



**Correção de teor de umidade em solos para
terraplenagem com adição de cal viva e pó de
pedra granítica**

Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

Márcio Silvino Iglesias Melo

Leiria, novembro de 2020



**Correção de teor de umidade em solos para
terraplenagem com adição de cal viva e pó de
pedra granítica**

Mestrado em Engenharia Civil – Construções Cívicas

Márcio Silvino Iglesias Melo

Dissertação realizada sob a orientação do Professor Doutor João Pedro Cruz da Silva e da Professora Doutora Anabela Quintela Nunes Veiga.

Leiria, novembro de 2020

Originalidade e Direitos de Autor

A presente dissertação é original, elaborada unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para a/o elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual o mesmo foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Civil – Construções Cívicas, no ano letivo 2019/2020, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

Agradecimentos

Não é possível iniciar este trabalho sem antes agradecer pela oportunidade de realizar este importante curso tão engrandecedor na minha vida profissional.

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais por tudo que fizeram e ainda fazem por mim; por toda ajuda e incentivo que me deram; pelo carinho atribuído; pela saudade compartilhada. Agradeço ao meu pai, Marcelo Iglesias, além de tudo, por diversos ensinamentos da engenharia civil e pelo exemplo de vida que me deu. À minha mãe, Maeve Márcia, por todo cuidado proporcionado e amor de mãe.

Para minha esposa, Lívia Falcão, quero deixar um “obrigado” especial por toda paciência, companheirismo e força de vontade para superar momentos difíceis e complicados em nossas vidas. Foram esses momentos que nos uniram cada vez mais.

Agradeço aos meus professores orientadores neste trabalho, Professor Doutor João Pedro Cruz da Silva e Professora Doutora Anabela Quintela Nunes Veiga, por todos os ensinamentos dentro e fora da sala de aula e por todo o acompanhamento e tempo disponibilizado na orientação deste trabalho. Para a Eng^a. Vânia Cristina Vala Marques, meu mais sincero agradecimento por todo o acompanhamento nos ensaios laboratoriais e auxílio fornecido.

Por fim, quero agradecer a todos que de uma forma ou de outra contribuíram bastante para este momento. Agradeço a minhas irmãs - Marília e Marcela -, a todos os meus amigos, a todos os professores que tive durante este curso e também àqueles que tive anteriormente ao longo da vida acadêmica e profissional, e, principalmente, a Deus por todas as bênçãos.

Resumo

Esta dissertação de mestrado tem o intuito de analisar a influência da incorporação de pó de pedra granítica e cal viva em solo considerado saturado para correção do teor de umidade e comparação com a umidade ótima de compactação. Partiu-se do princípio que o solo estará compactado em campo – para tal, o solo deverá apresentar características coerentes com as normas técnicas pertinentes para utilização em obras de terraplenagem – e chuvas posteriores elevaram o teor de umidade presente no solo, inviabilizando a execução continuada dos serviços de terraplenagem. Buscou-se, através da mistura de materiais, a correção do teor de umidade do solo para continuidade imediata dos trabalhos, sem a necessidade de espera para redução natural da umidade do solo.

Foram analisadas as características iniciais da amostra de solo coletada para compatibilização com normas técnicas, determinando, através de metodologia concebida, o teor de umidade na qual o solo estaria com umidade significativamente alta após a ocorrência de chuvas e partiu-se para a incorporação dos materiais. Com o solo dotado de elevado teor de umidade, foram então adicionados o pó de pedra granítica e cal viva em diferentes proporções para análise da umidade. Complementarmente, foram gerados gráficos com a correlação entre a redução do teor de umidade com o percentual de material adicionado ao solo.

Ao final, foram novamente determinadas as propriedades físicas e o comportamento mecânico do solo após a mistura com os materiais utilizados para nova análise e comprovação que a adição de novos materiais não comprometem a utilização do solo. No global, houve melhores resultados quanto a correção do teor da umidade com a adição da cal viva em relação ao pó de pedra granítica.

Palavras-chave: umidade, cal viva, pó de pedra granítica.

Abstract

This master's thesis aims to analyze the influence of the incorporation of granite stone powder and quicklime in soil considered saturated to correct the moisture content and compare it with the optimum compaction moisture. It was assumed that the soil will be compacted in the field – for this purpose, the soil must present characteristics consistent with the relevant technical standards for use in earthworks – and subsequent rains increased the moisture content present in the soil, making it impossible to continuously perform the compactation. Through the mixture of materials, sought to correct the soil moisture content for immediate continuity of the work, without the need to wait for natural reduction of soil moisture.

The initial characteristics of the soil sample collected were analyzed for compatibility with technical standards, determining, through the conceived methodology, the moisture content in which the soil would be with significantly high humidity after the occurrence of rains and it was decided to incorporate the materials. With the soil endowed with a high moisture content, granite stone powder and quicklime were added in different proportions for moisture analysis. In addition, graphs were generated with the correlation between the reduction of moisture content and the percentage of material added to the soil.

At the end, the physical properties and the mechanical behavior of the soil were again determined after mixing with the materials used for new analysis and proof that the addition of new materials does not compromise the use of the soil. Overall, there were better results regarding the correction of moisture content with the addition of quicklime in relation to granite stone powder

Keywords: moisture, lime, granitic stone powder

Índice

Originalidade e Direitos de Autor	iii
Agradecimentos	iv
Resumo	v
Abstract	vi
Lista de Figuras	x
Lista de tabelas	xi
Lista de siglas e acrónimos.....	xii
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Metodologia.....	2
1.4. Estrutura da Dissertação	4
2. Revisão Bibliográfica.....	5
2.1. Terraplenagem.....	5
2.1.1. Contextualização histórica.....	5
2.1.2. Definição de terraplenagem.....	7
2.1.3. Classificação dos materiais quanto ao processo de desmonte.....	10
2.2. O solo e suas principais propriedades ligadas a terraplenagem	11
2.2.1. Origem dos solos	11
2.2.2. Propriedades e classificação SUCS e HRB	13
2.2.3. Granulometria.....	13
2.2.4. Limites de Consistência.....	14
2.2.5. Classificação SUCS	16
2.2.6. Classificação HRB ou AASHTO	18
2.2.7. Comparação entre Classificações SUCS e HRB	19
2.2.8. Compactação	21

2.2.9.	Ensaio de Proctor	23
2.2.10.	Compactação em campo.....	24
2.2.11.	Índice de Suporte Califórnia (ISC).....	25
2.2.12.	Controle de qualidade de materiais	26
2.3.	Outros materiais.....	28
2.3.1.	Pó de Pedra.....	29
2.3.2.	Cal	29
3.	Caso de Estudo	31
3.1.	Coleta da amostra.....	32
3.2.	Análise laboratorial da amostra de solo.....	33
3.3.	Procedimento de determinação de umidade saturada.....	38
3.4.	Saturação de solo, incorporação de materiais e verificação da nova umidade	41
3.4.1.	Procedimento de saturação do solo	41
3.4.2.	Incorporação dos materiais.....	42
3.4.3.	Umidade após mistura com pó de pedra granítica	43
3.4.4.	Umidade após mistura com cal viva	44
3.5.	Ensaio de compactação do material enriquecido.....	45
3.5.1.	Ensaio de Compactação do solo com 4% de cal viva	47
3.5.2.	Ensaio de Compatação do solo com 40% de pó de granito	48
3.6.	Caracterização do material enriquecido.....	49
3.6.1.	Caracterização do solo com 4% de cal viva.....	50
3.6.2.	Caracterização do solo com 40% de pó de granito	51
4.	Análise dos resultados.....	52
4.1.	Umidade Ótima e Densidade Máxima.....	52
4.1.1.	Análise do resultado do ensaio de Compatação do solo com adição de 4% de cal viva	52
4.1.2.	Análise do resultado do ensaio de Compatação do solo com adição de 40% de pó de granito.....	56

4.1.3.	Análise das Curvas de Compactação solo, solo com 4% de cal e solo com 40% de pó de granito	59
4.2.	Propriedades físicas do solo após incorporação de cal viva e pó de pedra granítica.....	61
4.3.	CBR e Expansão do solo e após incorporação de cal viva e pó de pedra granítica.....	64
4.3.1.	CBR e Expansão do solo com 4% de cal viva.....	64
4.3.2.	CBR e Expansão do solo com 40% de pó de granito	65
5.	Conclusões	67
5.1.	Redução da Umidade	67
5.2.	Alterações nas propriedades do solo.....	68
5.3.	Sugestões para pesquisas futuras	69
5.4.	Limitações do procedimento em campo	69
6.	Referência Bibliográficas	71
Anexos.....		74
Anexo A		75
Anexo B.....		76

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Via Ostiense, ligando Ostia a Roma. dias atuais. Fonte: Bernucci [et al.] (2008)	6
Figura 2.2 – Terraplenagem mecanizada (motoniveladora e rolo compactador)	9
Figura 2.3 – Horizontes esquemático de solo residual. Fonte: DNIT (2006).....	12
Figura 2.4 – Perfil de solo transportado. Fonte: DNIT (2006).....	13
Figura 2.5 – Limites de consistência do solo. Fonte: Caputo (1988).....	16
Figura 2.6 – Efeito da energia de compactação na h_{ot} e $\gamma_{m\acute{a}x.}$ de um solo. Fonte: CAPUTO (1988)	22
Figura 3.1 – Fluxograma de execução dos ensaios	31
Figura 3.2 – Imagem via satélite de jazida para coleta de solo. Fonte: Google Maps.....	32
Figura 3.3 – Parte de amostra de solo após coleta em processo de secagem ao ar.....	33
Figura 3.4 – Curvas granulométricas do solo original e do solo com mais 10% de areia grossa.	36
Figura 3.5 – Corpo de prova submerso em água.	39
Figura 3.6 – Saturação de amostra de solo. Esq. - Amostra de solo seca em estufa; Centro - Amostra de solo com água adicionada; Dir. – Amostra de solo saturada e homogeneizada.....	42
Figura 3.7 – Incorporação de materiais ao solo saturado. Esq. – Solo saturado + 10% pó de granito; Dir. – Solo saturado + 3% de cal.....	43
Figura 3.8 – Preparação das amostras para realização do ensaio de Proctor.....	47
Figura 3.9 – Curva de compactação do solo com 4% de cal e valores de densidade máxima e umidade ótima	48
Figura 3.10 – Curva de compactação do solo-cal e valores de densidade máxima e umidade ótima	49
Figura 4.1 – Curva de compactação do solo (verde) e do solo com 4% de cal (azul).....	53
Figura 4.2 – Variação da umidade em função do teor de cal na mistura.....	54
Figura 4.3 – Curva de compactação do solo com 4%cal com a projeção de 18,66% de umidade.	55
Figura 4.4 – Curva de compactação do solo (verde) e do solo com 40% de pó de granito (vermelho)	57
Figura 4.5 – Variação da umidade em função do aumento do pó de pedra na mistura	58
Figura 4.6 – Curva de compactação do solo (verde), solo com 40% de pó de granito (vermelho) e solo com 4% cal viva (azul)	60

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Operação de Terraplenagem x Equipamento Utilizado	9
Tabela 2.2 – Classificação quanto ao tamanho das partículas. Fonte: (FDAs, 2011) e ABNT apud (PINTO, 2006), adaptado	14
Tabela 2.3 – Resumo do Sistema Unificado de Classificação. Fonte: CAPUTO (1988)	17
Tabela 2.4 – Tabela de classificação HRB (ou TRB ou AASHTO) de solos. Fonte: DNIT (2006).....	19
Tabela 2.5 – Correlação entre classificação HRB e SUCS. Fonte: DNIT (2006)	20
Tabela 2.6 – Correlação entre classificação SUCS e HRB. Fonte: DNIT (2006)	20
Tabela 2.7 – Correlações e restrições gerais para utilização de solos e materiais em pavimentos Fonte: DNIT (Normas 108/2009-ES; 138/2010-ES; 139/2010-ES e 141/2010-ES), adaptado.....	27
Tabela 2.8 – Parâmetros de composição de cal hidráulica. Fonte: DNIT (2006)	30
Tabela 3.1 – Caracterização de amostra de solo.....	34
Tabela 3.2 – Caracterização de amostra do solo com mais 10% de areia grossa	37
Tabela 3.3 – Teor de umidade de solo saturado	40
Tabela 3.4 – Teor de umidade de solo após mistura com pó de pedra granítica	44
Tabela 3.5 – Teor de umidade de solo após mistura com cal viva	45
Tabela 3.6 - Principais valores de granulometria e limites de consistência para o solo + 4% de cal viva.....	50
Tabela 3.7 – Principais valores da granulometria e limites de consistência para o solo +40% de pó de granito.	51
Tabela 4.1 – Comparação dos parâmetros de caracterização do solo com o solo com 4% cal viva.....	62
Tabela 4.2 – Comparação dos parâmetros de caracterização do solo com o solo com + 40% pó de granito ..	63
Tabela 4.3 – Valores de CBR e Expansão do solo e solo após mistura com cal viva	64
Tabela 4.4 – Evolução dos valores CBR e Expansão	65
Tabela 4.5 – Valores de CBR e Expansão do solo e solo após mistura com pó de pedra granítica.....	65

Lista de siglas e acrónimos

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Official
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBR	California Bearing Ratio (ou Índice de Suporte Califórnia)
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ESTG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
GC	Grau de Compactação
IG	Índice de Grupo
IP	Índice de Plasticidade
IPL	Instituto Politécnico de Leiria
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
ISC	Índice de Suporte Califórnia
HRB	Highway Research Board
LGVC	Laboratório de Geotecnia e Vias de Comunicação
LL	Limite de Liquidez
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LP	Limite de Plasticidade
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
TRB	Transportation Research Board
γ_{campo}	Densidade obtida em campo
γ_{dmax}	Densidade máxima aparente seca

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Os serviços de terraplenagem com objetivo à conformação de terrenos e movimentação de terras são, há muitos séculos, executados pelo homem (RICARDO e CATALANI, 2007). A terraplenagem em si constitui elemento indispensável em inúmeros tipos de obras de obras de engenharia, sejam estas de pequeno, médio ou grande porte. Indispensável em serviços de pavimentação, muitas vezes os serviços de terraplenagem, entre cortes e aterros, confundem-se com os serviços de pavimentação, havendo em alguns casos apenas uma linha teórica de diferenciação.

Entre diversos estudiosos da área, destaca-se Ralph Proctor tendo publicado em seus estudos que ao se aplicar determinada energia de compactação ao solo, a sua massa específica é função da umidade presente no solo (PINTO, 2006). Atualmente, o ensaio de compactação de Proctor é um dos ensaios mais utilizados para controle de qualidade em obras de terraplenagem na garantia do controle de compactação do solo. Tal ensaio estabelece que a densidade máxima aparente seca (γ_{dmax}) de cada tipo de solo compactado depende principalmente de dois fatores: umidade e energia de compactação. A energia de compactação em campo pode ser medida e determinada pelo tipo e pelo número de passadas do equipamento compactador, já a umidade de campo pode sofrer diversos impactos externos, principalmente por conta de chuvas.

Quando da ocorrência de chuvas nos serviços de terraplenagem, o solo irá absorver a água precipitada de tal maneira que poderá inviabilizar a continuidade imediata da terraplenagem. A absorção da água em questão dependerá de diversos fatores, tais quais: permeabilidade do solo, grau de compactação, volume precipitado e intensidade de precipitação, inclinação longitudinal e transversal do aterro, entre outros fatores. Com esta absorção, o solo compactado poderá saturar-se e inviabilizar a continuidade imediata dos serviços. Neste aspecto, alternativas usualmente adotadas em campo são a escarificação do trecho saturado e nova homogeneização com aeração, podendo este processo perdurar por dias dependendo do grau de saturação do solo, e, também, a substituição do material saturado por um novo solo seco (ABRAM e ROCHA, 2009).

Tal necessidade de trabalhar novamente a camada, devido às chuvas posteriores, pode comprometer o sucesso financeiro da obra, estando ligado à dilatação do prazo inicial previsto, aplicação de multas contratuais ou, até mesmo, atraso no início de outras atividades previstas no planejamento original. Com o intuito de mitigar esses efeitos, foi proposto este trabalho acadêmico.

1.2. Objetivos

O objetivo deste trabalho acadêmico é - partindo-se do princípio que o solo estará compactado em campo e, posteriormente, ocorreu uma chuva tal qual elevou consideravelmente o teor de umidade do solo em questão - procurar novas soluções viáveis para a correção da umidade do solo e a continuidade imediata dos serviços minimizando as demoras provocadas pela saturação do solo. Para isso, foram testados alguns procedimentos laboratoriais, conforme mencionado na Metodologia a seguir, com a utilização de pó de pedra granítica e cal viva em solo predominantemente argiloso e elevado teor de umidade, no entanto com enquadramento nas respectivas normas técnicas pertinentes para utilização em serviços de terraplenagem.

Ademais, além da redução do teor de umidade do solo, após a incorporação de novos materiais à mistura, as novas propriedades do solo também serão resumidamente abordadas. Contudo, os novos resultados obtidos, com a possível melhoria da qualidade do solo, não serão utilizados para novo redimensionamento estrutural do pavimento, pois não fazem parte dos objetivos deste trabalho.

1.3. Metodologia

A metodologia proposta iniciou-se com a coleta de amostra de solo e posterior caracterização quanto à granulometria, limites de consistência, classificação através do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e pelo sistema proposto pelo *Highway Research Board* (HRB), ensaio de compactação de Proctor e determinação do CBR e Expansão. Após esta fase, foi proposto um método empírico para determinação saturação parcial do solo, de modo que este contivesse um elevado teor de umidade. A determinação deste teor de umidade ao qual o solo pudesse ser considerado saturado foi de extrema importância para a fase seguinte da pesquisa.

Com o teor de umidade determinado, partiu-se para a incorporação dos materiais secos. O solo foi inicialmente posto em estufa para retirada da umidade higroscópica e, após a retirada, foi adicionada água em quantidade suficiente para saturação do solo. Após o solo saturado, foram incorporados o pó de pedra granítica e a cal viva em diversas proporções em peso, homogeneizado e retiradas algumas amostras para colocação em estufa e determinação da umidade após a incorporação dos materiais. Os resultados foram analisados e plotados em gráficos com linha de tendência de função linear para melhor percepção do efeito da quantidade de material adicionado *versus* teor de umidade da mistura. Novos ensaios de proctor foram realizados para determinação da nova umidade ótima e densidade máxima para a proporção em questão, juntamente com nova caracterização do material através da granulometria, limites de consistência, classificação SUCS e HRB e, por fim, determinado novamente o CBR e a Expansão.

A coleta da amostra de solo para análise foi realizada na cidade de Leiria – Portugal – e os respectivos ensaios laboratoriais realizados no Laboratório de Geotecnia e Vias de Comunicação (LGVC) da Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTG) do Politécnico de Leiria (IPL). Já em relação aos materiais para incorporação ao solo saturado, o pó de pedra utilizado foi o pó de pedra granítica disponibilizado pela empresa Lena Agregados e a cal utilizada foi a cal viva da marca Maxical.

As técnicas e ensaios utilizados neste trabalho seguem prioritariamente as diretrizes técnicas brasileiras, mas não se limitam a tal. Procedimentos laboratoriais e normas técnicas de Portugal, através das Especificações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) foram utilizadas de forma complementar e subsidiárias as normas técnicas brasileiras. Em complemento, algumas premissas de cálculo e metodologias teóricas utilizadas foram necessárias para adequação laboratorial do estudo, tais premissas, quando ocorrerem, serão perfeitamente detalhadas em relação ao procedimento adotado.

No contexto das diretrizes técnicas brasileiras, foram adotados manuais e normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), órgão especializado em pesquisas rodoviárias, normatização e criação de manuais. Ligado ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e ao Ministério da Economia, seus estudos, normas e manuais são referência para obras em todo Brasil, consultados por todas as esferas do governo, sejam federais, estaduais e/ou municipais.

1.4. Estrutura da Dissertação

Este trabalho está organizado em 5 capítulos. O Capítulo número 1 trata da introdução ao tema apresentado. Neste capítulo são trabalhados o enquadramento ao tema em estudo, bem como os objetivos da pesquisa, a metodologia utilizada e, por fim, a estrutura de apresentação do trabalho.

O Capítulo dois é referente à revisão bibliográfica e enquadramento do tema. Será abordada desde a contextualização histórica dos serviços de terraplenagem com explanação de equipamentos utilizados, passando pela origem e formação dos solos até à parte da mecânica dos solos pertinente ao estudo em questão.

O terceiro capítulo segue para a descrição dos procedimentos laboratoriais adotados e ensaios realizados, bem como apresentação dos resultados obtidos nos ensaios. A sequência adotada da metodologia aplicada para caracterização do estudo é disposta através de um fluxograma representativo do caminho seguido para análise da amostra. Contém, ainda, análises preliminares necessárias para o desenvolvimento cronológico das medidas aplicadas ao enquadramento às normas técnicas.

No Capítulo quatro são analisados os resultados obtidos e o tratamento dos dados analisados.

Já o Capítulo cinco, além de ser referente às conclusões obtidas e sugestões para pesquisas futuras, também trata das limitações de execução do procedimento em campo em comparação com o estudo laboratorial realizado. Visto que o presente trabalho foi realizado em ambiente totalmente laboratorial, algumas limitações e adaptações devem ser levadas em consideração para aplicação em campo da presente técnica proposta.

2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão abordados alguns aspectos relativos aos trabalhos de terraplenagem e os fatores da Mecânica dos Solos aplicados a estes serviços. Serão enfatizadas as propriedades do solo relativas às exigências das normas técnicas pertinentes para utilização em serviços de terraplenagem.

2.1. Terraplenagem

2.1.1. Contextualização histórica

Seria inviável introduzir o assunto de terraplenagem sem traçar um paralelo com pavimentação de estradas e afins. Tais serviços são intimamente ligados sendo inviável realizar qualquer pavimentação sem antes efetuar os devidos trabalhos de terraplenagem, sejam estes de corte ou aterro, pois as camadas do pavimento repousam sobre subleito da plataforma estradal (BERNUCCI [et al.], 2008).

As estradas pavimentadas mais antigas não se destinavam a veículos com rodas, mas a trenós para o transporte de cargas e terão sido construídas no Antigo Oriente. Para a construção das pirâmides no Egito (2600-2400 a.C.), foram construídas vias com lajões justapostos em base com boa capacidade de suporte. O atrito era mitigado com umedecimento por meio de água, azeite ou musgo molhado (Saunier (1936) apud (BERNUCCI [et al.], 2008).

