

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

RICARDO BAZZANI DRANKA

**MELHORAMENTO DE SOLO COM USO DE TELHA CERÂMICA
MOÍDA ORIUNDA DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO
(RCD)**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2016

RICARDO BAZZANI DRANKA

**MELHORAMENTO DE SOLO COM USO DE TELHA CERÂMICA
MOÍDA ORIUNDA DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO
(RCD)**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, do Curso Superior de Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. D. Sc. Ronaldo L. S. Izzo

CURITIBA
2016

FOLHA DE APROVAÇÃO

MELHORAMENTO DE SOLO COM USO DE TELHA CERÂMICA MOÍDA ORIUNDA DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

Por

RICARDO BAZZANI DRANKA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 23 de novembro de 2016, pela seguinte banca de avaliação:

Prof. Orientador – D. Sc. Ronaldo L. S. Izzo
UTFPR

Prof. D. Rogério Francisco Küster Puppi
UTFPR

Prof^a. D. Sc. Amanda Dalla Rosa Johann
UTFPR

AGRADECIMENTOS

Apesar de ser uma monografia, em momento algum realizei este trabalho sozinho. Desde o início até o fim diversas pessoas estiveram ao meu lado, me ajudando e apoiando.

Primeiramente, agradeço ao professor Ronaldo Izzo, por toda a ajuda e por confiar a mim este tema tão interessante.

Ao Eng. Fábio Kosmej pela ajuda na coleta das telhas e do solo.

A todos meus amigos que fizeram estes cinco anos passarem de uma maneira tão rápida e divertida, mas principalmente ao Gabriel Schwab, Jefferson Bonadeu e ao André Fardin, por ajudar a carregar todas aquelas telhas pelo Campus Ecoville.

Ao Wagner Teixeira, que além de me ajudar inúmeras vezes, sem ele o ensaio de granulometria nunca teria saído.

Ao Eclesielter Batista Moura, pela companhia e ajuda nos ensaios CBR, aprendi muito com ele.

Ao amigo Eng. Daniel Gioppo Ferré, que mesmo de longe continuou torcendo por mim em toda esta etapa da minha vida.

A Tassiane Jacon, minha parceira, que participou de todas as etapas desta pesquisa, todos os sábados ao meu lado no laboratório de solos, todas as virgulas corrigidas, sem ela eu levaria o dobro de tempo com a metade da felicidade para finalizar este trabalho, espero um dia poder retribuir à altura.

Agradeço à minha família, pois sem a dedicação, luta e apoio eu nunca teria tido a oportunidade de estar onde estou hoje. Mãe Sonia Mara Bazzani Dranka, irmã Caroline Bazzani Dranka, avô Ivo Bazzani e avó Leonor Rodrigues Bazzani.

Muito obrigado a todos.

RESUMO

DRANKA, R.B. **MELHORAMENTO DE SOLO COM USO DE TELHA CERÂMICA MOÍDA ORIUNDA DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)**. 2016. 95 f. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Este trabalho apresenta um estudo no qual a adição de telha cerâmica moída ao solo, visa o melhoramento dos aspectos físicos, mecânicos e ainda uma nova destinação para os resíduos destas telhas, encontradas em caliças de construção e/ou demolição, ou até mesmo sobras de materiais provenientes de quebras no processo de fabricação. A avaliação foi realizada mediante comparação entre os resultados obtidos para o solo natural e para o solo com quatro teores diferentes de telha moída (2%, 5%, 10% e 15% de telha cerâmica moída em relação ao peso do solo seco). A pesquisa apresentou uma melhora no parâmetro físico do índice de plasticidade. O principal ensaio realizado para obter informações sobre os parâmetros mecânicos, foi o ensaio CBR ou também conhecido como Índice de Suporte Califórnia, o qual apresentou um aumento no índice para os teores de 10% e 15% de telha cerâmica além de uma menor expansibilidade comparada ao solo puro. Os resultados do estudo demonstram ser possível a utilização do produto da telha cerâmica moída misturada ao solo, para obter um melhoramento nos aspectos mecânicos para fins rodoviários, assim como uma nova tecnologia para destinação do resíduo.

Palavras-chave: melhoramento de solo, estabilização de solo, solo-telha cerâmica, RCD.

ABSTRACT

DRANKA, R.B. **SOIL IMPROVEMENT WITH GROUND CERAMIC ROOF TILE FROM CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTES (CDW)**. 2016. 95 f. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

This paper presents a study in which the addition of ground ceramic roof tile to the soil aims to improve the physical and mechanical aspects. In addition, it shows a new destination for the residues of these roof tiles, found in construction and / or demolition rubbles, or even leftovers materials from breaks in the manufacturing process. The evaluation was performed by comparing the results obtained for natural soil and for soil with four different levels of ground roof tile addition (2%, 5%, 10% and 15% of ground roof tile in relation to the weight of dry soil). The research presented an improvement in the physical parameter of the plasticity index. The main test used to obtain information on the mechanical parameters was the CBR test, which presented an increase in the index of 10% and 15%, with even less expansibility compared to pure soil. The results of the study demonstrate that it is possible to use the product of ground ceramic roof tile mixed with the soil to obtain an improvement in mechanical aspects for road use, as well as a new technology for waste disposal.

