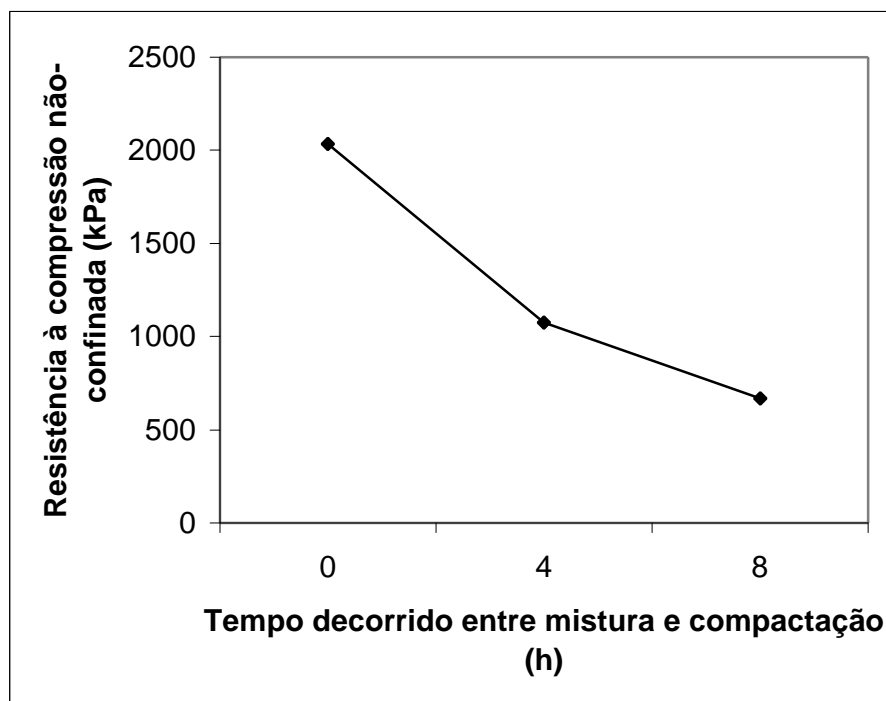


Figura 40 - Influência do tempo decorrido entre a mistura e a compactação na resistência mecânica da mistura – Solo VS – Dosagem: 10% de escória e 10% de cal – Período de cura: 28 dias.

4.10. Avaliação da influência da cal hidratada na resistência mecânica das misturas

No tópico 4.4.1, analisou-se a influência da quantidade de cal hidratada na mistura. Este estudo tem como objetivo, comparar os valores de resistência conhecidos com os resultados obtidos com misturas sem a presença de cal.

Os resultados dos ensaios de compactação, referente às misturas sem cal, estão apresentados na tabela 34 e nas figuras 41 e 42.

Tabela 34 - Parâmetros de compactação para a mistura sem cal.

Solo	Dosagem	Peso específico seco máximo e teor de umidade ótimo
ETA	10 % esc e 0 % cal	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 15,59 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 26,72 \%$
VS	10 % esc e 0 % cal	$\gamma_{dm\acute{a}x} = 18,46 \text{ kN/m}^3$ $w_{ot} = 14,18 \%$