Além das estradas egípcias, uma outra estrada que merece reconhecimento histórico é a estrada de Semíramis, no antigo império babilônio. Atualmente conhecida pela região do Oriente Médio, a estrada que se situava na região da Mesopotâmia, entre os rios Tigres e Eufrates, foi feita nivelando as proeminências e aterrando depressões, com o fim de levantar um monumento imortal, que até hoje é chamado de “A Estrada de Semíramis” (ABRAM e ROCHA, 2009). Ainda na Mesopotâmia, (RICARDO e CATALANI, 2007) também destacam os serviços movimentação de terras para a construção de canais de irrigação entre os rios.

Dentre outras estradas históricas, destaca-se também a Via Ápia construída durante o império romano. O início de sua construção data do ano de 312 a.c. e o objetivo era ligar Roma a Cápua (195 km), facilitando a movimentação do exército romano chegando rapidamente às áreas de Campania e Samnium. O traçado da via atravessa uma zona

pantanosas que implicou a construção de um aterro, com cerca de 28 km de extensão, sobre estrados de prancha de madeira como auxílio (BERNUCCI [et al.], 2008). Outras vias urbanas foram criadas na Roma antiga, entre elas a Via Ostiense (Figura 2.1) que ligava Óstia a Roma e a via urbana em Pompéia, no sul da Itália. Ambas pavimentadas com pedras intertravadas para circulação de veículos rodantes à época.



Figura 2.1 – Via Ostiense, ligando Ostia a Roma. dias atuais. Fonte: Bernucci [et al.] (2008)

Embora Chevallier (1976) apud (BERNUCCI [et al.], 2008), referia que não havia uma construção padrão para as estradas romanas, encontram-se características comuns entre elas, de sorte que BALBO (2007) cita: “*Os construtores da época eram obrigados a tirar o melhor proveito possível dos materiais disponíveis nas regiões próximas. A necessidade de aproveitamento de materiais locais para obras de pavimentação já se tratava, portanto, de um conceito da arquitetura romana*”. Tais conceitos perpetuam épocas e persistem até os dias atuais como bases econômicas para viabilidade e construção de obras de terraplenagem e pavimentação.

Estas obras envolvendo terraplenagens, tratavam-se de movimentações de terras executadas com ferramentas manuais (pá e/ou picareta) ou com auxílio de tração animal. A movimentação manual de terras ainda cruzou vários séculos quando em meados do século

XIX, juntamente com o advento da máquina a vapor durante a Revolução Industrial, surgiram as primeiras tentativas de utilizá-la em equipamentos de terraplenagem.

Com pequenos rendimentos da movimentação manual de terras, tal serviço dependia de mão de obra abundante, gerando dificuldades de recrutamento e administração. A título exemplificativo, conforme explica RICARDO e CATALANI (2007), para se ter uma ideia da quantidade de trabalhadores necessários para a execução braçal do movimento de terras, estima-se que para uma produtividade de 50 m³/h de escavação, seriam necessários pelo menos 100 homens. A mesma tarefa hoje pode ser executada por uma única escavadeira, operada apenas por um homem.

2.1.2. Definição de terraplenagem

De um modo geral, a terraplenagem pode ser entendida como o conjunto de operações necessárias para movimentação de terras dos locais em excesso para os locais necessitados, com o intuito de implantação de algum projeto ou serviço.

Segundo ABRAM e ROCHA (2009), “*terraplenagem é a arte de se mudar a configuração do terreno*”. O solo, em seu estado natural, opõe resistência para ser removido e a textura de suas partículas modifica-se no curso de seu deslocamento. Estas mudanças de textura e comportamento variam conforme as propriedades de cada material, porém, em terraplenagem, ainda segundo ABRAM e ROCHA (2009), o aspecto mais importante não é caracterizado pela natureza do material, mas sim, pelo meio mais simples e menos oneroso para escavá-lo, transportá-lo e compactá-lo.

A utilização de equipamentos mecanizados na execução dos serviços de terraplenagem trouxe, além de alta produtividade, uma redução nos custos de execução, justamente devido ao incremento de produção adicional e a redução da mão de obra necessária. Contudo, conforme esclarece ABRAM e ROCHA (2009), as importantes obras de terraplenagem dos dias atuais, por mais colossais que pareçam, certamente serão consideradas modestas pelas gerações futuras. ABRAM e ROCHA (2009) fazem referência que máquinas maiores e mais eficientes, novas tecnologias e métodos irão possibilitar a transformação da superfície terrestre com mais facilidade, de acordo com as necessidades e planos cada vez mais audaciosos.

No contexto da terraplenagem são descritas as operações básicas, ou o ciclo de operação, comuns a todos os serviços e com equipamentos específicos, subdivididas em cinco grupos de operações:

- Escavação: corte praticado na superfície do solo para conformação de faixa de terraplenagem;
- Carga do material escavado: retirada do solo proveniente da escavação e colocação em equipamentos de transporte;
- Transporte e descarga: movimentação do solo através de equipamentos específicos com posterior colocação do solo no local desejado;
- Espalhamento: distribuição do solo ao longo da plataforma desejada;
- Compactação: redução do volume de vazios do solo através da aplicação de energias fornecidas por equipamentos diversos.

Entender um pouco sobre os equipamentos e as operações básicas de terraplenagem, é fundamental para perceber sobre o processo de execução dos serviços, bem como avaliar os custos envolvidos. O maquinário envolvido, apesar da alta produtividade, possui custos de aquisição e manutenção elevados, sendo necessário o correto dimensionamento dos equipamentos, inclusive com relação ao tipo de solo local. Mais adiante, ainda neste capítulo, será abordada uma classificação de solo quanto ao equipamento utilizado nas operações de corte.

Segundo as especificações técnicas do DNIT relativas a execução de aterros (DNIT 108/2009-ES), os equipamentos utilizados para execução da terraplenagem podem ser tratores de lâmina, escavo-transportadores, moto-escavo-transportadores, escavo-carregadores, caminhões basculantes, motoniveladoras, rolos lisos, de pneus e pés e carneiro, estáticos ou vibratórios. Tal exigência irá depender do tipo de operação a ser executada.

Na Figura 2.2 é mostrada uma operação da terraplenagem com a utilização da motoniveladora no espalhamento do material e rolo compactador tipo pé de carneiro na compactação do terreno.



Figura 2.2 – Terraplenagem mecanizada (motoniveladora e rolo compactador)

Um mesmo equipamento pode efetuar mais de um tipo de serviço, a exemplo de tratores de esteiras com lâmina conseguem escavar, transportar e espalhar o material de aterro. Na Tabela 2.1 é apresentada uma correlação não exaustiva entre a operação básica realizada e o tipo de equipamento a utilizar.

Tabela 2.1 – Operação de Terraplenagem x Equipamento Utilizado

Operação Básica	Equipamentos
Escavação	Escavadeira hidráulica Retro escavadeira Trator de esteira com lâmina Motoscraper
Carga do material	Escavadeira hidráulica Retro escavadeira Pá carregadeira Motoscraper
Transporte e descarga	Motoscraper Caminhão basculante Trator de esteira com lâmina
Espalhamento	Motoscraper Trator de esteira com lâmina Motoniveladora
Compactação	Rolo liso Rolo pé de carneiro Rolo de pneus

2.1.3. Classificação dos materiais quanto ao processo de desmonte

Durante os processos de terraplenagem, constata-se que pouco auxílio pode ser obtido através das classificações geológicas ou da mecânica dos solos para a classificação dos materiais, pois estes são estudados de um ponto de vista diferente. Diante disto, o principal critério quanto a classificação é o grau de dificuldade, ou resistência, que os materiais oferecem ao desmonte (RICARDO e CATALANI, 2007).

Diante do exposto e, conforme aponta o DNIT (DNIT 106/2009-ES), transcreve-se a classificação de solos e definição da norma técnica:

- Material de 1ª Categoria: compreende os solos em geral, residuais ou sedimentares, seixos rolados ou não, com diâmetro máximo inferior a 0,15 m, qualquer que seja o teor de umidade apresentado. O processo de extração é compatível com a utilização de “Dozer” ou “Scraper” rebocado ou motorizado;
- Material de 2ª Categoria: compreende os solos de resistência ao desmonte mecânico inferior à da rocha não alterada, cuja extração se processe por combinação de métodos que obriguem a utilização do maior equipamento de escarificação exigido contratualmente; a extração eventualmente pode envolver o uso de explosivos ou processo manual adequado. Estão incluídos nesta categoria os blocos de rocha de volume inferior a 2 m³ e os matacões ou pedras de diâmetro médio compreendido entre 0,15m e 1,00 m;
- Material de 3ª categoria: compreende os materiais com resistência ao desmonte mecânico equivalente à rocha não alterada e blocos de rocha com diâmetro médio superior a 1,00 m, ou de volume igual ou superior a 2 m³, cuja extração e redução, a fim de possibilitar o carregamento, se processem com o emprego contínuo de explosivos.

ABRAM e ROCHA (2009) trazem uma definição um pouco mais simples e intuitiva sobre a matéria:

- Material 1ª Categoria - os solos que podem ser escavados facilmente pelas lâminas das máquinas;
- Material 2ª Categoria - são os materiais que para serem removidos necessitam de escarificação prévia;

- Material 3ª Categoria - materiais que para serem escavados é necessária a utilização de explosivos.

2.2. O solo e suas principais propriedades ligadas a terraplenagem

2.2.1. Origem dos solos

A palavra “solo” tem origem do latim “*solum*” e refere-se ao material não consolidado da crosta terrestre que pode ser facilmente desagregado pela ação da água, distinguindo-se da rocha a qual é um material consolidado (DNIT, 2006). Em geral o solo é formado pelo intemperismo das rochas, estas últimas conferem, em princípio, as propriedades físicas dos solos resultantes através da sua respectiva composição mineralógica (FDas, 2011).

Desta forma, a definição de “solo” não é simples, pois o solo pode ser definido de diversas maneiras distintas de acordo com a categoria de classificação e a área de estudo pretendida. Portanto, a definição certamente irá variar a depender da necessidade, seja ela para fins agropecuários, geológicos, hidrológicos e para a engenharia civil.

Do ponto de vista geológico, os Serviços Geológicos do Brasil dizem que os solos são produtos friáveis e móveis formados pelo intemperismo de rochas existentes na superfície da Terra e que não são imediatamente removidos pela água, vento ou gelo. Os solos evoluem, sofrendo uma reorganização estrutural num processo conhecido por pedogênese (BRANCO, 2014). Para a Pedologia, o solo pode ser dito como um material natural, em geral não consolidado, composto por minerais e matérias orgânicas separados por horizontes distintos quanto a morfologia, constituição e propriedades (BALBO, 2007).

Já quanto à engenharia rodoviária, conforme definição do DNIT (2006), solo pode ser classificado como “*todo o tipo de material orgânico ou inorgânico, inconsolidado ou parcialmente cimentado, encontrado na superfície da terra. Em outras palavras, considera-se como solo qualquer material que possa ser escavado com pá, picareta, escavadeiras, etc., sem necessidade de explosivos*”.

FDas (2011), por sua vez, define o solo para fins de engenharia como um agregado não cimentado de grãos minerais e matéria orgânica decomposta (partículas sólidas), com líquido e gás preenchendo os espaços vazios existentes entre as partículas sólidas.

Conforme a rocha de origem do solo e seus minerais constituintes, as propriedades do solo irão variar e também sua classificação. Quanto à sua formação, o solo pode ser dividido em dois grandes grupos: solos residuais e solos transportados.

O solo é considerado residual quando os produtos da rocha intemperizada ainda permanecem no local em que se deu a formação, ao passo que o solo transportado é aquele cujos produtos de sua formação foram transportados por um agente qualquer (gravidade, água, vento, etc.), para um local diferente ao da transformação (DNIT, 2006).

Os solos residuais para continuarem em seus respectivos locais de formação, é necessário que um não haja um agente transportador, ou um eventual agente de transporte do solo ocorra em uma velocidade menor do que a taxa de decomposição da rocha. Essa taxa de decomposição irá depender de fatores como a temperatura, precipitação e vegetação. Nas regiões tropicais as condições são mais favoráveis para taxas elevadas de alteração e isso explica o frequente aparecimento de solos residuais nessas regiões (MACHADO & MACHADO, 2002). Este tipo de solo é um material que pode não mostra nenhuma relação com a rocha que lhe deu origem e que poderia ser formado a partir de qualquer tipo de rocha, além de não haver uma linha de divisão direta entre o solo e a rocha, sendo uma passagem gradativa entre as camadas (DNIT, 2006). Na Figura 2.3 apresenta-se de forma esquemática um perfil de um solo residual.

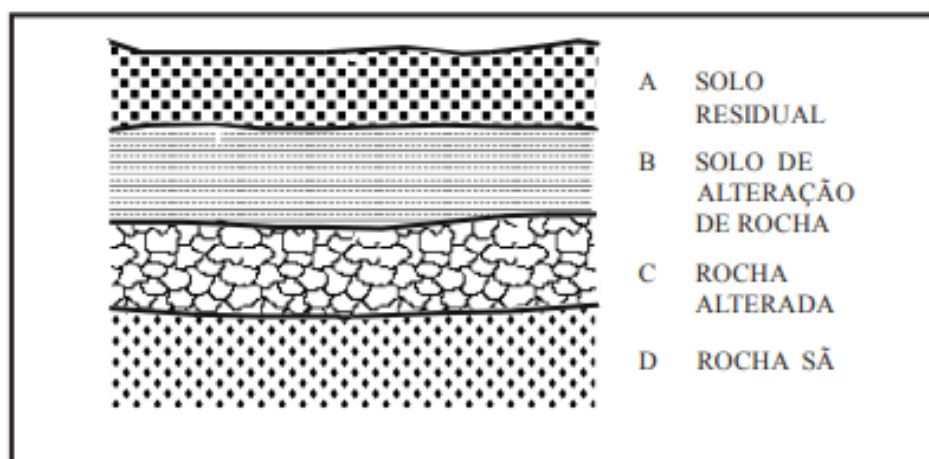


Figura 2.3 – Horizontes esquemático de solo residual. Fonte: DNIT (2006)

Os solos transportados, a seu turno, representam os solos que depois de formados sofrem transporte, originados por algum agente de transporte que os conduzem até o seu local atual. A sua classificação é feita de acordo com o agente transportador: solos coluvionares

(gravidade), aluvionares (água), eólicos (vento), glaciais (geleiras), lacustres (lagos de água parada) e marinhos (ação dos oceanos) (FDAs, 2011). Em geral formam depósitos menos consolidados e fofos que os residuais, além de possuírem profundidades variáveis. Ademais, os solos residuais tendem a ser mais homogêneos que os solos transportados no modo de ocorrência, principalmente se a rocha matriz for homogênea (DNIT, 2006). Na Figura 2.4 ilustra-se o perfil de um solo que sofreu transporte e onde se pode ver além de variabilidade litológica na vertical, a variabilidade litológica lateral.

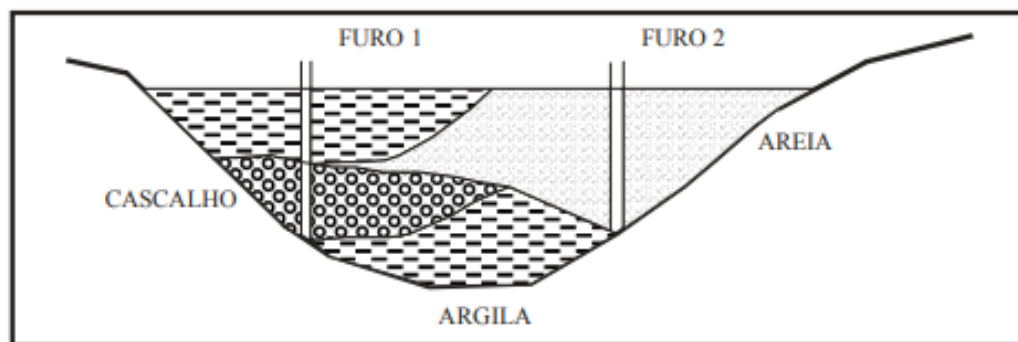


Figura 2.4 – Perfil de solo transportado. Fonte: DNIT (2006)

2.2.2. Propriedades e classificação SUCS e HRB

De uma maneira resumida, os solos utilizados em obras de pavimentação e terraplenagem são geralmente classificados apenas relativamente a algumas das suas principais propriedades. Neste trabalho, não serão abordadas todas as propriedades físico-químicas do solo, e sim, será direcionada especial atenção especial para propriedades pertinentes aos trabalhos de terraplenagem e sua correlação com o desempenho do solo.

2.2.3. Granulometria

Quanto à granulometria, o solo pode ser definido de acordo com o tamanho de suas partículas. Em seus estudos, PINTO (2006) trata sobre a enorme diversidade do tamanho das partículas. Diz o autor que no primeiro contato com o material simplesmente não se percebe a diferença do tamanho das partículas, porque todas parecem muito pequenas perante os materiais com os quais se está acostumado a lidar, porém algumas são consideravelmente menores que outras. Neste ponto, ainda segundo o mesmo autor, existem grãos de areia com dimensões de 1 a 2 mm, e existem partículas de argila com espessuras da ordem de 10

Angströms (0,000001 mm). De tal modo que, se uma partícula de argila fosse ampliada de modo a possuir o tamanho de uma folha de papel, o grão de areia teria diâmetro da ordem de 100 a 200 m.

A Tabela 2.2 mostra a classificação do tipo de solo de acordo com o tamanho da partícula constituinte. Importante salientar que, para descrever o solo pelo tamanho das partículas, diversas organizações desenvolveram classificações de tamanhos.

Tabela 2.2 – Classificação quanto ao tamanho das partículas. Fonte: (FDAs, 2011) e ABNT apud (PINTO, 2006), adaptado

Nome da Organização	Tamanho do grão (mm)			
	Pedregulho	Areia	Silte	Argila
MIT - Instituto de Tecnologia de Massachusetts	> 2	2 - 0,06	0,06 - 0,002	< 0,002
USDA - Departamento de Agricultura dos Estados Unidos	> 2	2 - 0,05	0,05 - 0,002	< 0,002
AASHTO - Associação Americana de Rodovias Estaduais e Autoridades de Transporte	76,2 - 2	2 - 0,075	0,075 - 0,002	< 0,002
Sistema Unificado de Classificação de Solos - Corpo de Engenharia do Exército dos Estados Unidos, Bureau de Reclamações dos Estados Unidos e Sociedade Americana para Testes e Materiais (ASTM)	76,2 - 4,75	4,75 - 0,075	Grãos Finos (por exemplo, siltes e argilas) < 0,075	
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas	76 - 4,8	4,8 - 0,05	0,05 - 0,005	< 0,005

Deste modo, a classificação quanto ao tamanho das partículas normalmente é realizada distinguindo-as em pedregulho, areia, silte e argila. A determinação do tamanho das partículas através da análise granulométrica é feita basicamente através de dois métodos: Ensaio de Peneiramento, para partículas com diâmetro até 0,075 mm, e Ensaio de Sedimentação, para as partículas com diâmetros menores que 0,075 mm.

No Brasil, o ensaio para análise granulométrica é definido pelo ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 7181:2016 Versão Corrigida 2:2018. Ademais, o DNIT recepcionou a norma do extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), através do procedimento DNER-ME 080/94 – Solos – Análise Granulométrica por Peneiramento, para análise granulométrica de solos para pavimentação rodoviária.

2.2.4. Limites de Consistência

Apesar de fornecer uma excelente base para caracterização de solos, a granulometria por si só é insuficiente para a caracterização de solos que possuam uma certa percentagem de fração fina, dado que suas propriedades plásticas dependem, além do teor de umidade, da composição mineralógica e da forma das partículas (CAPUTO, 1988). Neste sentido, quanto

menor o tamanho das partículas constituintes do solo, maior será sua superfície específica e maior será sua plasticidade (MACHADO & MACHADO, 2002).

PINTO (2006) refere que o comportamento das partículas com superfícies específicas tão distintas perante a água é muito diferenciado. Por outro lado, as partículas de minerais argila diferem acentuadamente pela estrutura mineralógica, bem como pelos cátions adsorvidos. Desta forma, para a mesma percentagem de fração argilosa, o solo pode ter comportamento muito diferente a depender das características dos minerais presentes. Essa variação no comportamento e propriedades do solo foi objeto de diversos estudos para análise do comportamento do solo em função do teor de umidade.

No início do século XX, o cientista sueco Attenberg desenvolveu um método para descrição do comportamento dos solos com teores de umidade variados, no qual, a depender do teor de água presente, o solo poderá ter comportamento sólido, semi-sólido, plástico ou líquido (FDAs, 2011). A partir desses estudos, surge a determinação dos limites de consistência do solo.

Os limites de consistências são caracterizados por serem teores de umidade os quais constituem verdadeiras linhas divisórias para os diferentes estados de consistência do solo. São eles:

- Limite de liquidez (LL): teor de umidade no qual o solo passa do estado líquido para o estado plástico;
- Limite de plasticidade (LP): teor de umidade no qual o solo passa do estado plástico para o semi-sólido;
- Limite de contração: teor de umidade no qual o solo passa do estado semi-sólido para sólido.

Os dois primeiros índices, propostos pelo cientista Attenberg, também recebem o nome de limites de Attenberg. Já o limite de contração, proposto pelo cientista Haines (CAPUTO, 1988), é pouco utilizado para fins rodoviários.

Sobre os limites de consistência e as propriedades do solo, CAPUTO (1988) afirma: *“Embora fundamentadas em extensas investigações experimentais, as definições desses limites são convencionais. Ainda assim, eles permitem, de uma maneira simples e rápida, dar uma ideia bastante clara do tipo de solo e suas propriedades. Por isso mesmo constituem, hoje, determinações rotineiras nos laboratórios de Mecânica dos Solos”*. A

Figura 2.5 mostra esquematicamente os estados físicos do solo em função do teor de umidade presente na amostra.