Keywords: soil improvement, soil stabilization, soil-ceramic roof tile, CDW.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico Umidade x Número de golpes do solo Puro	40
Figura 2 - Gráfico Umidade x Número de golpes do solo + 2%	41
Figura 3 - Gráfico Umidade x Número de golpes do solo + 5%	42
Figura 4 - Gráfico Umidade x Número de golpes do solo + 10%	43
Figura 5 - Gráfico Umidade x Número de golpes do solo + 15%	44
Figura 6 – Gráfico Curva Granulométrica - solo puro	47
Figura 7 – Gráfico Curva Granulométrica - solo + 2%	48
Figura 8 – Gráfico Curva Granulométrica - solo + 5%	49
Figura 9 – Gráfico Curva Granulométrica - solo + 10%	50
Figura 10 – Gráfico Curva Granulométrica - solo + 15%	51
Figura 11– Gráfico Curva Granulométrica – telha pura	52
Figura 12 – Gráfico Curva Granulométrica – Comparação	53
Figura 13 - Gráfico peso específico seco x umidade - solo puro	54
Figura 14 - Gráfico peso específico seco x umidade - solo + 2%	55
Figura 15 - Gráfico peso específico seco x umidade - solo + 5%	56
Figura 16- Gráfico peso específico seco x umidade - solo + 10%	57
Figura 17 - Gráfico peso específico seco x umidade - solo + 15%	58
Figura 18 - Gráfico peso específico seco x umidade	59
Figura 19 - Gráfico Tensão x Penetração dos ensaios de CBR	62
Figura 20 - Gráfico resumo dos resultados de CBR	62
Figura E1 - Correção da curva de tensão x Penetração para o Solo Puro	93
Figura E2 - Correção da curva de tensão x Penetração para o Solo + 2%	93
Figura E3 - Correção da curva de tensão x Penetração para o Solo + 5%	94
Figura E4 - Correção da curva de tensão x Penetração para o Solo +10%	94
Figura E5 - Correção da curva de tensão x Penetração para o Solo + 15%	95

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos resíduos segundo ABNT NBR 10.004:2004	18
Quadro 2 - Propriedades dos principais elementos constituintes das argilas	22
Quadro 3 - Processos para solo – cal	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição dos RCD em cidades brasileiras	19
Tabela 2 - Composição química das massas cerâmicas (%)	22
Tabela 3 - Previsão da quantidade de cimento em função do tipo de solo	24
Tabela 4 - Previsão da quantidade da cal em função do tipo de solo	26
Tabela 5 - Diferentes classes de resíduos de pneus	28
Tabela 6 - Coesão e ângulo de atrito SOLO/PET	30
Tabela 7 - Coesão e ângulo de atrito SOLO/COCO	31
Tabela 8 - Exemplo de quantidade de solo e resíduos por amostra	34
Tabela 9 - Resultados dos ensaios de densidade específica	38
Tabela 10 – Resultados dos ensaios de densidade específica para telha pura	39
Tabela 11 – Densidade específica	39
Tabela 12 – Resultados do Limite de Plasticidade.....	45
Tabela 13 – Resultados do Índice de Plasticidade.....	45
Tabela 14 – Composição granulométrica do solo puro	47
Tabela 15 – Composição granulométrica do solo + 2%	48
Tabela 16 – Composição granulométrica do solo + 5%	49
Tabela 17 – Composição granulométrica do solo + 10%	50
Tabela 18 – Composição granulométrica do solo + 15%	51
Tabela 19 – Composição granulométrica da telha pura	52
Tabela 20 – Composição granulométrica – Comparação	53
Tabela 21 – Resultados pH medidos em solução de H ₂ O	60
Tabela 22 – Resultados pH medidos em solução de KCl	60
Tabela A1 – Limite de Liquidez do Solo Puro	72
Tabela A2 – Limite de Liquidez do Solo + 2%	72
Tabela A3 – Limite de Liquidez do Solo + 5%	72
Tabela A4 – Limite de Liquidez do Solo + 10%	73
Tabela A5 – Limite de Liquidez do Solo + 15%	73
Tabela A6 – Limite de Liquidez da Telha Pura	73
Tabela A7 – Limite de Plasticidade do Solo Puro	74
Tabela A8 – Limite de Plasticidade do Solo + 2%	74
Tabela A9 – Limite de Plasticidade do Solo + 5%	74

Tabela A10 – Limite de Plasticidade do Solo + 10%	75
Tabela A11 – Limite de Plasticidade do Solo + 15%	75
Tabela A12 – Limite de Plasticidade da Telha Pura	75
Tabela B1 – Peneiramento grosso do solo puro	77
Tabela B2 – Peneiramento lavado do solo puro	77
Tabela B3 – Sedimentação do solo puro	77
Tabela B4 – Peneiramento grosso do solo + 2%	78
Tabela B5 – Peneiramento lavado do solo + 2%	78
Tabela B6 – Sedimentação do solo + 2%	78
Tabela B7 – Peneiramento grosso do solo + 5%	79
Tabela B8 – Peneiramento lavado do solo + 5%	79
Tabela B9 – Sedimentação do solo + 5%	79
Tabela B10 – Peneiramento grosso do solo + 10%	80
Tabela B11 – Peneiramento lavado do solo + 10%	80
Tabela B12 – Sedimentação do solo + 10%	80
Tabela B13 – Peneiramento grosso do solo + 15%	81
Tabela B14 – Peneiramento lavado do solo + 15%	81
Tabela B15 – Sedimentação do solo + 15%	81
Tabela B16 – Peneiramento grosso da telha pura	82
Tabela B17 – Peneiramento lavado da telha pura	82
Tabela B18 – Sedimentação da telha pura	82
Tabela C1 – Resultados Compactação e Saturação – Solo Puro	84
Tabela C2 – Resultados Compactação e Saturação – Solo + 2%	84
Tabela C3 – Resultados Compactação e Saturação – Solo + 5%	84
Tabela C4 – Resultados Compactação e Saturação – Solo + 10%	85
Tabela C5 – Resultados Compactação e Saturação – Solo + 15%	85
Tabela D1 – Expansão CBR – Solo Puro	87
Tabela D2 – CBR – Solo Puro	87
Tabela D3 – Expansão CBR – Solo + 2%	88
Tabela D4 – CBR – Solo + 2%	88
Tabela D5 – Expansão CBR – Solo + 5%	89
Tabela D6 – CBR – Solo + 5%	89
Tabela D7 – Expansão CBR – Solo + 10%	90
Tabela D8 – CBR – Solo + 10%	90