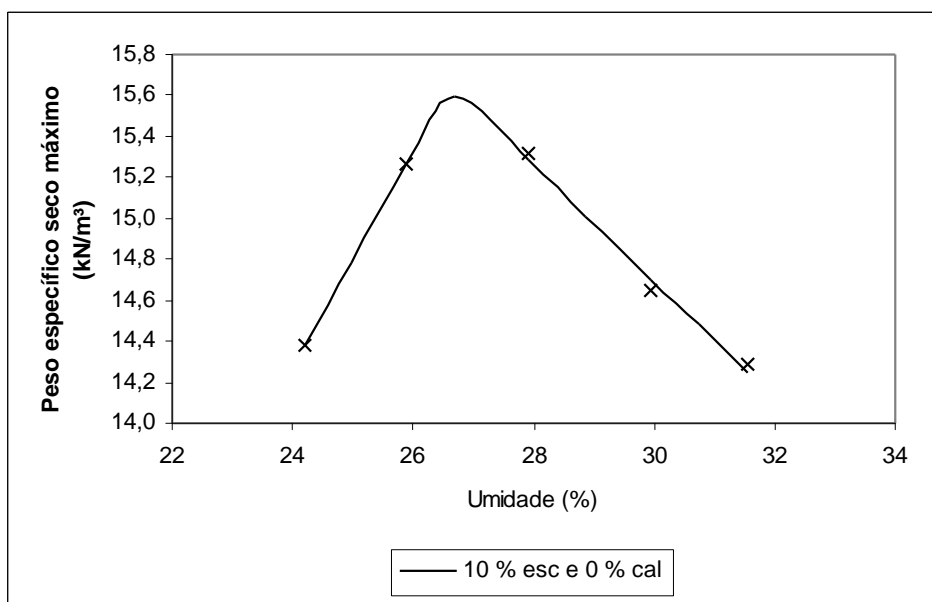


Figura 41 – Curva de compactação da mistura de solo (ETA) com escória.

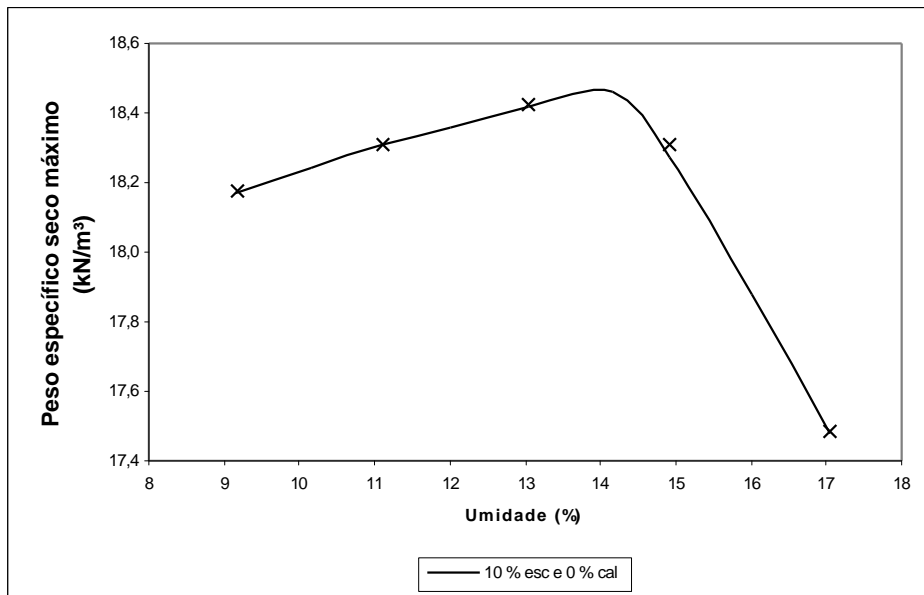


Figura 42 – Curva de compactação da mistura de solo (VS) com escória.

A avaliação da resistência para a mistura com solo VS não pode ser feita, pois os corpos-de-prova não resistiram à fase de imersão em água, desta forma, constatou-se a importância da presença da cal no processo de ativação da escória, para a mistura com o solo VS.

Analisando-se a figura 43, pode-se concluir que a presença da cal na mistura do solo ETA com escória (dosagem: 10% de escória e 20% de cal) não apresentou diferença significativa em relação à mistura sem a cal, para o período de cura de 7 dias. Porém, para 1 e 28 dias, houve uma redução de 51% e um aumento de 18%, respectivamente, para a mistura sem cal. A resistência dos corpos-de-prova, assim como, o valor médio e o desvio padrão, para a mistura do solo ETA com 10% de escória, estão apresentados na tabela 35.

Tabela 35 – Resistência à compressão não-confinada de mistura solo ETA - 10% de escória.