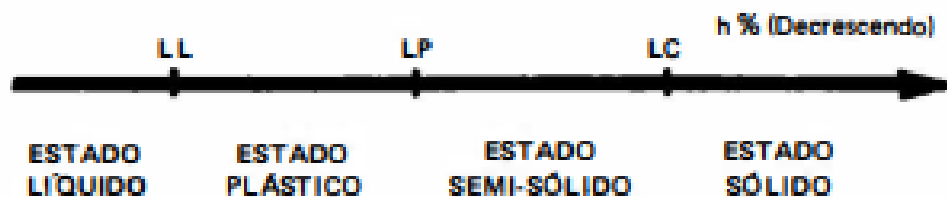


Figura 2.5 – Limites de consistência do solo. Fonte: Caputo (1988)

No seguimento dos limites de consistência, surge o Índice de Plasticidade (IP). O IP corresponde a diferença numérica entre o LL e o LP e indica a faixa de valores que o solo se apresenta no estado plástico (PINTO, 2006).

Para a determinação dos limites de consistência de um solo, as referências normativas utilizadas no Brasil são a NBR 6459:2017 para determinação do Limite de Liquidez e a NBR 7180:2016 para determinação do Limite de Plasticidade, ambas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Ainda assim, há as especificações para Métodos de Ensaio do antigo DNER (atual DNIT) nº 122/94 e 082/94 para determinação do LL e o LP, respectivamente.

É com base na análise granulométrica e na determinação dos limites de consistência que os solos são comumente classificados e definidas suas propriedades e aplicações na engenharia geotécnica. Neste aspecto, os dois principais sistemas de classificação, que se apresentam de seguida, são: O Sistema Unificado de Classificação (SUCS) – *Unified Classification System (U.C.S)* - e a Classificação segundo a H.R.B. – *Highway Research Board* -, também chamada de Classificação AASHTO - *American Association of State Highway and Transportation Official*.

2.2.5. Classificação SUCS

Em linhas gerais, os solos classificados pelo sistema de classificação SUCS, dividem-se em dois grupos (FDas, 2011):

- Solos grossos: cuja porção do material que passa pela peneira nº 200 é menor que 50%. Os solos desse grupo possuem seus símbolos iniciando pelas letras G (Gravel) ou S (Sand), representando pedregulhos e areias respectivamente;
- Solos finos: cujo porção do material que passa pela peneira nº 200 é maior ou igual a 50%. Os símbolos desses solos iniciam-se com as letras M (Mud), C (Clay) ou O (Organic) e representam respectivamente silte inorgânico, argila inorgânica e silte ou argila orgânico.

A classificação do conjunto de solo é feita através de duas letras, das quais a primeira representa o tipo principal e a segunda corresponde a dados complementares e secundários do solo. Deste modo, a classificação é feita de duas maneiras distintas conforme se esteja trabalhando com solos grossos ou finos. Na Tabela 2.3 apresenta-se resumidamente os diferentes tipos de solo e a respectiva simbologia à luz do sistema de classificação SUCS.

Tabela 2.3 – Resumo do Sistema Unificado de Classificação. Fonte: CAPUTO (1988)

Classificação geral	Tipos principais	Símbolos
SOLOS GROSSOS (Menos que 50% passando na # 200)	Pedregulhos ou solos pedregulhosos	<i>GW, GP, GM e GC</i>
	Areias ou solos arenosos	<i>SW, SP, SM e SC</i>
SOLOS FINOS (Mais que 50% passando na # 200)	Siltosos ou argilosos	Baixa compressibilidade ($LL < 50$) <i>ML, CL e OL</i>
		Alta compressibilidade ($LL > 50$) <i>MH, CH e OH</i>
SOLOS ALTAMENTE ORGÂNICOS	Turfas	<i>Pt</i>

Há de se salientar que existe ainda a classificação com dois símbolos. O sistema de classificação propõe que quando o solo apresente duas características secundárias, isto é, quando a fração grosseira estiver compreendido em certos limites, a classificação seja feita de forma intermediária com dois símbolos (PINTO, 2006).

2.2.6. Classificação HRB ou AASHTO

A classificação HRB ou AASHTO foi originalmente proposta nos Estados Unidos em 1945 pelo *Highway Research Board* (H.R.B.). Em 1974 o *Highway Research Board* tornou-se o *Transportation Research Board* (TRB).

Esta classificação também se baseia na análise granulométrica e nos limites de consistência do solo. O solo é subdividido em grupos e subgrupos conforme tais propriedades e o processo de classificação é iniciado pela análise da percentagem de material que passa na peneira nº 200.

São considerados solos grossos os que possuem menos de 35% passando nesta peneira, e não 50% como na SUCS (PINTO, 2006). No caso dos materiais silto-argilosos a classificação tem por base os valores do LP e do IP.

Para determinação do grupo do solo é utilizado um processo de eliminação da esquerda para a direita no quadro de classificação (Tabela 2.4). O primeiro grupo a partir da esquerda, com o qual os valores do solo ensaiado coincidir, será a classificação correta (DNIT, 2006). Na Tabela 2.4 apresenta-se a classificação HRB ou AASHTO.

Para complemento da leitura da Tabela 2.4, um ponto que merece uma rápida explanação é o Índice de Grupo (IG). A determinação e cálculo do IG é baseada no percentual da fração fina do solo e através dos limites de consistência, com valor podendo ser definido por meio de aplicação direta de fórmula empírica. O IG é representado por um número inteiro – variando de 0 até 20 – definidor da “capacidade de suportar cargas” do terreno de fundação de um pavimento. Os seus valores extremos representam solos ótimos (IG = 0) e solos péssimos (IG = 20), estes últimos que devem ser evitados (CAPUTO, 1988).

Tabela 2.4 – Tabela de classificação HRB (ou TRB ou AASHTO) de solos. Fonte: DNIT (2006)

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	30 máx.	51 mín.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

* O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

2.2.7. Comparação entre Classificações SUCS e HRB

Conforme orienta o DNIT (2006), a classificação SUCS é mais indicada para uma melhor descrição do solo para finalidade gerais, enquanto a classificação HRB melhor representa a as características de suporte dos distintos materiais. Diante disto, são apresentadas duas tabelas distintas com a correlação entre as duas principais categorias de classificação do solo para fins de pavimentação (Tabela 2.5 e Tabela 2.6), abordando, entre as classificações, o enquadramento do solo na devida classificação da forma “mais provável”, “possível” e “possível, mas não provável”.

Importante salientar que as duas tabelas buscam apresentar a mesma correlação entre as classificações, porém com métodos distintos de abordagem. A Tabela 2.5 busca correlacionar as duas classificações partindo-se da classificação HRB, enquanto a Tabela 2.6 faz o caminho inverso, ou seja, partindo-se da classificação SUCS para a HRB. Tal abordagem possui função meramente didática e explicativa, pois a depender da necessidade e do ponto de partida da pesquisa, seja para fins de classificação do solo para finalidades gerais ou para pavimentação, têm-se melhor aplicação de uma ou outra tabela.

Tabela 2.5 – Correlação entre classificação HRB e SUCS. Fonte: DNIT (2006)

Classificação TRB	Classificação Unificada		
	Mais provável	Possível	Possível, mas improvável
A-1-a	GW - GP	SW - SP	GM - SM
A-1-b	SW - SP - GM - SM	GP	—
A-3	SP	—	SW - GP
A-2-4	GM - SM	GC - SC	GW - GP - SW - SP
A-2-5	GM - SM	—	GW - GP - SW - SP
A-2-6	GC - SC	GM - SM	GW - GP - SW - SP
A-2-7	GM - GC - SM - SC	—	GW - GP - SW - SP
A-4	ML - OL	CL - SM - SC	GM - GC
A-5	OH - MH - ML - OL	—	SM - GM
A-6	CL	ML - OL - SC	GC - SM - GC - SC
A-7-5	OH - MH	ML - OL - CH	GM - SM - GC - SC
A-7-6	CH - CL	ML - OL - SC	OH - MH - GC - GM - SM

Tabela 2.6 – Correlação entre classificação SUCS e HRB. Fonte: DNIT (2006)

SUCS	TRB		
	Mais provável	Possível	Possível, mas improvável
GW	A-1-a		A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
GP	A-1-a	A-1-b	A-3, A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
GM	A-1-b, A-2-4, A-2-5, A-2-7	A-2-6	A-4, A-5, A-6, A-7, A-7-6, A-1-a
GC	A-2-6, A-2	A-2-4, A-6	A-4, A-7-6, A-7-5
SW	A-1-b	A-1-a	A-3, A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
SP	A-3, A-1-b	A-1-a	A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
SM	A-1-b, A-2-4, A-2-5, A-2-7	A-2-6, A-4, A-5	A-6, A-7-5, A-7-6, A-1-a
SC	A-2-6, A-2-7	A-2-4, A-6, A-4, A-7-6	A-7-5
ML	A-4, A-5	A-6, A-7-5	—
CL	A-6, A-7-6	A-6, A-7-5, A-4	—
OL	A-4, A-5	A-6, A-7-5, A-7-6	—
CH	A-7-6	A-7-5	—
OH	A-7-5, A-5	—	A-7-6
PT	—	—	—

2.2.8. Compactação

A compactação de um solo é o processo que visa reduzir o volume de seus vazios e, assim, aumentar sua resistência, tornando-o mais estável (CAPUTO, 1988). Ou seja, em termos gerais, é a densificação do solo por meio da remoção de ar, o que requer o emprego de energia mecânica (FDas, 2011).

Importante separar, desde já, a compactação do adensamento. Desta forma, conforme aponta PINTO (2006), o adensamento pode ser entendido como o processo de deformação desenvolvido lentamente pela expulsão da água dos vazios do solo, no caso de solos argilosos é um processo demorado devido à baixa permeabilidade das argilas e é especialmente estudado para estudo de recalques de argilas saturadas. Logo, CAPUTO (1988) resume de maneira simples e direta que a “compactação” trata da expulsão do ar no interior dos solos, enquanto o “adensamento”, ou “consolidação”, trata da expulsão da água do solo.

A técnica de compactação foi creditada ao engenheiro americano Ralph Proctor que, em 1933, publicou suas observações sobre a compactação de aterros, mostrando que, ao se aplicar uma certa energia de compactação, a massa específica resultante depende da umidade do solo (PINTO, 2006). Ademais, a compactação do solo é realizada buscando-se atingir características desejáveis em termos de resistência e de módulo de resiliência, que naturalmente estão associados ao grau de densificação atingido pelo material (BALBO, 2007).

Por ser função da umidade presente no solo, o grau de compactação do solo é afetado pela quantidade de água presente em seu interior. Quando a água é adicionada durante a compactação, ela atua como um agente lubrificante entre as partículas de solo que deslizam umas sobre as outras para uma posição mais densamente compactada (FDas, 2011). Logo, a redução do atrito proporcionado pela água e a possibilidade de formação de pequenos canais para a saída do ar presente no solo permitem uma massa específica maior quando a umidade é maior, contudo a partir de certo teor de umidade a compactação não consegue mais expulsar o ar dos vazios pois o grau de saturação já é elevado e o ar está envolto por água. Destarte, para a energia aplicada na compactação há um certo teor de umidade ótima que conduz a uma densidade máxima (PINTO, 2006).

Por conseguinte, para cada energia de compactação aplicada, haverá um certo teor ótimo de umidade o qual conduzirá a uma densidade máxima das partículas. Ao se analisar a Figura

2.6, percebe-se que ao elevar a energia de compactação haverá um decréscimo da umidade ótima e aumento da densidade máxima do solo.

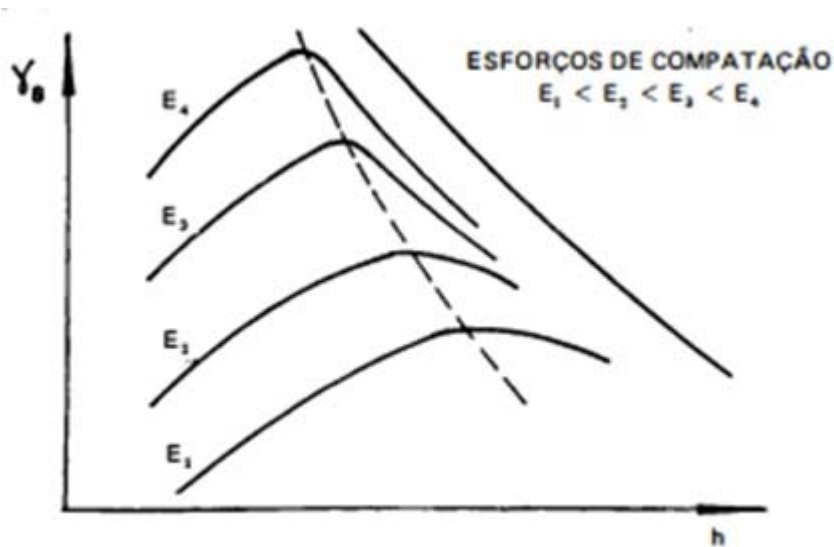


Figura 2.6 – Efeito da energia de compactação na h_{ot} e $\gamma_{m\acute{a}x}$ de um solo. Fonte: CAPUTO (1988)

O ensaio de laboratório normalmente utilizado para determinar a densidade seca máxima de compactação, ou baridade seca máxima, e o teor da umidade correspondente é chamado de ensaio de compactação de Proctor. Convém destacar que embora a determinação da densidade seca máxima e a umidade ótima sejam de suma importância para obras de engenharia, estas não representam índices físicos do solo, sendo que estes valores dependem diretamente da energia aplicada (PINTO, 2006).

Conquanto não seja o intuito deste trabalho apresentar a descrição dos ensaios, o ensaio de Proctor será resumidamente explicado por haver algumas características distintas entre o ensaio original, normas brasileiras e normas técnicas de Portugal.

Para o ensaio de compactação, é preparada uma amostra de solo e compactada em teores crescentes de umidade para uma mesma energia de compactação. Um molde padronizado é preenchido em determinado número de camadas e compactado com um soquete, estes dois variam conforme a energia de compactação desejada. O ensaio original foi proposto para a energia “Normal” de compactação, adequado aos equipamentos de compactação da época. Contudo, com o desenvolvimento de rolos compactadores mais pesados, o ensaio de Proctor Normal foi modificado para melhor representar as condições em campo. Esta versão revisada é chamada ensaio Proctor Modificado (FDas, 2011), com adaptações no ensaio quanto ao

molde e ao soquete utilizados e número de camadas compactadas representando uma maior energia de compactação.

Quanto à energia de compactação aplicada, a estimativa do valor pode ser obtida através da aplicação da expressão Eq. 1 (CAPUTO, 1988):

$$E = \frac{P \times h \times N \times n}{V} \quad \text{Eq. 1}$$

Em que:

- E = energia específica de compactação, por unidade de volume;
- P = peso do soquete;
- H = altura de queda;
- N = número de golpes por camadas;
- n = número de camadas;
- V = volume do solo compactado.

2.2.9. Ensaio de Proctor

No ensaio Proctor Normal, o solo é compactado em um molde com volume de 944 cm³, cujo diâmetro é de 10,16 cm e altura igual a 11,64 cm. O molde é fixado a uma base rígida e preenchido com solo em 3 camadas iguais para compactação com um soquete de peso 2,5 kg, altura de queda de 30,5 cm e 25 golpes em cada camada (FDAs, 2011).

O ensaio de Proctor Modificado utiliza o mesmo molde metálico do ensaio de Proctor Normal. Todavia, o solo é compactado em 5 camadas por um soquete de peso 4,54 kg, altura de queda de 45,7 cm e deve ser mantido o mesmo número de golpes por camada (FDAs, 2011). Para este tipo de ensaio, a energia específica de compactação é da ordem de 25 kg*cm/cm³ (CAPUTO, 1988).

Em Portugal, a metodologia para ensaio de compactação segue as instruções do LNEC através da Documentação Normativa “E 197-1966 – Solos – Ensaio de Compactação” a qual segue os princípios originais do ensaio de Proctor, com uma ínfima diferença no volume total do molde, que é de 956 cm³. Já no Brasil o ensaio tem uma pequena adaptação.

No Brasil, o cilindro padrão adotado possui volume da ordem de 1.000 cm³ o que levou a alteração da norma para 26 golpes por camada para ajustar a energia de compactação às normas internacionais, visto que as dimensões do cilindro padronizado no Brasil serem diferentes das demais (PINTO, 2006). Em seu livro, FDas (2011) também faz referência a esta adaptação da norma brasileira às demais normas internacionais quanto ao tamanho do cilindro e número de golpes aplicados, constatando sobre a necessidade de ajuste na norma para os padrões internacionais.

Apesar do ensaio original de Proctor apresentar apenas duas energias de compactação, algumas normas técnicas conduzem a ensaios com uma energia de compactação *intermediária* às energias normal e modificada (CAPUTO, 1988). Um exemplo é a norma brasileira “DNIT 164/2013-ME – Solos – Ensaio de Compactação Utilizando Amostras Não Trabalhadas – Método de Ensaio”, a qual aponta três energias para compactação: normal, intermediária e modificada.

2.2.10. Compactação em campo

Durante os trabalhos de execução de terraplenagem, a compactação em campo é obtida através da utilização de equipamentos apropriados para cada tipo de solo utilizado. Um ponto importante para o procedimento de compactação em campo, exige, antes da compactação propriamente dita, a verificação da umidade do solo, pois tal valor deve coincidir com a umidade ótima estabelecida nos ensaios de compactação, ou apresentar desvios dentro de limites toleráveis para mais ou para menos (BALBO, 2007).

O acerto da umidade de compactação é conseguido através de aeração ou irrigação do solo. Caso o solo não se encontre na umidade ideal deverá ser aerado, se verificada umidade elevada, com emprego de grade de discos e motoniveladora para revolvê-lo e perder umidade, ou umedecido por aspersão de água com caminhão pipa e subsequente homogeneização do solo, caso a umidade encontre-se abaixo dos padrões desejáveis (BALBO, 2007).

Apesar da aeração com a grade de discos ser bastante utilizada no controle para diminuição de umidade dos solos, ABRAM & ROCHA (2009) citam que em alguns casos nos quais a umidade chegue a saturar o solo, é mais vantajoso a substituição completa do solo da camada em questão e por um outro solo de umidade inferior. Contudo, deve-se ter atenção a outros

fatores, tais quais a urgência de finalização da camada e a existência de outros trechos de trabalho.

É nesse aspecto que o controle de umidade do material em campo é de suma importância para obras de terraplenagem, pois, conforme refere ABRAM (2001), o sucesso de um projeto está relacionado a grande influência das chuvas e a rapidez com que se executam os trabalhos.

Para além do teor de umidade e do tipo de solo, diversos são os fatores que devem ser levados em conta durante o processo de compactação. Entre alguns desses fatores pode-se citar a espessura da camada compactada, a pressão aplicada pelo equipamento de compactação e a área na qual a força será aplicada (FDas, 2011). Ainda segundo o autor, durante a compactação, o peso específico do solo é diretamente afetado pelo número de passagens do equipamento compactador, com aumento de valores até certo ponto. Contudo, a partir de determinado número de passadas do equipamento, o peso específico permanece aproximadamente constante.

Segundo BALBO (2007), para finalidades práticas, o parâmetro de controle da compactação do solo é o Grau de Compactação (GC). O GC corresponde à razão entre a densidade seca obtida em campo e a densidade seca máxima obtida no ensaio de compactação em laboratório (Eq. 2):

$$GC = \frac{\gamma_{dcampo}}{\gamma_{dm\acute{a}x}} \quad Eq. 2$$

Em que:

- GC = grau de compactação (%);
- γ_{dcampo} = densidade seca obtida em campo;
- $\gamma_{dm\acute{a}x}$ = densidade seca máxima obtida em laboratório.

Não se obtendo o GC especificado em projeto para a camada do pavimento em questão, o qual nunca deverá ser menor que o fixado pelas especificações técnicas adotadas, o material deverá ser revolvido e recompactado (CAPUTO, 1988).

2.2.11. Índice de Suporte Califórnia (ISC)

O Índice de Suporte Califórnia (ISC), ou *California Bearing Ratio (CBR)*, é um ensaio que foi concebido no final da década de 1920 para avaliar a o potencial de ruptura do subleito,

visto que era o defeito mais frequentemente observado nas rodovias do estado da Califórnia naquele período (PORTER, 1950 apud (BERNUCCI [et al.], 2008). O ensaio consiste em determinar uma relação entre uma pressão padrão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo de prova, e a pressão necessária para produzir a mesma penetração numa brita padronizada (DNIT, 2006).

A correlação entre pressões é feita da de acordo com a Eq. 3:

$$CBR = \frac{\textit{pressão aplicada ou pressão corrigida}}{\textit{pressão padrão}} \quad \textit{Eq. 3}$$

À época da concepção do ensaio, final da década de 1920, foram selecionados os melhores materiais granulares para base de pavimentos e a média de resistência à penetração no ensaio CBR foi estabelecida como sendo o valor de referência padrão, equivalente a 100% (BERNUCCI [et al.], 2008). Dessa forma, BALBO (2007) resume que o valor do CBR exprime um número percentual da resistência à penetração do material de referência. Visto que o CBR é um valor percentual, BERNUCCI et al. (2008) diz que: *“Todos os materiais são referenciados por um valor em percentagem, representando o quão melhor ou pior é sua resistência no ensaio ISC (ou CBR) por comparação com aqueles materiais granulares de referência, designados simplifcadamente de material padrão. Assim, podem ser encontrados valores de ISC (ou CBR) bem baixos, da ordem de unidades, e valores acima de 100%.”*

A metodologia do ensaio CBR não será aqui descrita, contudo é importante salientar que o DNIT especifica o valor mínimo do CBR - bem como o valor máximo da expansão - dos materiais a serem aplicados nas camadas do pavimento e em terraplenagem. O DNIT utiliza a “NORMA DNIT 172/2016-ME - Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostra não trabalhadas – Método de Ensaio” como referência normativa para realização ensaio de CBR.

2.2.12. Controle de qualidade de materiais

Após uma breve explanação sobre as principais características dos solos e materiais utilizados em pavimentações, é importante citar o controlo de qualidade dos materiais utilizados. Neste ponto, o DNIT estabelece critérios de aplicação de cada tipo de material, conforme suas propriedades, para o respectivo serviço de terraplenagem ou pavimentação ao qual se destina. A Tabela 2.7 é um resumo de diversas normas do DNIT compiladas em

uma única tabela, a qual mostra as condições de aplicação de cada material para cada camada de utilização.