Tabela D9 – Expansão CBR – Solo + 15%	91
Tabela D10 – CBR – Solo + 15%	91

LISTA DE ABREVIATURAS

°C	Grau Celsius
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CBR	Califórnia Bearing Ratio
CDW	Construction and demolition wastes
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes
Gs	Densidade relativa dos grãos do solo
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
NBR	Norma Brasileira Registrada
NP	Não-Plástico
PET	Politereftalato de etileno
RCD	Resíduos de Construção e Demolição

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVO GERAL	15
1.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	15
1.3	JUSTIFICATIVA	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	17
2.1.1	Composição dos RCD	18
2.2	TELHAS CERÂMICAS	19
2.2.1	Fabricação de telhas cerâmicas	20
2.2.2	Composição de telhas cerâmicas	21
2.2.3	Classificação dos tipos de telhas cerâmicas	23
2.3	TÉCNICAS DE ESTABILIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE SOLOS	23
2.3.1	Solo – Cimento	23
2.3.2	Solo – Cal	25
2.4	ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DE SOLO	27
2.5	TÉCNICAS DE ESTABILIZAÇÃO DE SOLO COM UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS	27
2.5.1	Resíduo de pneu	27
2.5.2	Resíduo de madeira	29
2.5.3	Resíduo de pó de pet	29
2.5.4	Fibra de coco	30
2.6	UTILIZAÇÃO DE RCD COMO AGREGADO PARA PAVIMENTAÇÕES URBANAS	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA TELHA	34
3.2	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO E MISTURAS	34
3.3	ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	35
3.4	ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	37
4	RESULTADOS	38
4.1	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DENSIDADE RELATIVA DOS GRÃOS	38
4.2	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE IP	39
4.2.1	Limite de Liquidez	39

4.2.2	Limite de Plasticidade.....	44
4.2.3	Índice de Plasticidade.....	45
4.3	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA	46
4.3.1	Análise Granulométrica do solo Puro	47
4.3.2	Análise Granulométrica do solo + 2% de telha cerâmica.....	48
4.3.3	Análise Granulométrica do solo + 5% de telha cerâmica.....	49
4.3.4	Análise Granulométrica do solo + 10% de telha cerâmica.....	50
4.3.5	Análise Granulométrica do solo + 15% de telha cerâmica.....	51
4.3.6	Análise Granulométrica da telha cerâmica	52
4.3.7	Análise Granulométrica – Comparação	53
4.4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PROCTOR NORMAL	54
4.5	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PH.....	59
4.6	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS CBR	61
5	CONCLUSÃO	64
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	66
	REFERÊNCIAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

O solo deve ser um dos grandes focos de estudo dos engenheiros civis, pois compõe o sistema de fundações da maioria das obras civis, aterros, taludes, barragens, edifícios, entre outros. Portanto, é de grande relevância, conhecer o comportamento mecânico de um solo quando este for solicitado por determinada carga. Devido a existência de solos cuja capacidade de suporte é considerada baixa, uma das alternativas existentes é a melhoria das propriedades do mesmo, tornando-o resistente às cargas solicitadas.

De acordo com Guimarães (1998 apud OLIVEIRA, 2010), quando um solo não apresenta as características de resistência suficientes para suportar uma obra de engenharia, necessita-se que o solo seja corrigido por meio de adição ou subtração de componentes, a escolha desta técnica – estabilização de solo – deve ser escolhida levando em conta a finalidade da obra e sua viabilidade econômica.

Ainda segundo o autor, “A estabilização de um solo é um conjunto de procedimentos que visam a melhoria e estabilidade das propriedades dos solos”. Diferencia-se solo estabilizado do solo melhorado devido ao primeiro utilizar o emprego do aditivo para obter-se um ganho significativo da resistência, já o último, apresenta um determinado ganho em outras propriedades não visando necessariamente a resistência.

Uma das soluções encontradas para estes tipos de estudo, é a adição de materiais no solo, como o cimento, a cal ou até mesmo resíduos.

A crescente preocupação com a destinação dos resíduos da construção civil, é um dos fatores para a realização desta pesquisa, pois é devido à falta de planejamento e gerenciamento adequado dos mesmos, que por vezes são descartados de maneira incorreta. Como exemplo de aproveitamento de resíduo temos a telha cerâmica, oriunda essencialmente de argilas, que pode ser encontrada com facilidade em caliças (sobras de materiais provenientes de obras), deste modo, com a gestão correta, pode ser utilizada no melhoramento do solo, evitando o descarte inadequado do material.