Tipo de solo	Teor de estabilizante	Tempo de cura (dia)	Tensão de Ruptura (kPa)				
			Corpo-de-prova			Média	Desvio Padrão
			1	2	3		
ETA	0% de cal	1	316	375	335	342	30
		7	844	941	747	844	97
		28	1190	1445	1356	1330	129
	20% de cal	1	504	580	x	542	54
		7	933	915	872	907	31
		28	1243	1006	1064	1104	124

x Resultado não considerado devido ao elevado desvio do valor da resistência em relação aos demais corpos-de-prova.

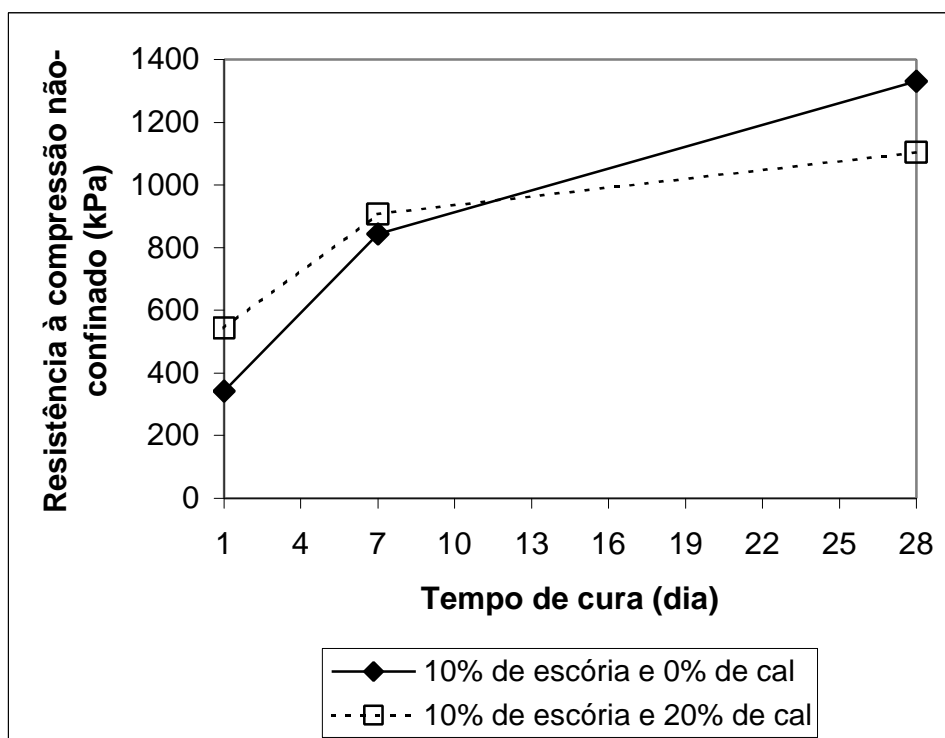


Figura 43 – Variação da resistência à compressão não-confinada com o tempo de cura – mistura solo ETA com 10% de escória.

4.11. Ensaio de resistência à compressão diametral

O ensaio de resistência à compressão diametral tem como objetivo determinar a máxima resistência à tração do corpo-de-prova, quando submetido à uma carga diametral. Os resultados dos ensaios realizados com as misturas estão apresentados na tabela 36.

Para as misturas com os solos ETA e VS, obteve-se um ganho de 53% e 358%, respectivamente, na resistência mecânica, quando comparando-se às idades de 7 e 28 dias.

Observa-se, na figura 44, com relação ao solo VS, um comportamento mecânico que contraria aquele observado na resistência à compressão não-confinada das misturas. Nota-se, presentemente, uma grande influência do período de cura na resistência à compressão diametral das misturas, fato este que, aparentemente, não pode ser justificado pela ocorrência de reações de hidratação, à semelhança da discussão sobre este tópico apresentado quando se analisou o efeito do período de cura na resistência à compressão não-confinada.

Tabela 36 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão diametral.