Tabela 2.7 – Correlações e restrições gerais para utilização de solos e materiais em pavimentos Fonte: DNIT (Normas 108/2009-ES; 138/2010-ES; 139/2010-ES e 141/2010-ES), adaptado

Material	Restrições	Energia Compactação
Corpo de Aterro	CBR \geq 2% Expansão \leq 4%	Normal
Camada Final de Aterro	CBR \geq 2% * Expansão \leq 2%	Intermediária
Reforço Subleito	CBR e IG melhores que o do subleito Expansão \leq 1%	Intermediária
Sub-base	IG = 0 CBR \geq 20% Expansão \leq 1%	Intermediária
Base	Composição granulométrica dentro das faixas indicadas Percentual passante na #40 deve apresentar LL \leq 25% e IP \leq 6% ** Percentual passante na #200 \leq 2/3 perc. passante #40 CBR \geq 60% se $N \leq 5 \times 10^6$ *** CBR \geq 80% se $N > 5 \times 10^6$ *** Expansão \leq 0,5% Agregado retido na #10 deve ser submetido ao ensaio de abrasão Los Angeles e não apresentar desgastes superior a 55%	Modificada
<p>* O atendimento aos mencionados preceitos deve ser efetivado através de análise técnico-econômica, considerando as alternativas de disponibilidade de materiais ocorrentes e incluindo-se, pelo menos, 01 (uma) alternativa com a utilização de material com CBR \geq 6%</p> <p>** Se estes limites forem ultrapassados pode-se aceitar o material caso enquadra-se nas demais características e tenha Equivalente em Areia mínimo de 30%.</p> <p>*** "N" representa o número de repetições do eixo padrão no dimensionamento do pavimento</p>		

Sobre estas camadas de pavimentação, o DNIT traz algumas definições as quais são transcritas:

- Corpo de aterro: parte do aterro situada sobre o terreno natural até 0,60 m abaixo da cota correspondente ao greide de terraplenagem. O valor de CBR deverá ser maior ou igual a 2% e a expansão inferior ou igual a 4%. A energia de compactação deverá ser a energia Normal;
- Camada final de aterro: parte do aterro constituída de material selecionado com base em preceitos técnico-econômicos, com 60,0 cm de espessura, situada sobre o corpo do aterro ou sobre o terreno remanescente de um corte e cuja superfície é definida

pelo greide de terraplenagem. Obedece às mesmas restrições quanto ao CBR, contudo a Expansão deve ser inferior ou igual a 2%. A energia de compactação utilizada é a Energia Intermediária. Há, ainda, a necessidade de consideração da viabilidade técnico-econômica, de acordo com os materiais disponíveis no local, de ao menos uma solução com CBR maior ou igual a 6%;

- Reforço do subleito: camada estabilizada granulometricamente, executada sobre o subleito devidamente compactado e regularizado, utilizada quando se torna necessário reduzir espessuras elevadas da camada de sub-base, originadas pela baixa capacidade de suporte do subleito. As restrições são mais apertadas pois os valores de compactação deverão conferir valores mais baixos de expansibilidade e de IG e mais elevados de CBR que o subleito;
- Sub-base: camada de pavimentação, complementar à base e com as mesmas funções desta, executada sobre o subleito ou reforço do subleito, devidamente compactado e regularizado. O IG desta camada deverá ser igual a zero, a expansão inferior a 1% e o CBR igual ou superior a 20%;
- Base: camada de pavimentação destinada a resistir aos esforços verticais oriundos dos veículos, distribuindo-os adequadamente à camada subjacente, executada sobre a sub-base, subleito ou reforço do subleito devidamente regularizado e compactado. Os materiais de construção desta camada deverão respeitar restrições de composição granulométrica, de acordo com a NORMA DNIT 141/2010-ES - Pavimentação – Base Estabilizada Granulometricamente – Especificação de Serviço, baixos valores de plasticidade e de expansibilidade e altos valores de CBR. A compactação deverá ser realizada sobre o efeito de energia modificada.

2.3. Outros materiais

Além do solo, também foram utilizados neste trabalho outros materiais para análise comportamental da mistura. Os materiais em questão foram o pó de pedra granítica e a cal viva. Estes materiais serão resumidamente abordados quanto as propriedades e definições para melhor compreensão das possíveis reações químicas entre o solo e os materiais utilizados.

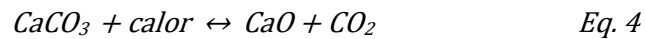
2.3.1. Pó de Pedra

O pó de pedra é um tipo de agregado natural miúdo, obtido a partir da britagem de rocha, cujo diâmetro enquadra-se na faixa entre 2,0 e 0,075mm (DNIT, 2006). Desta forma, a definição do material é feita apenas com relação à sua granulometria, podendo serem utilizadas diferentes rochas, entre as quais destacam-se, para fins de pavimentação, a rocha granítica, calcária e basáltica.

No presente estudo foi utilizado pó de pedra granítica fornecido pela empresa Lena Agregados. A ficha técnica do produto contém o ensaio de caracterização do material com as respectivas informações e pode ser vista no Anexo A.

2.3.2. Cal

A cal, em geral, pode ser definida como um aglomerante obtido através da calcinação de rochas ricas em carbonato de cálcio formando o óxido de cálcio (CaO) (BALBO, 2007). A reação de transformação pode ser vista na Eq. 4.



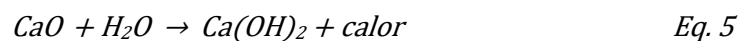
Quando o processo de queima é realizado a partir de rochas calcárias com elevadíssima pureza, temos a formação da cal virgem (ou cal viva) – teor de óxido de cálcio presente maior que 95% - que, quando misturada com água, é consumida com grande liberação de calor (BALBO, 2007). Já a cal hidráulica, provêm da queima de calcários argiloso impuros – teor de argila entre 20 e 30%, conseqüentemente teor de calcário (CaCO₃) entre 70 e 80% – e posterior pulverização por suspensão ou imersão em água (DNIT, 2006). Balbo (2007) ainda pontua que a queima do calcário com presença de argila produz grande quantidade de silicatos, além de pequenas frações de ferro aluminatos.

Desta forma, o DNIT (2006) fornece os parâmetros para os quais a composição da cal hidráulica deve ser enquadrada. Estes parâmetros são mostrados na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Parâmetros de composição de cal hidráulica. Fonte: DNIT (2006)

Componentes	Máx %	Mín %
Óxido de cálcio e óxido de magnésio (CaO e MgO)	75	65
Silica (SiO ₂)	26	16
Óxido de ferro e óxido de alumínio (Fe ₂ O ₃ e Al ₂ O ₃)	12	—
Dióxido de Carbono (CO ₂)	8	—

A cal hidratada surge como produto proveniente de processos de hidratação da cal viva, conforme reação de transformação ilustrada na Eq. 5: (LOVATO, 2004):



A cal utilizada neste trabalho foi a cal viva da marca Maxical, cuja ficha técnica do produto se encontra no Anexo B. A escolha deste material foi realizada com intenção de aproveitar-se da reação de hidratação do óxido de cálcio com a água, a fim de reduzir o teor de água presente no solo saturado.

3. Caso de Estudo

Conforme explanado anteriormente, a compactação em campo depende diretamente da umidade presente no solo. Isto posto, buscou-se um procedimento para correção do teor de umidade de solo com elevado teor de umidade a partir da incorporação de materiais secos, nomeadamente pó de pedra granítica e cal viva.

Partiu-se do pressuposto que o solo foi previamente compactado em campo, em sua respectiva umidade ótima, contudo chuvas posteriores à compactação elevaram o teor de umidade do solo de maneira tal que a camada em questão deveria ser escarificada e aerada novamente, a fim de se chegar na umidade ótima para recompactação. Para tal, o solo precisa, no mínimo, enquadrar-se nas restrições de aplicação impostas pelo DNIT, de acordo com a camada a ser compactada à qual se relaciona.

A descrição dos procedimentos adotados será explicada no presente capítulo e o procedimento seguiu o fluxograma mostrado na Figura 3.1. Tal fluxograma representa o caminho na linha do tempo dos ensaios propostos e metodologia adotada.

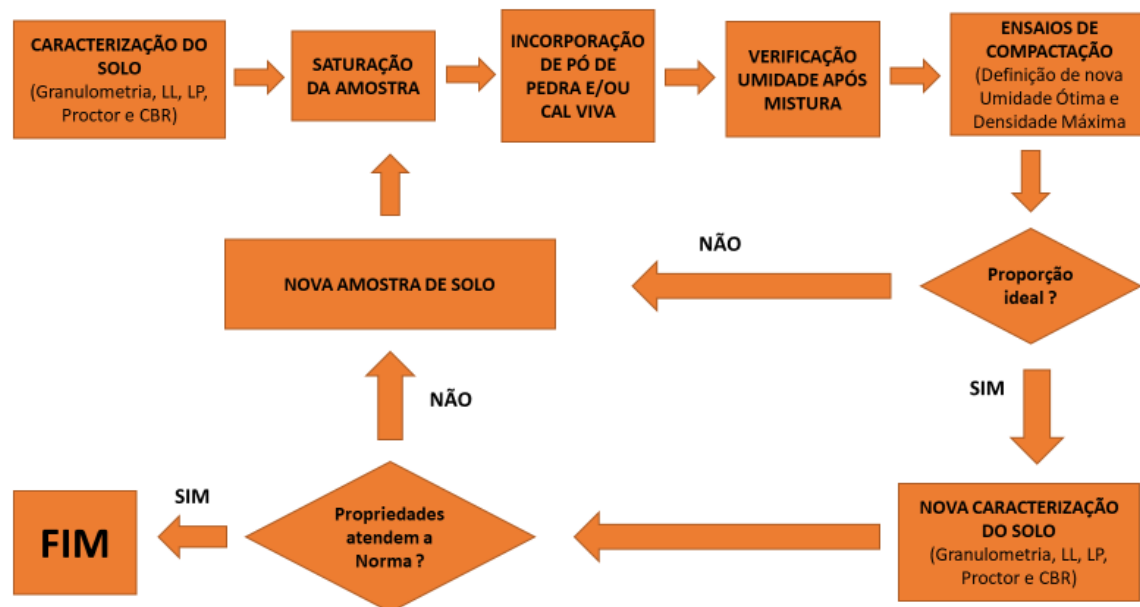


Figura 3.1 – Fluxograma de execução dos ensaios

Iniciou-se a pesquisa com a colheita de solo e caracterização através da análise granulométrica, determinação de limites de Attenberg, classificação SUCS e HRB e, por

fim, determinação da densidade seca máxima, umidade ótima, expansão e CBR. Em seguida, partiu-se para a saturação do solo, na qual a amostrada foi deixada submersa em água por 24 horas e posteriormente determinou-se a umidade do solo após esse tempo. Os passos seguintes foram a preparação da mistura com umidade próxima ao valor encontrado no procedimento anterior e incorporação dos materiais ao solo para determinação da umidade após incorporação do material seco. A seguir, novos ensaios de caracterização das amostras foram realizados, bem como medição dos novos valores de densidade máxima, umidade ótima, expansão e CBR.

3.1. Coleta da amostra

A amostra de solo utilizada neste trabalho foi coletada no dia 14 de novembro de 2019 em obra realizada no concelho de Leiria na Av. Papa Francisco. A Figura 3.2 mostra imagem via satélite do local que serviu de jazida para coleta de solo. O contorno na cor vermelha indica o local de recolha da amostra.

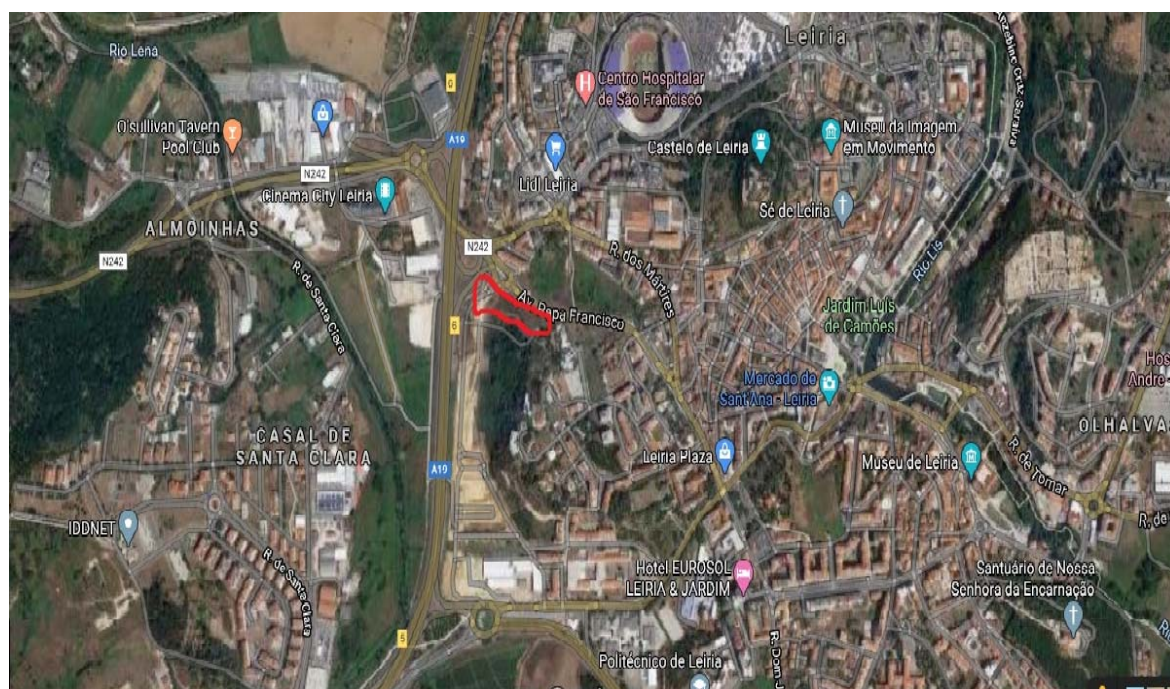


Figura 3.2 – Imagem via satélite de jazida para coleta de solo. Fonte: Google Maps

Esta amostra de solo foi colhida na Formação de Dagorda de idade do início do Período Jurássico, constituída por argilas e siltes, vermelhas ou cinzentas, e muitas vezes com gesso disseminado nas argilas (VEIGA, 2011). Da análise tátil e visual da amostra coletada, o solo

apresentou-se na cor vermelha escura, com elevado teor de umidade e alto teor de partículas finas.

Importante frisar que no dia da coleta o tempo apresenta-se chuvoso, tal situação implicou a coleta de um solo com elevado teor de umidade e torrões de grandes dimensões. Foram coletados aproximadamente 500 kg de material para a caracterização laboratorial o qual se deixou secar ao ar, em ambiente apropriado, durante aproximadamente duas semanas antes de realizar qualquer procedimento de caracterização. Na Figura 3.3 pode observar-se a amostra durante o período de secagem.



Figura 3.3 – Parte de amostra de solo após coleta em processo de secagem ao ar

3.2. Análise laboratorial da amostra de solo

O solo coletado foi caracterizado quanto à granulometria e limites de Attenberg. Os ensaios seguiram as normas DNER-ME 080/94 – Solos - Análise granulométrica por peneiramento; DNER-ME 122/94 - Solos – Determinação do limite de liquidez e DNER-ME 082/94 – Solos – Determinação do limite de plasticidade. Subsidiariamente, foram utilizadas as normas do LNEC no que couberam.

Da realização da análise granulométrica e determinação dos limites de Attenberg obtiveram-se os valores apresentados na Tabela 3.1. Estes valores permitiram classificar os solos de acordo com os sistemas HRB e SUCS.

Tabela 3.1 – Caracterização de amostra de solo.

Amostra Solo		
% passante na peneira	Nº 10	98,26
	Nº 40	90,91
	Nº 200	68,78
LL		31
LP		18
IP		13
Classificação	HRB	A-6 (8)
	SUCS	CL

De acordo com a classificação SUCS, o solo foi classificado como um CL, argila magra, e de acordo com a classificação HRB como um A-6 (8). Destes resultados, percebe-se que se trata de um solo fino com predominância de argila e possui, em geral, um comportamento para subleito de regular a ruim. Além disto, ainda é possível dizer que se trata de um solo inorgânico de baixa plasticidade. Além dos ensaios citados, foram realizados os ensaios de Proctor e CBR para determinação das propriedades físicas do solo em estudo e compatibilização para utilização em obras de terraplenagem, conforme exposto anteriormente na Tabela 2.7.

Buscando a compatibilização das normas técnicas entre Brasil e Portugal – (DNIT, NORMA 164/2013) e (LNEC 197, 1967) –, foi necessária a adoção de uma energia de compactação comum para a realização dos ensaios laboratoriais. Portanto, foi escolhida a utilização da energia Modificada de compactação. Deste modo, os resultados obtidos para ensaio de Proctor e CBR foram:

- Densidade máxima: 1,880 g/cm³;
- Umidade ótima: 13,20%;
- CBR: 1,6%;
- Expansão: 3,81%.

Dos resultados obtidos, percebe-se que o solo coletado não se enquadra em nenhum dos parâmetros impostos – conforme Tabela 2.7 - para utilização em obras. Contudo, o solo em questão não foi automaticamente descartado. Conforme cita BALBO (2007), o aproveitamento de um solo com características medíocres ou com propriedades indesejáveis para fins de pavimentação poderá ocorrer com o emprego de procedimentos de melhoria do solo com agregados, o que se denomina mistura solo-agregado.

Deste modo, foi criado um “solo artificial” buscando a estabilização do solo e posterior realização de novos ensaios. O “solo artificial” foi criado a partir da adição de cerca de 10% em peso seco de areia grossa ao solo inicial, com intuito de melhorar suas características e enquadramento para aplicação em obra. A opção por utilização de “solo artificial” foi feita baseada no ponto que diversos são os fatores podem afetar a escolha de uma jazida de empréstimo para uma obra, entre o mais recorrente encontra-se a distância e consequente viabilidade econômica da jazida.

Isto posto, PEREIRA & SANTOS (2002) expõem da seguinte forma: *“Nas zonas em que há falta de pedra e os solos não têm características satisfatórias, ou quando se pretenda fazer, com solos, uma camada mais resistente, recorre-se geralmente à estabilização de solos. A estabilização de um solo consiste em melhorar as suas características por mistura com outros materiais”*.

Assim sendo, após a mistura do solo com cerca de 10% em peso de areia grossa, procedeu-se à sua análise granulométrica. A Figura 3.4 mostra a sobreposição das curvas da análise granulométrica por peneiramento correspondentes ao solo original e ao solo com mais 10% de areia grossa.

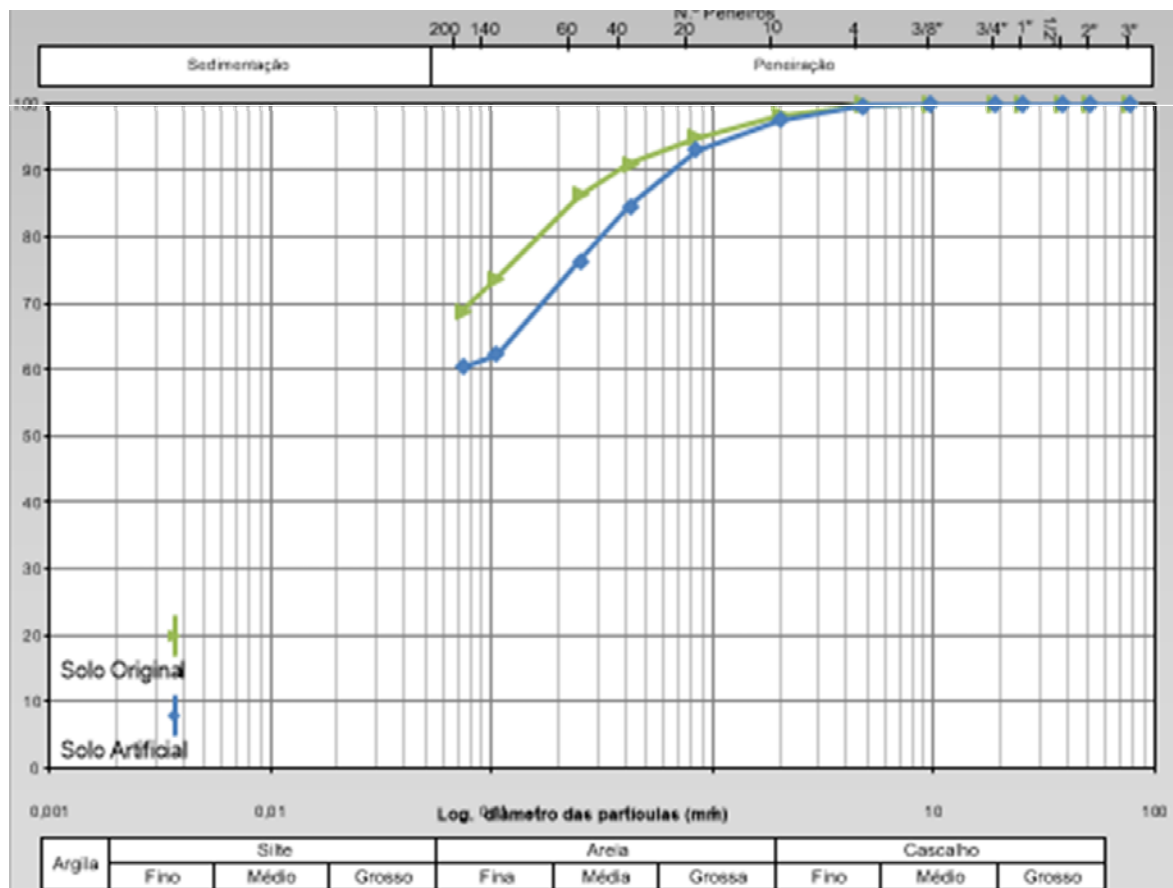


Figura 3.4 – Curvas granulométricas do solo original e do solo com mais 10% de areia grossa.

Da leitura das curvas granulométricas, percebeu-se que o solo com mais 10% de areia grossa apresentou-se de forma ligeiramente mais grosseira, contudo ainda com elevados teores de fração fina passante na peneira nº200. Com a referida análise feita apenas através do peneiramento, e não pelo ensaio de sedimentação, não foi possível distinguir com precisão as proporções de silte e argila presentes no solo.

Após a análise granulométrica, o solo com mais 10% de areia grossa foi submetido, também, à determinação de limites de Attenberg. Na Tabela 3.2 apresentam-se os resultados obtidos da caracterização deste solo com mais 10% de areia grossa.