A relevância deste estudo, vem da necessidade de encontrar novas maneiras de melhoramento e/ou estabilização do solo, encontrando-se novas opções de tratamento para solos de baixa capacidade mecânica, e ainda descobrir uma nova tecnologia para reaproveitamento deste resíduo.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal do trabalho é, verificar o comportamento do solo em estudo com a adição de telha cerâmica moída oriunda de resíduos de construção e demolição (RCD).

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Recolher telhas cerâmicas oriundas de resíduos de construção e/ou demolição, moê-las e investigar as características físicas deste material, tais como granulometria e densidade relativa dos grãos;
- Realizar a caracterização física e o ensaio CBR com o solo sem resíduo e com a adição dos resíduos em determinadas porcentagens;
- Analisar os resultados.

1.3 JUSTIFICATIVA

Obras de construção civil, podem-se tornar inviáveis pelo fato do terreno no qual o trabalho deverá ser executado, abrigar um solo com baixa capacidade de

suporte e/ou propriedades inadequadas para o serviço em questão. Porém, não é sempre que se pode escolher o local em que o solo tenha as melhores características para se trabalhar, portanto, é necessário encontrar alternativas mais econômicas para execução dentro dos padrões necessários.

Quando o solo é considerado impróprio para uso geotécnico, existem três alternativas para serem consideradas:

- a) Projetar considerando a qualidade do solo local e suas limitações;
- b) Substituir o solo local por outro com melhores qualidades para o uso em estudo;
- c) Alterar as propriedades do solo existente para criar um novo material capaz de atender as exigências;

O foco deste estudo baseia-se na alternativa “c”, que visa descobrir uma nova técnica de melhoramento de solo, assim como uma nova alternativa para destinação de resíduos de telhas cerâmicas, visto que são materiais que podem gerar muita quebra, desde a fase de produção, até a fase de instalação, como em alguns estados brasileiros, no qual 48% dos RCD são oriundos de materiais cerâmicos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Resíduos da construção civil, segundo a resolução CONAMA nº 307/02 atualizada pelas resoluções CONAMA nº 431 (BRASIL, 2011) e CONAMA nº 469 (BRASIL, 2015):

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

Segundo o artigo 3º da referida norma, que dispõe sobre a gestão dos resíduos na construção civil, os resíduos são classificados da seguinte maneira:

I - Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

- a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infra-estrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
- b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
- c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras (BRASIL, 2002);

II - Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso (BRASIL, 2015);

III - Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação (BRASIL, 2011);

IV - Classe D - são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde (BRASIL, 2002).

A norma NBR 10.004 (ABNT, 2004), faz ainda outro tipo de classificação para os resíduos sólidos, sendo estes os que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. A classificação está resumida no Quadro 1.

Classe	Descrição	Características
Classe I	Perigosos	Inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade
Classe II - A	Não inertes	Biodegradabilidade, combustibilidade, solubilidade em água
Classe II - B	Inertes	Não tem qualquer de seus constituintes solúveis em água destilada ou deionizada.

Quadro 1 – Classificação dos resíduos segundo NBR 10.004
Fonte: Adaptado de ABNT (2004).

Portanto, segundo o CONAMA, a telha cerâmica – material utilizado nesta pesquisa - é classificada como um resíduo classe A. E pela norma NBR 10.004 (ABNT, 2004), classifica-se como Classe II – B.

2.1.1 Composição dos RCD

De acordo com Grubba (2009), a composição dos resíduos da construção civil depende das técnicas construtivas e matérias primas disponíveis em cada região.

“No Brasil, a maior parte desses resíduos é composta por materiais inertes e recicláveis, como restos de argamassas, concretos, agregados pétreos e materiais cerâmicos” (GRUBBA, 2009).

Na Tabela 1 pode-se visualizar a composição dos RCD em algumas cidades brasileiras.

Tabela 1 – Composição dos RCD em cidades brasileiras

Município	%					
	Argamassa	Concreto	Mat. Cerâmico	Cer. Polida	Rochas e solos	Outros
São Paulo/SP	25,50	8,20	29,60	n.d.	32,00	5,00
Porto Alegre/RS	44,20	18,30	35,60	0,10	1,80	n.d.
Salvador/BA		53,00	9,00	5,00	27,00	6,00
Campina Grande/PB	28,00	10,00	34,00	1,00	9,00	18,00
Maceió/AL	27,82	18,65	48,15	3,06	n.d.	2,32

n.d. - não disponível

Fonte: Adaptado de RIBEIRO (2013).

2.2 TELHAS CERÂMICAS

Segundo Bauer (2001), “chama-se cerâmica à pedra artificial obtida pela moldagem, secagem e cozedura de argilas ou de misturas contendo argilas”.

A argila é um material natural proveniente de decomposição de rochas, apresenta baixa granulometria e quando misturada com quantidades específicas de água exibe plasticidade. São constituídas por argilominerais, pode-se encontrar depósitos de argilas que contenha a predominância de um determinado argilomineral, porém, para alcançar as características necessárias para a produção de peças cerâmicas é comum que se misture dois ou mais tipos de argilas (ISAIA, 2007).