Solo	Dosagem	Tempo de cura (dia)	Tensão de Ruptura (kPa)				
			Corpo-de-prova			Média	Desvio Padrão
			1	2	3		
ETA	10% de escória e 5% de cal	7	97	103	102	101	3
		28	130	161	174	155	23
VS	10% de escória e 10% de cal	7	26	25	22	24	2
		28	105	108	116	110	6

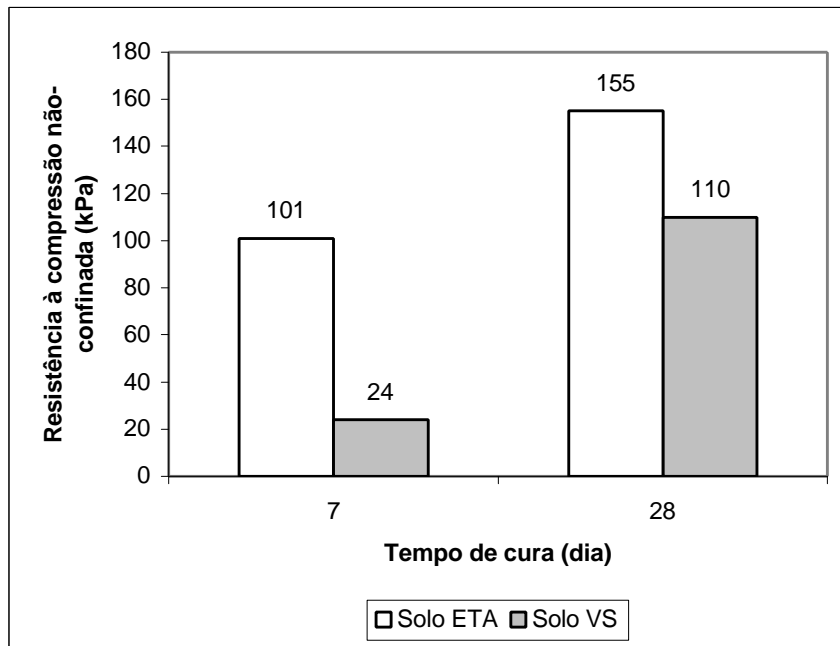


Figura 44 – Tempo de cura x resistência à compressão diametral.

5. Conclusões e Sugestões

Apresentam-se neste capítulo, as principais conclusões observadas sobre o comportamento da estabilização de solos com escória de alto-forno granulada moída. Além disso, são dadas sugestões para futuros trabalhos de pesquisa, de forma a elucidar aspectos não abordados, bem como justificar outros, relativos a este programa experimental.

5.1. Conclusões

A análise dos dados obtidos neste programa experimental permitiu que se chegassem às seguintes conclusões:

Os solos se mostraram reativos a escória gerando ganhos significativos, contudo, os mecanismos de reação são diferentes. A reatividade solo-escória apresenta-se, no solo arenoso, através de ligações de cimentação intergrãos. No caso do solo argiloso, embora não se tenha procedido as análises químicas da mistura, pode-se antever a ocorrência de reações de trocas catiônicas entre os aditivos e o solo anteriormente à formação de ligações de cimentação.

O tempo decorrido entre a mistura e a compactação, aspecto este fundamental para os trabalhos de campo, é de grande importância nesta modalidade de estabilização, mostrando ser diferente para cada tipo de solo.

O efeito negativo da energia de compactação do ensaio Proctor Modificado na resistência mecânica deve-se, provavelmente, a mudanças na geometria e/ou dimensões dos grãos do solo arenoso (VS). Em geral, observou-se a ocorrência de ganhos significativos de resistência mecânica com o aumento da energia de compactação empregada.

A partir da análise dos resultados de resistência à compressão não-confinada pode-se notar a importância da presença da cal hidratada no processo de ativação da escória para a mistura com o solo VS, não podendo-se afirmar o mesmo para a mistura com o solo ETA, onde a presença da cal, nos teores utilizados nesta pesquisa, mostrou-se pouco significativo.