Tabela 3.2 – Caracterização de amostra do solo com mais 10% de areia grossa

Amostra Solo + 10% areia		
% passante na peneira	Nº 10	97,61
	Nº 40	84,55
	Nº 200	60,37
LL		25
LP		16
IP		9
Classificação	HRB	A-4 (5)
	SUCS	CL

Em comparação com os resultados apresentados anteriormente pelo solo, após a mistura com cerca de 10% de areia grossa verificou-se uma redução nos valores de IG, LL, LP e IP, sendo estes decorrentes da menor presença proporcional de argila na mistura. Assim, LL passou de 31% para 25%, LP de 18% para 16%, o IP de 13 para 9 e o IG de 8 para 5. Outro aspecto importante foi que, devido ao IP apresentar agora um valor inferior a 10, pode-se dizer que o solo passou a se comportar com características mais siltosas ao invés de argilosas, contudo ainda assim apresenta um comportamento geral para subleito de regular a ruim. O solo resultante da adição de cerca de 10% de areia, de acordo com a classificação SUCS, foi classificado como um CL novamente, porém, de acordo com a classificação HRB, resultou num solo classificado como um A-4(5).

Relativamente aos novos valores obtidos nos ensaios de compactação e CBR, o solo com mais 10% de areia grossa apresentou os seguintes valores:

- Densidade máxima: 1,949 g/cm³;
- Umidade ótima: 12,00%;
- CBR: 3,4%;
- Expansão: 1,70%.

Verifica-se um aumento no valor da densidade seca máxima de 1,880 g/cm³ para 1,949 g/cm³, e a redução do valor da umidade ótima de 13,20% para 12,00%. Já em relação ao CBR, o solo apresentou um aumento do valor de 1,6% para 3,4% e uma redução da expansão de 3,81% para 1,70%. Comparando o solo natural com o solo ao qual foi adicionado 10% de areia grossa, este último exibe melhores características para subleito.

Diante dos valores obtidos, o solo com 10% de areia grossa adicionada enquadra-se nas condições impostas para utilização em obras de terraplenagem para execução de aterros, apesar de, ainda assim, ser um solo considerado pobre. Foi com esta mistura de solos (solo inicialmente coletado + cerca de 10% areia grossa) que foram realizados todos os procedimentos laboratoriais deste estudo, e, a partir de agora, é designado apenas de solo.

3.3. Procedimento de determinação de umidade saturada

A saturação da amostra do solo foi um ponto crucial do estudo. Durante os serviços de terraplenagem, o solo estará exposto às intempéries, mais precisamente chuva e vento, as quais variam conforme diversos fatores externos. Tais processos afetam o terreno compactado e a umidade existente no solo de acordo com inúmeras variáveis, tais como: quantidade precipitada, intensidade pluviométrica, temperatura e umidade do ar, velocidade dos ventos, permeabilidade do solo, inclinação do greide, entre diversos outros fatores.

Sabendo-se da limitação de considerar todas essas variáveis de campo em um procedimento teórico, seria inexecutável simular tantas variáveis em laboratório. Diante disto, o objeto do estudo consolidou-se apenas sobre a umidade do solo saturado, deixando-se de lado as demais variáveis do processo. Pese embora a teoria da Mecânica dos Solos considere que o solo saturado é aquele que possui todos os vazios preenchidos com água, neste trabalho o termo “solo saturado”, ou variações do termo, refere-se unicamente ao solo com elevado teor de umidade, umidade esta que é o objeto de determinação deste subcapítulo.

O procedimento adotado para saturação da amostra e determinação da respectiva umidade foi simples. Foram compactados dois corpos de prova – idênticos ao realizado nos ensaios de Proctor - e posteriormente submersos em tanque com água, inclusive ainda dentro do molde. Os corpos de prova foram deixados com o topo livre e em contato direto com a água durante 24 horas, buscando-se simular uma situação ao qual o solo estaria exposto no campo, numa situação de forte precipitação. A Figura 3.5 mostra um corpo de prova submerso.

Salienta-se que, durante a montagem do corpo de prova, a umidade do solo foi controlada, para que esta permanecesse no valor ótimo, ou com distorções toleráveis, e utilizada a energia Modificada de compactação.



Figura 3.5 – Corpo de prova submerso em água.

Após o período determinado, os corpos de prova foram retirados do tanque, deixados em repouso por aproximadamente 15 minutos para escorrer o excesso de água e, em seguida, procedeu-se à determinação da umidade. O cálculo da umidade baseou-se na média aritmética dos teores de umidade presente em quatro amostras retiradas de cada corpo de prova: uma retirada do topo, uma do meio, uma da base e, por último, o corpo de prova foi desmontado, homogeneizado e retirada mais uma amostra. Todas as amostras foram deixadas na estufa a 105°C por mais 24 horas para determinação do teor de umidade final.

A seguir é mostrada a Tabela 3.3 com os resultados do teor de umidade obtido de acordo com o procedimento adotado.

Tabela 3.3 – Teor de umidade de solo saturado

TEOR DE UMIDADE EM SOLO SATURADO										
Código	Descrição	Und	Provetes							
	Nº Proвете		2				3			
	Data Moldagem		13/05/2020				13/05/2020			
a	Peso do Molde	g/cm ³	2019,06				2054,31			
b	Volume do Molde	cm ³	999,16				1003,33			
c	Umidade ótima	%	12,00				12,00			
d	Peso do Solo Úmido	g	2090,91				2160,16			
e	Densidade máxima aparente seca	g/cm ³	1,949				1,949			
f	Umidade de compactação	%	10,37				11,65			
g	Densidade aparente seca	g/cm ³	1,896				1,928			
h = g / e	Grau de compactação	%	97,28%				98,92%			
UMIDADE APÓS EMBEBIÇÃO										
	Nº Cápsula		31	23	44	10	17	25	3	15
i	Peso cápsula	g	10,29	9,93	10,33	9,90	9,53	9,94	10,54	9,98
j	Peso cáp. + solo úmido	g	55,24	44,76	40,64	50,98	91,51	36,92	35,56	51,45
k	Peso cáp. + solo seco	g	42,68	39,91	36,12	44,34	71,80	33,81	32,14	45,03
l = k-i	Peso solo seco	g	32,39	29,98	25,79	34,44	62,27	23,87	21,60	35,05
m = j-k	Peso da água	g	12,56	4,85	4,52	6,64	19,71	3,11	3,42	6,42
n = m / l	Teor umidade	%	38,78%	16,18%	17,53%	19,28%	31,65%	13,03%	15,83%	18,32%
o = (n ₁ +n ₂ +n ₃ +n ₄)/4	Teor em água médio	%	22,94%				19,71%			

Os valores expostos na Tabela 3.3 buscam relacionar a umidade de compactação do solo, com o GC obtido para cada provete e com a umidade final da mistura após o processo de embebição. Percebe-se que o provete número 2 foi compactado a uma umidade equivalente a 10,37%, enquanto o provete número 3 foi compactado a uma umidade de 11,65%, ambos conforme exposto na linha “f” da tabela e utilizada a mesma energia de compactação. Essa variação da umidade provocou um melhor teor de compactação no provete número 3 em comparação com o provete número 2, enquanto o provete número 2 teve um GC de 97,28%, o provete número 3 atingiu um GC de 98,92%. Ao final do período de embebição dos provetes, o provete número 3 obteve um teor de umidade final 19,71%, enquanto o provete número 2 chegou ao fim do ensaio com um valor de umidade de 22,94%. Dos valores obtidos, e para a continuação da pesquisa, foi adotado o valor mais desfavorável entre os dois exemplares, nomeadamente a umidade de 22,94%.

A título exemplificativo foi calculada uma hipotética quantidade precipitada para a umidade em questão. Partindo-se da premissa hipotética que toda a água precipitada seria absorvida pelo solo e que não haveria evaporação posterior, para que o solo compactado ficasse saturado com uma umidade igual a 22,94% seria necessária uma chuvada com quantidade precipitada equivalente a 29,30 mm.

O cálculo realizado para chegar nessa altura hipotética de chuva precipitada foi feito através da correlação entre a água absorvida pelo solo e a área de contato do solo com a água. Para o teor de umidade passar do valor inicial de 10,37% para 22,94% e com o corpo de prova com peso úmido igual a 2.090,91 g, é necessária a absorção de 238,13 g de água. Ao relacionar a água absorvida pelo solo com a área de contato entre solo e água – equivalente a área de topo do molde e valor de 81,23 cm², visto que o molde pequeno utilizado possui um diâmetro de 10,17 cm – chega-se a um valor de água absorvida de 2,93 g/cm². Ao considerar que uma altura de chuva de 1 mm pode ser também considerada como 0,1 g/cm², chega-se ao valor final de altura hipotética de chuva precipitada de 29,30 mm.

3.4. Saturação de solo, incorporação de materiais e verificação da nova umidade

Após o procedimento de saturação e definição da umidade a ser considerada nos ensaios, partiu-se para a incorporação dos materiais secos, inertes ou não, no solo utilizado. A umidade utilizada nos procedimentos laboratoriais foi a umidade de 22,94% e a mistura de solo nessa umidade é o que foi chamado de solo saturado.

Buscou-se a saturação do solo através de procedimentos laboratoriais que pudessem retratar as condições de execução em campo, bem como materiais de baixo custo e com fácil disponibilidade. Deste modo, o procedimento realizado foi feito utilizando-se a incorporação de dois materiais ao solo saturado, pó de pedra granítico e cal viva, designado-se por material enriquecido.

3.4.1. Procedimento de saturação do solo

Nesta fase, o solo foi inicialmente posto em estufa por 24 horas para retirada da umidade higroscópica. Após este período, foi pesado cerca de 500 g de solo em cada amostragem e adicionada água em quantidade suficiente para representar uma umidade aproximada de 22,94%.

O material foi homogeneizado e retiradas duas pequenas amostras que foram levadas para a estufa para confirmação do teor de umidade final. Estas pequenas amostras retiradas foram de tamanho tal que fosse representativa para cálculo do teor de umidade, mas insignificante na quantidade total de solo para não alterar a proporção em peso do material a ser incorporado. Deste modo, importante frisar que o processo de saturação se trata de um

processo empírico, com os valores finais podendo sofrer variações de acordo com cada mistura. Na Figura 3.6 mostra-se o processo de umidificação da amostra.



Figura 3.6 – Saturação de amostra de solo. Esq. - Amostra de solo seca em estufa; Centro - Amostra de solo com água adicionada; Dir. – Amostra de solo saturada e homogeneizada.

3.4.2. Incorporação dos materiais

O solo saturado foi misturado instantaneamente com os respectivos materiais. Inicialmente foram feitas misturas utilizando-se o pó de pedra granítica em proporções que variaram de 10% a 50% em peso de pó de pedra granítica em relação ao peso seco do solo. A mistura foi devidamente homogeneizada e, posteriormente, foram retiradas duas amostras para serem colocadas em estufa durante 24 h para cálculo da umidade final.

O mesmo procedimento foi adotado para a mistura com cal viva (Figura 3.7), contudo, por ser um material aglomerante, aguardou-se cerca de 2 h após a retirada das duas amostras para que estas fossem colocadas em estufa. Já a proporção da mistura variou entre 3% a 5% em peso seco.



Figura 3.7 - Incorporação de materiais ao solo saturado. Esq. - Solo saturado + 10% pó de granito; Dir. - Solo saturado + 3% de cal.

3.4.3. Umidade após mistura com pó de pedra granítica

Após a retirada da estufa de todas as amostras, o material foi pesado e verificados os teores de umidade, tanto a umidade do solo saturado, quanto a do solo após a mistura dos materiais secos. Na Tabela 3.4 apresentam-se os resultados dos ensaios após a mistura do solo saturado com o pó de granito. Visto que, nas condições do estudo, não era possível chegar-se a um valor de umidade sempre exato e igual a 22,94%, a tabela buscou relacionar a variação percentual da umidade do solo após a incorporação dos diversos percentuais de pó de granito. Percebe-se que, com a adição de material granular seco a mistura de solo, houve uma redução do teor de umidade presente no solo saturado.

Tabela 3.4 – Teor de umidade de solo após mistura com pó de pedra granítica

TEOR DE UMIDADE EM MISTURA DE SOLO										
Pó de Pedra granítica										
Código	Descrição	Und	Provetes							
			1	2	3	4	5	6	7	8
	Nº Provette									
	Data		18/05/2020	18/05/2020	18/05/2020	18/05/2020	18/05/2020	18/05/2020	18/05/2020	18/05/2020
a	Peso amostra seco ao ar	g	520,00	515,00	516,00	516,00	516,00	516,00	516,00	516,00
b	Umidade higroscópica	%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
c = a / (1 - b)	Peso amostra seco	g	520,00	515,00	516,00	516,00	516,00	516,00	516,00	516,00
d	Umidade após 24h	%	22,94%	22,94%	22,94%	22,94%	22,94%	22,94%	22,94%	22,94%
e = c*d - a*b	Água adicional	ml	119,29	118,14	118,37	118,37	118,37	118,37	118,37	118,37
f = a + e	Peso Final da mistura	g	639,29	633,14	634,37	634,37	634,37	634,37	634,37	634,37
UMIDADE INICIAL										
	Nº Cápsula		E	27	45	47	3	15	31	10
i	Peso cápsula	g	10,70	10,20	10,30	10,00	10,54	9,99	10,30	9,90
j	Peso cáps. + solo úmido	g	23,84	19,16	20,17	21,92	30,50	29,91	28,12	27,50
k	Peso cáps. + solo seco	g	21,39	17,46	18,28	19,67	26,72	26,06	24,59	24,14
l = k-i	Peso solo seco	g	10,69	7,26	7,98	9,67	16,18	16,07	14,29	14,24
m = j-k	Peso da água	g	2,45	1,70	1,89	2,25	3,78	3,85	3,53	3,36
n = m / l	Teor umidade	%	22,92%	23,42%	23,68%	23,27%	23,36%	23,96%	24,70%	23,60%
o = (n ₁ +n ₂)/2	Teor em água médio	%	23,17%	23,48%	23,48%	23,48%	23,66%	23,66%	24,15%	24,15%
UMIDADE APÓS MISTURA										
g	Quantidade pó de granito	%	10%	20%	40%	50%				
h = g * c	Quantidade pó de granito	g	52,00	103,00	206,40	258,00				
	Nº Cápsula		33	36	13	17	5	35	44	25
p	Peso cápsula	g	10,30	10,28	11,57	9,79	10,65	10,21	10,33	9,95
q	Peso cáps. + solo úmido	g	30,17	34,62	25,17	44,00	46,76	39,82	33,72	36,97
r	Peso cáps. + solo seco	g	26,75	30,49	22,95	38,25	41,56	35,58	30,56	33,25
s = r-p	Peso solo seco	g	16,45	20,21	11,38	28,46	30,91	25,37	20,23	23,30
t = q-r	Peso da água	g	3,42	4,13	2,22	5,75	5,20	4,24	3,16	3,72
u = t/s	Teor umidade	%	20,79%	20,44%	19,51%	20,20%	16,82%	16,71%	15,62%	15,97%
v = (u ₁ +u ₂)/2	Teor em água médio	%	20,62%	19,86%	16,77%	15,80%				
x = o - v	Redução da Umidade	%	2,55%	3,62%	6,89%	8,35%				

Assim, verifica-se que para uma quantidade de 10% de pó de granito adicionado a redução de umidade foi de 2,55%; para uma adição de 20% a redução de umidade foi de 3,62%. Para uma adição de 40% a redução foi de 6,89% e para uma adição de 50% (valor muito alto) a redução de umidade foi de 8,35%.

Além da perceptível redução da umidade no solo saturado, é possível notar a graduação existente no processo. É intuitivo observar que quanto maior a proporção do material seco adicionado, maior será a redução da umidade após a homogeneização

3.4.4. Umidade após mistura com cal viva

O procedimento utilizado para a mistura do solo saturado com a cal viva seguiu os mesmos princípios e considerações para a mistura com pó de granito. Contudo, pelo fato da cal ser um material aglomerante e que necessita da água para reagir, a redução da umidade na

mistura deu-se não apenas pela adição de material seco à mistura, mas também pelas reações existentes entre o óxido de cálcio e a água. As proporções para a mistura de cal no solo ficaram entre 2,5% a 5% e os resultados são apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Teor de umidade de solo após mistura com cal viva

TEOR DE UMIDADE EM MISTURA DE SOLO												
Cal Viva												
Código	Descrição	Und	Provetes									
			1	2	3	4	5					
	Nº Provette											
	Data		16/06/2020	29/06/2020	29/06/2020	04/07/2020	04/07/2020					
a	Peso amostra seco em estufa	g	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00					
b	Umidade higroscópica	%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%					
c = a / (1 - b)	Peso amostra seco	g	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00					
d	Umidade após 24h	%	22,94%	22,94%	22,94%	22,94%	22,94%					
e = c*d - a*b	Água adicional	ml	114,70	114,70	114,70	114,70	114,70					
f = a + e	Peso Final da mistura	g	614,70	614,70	614,70	614,70	614,70					
UMIDADE INICIAL												
	Nº Cápsula		42	4F	34	40	31	39	23	32	5	31
i	Peso cápsula	g	10,01	10,58	10,13	10,19	10,29	10,38	9,93	11,23	10,65	10,29
j	Peso cáp. + solo úmido	g	25,63	23,54	32,38	25,54	27,73	29,23	23,72	22,89	23,97	23,51
k	Peso cáp. + solo seco	g	22,87	21,18	28,09	22,56	24,56	25,81	21,30	20,80	21,60	21,10
l = k-i	Peso solo seco	g	12,86	10,60	17,96	12,37	14,27	15,43	11,37	9,57	10,95	10,81
m = j-k	Peso da água	g	2,76	2,36	4,29	2,98	3,17	3,42	2,42	2,09	2,37	2,41
n = m / l	Teor umidade	%	21,46%	22,26%	23,89%	24,09%	22,21%	22,16%	21,28%	21,84%	21,64%	22,29%
o = (n ₁ +n ₂)/2	Teor em água médio	%	21,86%	23,99%	22,19%	21,56%	21,97%					
UMIDADE APÓS MISTURA												
g	Quantidade cal viva	%	2,50%	3,00%	4,00%	4,50%	5,00%					
h = g * c	Quantidade cal viva	g	12,50	15,00	20,00	22,50	25,00					
	Nº Cápsula		33	E	35	36	42	32	11	15	25	19
p	Peso cápsula	g	10,31	10,71	10,23	10,29	10,01	11,23	9,98	9,98	9,95	11,64
q	Peso cáp. + solo úmido	g	28,80	26,74	39,03	29,60	29,87	27,99	26,72	25,62	24,93	28,21
r	Peso cáp. + solo seco	g	25,91	24,07	33,97	26,21	26,74	25,40	24,36	23,28	22,80	25,80
s = r-p	Peso solo seco	g	15,60	13,36	23,74	15,92	16,73	14,17	14,38	13,30	12,85	14,16
t = q-r	Peso da água	g	2,89	2,67	5,06	3,39	3,13	2,59	2,36	2,34	2,13	2,41
u = t/s	Teor umidade	%	18,53%	19,99%	21,31%	21,29%	18,71%	18,28%	16,41%	17,59%	16,58%	17,02%
v = (u ₁ +u ₂)/2	Teor em água médio	%	19,26%	21,30%	18,50%	17,00%	16,80%					
x = o - v	Redução da Umidade	%	2,60%	2,69%	3,69%	4,56%	5,17%					

Verifica-se que para uma quantidade de 2,5% de cal adicionada a redução de umidade foi de 2,60%; para uma adição de 3% a redução de umidade foi de 2,69%; para uma adição de 4% a redução foi de 3,69%; para uma adição de 4,5% a redução de umidade foi de 4,56% e para uma adição de 5% a redução de umidade foi de 5,17%.

3.5. Ensaios de compactação do material enriquecido

Com a verificação da umidade após a incorporação de materiais secos, partiu-se para o novo ensaio de Proctor para determinação da nova umidade ótima e densidade máxima. Com a introdução de cal viva e pó de granito à mistura de solo, as respectivas propriedades físicas

passam a ter outro comportamento devido à alteração da composição da mistura. Neste âmbito, verificou-se a necessidade da análise do comportamento do solo após a mistura com o pó de granito e a cal viva.

Novamente, os ensaios foram realizados com a energia modificada de compactação visando a melhor compatibilização entre as normas técnicas brasileiras e portuguesas. Ainda neste sentido, os ensaios não foram realizados para todas as percentagens de mistura de material, tendo sido feitos com a proporção de 40% de pó de granito em peso e 4% de cal viva também em peso. Estes percentuais foram adotados devido a viabilidade técnica-econômica da solução proposta, visto que valores superiores aos descritos, já não representariam uma solução financeiramente viável. Ademais, o solo em questão, conforme exposto nos Subcapítulos 2.2.5 e 3.2, enquadra-se apenas nas especificações técnicas para utilização em aterros, e, conforme orienta a NORMA 422/2019-ES do DNIT referente a utilização de solo-cal para melhoria do subleito, os teores usuais de cal situam-se na faixa entre 2% e 4%.

De modo semelhante ao cálculo da redução do teor de umidade no solo saturado, para o ensaio de Proctor procedeu-se a uma espera de cerca de 2 h após a mistura do solo com cal para dar início ao ensaio. O mesmo não foi necessário para o pó de granito, visto que este último é um material inerte que não necessita de tempo para reagir. A Figura 3.8 mostra a preparação das 5 amostras de solo misturado com 4% de cal viva em peso em diferentes teores de umidade para o ensaio de Proctor.



Figura 3.8 – Preparação das amostras para realização do ensaio de Proctor

Relativamente aos resultados do ensaio, diversos autores já relacionaram o aumento da umidade ótima e diminuição da densidade máxima aparente seca para misturas de solo-cal. Já com relação a adição de pó de granito, é expectável que, à medida que o solo adquire uma granulometria mais grosseira, ocorra o inverso, com o aumento do peso específico máximo e a diminuição da umidade ótima de compactação.

De seguida apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de compactação para as mituras com 4% de cal e para 40% de pó de granito.

3.5.1. Ensaio de Compactação do solo com 4% de cal viva

Na determinação da nova umidade ótima do solo com a adição de 4% de cal viva, o ensaio de Proctor foi realizado após a adição da cal viva ao solo com diferentes teores de umidade, conforme determina a NORMA DNIT 164/2013-ME, e aguardou-se um intervalo de tempo de cerca de 2 horas após a mistura para início do ensaio. Os novos resultados são mostrados na Figura 3.9 com o respectivo gráfico da curva de compactação.