“As argilas mais utilizadas na fabricação de telhas cerâmicas são do tipo illita e montmorilonita, sendo necessária uma seleção criteriosa da mistura de argilas que irão compor a massa, em função do tipo de telhas a ser fabricada” (ISAIA, 2007).

As alterações físicas devido ao efeito do calor sobre as argilas acontecem da seguinte maneira, entre 20 e 150°C perda de água de capilaridade e amassamento, de 150 a 600°C perda de água absorvida, conseqüente enrijecimento. As alterações químicas se dão em três estágios, a partir de 600°C ocorrem o primeiro e segundo estágio, endurecimento resultante da desidratação química e oxidação, respectivamente. O terceiro estágio, a vitrificação se dá a partir dos 950°C (BAUER, 2001).

2.2.1 Fabricação de telhas cerâmicas

De acordo com Isaia (2007), o processo de fabricação de componentes de cerâmica vermelha, assim como as telhas cerâmicas, podem ser divididas entre as seguintes etapas.

- Preparação da massa;
- Moldagem;
- Secagem;
- Queima;
- Resfriamento.

A preparação da massa tem como objetivo adequar a dimensão dos grãos da argila para o processo seguinte de moldagem. Esta preparação ocorre por meio das operações de sazamento, mistura e laminação. A primeira consiste na exposição da argila à intempérie para que ocorra desagregação dos torrões e lixiviação de sais solúveis. A segunda tem finalidade de corrigir deficiências proveniente da jazida em que a argila foi retirada e a última tem a função de triturar os torrões e grãos de maiores dimensões.

A moldagem de telhas cerâmicas é realizada através da prensagem, após a extrusão da argila entre 20-25% de umidade, essa é submetida à prensagem em fôrmas que lhe conferem suas características geométricas.

A secagem pode ser realizada de duas formas. Naturalmente, ou seja, por estocagem em prateleiras, protegida da chuva, com tempo de duração entre 10 e 30 dias. E artificialmente, realizada em estufas ou em câmaras de alvenaria, tendo duração de no máximo 3 dias.

A queima pode acontecer em diversos tipos de fornos, os mais tradicionais são os fornos contínuos para uma produção contínua, e intermitente quando a queima acontece em ciclos de carga, queima e descarga.

O resfriamento deve ser lento, variando entre 8 e 24 horas (ISAIA, 2007).

2.2.2 Composição de telhas cerâmicas

Segundo Motta et al. (2001), o setor de cerâmica vermelha, no ponto de vista de matéria prima, utiliza basicamente argila comum como massa do tipo monocomponente, ou seja, apenas argila. A preparação da massa de argila é feita geralmente com uma mistura de argila “gorda” e “magra”, a primeira caracterizada pela alta plasticidade, granulometria fina e composta essencialmente de argilominerais, e a segunda rica em quartzo e caracterizada como material redutor de plasticidade.

“As argilas são aluminossilicatos, sendo compostas por alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2), as quais contêm água quimicamente ligada” (CALLISTER, 2002).

De acordo com Callister (2002), dentre as impurezas mais comuns encontradas nas argilas, incluem-se compostos de bário, cálcio, sódio, potássio e ferro, geralmente óxidos, e materiais orgânicos. O quartzo é usado principalmente como um material de enchimento, experimenta pouca alteração durante o tratamento térmico a alta temperatura, apresentando ainda a capacidade de formação de vidro.

Estudo feito por Vieira et al. (2003), caracterizou a composição química de três massas cerâmicas utilizadas para fabricação de telhas de diferentes estados brasileiros, o resultado é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química das massas cerâmicas (%)

	%								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	PF
Campos - RJ	44,56	29,64	9,21	1,44	1,41	0,51	0,24	1,10	11,43
Santa Catarina	68,35	15,60	5,96	1,17	1,36	0,23	0,14	0,71	5,83
Piauí	61,39	19,74	6,93	1,11	2,20	0,23	0,31	0,91	6,91

PF - Perda ao fogo

Fonte: Adaptado de VIEIRA et al. (2003).

No quadro 2, estão relacionadas as principais propriedades dos elementos constituintes dos argilominerais.

Elementos	Principais propriedades
Alumina	Propicia estabilidade dimensional em temperaturas elevadas.
Carbonato e sulfato de cálcio e magnésio	Resultam em expansão volumétrica; agem como fundentes
Matéria orgânica	Resulta em retração, fissuras durante os processos de sazonalidade e queima e diferenças de coloração em um mesmo componente cerâmico.
Sílica livre	Diminui a retração durante os processos de sazonalidade e queima: reduz a plasticidade da argila.
Silicatos e fosfatos	São fundentes, alguns aumentam a resistência da cerâmica.
Sais solúveis	Propiciam o aparecimento de eflorescências nos componentes cerâmicos.

Quadro 2 – Propriedades dos principais elementos constituintes das argilas

Fonte: ISAIA (2007).

2.2.3 Classificação dos tipos de telhas cerâmicas

De acordo com a NBR 15310 (ABNT, 2009), existem quatro tipos de telhas cerâmicas que classificam-se pelas suas características geométricas e tipo de fixação.

- Telhas planas de encaixe, encaixam-se por meio de saliências, apresentando furos de amarração para fixação;
- Telhas compostas de encaixe, geometria formada por capa e canal na mesma peça e apresenta furos de amarração;
- Telhas simples de sobreposição, formadas por capa e canal independentes, sendo que o canal é quem possui furos de amarração;
- Telhas planas de sobreposição, apenas sobrepõem e podem ter, mas não obrigatoriamente, furos de amarração (NBR 15310 (ABNT, 2009)).