Finalizando, tem-se que, em geral, os resultados obtidos nos ensaios de compressão diametral corroboraram o bom desempenho das misturas observado nos ensaios de compressão não-confinada, à exceção do solo VS, cujos resultados merecem análise mais detalhada.

5.2. Sugestões para futuros trabalhos

A análise dos resultados experimentais obtidos nesta pesquisa evidenciam que, apesar de um avanço no entendimento do comportamento dos solos estabilizados com escória de alto-forno granulada moída, novos estudos podem ser realizados. A seguir são apresentadas algumas destas recomendações:

- Sugere-se desenvolver um novo trabalho que englobe a influência do envelhecimento da escória moída e da cal na resistência mecânica dos solos estudados, bem como a determinação de possíveis compostos neoformados, com emprego de análises químicas.
- Considerando a grande ocorrência de solos lateríticos e não-lateríticos, no complexo cristalino brasileiro, representados, por exemplo, por latossolos e solos residuais jovens, é de interesse a inclusão de um solo de comportamento não-laterítico de granulometria mais fina e com porcentagem de parcela de silte maior do que o solo VS do presente estudo.
- Determinação da resposta dinâmica, representada pelo módulo de Resiliente das misturas solo – escória de alto-forno granulada moída – cal hidratada e o seu comportamento mecânico em camadas de pavimento, utilizando-se modelos elásticos lineares e não-lineares.
- Construção de um trecho experimental com mistura solo – escória de alto-forno granulada moída – cal hidratada.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTOS (ABEDA), 2001. **MANUAL BÁSICO DE EMULSÕES ASFÁLTICAS. SOLUÇÕES PARA PAVIMENTAR SUA CIDADE.** Rio de Janeiro, 136p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1982. **NBR 7181 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980. **NBR 6508 – DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS DOS SOLOS.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980. **NBR 6459 – SOLO – DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE LIQUIDEZ.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1982. **NBR 7180 – SOLO – DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE PLASTICIDADE.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1986. **NBR 7182 – SOLO – ENSAIO DE COMPACTAÇÃO.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994. **PROJETO 18:106.01-004 – ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO-FORNO – DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE.**

CHIARATTI, L.; GOMES, C.; BRAGA, R.; VASCONCELOS, H. O. B. de; PRADO, J. L. V. T., 1987. **ESCÓRIA DE ALTO FORNO-COSIPA. Seminário sobre Resíduos Siderúrgicos.** Rio de Janeiro-RJ.

CINCOTTO, M. A.; BATTAGIN, A. F.; AGOPYAN, V., 1992. **CARACTERIZAÇÃO DE ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO-FORNO E SEU EMPREGO COMO AGLOMERANTE E AGREGADO**. São Paulo: Instituto de Pesquisas tecnológicas.

CINCOTTO, M. A.; JOHN, V. M. 1990. **CIMENTO ALTERNATIVO À BASE DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO**. Encarte Técnico IPT/PINI nº 09.

SENÇO, W., 2001. **MANUAL DE TÉCNICAS DE PAVIMENTAÇÃO**. São Paulo: Pini – V. 02.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994. **DNER 181/94 – SOLOS ESTABILIZADOS COM CINZA VOLANTE E CAL HIDRATADA – DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL**.7p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994. **DNER 201/94 - SOLO-CIMENTO – COMPRESSÃO AXIAL DE CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS**.4p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994. **DNER 202/94 - SOLO-CIMENTO – MOLDAGEM E CURA DE CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS**.7p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994. **DNER 203/94 – SOLO-CIMENTO – DETERMINAÇÃO DA DURABILIDADE ATRAVÉS DA PERDA DE MASSA POR MOLHAGEM E SECAGEM**. 4p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994. **DNER 260/94 – ESCÓRIA DE ALTO FORNO PARA PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**. 4p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1990. **DNER 261/90 – ESCÓRIA DE ALTO FORNO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**. 3p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 2001. **SISTEMA DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS**. 12p.