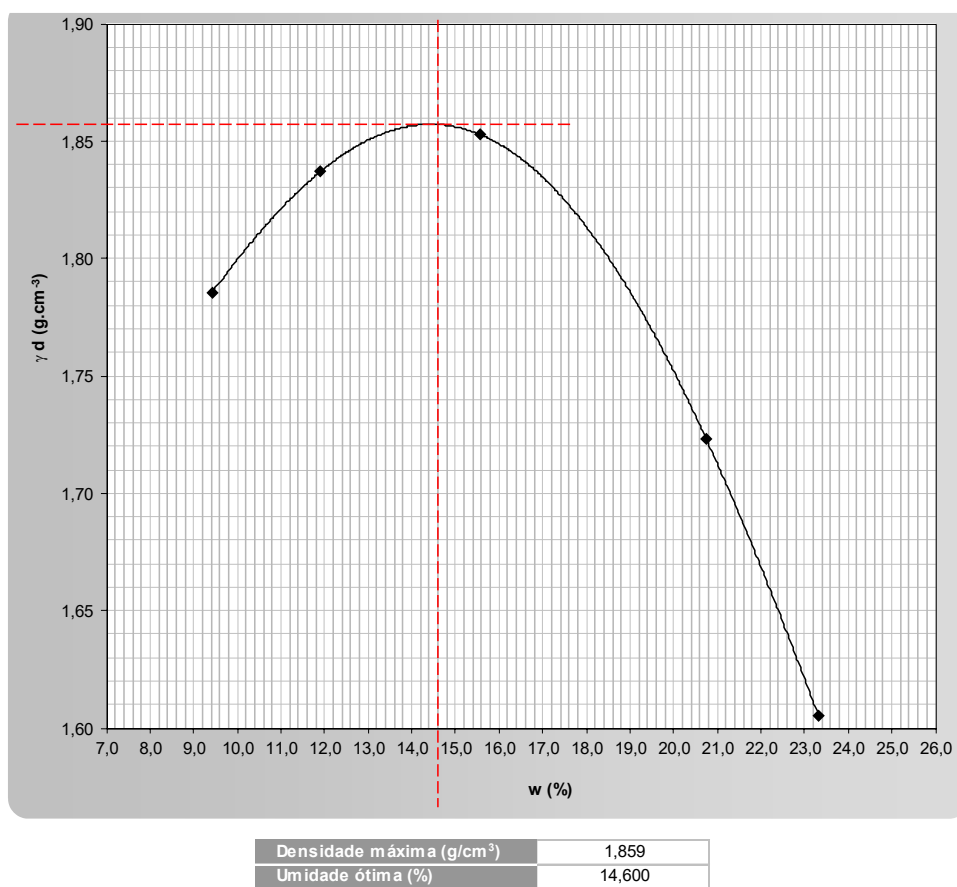


Figura 3.9 – Curva de compactação do solo com 4% de cal e valores de densidade máxima e umidade ótima

O gráfico da Figura 3.9 representa a curva de compactação da mistura entre solo e cal viva com 4% em peso. Os respectivos valores de umidade ótima e densidade seca máxima obtidos foram de 14,60% e 1,859 g/cm³.

3.5.2. Ensaio de Compactação do solo com 40% de pó de granito

De forma análoga à adotada para a cal viva, procedeu-se a avaliação da nova umidade ótima do solo após a adição de 40% de pó de pedra granítica ao solo para o ensaio de Proctor, porém, desta vez, não foi necessário a espera de 2 horas após a mistura, pois trata-se de um produto inerte. A Figura 3.10 mostra a curva de compactação do solo após adição de 40% de pó de granito.

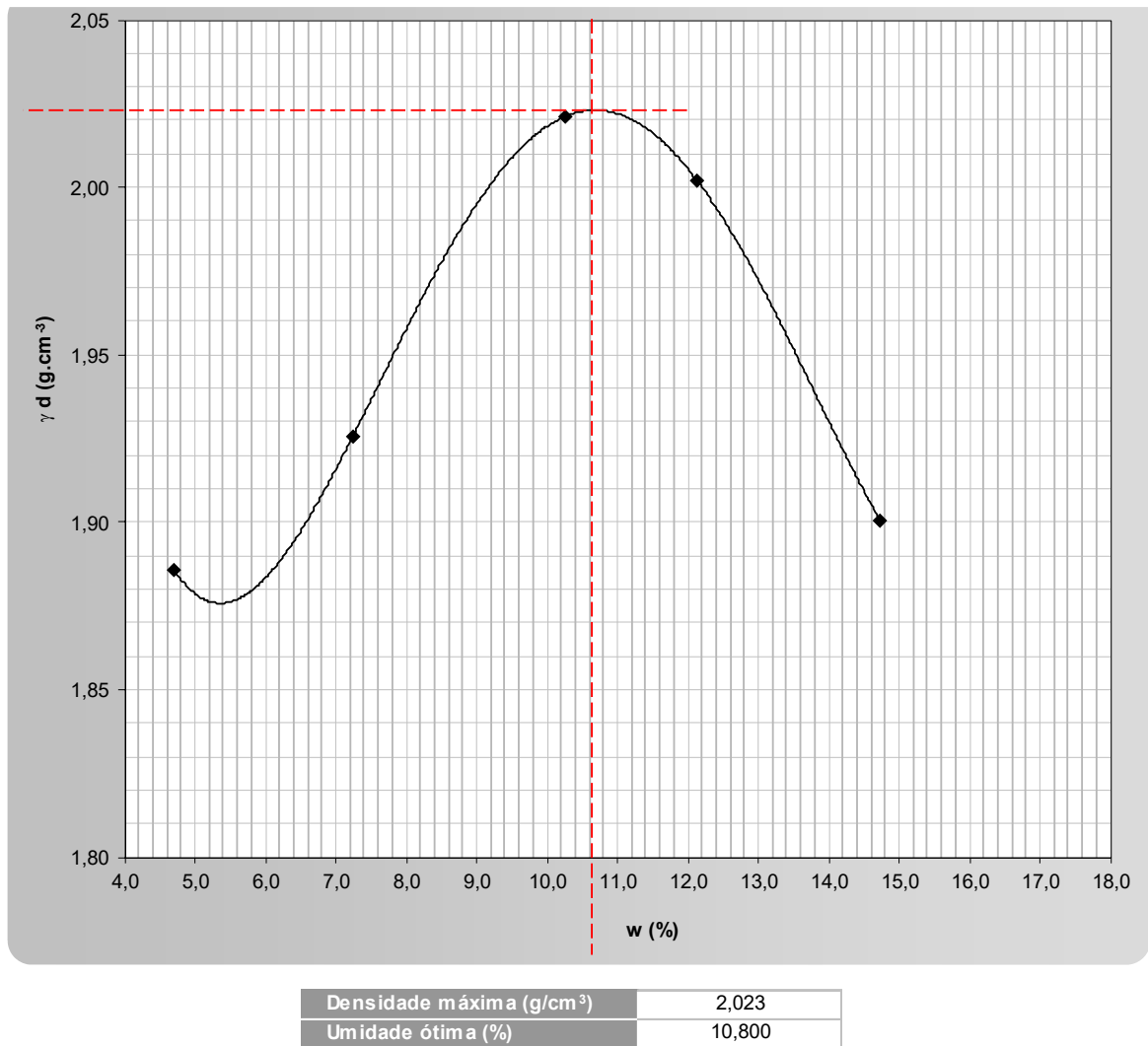


Figura 3.10 – Curva de compactação do solo-cal e valores de densidade máxima e umidade ótima

Após a adição do pó de granito na proporção de 40% em peso seco da mistura, verificou-se que a densidade seca máxima resultou em um valor de 2,023 g/cm³ e a umidade ótima foi de 10,80%.

3.6. Caracterização do material enriquecido

Além das novas propriedades físicas do solo após a adição de cal viva ou pó de granito, é importante analisar o comportamento da mistura no que tange aos demais índices físicos. Com a adição de novos materiais, o solo apresentará diferentes características tanto na granulometria, quanto nos limites de Attenberg. Essa variação dos índices físicos é de extrema importância para a qualidade do solo, pois irá alterar o comportamento geral da mistura, trabalhabilidade e até, eventualmente, a classificação geral do solo.

Ademais, as propriedades do solo após a incorporação dos materiais devem enquadrar-se nas especificações técnicas para a respectiva camada do pavimento a que se relaciona. Algumas alterações na composição do solo podem inviabilizar sua utilização em terraplenagem, contudo, no estudo em questão, é um fato bastante improvável, pois esta a se incorporar materiais de natureza mais nobre a um solo predominantemente argiloso com características regulares a ruim.

Apesar de não constituir um índice físico do solo, também foram realizados os ensaios para avaliação do CBR e Expansão da amostra para comparação dos resultados. Novamente, o solo após a mistura com 4% de cal viva ou 40% de pó de granito deverá enquadrar-se nas normas técnicas pertinentes em relação a qualidade do material e capacidade de suporte.

3.6.1. Caracterização do solo com 4% de cal viva

Quanto à adição de 4% de cal viva, os principais valores obtidos nos ensaios de granulometria e limites de consistência, são apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Principais valores de granulometria e limites de consistência para o solo + 4% de cal viva

Solo + 4% cal viva		
% passante na peneira	Nº 10	95,87
	Nº 40	86,19
	Nº 200	64,86
LL		39
LP		28
IP		11
Classificação	HRB	A-6 (6)
	SUCS	CL

Os valores apresentados na Tabela 3.6 correspondem apenas aos principais valores obtidos no ensaio de granulometria por peneiramento. Verifica-se que a percentagem de material fino é de 64,89%, a adição de 4% de cal é também a adição de 4% de material fino. O solo apresentou valores de LL e LP, respectivamente de 39 e 28, ao passo que apresentou um IP de 11. A classificação HRB do solo + 4% de cal viva foi de A-6, com IG igual a 6, enquanto que na classificação SUCS apresentou-se como um CL.

Relativamente ao ensaio para determinação do CBR e da Expansão da mistura de solo com 4% em peso de cal viva, os resultados obtidos são mostrados abaixo:

- CBR: 19,8%;
- Expansão: 0,02%.

3.6.2. Caracterização do solo com 40% de pó de granito

Com relação às propriedades do solo após a incorporação de 40% de pó de pedra granítica, os principais resultados obtidos são mostrados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Principais valores da granulometria e limites de consistência para o solo +40% de pó de granito.

Solo + 40% pó de granito		
% passante na peneira	Nº 10	92,19
	Nº 40	68,02
	Nº 200	41,95
LL		22
LP		15
IP		7
Classificação	HRB	A-4 (1)
	SUCS	SC-SM

A Tabela 3.7 explicita os principais valores obtidos no ensaio de granulometria por peneiramento e os valores obtidos para LL e LP. Deste modo, a adição de 40% de pó de granito implicou em adição de material granular ao solo, tendo, neste caso, o solo apresentado menores teores de finos e alterando-se a classificação. O LL foi de 22, o LP de 15 e o IP igual a 7. Quanto às classificações, pelo HRB é classificado como um A4 e na classificação SUCS é classificado com dois símbolos do tipo SC-SM (areia argilo-siltosa).

Ademais, após a incorporação do solo com 40% de pó de pedra granítica, a mistura apresentou os valores listados abaixo relativamente ao CBR e Expansão:

- CBR: 7,4%;
- Expansão: 0,72%.

4. Análise dos resultados

Neste capítulo procede-se ao tratamento, análise e interpretação dos diversos ensaios realizados tendo em vista o objetivo do trabalho.

4.1. Umidade Ótima e Densidade Máxima

Diante do objetivo principal do trabalho para redução do teor de umidade em solo saturado e, após incorporação de materiais secos ao solo - nomeadamente cal viva e pó de pedra granítica - foi necessária a realização de novos ensaios de Proctor para determinação da nova umidade ótima e densidade máxima da mistura para análise, conforme já apresentados no capítulo anterior.

4.1.1. Análise do resultado do ensaio de Compactação do solo com adição de 4% de cal viva

A adição de 4% de cal viva ao solo provocou uma mudança no comportamento do solo quanto à densidade máxima e à umidade ótima de compactação. Os valores obtidos, 1,859 g/cm³ para densidade máxima e 14,60% de umidade ótima, conforme já esperado, representam um aumento na umidade ótima, de 12,00% para 14,60%, e redução na densidade máxima, de 1,949 g/cm³, após a adição de 4% cal na mistura. Esta diferença pode ser melhor percebida através da sobreposição das curvas em um mesmo gráfico, conforme apresentado na Figura 4.1, em que a curva em verde representa a curva de compactação do solo e a curva azul representa a curva de compactação do solo com a mistura de 4% em peso de cal viva.

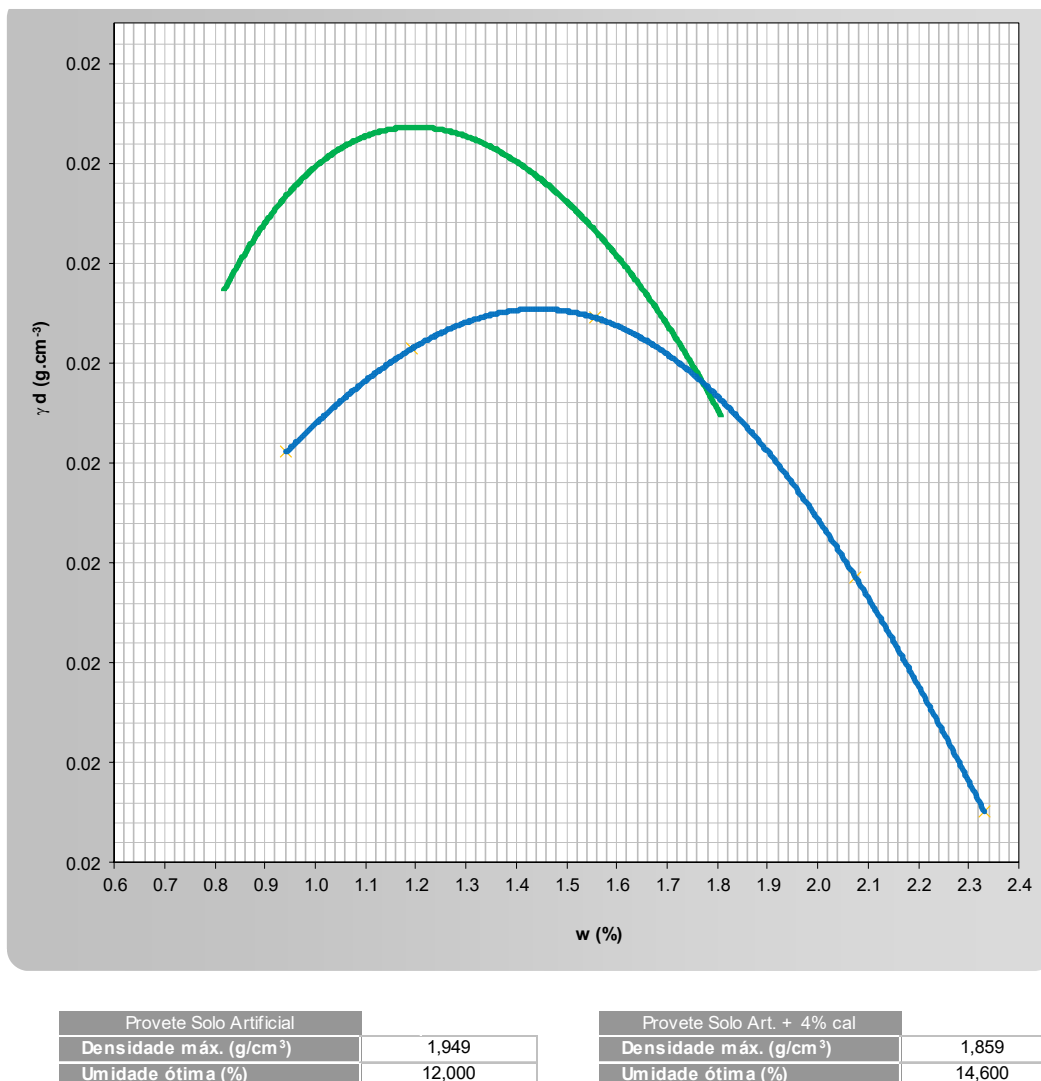


Figura 4.1 – Curva de compactação do solo (verde) e do solo com 4% de cal (azul)

O valor da umidade ótima obtida no ensaio de Proctor após a adição de 4% em peso de cal viva, implica, conseqüentemente, em comparação com o valor da umidade obtida após o procedimento de saturação do solo e incorporação da cal viva, conforme apresentado na Tabela 3.5. A Tabela 3.5 em questão, apresentou os valores obtidos no ensaio para a redução da umidade do solo saturado, após a incorporação de diferentes percentuais de cal viva.

Da Tabela 3.5, além redução da umidade no solo saturado, foi possível perceber uma gradual, porém não uniforme, redução do teor de umidade presente no solo em função da quantidade proporcional de cal adicionada. Destarte, torna-se válida a comparação com uma linha de tendência de função linear neste processo. Ao serem plotados os resultados obtidos em um gráfico de dispersão com linha de tendência em função linear (Figura 4.2), é possível ter uma melhor percepção na análise dos resultados.

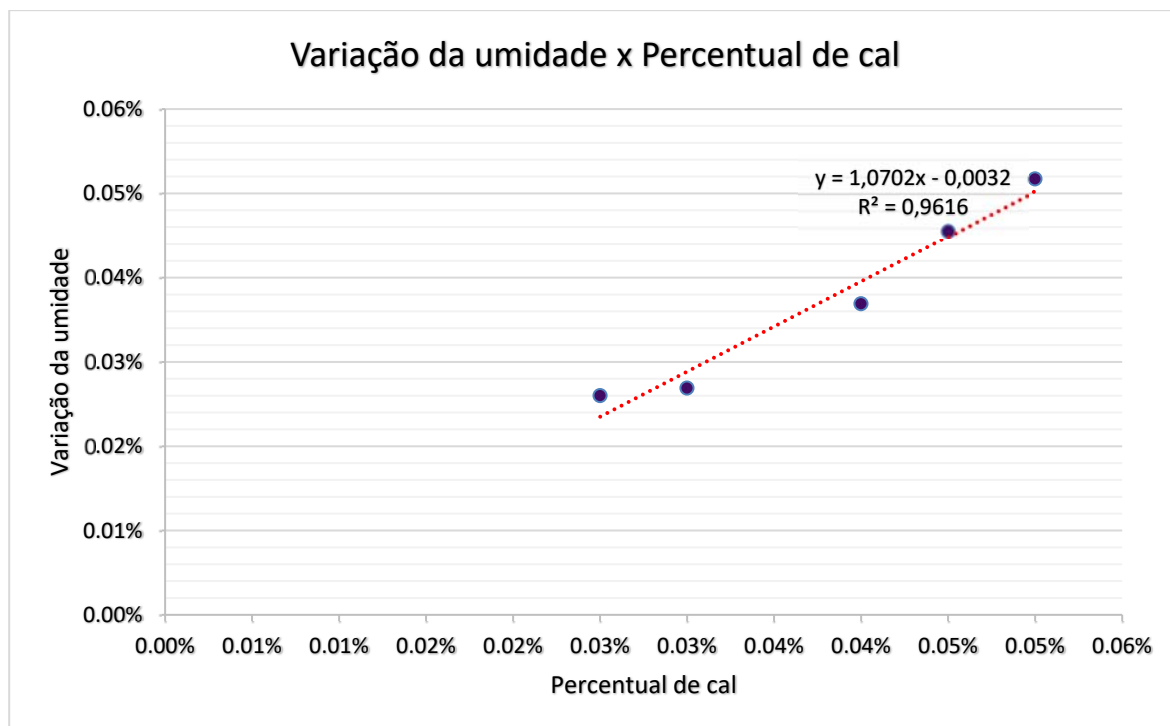


Figura 4.2 – Variação da umidade em função do teor de cal na mistura

A linha de tendência mostrada no gráfico da Figura 4.2, indica que há um grande fator de correlação entre a quantidade de cal adicionada e redução do teor de umidade e, conseqüentemente, a função linear para redução de umidade representa um bom parâmetro de comparação para variação da umidade em função do teor de cal na mistura. A função que descreve a equação é expressa na Eq. 6:

$$f(x) = 1,0702x - 0,0032 \quad \text{Eq. 6}$$

Em que:

- $F(x)$: representa a variação da umidade;
- x : representa a quantidade de cal viva adicionada a mistura.

Por conseguinte, é possível chegar à conclusão que, para o solo e a cal viva utilizados, percebe-se que para cada incremento de 1% de cal viva no solo, ocorre uma redução de 1% no valor de umidade da mistura.

Mais se indica que, conforme pontua LOVATO (2004), as reações da cal com o solo podem sofrer variações a depender das características do solo, entre elas o pH, a mineralogia da fração argilosa, o grau de intemperismo e a presença de sulfatos. Uma vez que o solo em

estudo é predominantemente argiloso, tais propriedades são particulares da mistura em questão.

Ao se aplicar na equação 6 o valor de 4% de cal, é obtido o valor de redução do teor de umidade 4,28%. Contudo, como o solo em questão possui umidade ótima de 14,60% e a umidade do solo saturado é de 22,94%, a incorporação da cal viva apenas guiaria para uma umidade de 18,66%, sendo ainda necessária maior redução do teor de umidade da mistura para recompressão do solo em terraplenagem. Embora haja uma tolerância da ordem de 1% para mais ou para menos no teor de umidade ótimo para compactação do solo melhorado com cal (NORMA DNIT 422/2019-ES), ainda assim o solo estará em desacordo com as especificações técnicas pertinentes.

Apesar da umidade de compactação não apresentar valores em harmonia com a norma técnica, a densidade da mistura após compactação atingirá valores coerentes com o regulamentado para estabilização do solo.

A Figura 4.3 apresenta a projeção do valor de umidade de compactação de 18,66% sobre a curva de compactação do solo com 4% de cal viva adicionada.