2.3 TÉCNICAS DE ESTABILIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE SOLOS

A estabilização físico-química é o procedimento que utiliza-se de aditivos que interagem com as partículas do solo visando melhoria e estabilidade em suas propriedades mecânicas e hidráulicas (BASTOS, 2008).

A seguir, será tratado sobre as principais técnicas de estabilização físico-químicas empregadas atualmente.

2.3.1 Solo – Cimento

O cimento é o agente de ligação mais antigo desde a invenção da estabilização de solo, na década de 1960. Este pode ser considerado como agente de estabilização primário, devido a possibilidade de ser utilizado de forma isolada para provocar a ação estabilizante necessária. A reação cimentante não depende de

minerais do solo, portanto, a vantagem desta técnica é sua reação com água, que pode acontecer em qualquer tipo de solo. (MAKUSA, 2012).

Solo-Cimento, segundo a ABCP (1986), “é o produto endurecido resultante da mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem racional, executada de acordo com as normas aplicáveis ao solo em estudo.”

ABCP (2009) afirma que, o produto da mistura solo-cimento, é um material com boa resistência à compressão, bom índice de impermeabilidade, baixo índice de retração volumétrica e boa durabilidade. A quantidade de cimento necessária para estabilização do solo e conferir as propriedades de resistência desejadas para o composto varia de 5% a 10%.

Os solos mais apropriados para a utilização desta técnica, são os que possuem teor de areia entre 45% e 50%. Apenas solos orgânicos - solos de cor preta - não podem ser utilizados.

A matéria orgânica, contida em solos altamente orgânicos, tem a capacidade de retardar ou até mesmo impedir a hidratação do cimento. Solos com presença de sais, principalmente de sulfato e com pH ácido, também inibem o desenvolvimento da resistência (VENDRUSCOLO, 2003).

A faixa viável de uso de cimento em relação à massa total fica em torno de 5% e 9%, para fins rodoviários. Acima destes percentuais, a estabilização muitas vezes se torna inviável economicamente devido os custos ficarem bastante elevados (LIEDI et al., 2006).

A previsão da quantidade de cimento em função do tipo de solo é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Previsão da quantidade de cimento em função do tipo de solo

Tipo de solo	Porcentagem de cimento a adicionar
Pedra finamente britada	0,5 a 2
Pedregulho areno-argiloso bem graduado	2 a 4
Areia bem graduada	2 a 4
Areia mal graduada	4 a 6
Argila-arenosa	4 a 6
Argila-siltosa	6 a 8
Argilas	8 a 15

Fonte: adaptado de INGLES e METCALF (1973).

O processo de hidratação do cimento junto ao solo no qual sua característica aglomerante ocorre, pode ser separada em quatro fases (PINHEIRO, 2011):

1ª fase – Hidróxido de cálcio é liberado após reação dos componentes do cimento, dissolvendo-se parcialmente na fase aquosa elevando o pH para 13. Essa fase dura aproximadamente de 5 a 10 minutos sendo caracterizada como exotérmica (40 cal/g/h);

2ª fase – Período de indução, géis neo-formados cobrem os grãos. Uma camada gelatinosa de silicatos e aluminatos hidratados dos grãos de cimento é formada;

3ª fase – Ligação entre os grãos parcialmente hidratados devido o endurecimento do gel. Duração aproximada de 6 horas;

4ª fase – Endurecimento total do gel.

2.3.2 Solo – Cal

A estabilização ou melhoria dos solos instáveis através da adição de cal é uma das mais antigas técnicas empregadas pelo homem. Exemplos marcantes encontrados que comprovam o uso da cal são a Via Apia, no sul da Itália construída no ano 312 a.C. e, num trecho da muralha da China, datado de 228 a.C. (GUIMARÃES 1998, apud OLIVEIRA, 2010).

Segundo Guimarães (1971 apud LOPES JUNIOR, 2007), a cal, em geral, afeta de maneira positiva as propriedades do solo, alterando as seguintes características físicas: granulometria, plasticidade, contração e retração, umidade de campo, densidade, trabalhabilidade, desintegração e compactação, resistência e permeabilidade.

De acordo com Castro (1995), a estabilização química com cal é caracterizada por duas etapas, a inicial denominada etapa rápida pode ser determinada através de fenômenos tais como, troca catiônica, floculação-aglomeração, adsorção dentre outros, e sua duração pode variar de horas a dias. Já a etapa lenta, que pode demorar

de meses a anos, caracteriza-se pelas reações pozolânicas, que devido a formação de produtos cimentantes geram aumento da resistência.

Para solos argilosos, a resistência a compressão simples aumenta linearmente com o teor de cal, até aproximadamente 8%. A partir deste teor a taxa de acréscimo de resistência diminui com a quantidade de cal, em virtude da lenta cimentação da mistura solo-cal. (INGLES e METCALF, 1973).

De acordo com Cristelo (2001), o teor ótimo da cal depende do objetivo específico que pretende-se alcançar, como resistência e durabilidade. Este processo então, pode ser alcançado por modificação ou estabilização.

No Quadro 3, esta exemplificado diferentes utilizações para modificação e estabilização de solo.