- FERRAZ, R. L., 1994. **CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS PARA FINS RODOVIÁRIOS E HABITACIONAIS**. Viçosa: UFV. 180p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa.
- GASTALDINI, A. L. G., 1989. **INFLUÊNCIA DA FINURA E DA PORCENTAGEM DE ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO NA ESTRUTURA DAS PASTAS DE CIMENTO PORTLAND DE ALTO FORNO**. São Paulo: USP. 185p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da USP.
- GEYER, R. M. T.; MOLIN, D. C. C. D.; VILELA, A. C. F., 1995. **CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÕES DAS ESCÓRIAS SIDERÚRGICAS NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL**. V Encontro Regional sobre Meio Ambiente na Indústria Siderúrgica e Seminário sobre Gestão Ambiental na Siderúrgica. Vitória-ES.
- HAGA, N.; KONNO, M.; MIZAGUCHI, I.; OHKAWA, Y.; KAWAMOTO, T., 1981. **UTILIZATION OF BLAST FURNACE AND STEEL SLAGS IN ROAD CONSTRUCTION**. Nippon Steel Technical Report. Japan.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA-IBS (G T ESCÓRIAS), 1997. **CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS SIDERÚRGICOS**.
- JOHN V. M.; CINCOTTO, M. A.; AGOPYAN, V., 1995. **NOVOS MERCADOS PARA AS ESCÓRIAS DE ALTO FORNO**. V Encontro Regional sobre Meio Ambiente na Indústria Siderúrgica. Vitória-ES.
- JOHN, V. M., 1995. **CIMENTOS DE ESCÓRIA ATIVADA COM SILICATOS DE SÓDIO**. São Paulo: USP. 117p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- LIMA, D. C. de; BUENO, B. de S.; SILVA, C. H. de C., 1993. **ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS II. TÉCNICAS E APLICAÇÕES A SOLOS DA MICROREGIÃO DE VIÇOSA**. Universidade Federal de Viçosa: Imprensa Universitária. 32p.
- LIMA, L. A., 1999. **HORMIGONES COM ESCORIAS DE HORNO ELÉCTRICO COMO ÁRIDOS: PROPIEDADES, DURABILIDADE Y COMPORTAMIENTO**

AMBIENTAL. Tesis Doctoral. E. T. S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, UPC. Barcelona, Espanha.

MARQUES, J. C., 1994. **ESCÓRIA DE ALTO FORNO: ESTUDO VISANDO SEU EMPREGO NO PREPARO DE ARGAMASSAS E CONCRETOS.** São Paulo: USP. 175p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

MENDONÇA, A. A., 1998. **CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE MISTURAS SOLO-CAL.** Viçosa: UFV. 109p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa.

REGOURD, M.; THOMASSIN, J. H.; BAILLIF, P.; TOURAY, J. C., 1983. **BLAST-FURNACE SLAG HYDRATION. SURFACE ANALYSIS.** Cement and Concrete Research, vol. 13.

SILVA, E.; FLORINDO, M. C.; ALMEIDA, C. de, 1991. **ESTUDO E AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO PODER AGLOMERANTE DA ESCÓRIA DE ALTO-FORNO GRANULADA.** Encarte Técnico IPT/PINI nº 20 e 21.

TRINDADE, T. P., 2003. **CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE MISTURAS SOLO-RBI GRADE 81 PARA EMPREGO EM ESTRADAS E GEOTECNIA AMBIENTAL.** Viçosa: UFV. Dissertação em curso (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa.

WILD, S.; KINUTHIA, J. M.; JONES, G. I.; HIGGINS, D. D., 1998. **EFFECTS OF PARTIAL SUBSTITUTION OF LIME WITH GROUND GRANULATED BLAST FURNACE SLAG (GGBS) ON THE STRENGTH PROPERTIES OF LIME-STABILISED SULPHATE-BEARING CLAY SOILS.** Engineering Geology, 51.