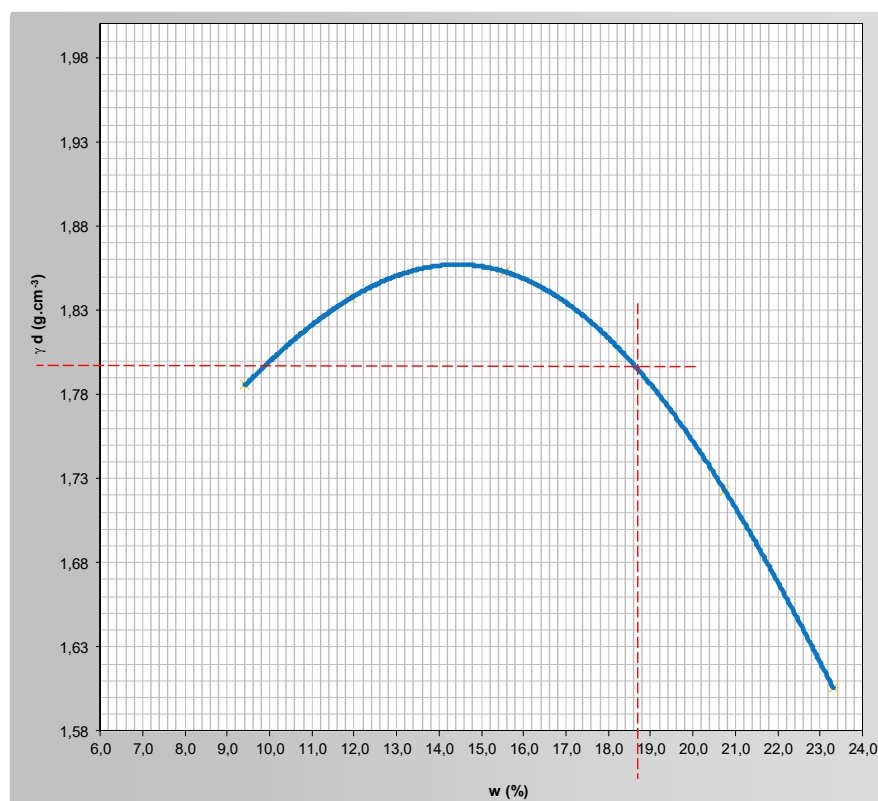
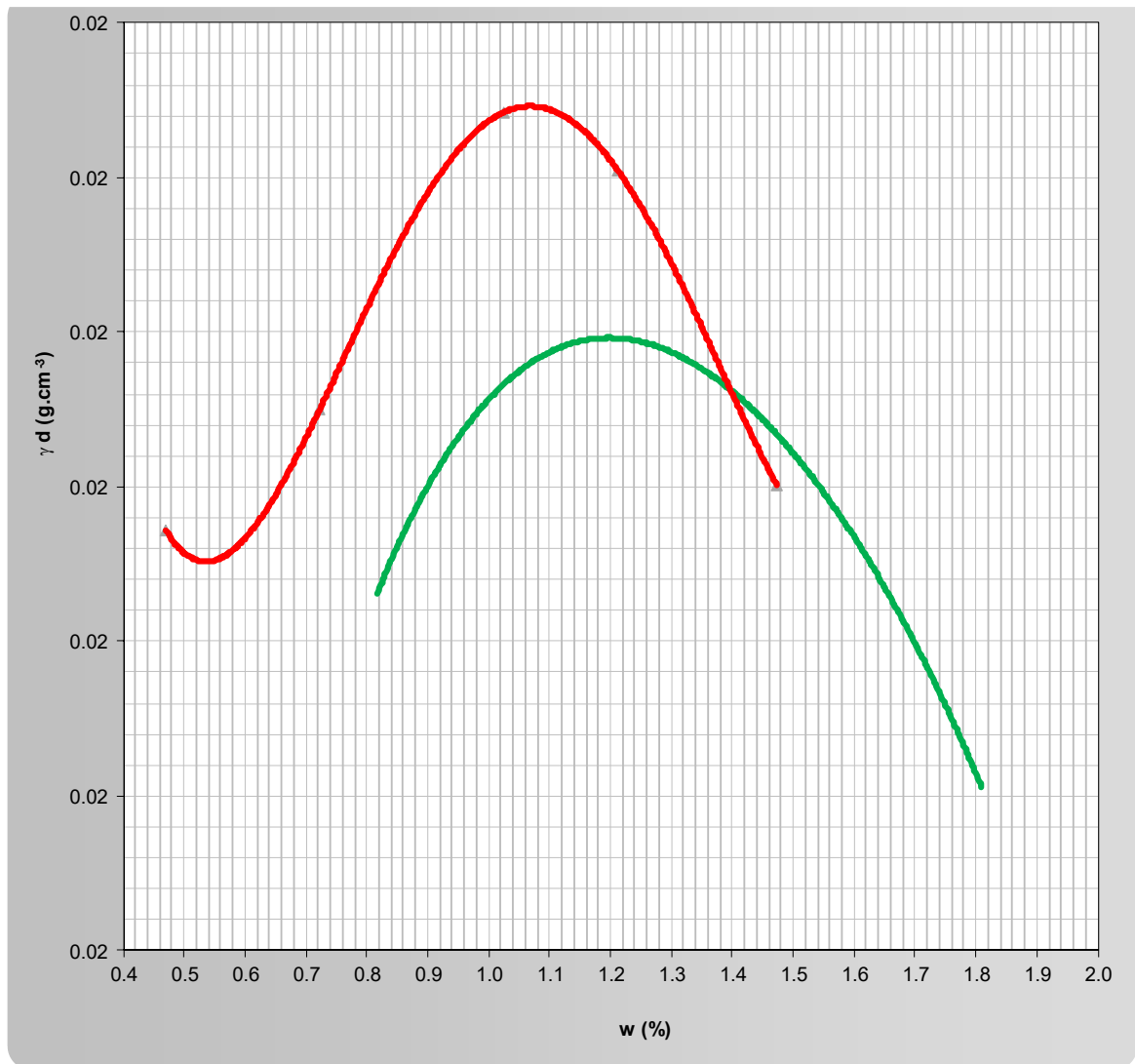


Figura 4.3 – Curva de compactação do solo com 4%cal com a projeção de 18,66% de umidade.

Da Figura 4.3, para uma umidade de compactação de 18,66%, é esperada uma densidade de 1,798 g/cm³ com a utilização da energia modificada de compactação. Tal qual a densidade máxima da mistura de solo com 4% de cal viva é de 1,859 g/cm³, o GC obtido seria de aproximadamente 96,66%, estando, este último, em conformidade com as especificações técnicas, as quais exigem um GC \geq 95% (NORMA DNIT 422/2019-ES). Entretanto, mesmo com o GC enquadrando-se nas diretrizes normativas, pelo teor em água ser superior ao especificado, o material não estará pronto para compactação, devendo sua respectiva umidade ser reduzida até os valores necessários.

4.1.2. Análise do resultado do ensaio de Compactação do solo com adição de 40% de pó de granito

À semelhança ao procedimento adotado para a cal viva, as curvas de compactação referentes ao solo e ao solo com adição de pó de granito também foram colocadas em um mesmo gráfico para comparação dos resultados entre cada uma das misturas. A Figura 4.4 mostra as duas curvas de compactação e os respectivos valores logo abaixo do gráfico, sendo, novamente, a curva em verde referente ao solo e a curva vermelha pertencente ao solo com adição de 40% em peso de pó de granito.



Proвете Solo Artificial		Proвете Solo Art. + 40% pó	
Densidade máx. (g/cm ³)	1,949	Densidade máx. (g/cm ³)	2,023
Umidade ótima (%)	12,000	Umidade ótima (%)	10,800

Figura 4.4 – Curva de compactação do solo (verde) e do solo com 40% de pó de granito (vermelho)

Destarte, e em oposição ao ocorrido com a adição de 4% de cal viva, a curva de compactação do solo com pó de granito deslocou-se para a esquerda do gráfico, representando um aumento da densidade seca máxima, de 1,949 g/cm³ para 2,023 g/cm³, e diminuição da umidade ótima de compactação, de 12,00% para 10,80%. O valor de 10,80% referente à umidade ótima do solo após a adição de 40% de pó de granito em peso, importa uma comparação com os valores de umidade obtidos após o procedimento de análise da umidade com o solo saturado, mais especificamente os valores obtidos na Tabela 3.4. A Tabela 3.4 mostrou a variação do teor de umidade do solo com 40% de pó de granito adicionado.

À semelhança do critério adotado para o solo com 4% de cal viva, após a adição de 40% de pó de granito ao solo, foi traçada uma linha de tendência de função linear em um gráfico de dispersão para análise dos resultados. O gráfico apresentado na Figura 4.5 representa a variação da umidade em função da quantidade de pó de granito adicionado ao solo saturado.

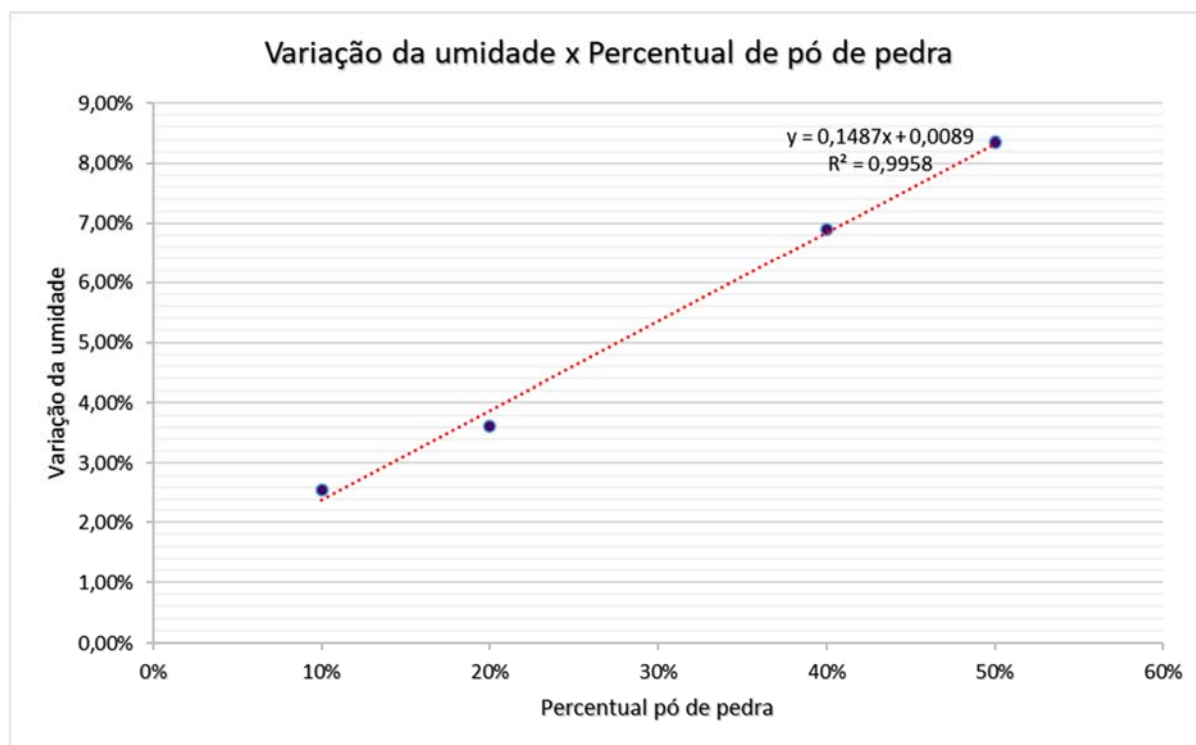


Figura 4.5 - Variação da umidade em função do aumento do pó de pedra na mistura

No gráfico da Figura 4.5, também foi plotada uma linha de tendência de função linear, que é representada pela expressão da Eq. 7:

$$f(x) = 0,1487x + 0,0089 \quad \text{Eq. 7}$$

Em que:

- $F(x)$: representa a variação da umidade;
- x : representa a quantidade de pó de granito adicionada a mistura.

Por conseguinte, é possível chegar à conclusão que, para o solo e o pó de granito utilizados, uma variação de 5% na incorporação do pó de granito, representa um decréscimo

aproximado de 0,75% na umidade da mistura, ou que a cada 10% de pó de granito, haverá uma redução também aproximada de 1,50% na umidade final do solo.

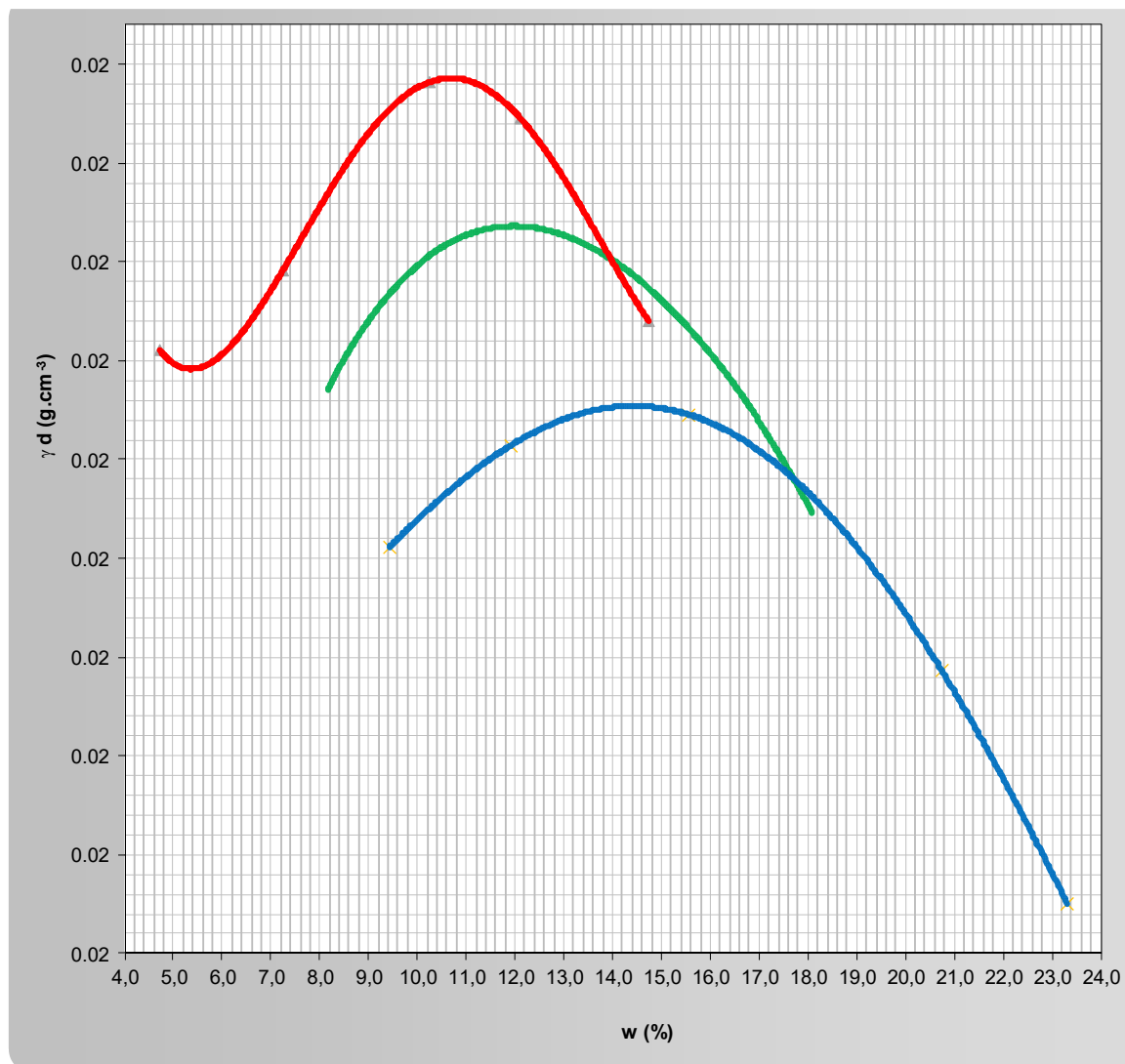
Deste modo, substituindo-se na equação 7 o valor da incógnita pela respectiva quantidade de pó de granito, no caso 40%, chega-se a um valor de redução do teor de umidade para a mistura de 5,96%. Ao passo que a nova umidade ótima do solo é igual a 10,80% e a umidade de saturação do solo foi de 22,94%, a redução de 5,96% no teor de umidade da mistura apenas conduziria para uma umidade de 16,98%, ainda bastante longe do teor ótimo.

No caso do pó de granito, por ser um material inerte e a estabilização do solo ser primordialmente através dos aspectos granulométricos e da energia de compactação, a tolerância para variação do teor de umidade é de 3% para mais ou para menos na execução de aterros (NORMA DNIT 108/2009-ES). Ainda assim, o valor máximo para aceitação pelas especificações técnicas seria de 13,80%, sendo este, ainda inferior ao obtido nos procedimentos laboratoriais, especificamente 16,98%.

Já para os valores da densidade seca obtida na compactação, a NORMA DNIT 108/2009 diz que o GC obtido em campo deve ser superior a 100%. Portanto, não faz sentido a análise de uma densidade teórica através da curva de compactação solo, pois, para obtenção de $GC \geq 100\%$, é necessária a aplicação de uma energia de compactação superior a utilizada na análise laboratorial.

4.1.3. Análise das Curvas de Compactação solo, solo com 4% de cal e solo com 40% de pó de granito

De acordo com os resultados expostos nos subcapítulos anteriores, foi perceptível a variação das respectivas densidades máximas e umidades ótimas consoante as diferentes misturas de solo. Em comparação com o solo (curva a verde), que serviu de base para as análises posteriores, o deslocamento da curva de compactação deslocou-se para a direita e para baixo quando o solo foi mistura com 4% de cal viva (curva a azul), e para a esquerda e para cima quando foi incorporado ao solo 40% de pó de granito (curva a vermelho). A Figura 4.6 mostra as curvas de compactação dos materiais estudados.



Proвете Solo	
Densidade máx. (g/cm ³)	1,949
Umidade ótima (%)	12,000

Proвете Solo + 4% cal	
Densidade máx. (g/cm ³)	1,859
Umidade ótima (%)	14,600

Proвете Solo + 40% pó	
Densidade máx. (g/cm ³)	2,023
Umidade ótima (%)	10,800

Figura 4.6 – Curva de compactação do solo (verde), solo com 40% de pó de granito (vermelho) e solo com 4% cal viva (azul)

O deslocamento lateral das curvas é um ponto importante para a análise da variação do teor de umidade obtido após a incorporação dos materiais ao solo saturado. Ao passo que a incorporação de 40% de pó de granito produz uma redução da umidade de saturação na mistura, também acarreta um deslocamento lateral da curva para a esquerda, diminuindo sua umidade ótima de compactação em 1,20% e aumentando a densidade seca máxima. Portanto,

a incorporação do pó de pedra granítica tende a não ser um material viável ao estudo em questão.

Já a adição de 4% em peso de cal viva, além de reduzir a umidade do solo saturado - tanto pela adição de material seco quanto pelas reações de hidratação da cal -, provoca um deslocamento da curva para a direita, aumentando a umidade ótima do solo em 2,60% e diminuindo a densidade seca máxima. Este deslocamento da curva para a direita é de suma importância, pois a medida que se aumenta o teor de cal ao solo, tem-se tanto a redução da própria umidade do solo quanto o aumento da umidade ótima da mistura, tendendo a obtenção de um teor de cal viva em peso no qual os valores da umidade sejam coincidentes (ou, ao menos, dentro da faixa tolerável de variação).

Não obstante a proporção utilizada da cal viva (4%) não ter apresentado valores satisfatórios para a redução necessária da umidade, observa-se que caso sejam utilizados maiores teores de cal viva ou, ainda, a umidade de saturação do solo esteja em valores inferiores aos 22,94% utilizados, a cal viva pode ser um material viável para a incorporação ao solo com elevados teores de umidade. Contudo, ainda assim, é necessária a avaliação da viabilidade econômica da técnica, visto que é um material com custos relativamente elevados e a utilização em grandes quantidades pode ocasionar o insucesso financeiro do empreendimento.

4.2. Propriedades físicas do solo após incorporação de cal viva e pó de pedra granítica

Além do teor de umidade do solo e do GC necessário, o solo para compactação ainda deve possuir as características necessárias para enquadramento nas normas técnicas. Após a incorporação do solo com cal viva e/ou pó de granito, a mistura passará a ter novas propriedades físicas quanto a granulometria, limites de liquidez e plasticidade, além de eventual alteração quanto as classificações SUCS e HRB.

Novos ensaios foram realizados para determinação dos novos limites de Attenberg e nova granulometria do solo, tanto para mistura solo com 4% de cal viva, quanto para solo com 40% de pó de granito. A Tabela 4.1 mostra os resultados obtidos para os novos índices físicos do solo, além da nova classificação do material, e correlaciona os valores com o solo utilizado.

Tabela 4.1 – Comparação dos parâmetros de caracterização do solo com o solo com 4% cal viva

Propriedades		Solo	Solo + 4% cal viva
% passante na peneira	Nº 10	97,61	95,87
	Nº 40	84,55	86,19
	Nº 200	60,37	64,86
LL		25	39
LP		16	28
IP		9	11
Classificação	HRB	A-4 (5)	A-6 (6)
	SUCS	CL	CL

De acordo com os resultados obtidos, percebe-se que com a adição da cal houve um aumento considerável dos limites de liquidez e plasticidade do solo, passando o LL de 25 para 39 e o LP de 16 para 28, bem como um maior IP, indicando que o solo possui uma maior faixa de valores ao qual permanece no estado plástico. Mais ainda, por apresentar um $IP \geq 11$, a mistura de solo-cal apresenta características predominantemente argilosas em comparação as características siltosas apresentadas apenas pelo solo e, por isso, a classificação HRB de um solo A-6 lhe é atribuída. Quanto ao índice de grupo, este alterou-se em apenas uma unidade superior ao inicial, com variação de 5 para 6, mas, com o aumento do LL e IP, o aumento do IG já era esperado. Relativamente a classificação SUCS, o solo manteve sua classificação original CL indicando ainda se constituir uma argila de baixa plasticidade arenosa.

Contudo, esta alteração do comportamento do solo em pouco ou em nada influenciou relativamente a utilização do solo para terraplenagem. Visto que, conforme exposto na Tabela 2.7, o solo utilizado apenas possui características técnicas para utilização em aterros, as novas alterações nas propriedades do solo ainda se enquadram para tal utilização.

Com relação à adição de pó de pedra granítica ao solo, este também apresentou novas propriedades físicas e novas características. A Tabela 4.2 faz a correlação dos novos valores apresentados pelo solo enriquecido com pó de pedra e o solo que serviu de base para os estudos.