Processo	Objetivo
Modificação com cal	Melhoria de acesso em locais molhados
	Melhoria de trabalhabilidade
Estabilização com cal	Reforço de subleito
	Reforço da base

Quadro 3 – Processos para solo-cal
Fonte: adaptado de INGLES e METCALF (1973)

A previsão da quantidade de cal em função do tipo de solo é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Previsão da quantidade da cal em função do tipo de solo

Tipo de solo	Teor de cal para modificação	Teor de cal para estabilização
Pedra finamente britada	2 a 4 %	não recomendado
Pedregulho argiloso bem graduado	1 a 3 %	≥3 %
Areias	não recomendado	não recomendado
Argila arenosa	não recomendado	≥5 %
Argila siltosa	1 a 3 %	2 a 4 %
Argilas	1 a 3 %	3 a 8 %
Solos orgânicos	não recomendado	não recomendado

Fonte: adaptado de INGLES e METCALF (1973).

Segundo Herrin e Mitchell (1961 apud LOPES JUNIOR, 2007) os principais fatores que influenciam a resistência de misturas solo-cal são: teor e tipo de cal, tipo de solo, massa específica, tempo e tipo de cura.

2.4 ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DE SOLO

De acordo com Bastos (2008), a estabilização granulométrica é a combinação de dois ou mais solos, com objetivo de obtenção de um produto com nova distribuição granulométrica e que mantenha-se volumetricamente estável e apresente um aumento de resistência.

A função da distribuição granulométrica na estabilidade de um solo se dá principalmente pelo contato grão a grão do solo devido ao preenchimento de vazios, em geral solos naturalmente estabilizados são solos bem graduados (BASTOS, 2008).

2.5 TÉCNICAS DE ESTABILIZAÇÃO DE SOLO COM UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS

A seguir serão apresentados métodos de reforço de solo utilizando mistura de novos materiais ao solo.

2.5.1 Resíduo de pneu

Segundo Franco (2012), “dentre as alternativas tecnológicas para a destinação correta de pneus está o uso na construção de aterros de misturas de solo e resíduo de pneus triturados. ”

Para a reutilização os pneus são processados, formando-se então migalhas de pneu, desbastes e lascas (FRANCO, 2012).

As classes e suas respectivas dimensões são relacionadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Diferentes classes de resíduos de pneus

Classificação	Tamanho dos resíduos de pneus
Pedaços de pneus	50 - 300 mm
Lascas de pneus	30 mm
Desbastes de pneus	2 - 40 mm
Migalhas de pneus	< 0,6 mm

Fonte: Adaptado de FRANCO (2012).

De acordo com o estudo realizado por Franco (2012), a mistura de resíduos de Pneu, mais especificamente desbastes de pneu, com tamanho médio de 1,4 mm, geram o melhoramento do solo. A pesquisa realizada utilizou-se de solos com mistura em peso de 0% de pneu, ou seja, solo puro, 10%, 20%, 40%, 50% e 100% (resíduo puro).

A mistura proporciona um ganho considerável de resistência ao cisalhamento, a máxima resistência ao cisalhamento é obtida com a mistura em peso de 40% de resíduos de pneu.

A permeabilidade da mistura solo-pneu para uma tensão confinante de 100 kPa, cresce significativamente com a adição do pneu até o teor de 20% do resíduo, após essa faixa a permeabilidade da mistura estabiliza-se.

Observa-se também, que o solo misturado ao resíduo torna-se mais compressível que o solo puro.

Silva (2007), afirma ainda que com a mistura de raspas de pneu no solo, obtém-se uma redução no teor de umidade ótima e aumento de massa específica aparente seca do solo.

2.5.2 Resíduo de madeira

De acordo com Repsold (2015), a madeira é um material utilizado em larga escala, tanto na construção civil quanto na indústria moveleira, o beneficiamento e o processamento industrial desta matéria prima geram grandes quantidades de resíduos, muitas vezes disposta de forma inadequada. Portanto, uma das possibilidades de aproveitamento desses resíduos, é a utilização de serragem de madeira como reforço de solo

Segundo o mesmo autor, “o uso de serragem como elemento de reforço torna possível a redução de volume de solo utilizado, assim como o aproveitamento e disposição adequada de um material com grande potencial energético que seria desperdiçado. ”

No estudo feito por Repsold, avaliou-se o comportamento do solo com dois tipos de madeira. A Peroba, que é considerada uma madeira nobre, e o MDF que é um material fabricado com fibras de madeiras. Os ensaios foram realizados com solo puro e mistura de solo com uma porcentagem fixa de serragem, 3% em massa em relação ao peso seco do solo.

De acordo com a pesquisa, ambas as misturas de serragens melhoram o parâmetro de resistência mecânica do solo argiloso. Tendo destaque o aumento de coesão nas duas misturas, que apresentou valores de até 50% de melhora em relação ao solo puro, sem perdas significativas no ângulo de atrito.

2.5.3 Resíduo de pó de pet

Segundo Rocha e Novo (2015), a produção e consumo de garrafas PET no Brasil é considerada alta, porém não existe uma reciclagem eficiente deste material.

Material este que demora centenas de anos para se decompor e requer amplos espaços de armazenamento. Portanto, umas das alternativas para consumo deste material é a de utilização em obras geotécnicas, como reforço de solo.

A pesquisa realizada pelos autores utilizou o resíduo de Pet na forma de pó, material passante na peneira de 0,42 mm. E as misturas feitas para os ensaios foram de 10%, 20% e 30% de pó de PET em relação ao peso seco do solo puro.