Tabela 4.2 – Comparação dos parâmetros de caracterização do solo com o solo com + 40% pó de granito

Propriedades		Solo	Solo + 40% pó
% passante na peneira	Nº 10	97,61	92,19
	Nº 40	84,55	68,02
	Nº 200	60,37	41,95
LL		25	22
LP		16	15
IP		9	7
Classificação	HRB	A-4 (5)	A-4 (1)
	SUCS	CL	SC-SM

A adição de 40% de pó de granito provocou um efeito contrário à adição da cal relativamente a granulometria. Desta vez, o solo tornou-se mais grosso e com propriedades menos plásticas pela adição do pó de granito. Ao se analisar o aspecto granulométrico, nota-se uma considerável redução na quantidade de finos do solo, tendo o percentual passante na peneira nº200 sofrido uma redução de 60,37% para 41,95%, e uma redução, ainda que pequena, nos teores de umidade relativos aos limites de liquidez e plasticidade, tendo o LL reduzido de 25 para 22 e o LP de 16 para 15.

Quanto à classificação AASHTO, o solo ainda se apresentou como um A4, mantendo a classificação anterior, contudo com uma grande redução no IG que dessa vez apresentou o valor igual a 1. A redução do IG para o valor em questão indica, também, uma menor presença de fração fina no solo. Houve alteração na classificação SUCS devido ao alto teor de pó de granito adicionado, passando o solo - de acordo com a Classificação Unificada - a ser considerado um solo grosso e classificado com dois símbolos do tipo SC-SM (areia argilo-siltosa).

Mais uma vez, a alteração de tais propriedades do solo em pouco ou em nada irão influenciar na utilização do solo para terraplenagem, visto que o solo permanece enquadrado nas especificações. Tais alterações implicariam apenas caso os resultados obtidos fossem no sentido de reprovar o material para utilização, as melhorias advindas não são aqui consideradas.

4.3. CBR e Expansão do solo e após incorporação de cal viva e pó de pedra granítica

Relativamente aos valores obtidos para o CBR e a Expansão do solo após a incorporação de pó de granito e cal viva, os resultados encontrados também apresentaram melhorias quanto à capacidade de suporte de cargas. Embora não constitua um índice físico do solo, a análise da capacidade de suporte é um aspecto sempre levado em consideração em obras de terraplenagem, pois o comportamento do solo é de fundamental importância no processo, sendo, inclusive, um dos critérios de restrição para utilização dos solos em aterros, conforme exposto na Tabela 2.7.

4.3.1. CBR e Expansão do solo com 4% de cal viva

Nos ensaios realizados para a determinação do CBR e Expansão com 4% de cal viva, o solo apresentou melhorias consideráveis no seu comportamento. O valor do CBR teve um aumento importante, passando do valor de 3,4% inicial, para 19,8% após a adição da cal viva.

No caso da Expansão, o resultado foi ainda mais positivo. Durante o processo de caracterização da amostra de solo, o valor da expansão obtido foi de 1,7%, desta vez o valor obtido foi 0,02%. A Tabela 4.3 faz uma comparação dos valores iniciais com os valores finais após a incorporação da cal.

Tabela 4.3 – Valores de CBR e Expansão do solo e solo após mistura com cal viva

Propriedades	Solo	Solo + 4% cal viva
CBR (%)	3,4	19,8
Expansão (%)	1,7	0,02

A Tabela 4.3 mostra o incremento da capacidade de suporte do solo obtido após a mistura com cal viva, de 3,4% para 19,8% no valor de CBR e uma diminuição na Expansão de 1,7% para 0,02%, fato este que implica grandes melhorias no comportamento geral do aterro. Ademais, o baixo valor da expansão confere ao solo melhor desempenho perante a presença de água.

Relativo ao valor da expansão é válida uma melhor abordagem sobre o resultado. Inicialmente o valor de 0,02% chamou a atenção para alguma possível incoerência ou falha procedimental no ensaio realizado. Porém, ao se analisar a evolução de todos os ensaios

realizados - precisamente o solo inicial ou original, solo com 10% de areia grossa adicionada e solo com 10% de areia grossa mais 4% de cal –, percebe-se que o avanço de redução da expansão, ocorreu desde a adição de areia grossa até a adição de um material aglomerante, resultando em um valor igual 0,02%. A Tabela 4.4 mostra a evolução dos resultados obtidos para CBR e Expansão de acordo com o solo estudado (solo original, solo com 10% de areia grossa adicionada e solo com 10% de areia grossa mais 4% de cal).

Tabela 4.4 - Evolução dos valores CBR e Expansão

Propriedades	Solo Original	Solo	Solo + 4% cal viva
CBR (%)	1,6	3,4	19,8
Expansão (%)	3,81	1,70	0,02

Ao analisar a evolução dos resultados, é possível concluir que os resultados obtidos mostram que o valor de 0,02% é um valor aceitável para a Expansão do solo. Ademais, apesar de terem sido utilizados solos com características distintas ao solo deste trabalho, ARAÚJO (2009) e NEVES (2009) também encontraram valores de Expansão próximos a zero em misturas de solo com adição de cal em teores entre 2 e 5% de cal em peso. Mais ainda, conforme pontua SANTOS (2004) *apud* (ARAÚJO, 2009), a utilização da cal em solos predominantemente argilosos ou siltosos é indicada para os solos com elevada Expansão e baixa capacidade de suporte.

4.3.2. CBR e Expansão do solo com 40% de pó de granito

Não obstante a melhoria nas características do solo quanto à capacidade de suporte e Expansão, os resultados obtidos para a mistura de solo com pó de pedra granítico foram mais modestos em comparação aos resultados obtidos através da mistura com cal viva. A Tabela 4.5 ilustra os resultados obtidos para o solo após a incorporação de 40% em peso de pó de granito.

Tabela 4.5 - Valores de CBR e Expansão do solo e solo após mistura com pó de pedra granítica

Propriedades	Solo	Solo + 40% pó
CBR (%)	3,4	7,4
Expansão (%)	1,7	0,72

Dos resultados obtidos com a adição do pó de granito à mistura, nota-se que houve uma melhoria no comportamento geral do solo. O CBR teve um incremento de 4 pontos

percentuais, passando de 3,4% iniciais para 7,4% com pó de granito e a Expansão reduziu de 1,70% para 0,72%. Tal alteração nas características deve-se, fundamentalmente, a estabilização granulométrica da mistura após a adição do pó de pedra granítica. Este último contribuiu para um menor percentual da fração fina no solo, conseqüentemente, reduzindo a quantidade proporcional de argila expansiva e aumentando a capacidade de suportar cargas.

Conquanto os resultados obtidos para CBR e Expansão serem superiores ao solo com adição de 10% de areia grossa, e a semelhança dos valores encontrados para os limites de Atterberg, a melhoria em pouco ou em nada influirá para o estudo em tela. Tais características foram mostradas unicamente para confirmação de melhoria na capacidade de suporte, sendo que os resultados apenas seriam considerados caso resultassem em aspectos negativos, os quais desenquadrariam o material para aplicação em aterros.

5. Conclusões

A partir dos resultados apresentados e analisados anteriormente, foi possível chegar a algumas conclusões importantes e válidas acerca da redução da umidade do solo em obras de terraplenagem. Embora o presente trabalho não apresente resultados conclusivos e concretos quanto a percentuais ideais relativos aos materiais utilizados para incorporação ao solo considerado saturado, os experimentos laboratoriais mostraram-se positivos em alguns aspectos.

Ainda que o objeto inicial do estudo tenha sido apenas a redução do teor de umidade do solo, as alterações das características do solo proporcionadas pela adição de novos materiais também fizeram parte da análise. Isto posto, este capítulo será subdividido em quatro partes: a primeira referente a redução da umidade, a segunda parte alusiva a alteração do comportamento do solo, sugestões para pesquisas futuras e, por fim, as limitações do estudo para o procedimento em campo

5.1. Redução da Umidade

Relativamente à incorporação de pó de pedra ao solo, os resultados apresentados não indicam que este seja um material viável para o estudo em tela. Elevados teores de pó de pedra granítica precisam de serem incorporados ao solo para que haja uma pequena redução do teor de umidade. Ademais, com o aumento da quantidade adicionada, o solo começa a apresentar características distintas do inicial, tendendo a comportar-se como um solo de granulometria diferente e mais grosseiro, conseqüentemente, haverá uma redução do valor da umidade ótima, fato este que afasta cada vez mais a viabilidade do procedimento.

Já com relação a incorporação da cal viva em solo com elevado teor de umidade, foi observado que a adição da cal viva ocasiona uma redução considerável da umidade. Os resultados mostraram que cada incremento de 1% de cal viva em peso representa a redução aproximada de, também, 1% na umidade presente no solo. Esta redução dar-se-á não apenas pela incorporação de material seco a mistura, mas sim, principalmente, pelas reações de hidratação da cal quando esta entre em contato com a água presente no solo saturado.

Também em relação à cal viva, diversos autores já constataram o aumento da umidade ótima da mistura de solo após a incorporação da cal – e neste trabalho também se constatou o mesmo efeito. Portanto, com o aumento do teor de cal viva no solo, além da redução gradual

do teor de umidade existente, o aumento do valor da umidade ótima tenderá à convergência de valores até a obtenção de uma proporção de cal a qual seja considerada ideal para correção do valor da umidade presente em solo com elevado teor de umidade. Embora elevados teores de cal possam majorar os custos do empreendimento e inviabilizar a utilização da técnica, poderão existir situações específicas na qual elevados percentuais de cal utilizados sejam viáveis.

Ademais, é importante lembrar que todo o estudo realizado foi feito partindo-se do princípio de que o solo, considerado saturado, estaria com a umidade em torno de 22,94%. Com a utilização de menores valores para a umidade, a depender de novos critérios adotados, pode ser possível a utilização da técnica.

Outro ponto em questão trata da energia de compactação aplicada. Para a compatibilização entre as normas técnicas entre Brasil e Portugal, foi adotada a energia modificada de compactação do solo, fato este que, por si só, já resulta em menores valores da umidade ótima de compactação. Um estudo com a utilização de menores energias de compactação tende a elevar o teor ótimo da umidade, e, conseqüentemente, resultar em diferentes valores para utilização da técnica.

5.2. Alterações nas propriedades do solo

Ao se analisar o comportamento do solo após a adição de novos materiais, constatou-se que estes últimos conferiram melhorias de qualidade em relação ao solo analisado. O solo estudado apresentou inicialmente baixos valores de capacidade de suporte, expansão e plasticidade razoáveis e elevado teor da fração passante na peneira nº 200.

Com a incorporação do pó de pedra granítica, observou-se que houve redução na plasticidade do solo, com decréscimo nos valores dos limites de Attenberg e também redução do IP. O solo apresentou características granulométricas mais próximas de um solo grosso quando comparados ao solo inicial, fato este que, inclusive, alterou a classificação do solo quanto à classificação *SUCS* e obtendo-se valor do IG igual a 1 na classificação AASHTO. Quanto aos valores de CBR e Expansão, houve um aumento na capacidade de suporte e redução da expansão.

A adição da cal viva proporcionou resultados ainda mais expressivos em algumas propriedades do solo. Relativamente a plasticidade, o solo apresentou maiores valores do IP

e também dos limites de consistência, indicando uma maior faixa de valores de umidade no qual o solo mantém no estado plástico. Quanto a granulometria, os valores pouco foram alterados, a classificação SUCS manteve-se a original e a classificação AASHTO foi alterada devido ao novo valor do IP. Os resultados mais significativos foram quanto ao CBR e a Expansão, já que houve um relevante aumento do CBR e uma redução da Expansão até próximo de zero.

5.3. Sugestões para pesquisas futuras

A fim de complementação do estudo realizado e busca por soluções viáveis para a correção da umidade, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Utilização de diferentes tipos de solo, sendo desta vez com características mais arenosas e enquadramento nas normas técnicas para utilização em Reforço de Subleito e/ou Sub-base;
- Utilização de menores energias de compactação para a solo, seja normal ou intermediária, a depender da camada de pavimento em estudo;
- Utilização de outros materiais para incorporação. Podendo estes novos materiais serem outros tipos de cales – sejam estas hidratadas ou hidráulicas -, cimento portland ou, até mesmo, pó de pedra calcária;
- Definição de diferentes métodos e critérios para o “solo saturado”. A influência das ocorrências pluviométricas, aliadas as diferentes intensidades, em cada região e a metodologia com nova simulação de chuvas pode ser um ponto de nova abordagem no estudo.

5.4. Limitações do procedimento em campo

Embora o objetivo inicial de encontrar uma proporção ideal para incorporação de materiais a um solo com elevado teor de umidade não ter obtido sucesso esperado, após a análise dos resultados e com a complementação do estudo através de pesquisas futuras, a técnica proposta neste estudo pode ser colocada em prática com o intuito de agilizar os trabalhos de terraplenagem. Contudo, é necessário salientar algumas limitações técnicas ocorridas durante o estudo laboratorial, visto que todo o procedimento adotado foi baseado em análises laboratoriais em condições favoráveis, a aplicação na prática pode encontrar divergência quando empregada em campo.

A primeira delas é justamente a operacionalização do projeto. Os ensaios foram realizados em condições laboratoriais pré-estabelecidas, as quais não retratam a realidade encontrada em campo. Ademais, a técnica proposta deve ser testada para cada tipo de solo a ser utilizado, bem como o tipo de cal viva utilizada. Ainda sobre a cal viva utilizada, cada projeto deve possuir disponível em obra um estoque deste material para aplicação imediata quando da ocorrência de precipitações e necessidade de utilização da técnica.

Um segundo ponto para avaliação da viabilidade prática da técnica são os caminhos de serviço da obra. Em alguns casos, quando ocorrem chuvas em excesso a ponto de inviabilizar a execução do imediato dos trabalhos, os caminhos de serviços para acesso de máquinas e caminhões encontram-se inviáveis para trafegabilidade. Neste ponto, independentemente da redução teórica do teor de umidade do solo através da incorporação de novos materiais, a continuidade dos trabalhos será afetada por fatores externos.

A limitação mais crítica da pesquisa e impossível de se combater é a ocorrência de chuvas consecutivas e posteriores a adoção das medidas propostas. Tratando-se de apenas uma chuvada isolada no tempo, a técnica pode se mostrar viável para utilização, contudo em períodos de chuvas recorrentes - principalmente em regiões com elevados índices de precipitação e períodos de inverno – deve-se sempre analisar o custo da medida adotada.

6. Referência Bibliográfica

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7180:2016. Solo - Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 2016

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7182:2016. Solo - Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 2016

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 6459:2017. Solo - Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 7181:2016. Solo - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2016

ABRAM, I. (2001). Planejamento de obras rodoviárias. Salvador, Bahia, Brasil.

ABRAM, I., & ROCHA, A. V. (2009). Manual Prático de Terraplenagem. Salvador, Bahia: -.

ARAÚJO, A. (2009). Dissertação de Mestrado. Avaliação de Misturas de Solos Estabilizados com Cal, em pó e em pasta, para aplicação em rodovias do estado do Ceará. Fortaleza, Brasil: Universidade Federal do Ceará.

BALBO, J. T. (2007). Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração. São Paulo: Oficina de Textos.

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M., CERATTI, J. P. & SOARES, J. B. (2008). Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: Abeda.

BRANCO, P. d. (14 de Agosto de 2014). COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - Serviço Geológico do Brasil. Obtido de <http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Os-Solos-2620.html>

CAPUTO, H. P. (1988). Mecânica dos Solos e suas Aplicações. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.

DNER, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 080/94 – Solos – Análise granulométrica por peneiramento (1994). Rio de Janeiro: IPR - Instituto de Pesquisas Rodoviárias,

DNER, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 082/94 – Solos – Determinação do limite de plasticidade (1994). Rio de Janeiro: IPR - Instituto de Pesquisas Rodoviárias.

DNER, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 122/94 – Solos – Determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedito (1994). Rio de Janeiro: IPR - Instituto de Pesquisas Rodoviárias.

DNER, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 162/1994 – Solos – Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas (1994). Rio de Janeiro: IPR - Instituto de Pesquisas Rodoviárias.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006). Manual de Pavimentação. Brasil: Instituto de Pesquisas Rodoviárias.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2009). NORMA DNIT 106/2009-ES – Terraplenagem – Cortes – Especificação de Serviço. Brasil: IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2009). NORMA DNIT 108/2009 – ES – Terraplenagem – Aterros – Especificação de Serviço. BRASIL: IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2010). NORMA DNIT 138/2010 – ES – Pavimentação – Reforço de Subleito – Especificação de Serviço. BRASIL: IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2010). NORMA DNIT 139/2010 – ES – Pavimentação – Sub-base Estabilizada Granulometricamente – Especificação de Serviço. BRASIL: IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2010). NORMA DNIT 141/2010 – ES – Pavimentação – Base Estabilizada Granulometricamente – Especificação de Serviço. BRASIL: IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2013). NORMA DNIT 164/2013 – ME – Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio. Brasil: IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2016). NORMA DNIT 172/2016 – ME – Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia em amostras não trabalhadas – Método de Ensaio. BRASIL: IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2019). NORMA DNIT 422/2019 – ES – Pavimentação – Solo-Cal – Adição de cal para melhoria do subleito – Especificação de Serviço. Brasil: IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias.

FDas, Braja. M. (2011). Fundamentos de engenharia geotécnica. [trad] Braja M. Das. São Paulo: Cengage Learning.

LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (1967). E197/1996. Lisboa, Portugal.

LOVATO, R. S. (2004). Dissertação (Mestrado). Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação. Brasil: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MACHADO, S. d., & MACHADO, M. d. (2002). Mecânica dos Solos I - Conceitos Introdutórios. Salvador, Bahia.

NEVES, E. N. (2009). Dissertação de Mestrado. Estudo Laboratorial de Solos Tratados com Cal. Porto, Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

PEREIRA, P., & SANTOS, L. P. (2002). Pavimentos Rodoviários. Braga - Portugal: Barbosa & Xavier Lda.

PINTO, C. d. (2006). Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas / 3ª Edição. São Paulo: Oficina de Textos.

RICARDO, H. d., & CATALANI, G. (2007). Manual Prático de Escavação, Terraplenagem e Escavação de Rocha - 3ª Edição. PINI.

VEIGA, A. Q. (2011). TESE (Doutorado). Caracterização Geotécnica dos Terrenos do Vale Tifónico - Parceiros - Leiria, 351. Portugal: Universidade de Coimbra.

Anexos

Anexo A



Lena Agregados, S.A.
Quinta de Sordinha - Apartado 1004 Santa Catarina da Serra
2495-907 Santa Catarina da Serra - Portugal



1592
09
1592-CPR-1109

Ficha Técnica de Produto

Norma de Produto:	NP EN 13043:2004/AC:2010 - Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação
Centro de Produção:	Castelo Branco
Produto:	Pó Granito Parker CB (0/4 mm)


Peneiro (mm)	Valores Típicos (%)	Limites Mínimos (%)	Limites Máximos (%)	Características	NP EN 13043
125,000	100			Dimensão (diD)	0/4 mm
90,000	100			Granulometria	G _{0,50}
83,000	100			Tolerância da Granulometria Típica	GT _C -10
45,000	100			Teor de Finos	f _{ix}
31,500	100			Qualidade dos Finos	MB _{0,10}
22,400	100			Índice de Achatamento	NA
16,000	100			Índice de Forma	NA
11,200	100			Coefficiente de Los Angeles	NA
8,000	100	100	100	Coefficiente de micro-Deval	NA
5,600	100	98	100	Coefficiente de Polimento Acelerado	NA
4,000	100	90	100	Massa Volumica	
2,000	83	73	93	material impermeável	2,66 Mg/m ³
1,000	62			partículas secas em estufa	2,65 Mg/m ³
0,500	44			partículas saturadas	2,65 Mg/m ³
0,250	30			Absorção de Água	0,2 %
0,125	19			Baridade	1,53 Mg/m ³
0,083	11,5	8,5	14,5	Porcentagem de Vazios	42 %
				Teor de Cloretos	NA
				Teor de Sulfuretos	NA
				Reação álcali-silica	NA
				Sulfatos solúveis em ácido	NA
				Teor de Enxofre	NA
				Teor de Húmus	NA
				Teor de Ácido Fólvico	NA
				Contaminantes Leves	NA
				Contaminantes orgânicos pelo método da argamassa	
				Aumento do tempo de presa	NA
				Diminuição da resistência à compressão aos 28 dias	NA
				Retração por secagem	NA

Observações:
NA - Não aplicável




Doc.L. 061	Revisão: 07	Data: 15-03-2016	Elaborou: <i>J. Marques</i>	Aprovou: <i>[Signature]</i>
------------	-------------	------------------	-----------------------------	-----------------------------

Anexo B



DECLARAÇÃO DE DESEMPENHO N.º CVM

Revisão: 00




1. **Código de identificação único do produto tipo:**
Óxido de Cálcio CL 90 - Q
2. **Utilização(ões) prevista(s):**
Cal Cálcica: Preparação de ligante para argamassa para alvenaria, rebocos e estuques para produção de outros produtos de construção e para a utilização em engenharia Civil.
3. **Fabricante:**
Maxical, Sociedade Industrial e Comercial de Cal da Maxeira, Unip Lda
Estrada dos Fornos, s/n, Maxeira, 2495-641 Fátima
4. **Sistema(s) de avaliação e verificação da regularidade do desempenho (AVCP):**
Sistema 2»
5. **Norma harmonizada:**
EN 459-1:2010
Organismo(s) notificado(s):
APCER- Associação Portuguesa de Certificação, organismo notificado nº 0866
6. **Desempenho(s) declarado(s):**

Características essenciais	Desempenho	Especificações Técnicas harmonizadas
Granulometria	F2	EN 459-1:2010
CaO + MgO	≥ 90	
MgO	≤ 5	
CO ₂ TM	≤ 4	
SO ₃	≤ 2	
Cal Disponível	≥ 80	
Reatividade	R5	
Expansibilidade TM	Satisfaz	

*Níveis mínimos são feitos por métodos comparativos:
a) Especificação Técnica harmonizada alternativa EN12445:2017
b) Especificação Técnica harmonizada alternativa EN12613

O desempenho do produto identificado acima está em conformidade com o conjunto de desempenhos declarados. A presente declaração de desempenho é emitida, em conformidade com o Regulamento (UE) n.º 305/2011, sob a exclusiva responsabilidade do fabricante identificada acima. Assinado por e em nome do fabricante por:

Abílio Antunes Guerra, Gerente
Maxeira, 30 de dezembro, 2019



Maxical, Sociedade Industrial e Comercial de Cal da Maxeira, Unip Lda | Rua dos Fornos, s/n | Maxeira | 2495-641 Fátima
Tel: 249 521 826 | geral@maxical.pt | www.maxical.pt | NIF 501483822 | MCR: OUBIM N212 | CAP. SOCIAL 125.000€