De acordo com Rocha e Novo (2015), para uma pequena tensão confinante a mistura de pó de PET não aumenta a capacidade do solo, devido os grãos não estarem com contato um com o outro, fazendo com que a capacidade da mistura fique mais fraca que a do solo puro. Entretanto, o solo é melhorado para maiores tensões confinantes. Segundo os autores, a mistura não reage com o solo, criando um processo de cimentação por exemplo, o pó de PET trabalha como uma melhoria do tamanho dos grãos, deixando menos vazios entre as partículas do solo, por isso o aumento de capacidade apenas foi visto nas tensões mais altas.

Os parâmetros de resistência de cisalhamento encontrados com 18% das tensões residuais são resumidos na Tabela 6.

Tabela 6 – Coesão e ângulo de atrito SOLO/PET

Material/Mistura	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Solo puro	25,0	27,1
10%	22,0	30,6
20%	17,0	30,8
30%	27,8	31,0

Fonte: Adaptado de ROCHA e NOVO (2015).

2.5.4 Fibra de coco

De acordo com Santos e Teixeira (2015), a produção de coco no Brasil chega a 800 milhões de unidades por ano. No litoral das grandes cidades brasileiras, cerca

de 70% do lixo produzido é representado pela casca de coco, gerando em média 6,7 milhões de toneladas casca / ano.

Segundo os autores já citados, para o confinamento seguro desses resíduos deve-se direcioná-los a aterros sanitários. Entretanto, como a casca do coco é um material volumoso e de difícil degradação acaba contribuindo para a diminuição da vida útil desses aterros.

Uma das possibilidades para atenuar os problemas relatados acima, é a utilização desses resíduos em obras geotécnicas, como reforço de solo.

Existem diversas possibilidades de uso para a fibra extraída da casca de coco, devido ser um material ecológico e de grande facilidade de reciclagem. É pertencente a família das fibras duras, devido a grande porcentagem de lignina e celulose, (35-45%) e (23-43%) respectivamente, o que lhe confere elevados índices de rigidez e dureza. (NOGUEIRA et al., 1998 apud SANTOS; TEIXEIRA, 2015).

A análise feita por Santos e Teixeira (2015), utilizou-se de fibras cortadas com comprimento de aproximadamente 2 cm, e as misturas utilizadas com solo argiloso foram de 0,5%, 0,75%, 1,0%, 1,25% e 1,5 % de fibra de coco, calculados em relação ao peso do solo seco.

A adição da fibra de coco permite o aumento dos parâmetros de resistência do solo, como a coesão (c) e o ângulo de atrito (ϕ). De acordo com o estudo, considera-se como “teor ótimo” de mistura, o teor de 1,5% de fibra de coco, visto que com este teor o aumento dos parâmetros de resistência do solo foi de cerca de 61,3% para a coesão e 19,2% para o ângulo de atrito (SANTOS; TEIXEIRA, 2015).

Os valores encontrados para os parâmetros de resistência podem ser vistos na Tabela 7.

Tabela 7 – Coesão e ângulo de atrito SOLO/COCO

Material/Mistura	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Solo puro	27,66	25,32
1,00%	68,99	29,58
1,50%	71,40	31,32

Fonte: Adaptado de SANTOS e TEIXEIRA (2015)

Este método ainda pode ser empregado para solos granulares (areia). De acordo com Sotomayor e Casagrande (2015), a fibra de coco utilizada como reforço melhora o comportamento tensão-recalque do solo, e é capaz de distribuir e absorver até o dobro do carregamento suportado quando sem a presença da fibra. Inibe a propagação de fissuras, influi na mudança do mecanismo de ruptura (de rupturas localizadas a rupturas por puncionamento).

Sotomayor e Casagrande (2015), ainda afirmam que não existe uma diferença significativa entre o uso das fibras de coco e fibras de polipropileno quando empregadas como reforço de solo, porém seu uso deve-se limitar a obras temporais ou aterros não estruturais.

2.6 UTILIZAÇÃO DE RCD COMO AGREGADO PARA PAVIMENTAÇÕES URBANAS

De acordo com estudo realizado na cidade de Passo Fundo no estado do Rio Grande do Sul em 2015. Estudou-se a viabilidade técnica e econômica da utilização de resíduos de construção e demolição britados para utilização em sub-bases para pavimentações urbanas.

Segundo Almeida (2015), o RCD estudado é considerado de boa qualidade por apresentar percentuais superiores a 90% de materiais cimentícios. O material apresentou ter boa capacidade estrutural, apresentando um índice de CBR de 83% e expansão de 0,00%, caracterizando-o de acordo com a norma NBR 15116 (ABNT, 2004), como material bom para execução de base de pavimento.

Em relação à viabilidade econômica, concluiu-se que para a região de Passo Fundo, devido à dificuldade de obtenção da quantidade de resíduos necessários não seria viável, mesmo considerando o preço de venda do RCD como 80% do valor do material convencional, visto que o RCD exige uma quantidade maior considerando o mesmo dimensionamento, o que poderia fazer com que cliente não optasse pela troca.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O solo utilizado em todos os ensaios realizados neste trabalho, foi recolhido da região metropolitana de Curitiba, na cidade de Fazenda Rio Grande, em um empreendimento em fase de movimentação de terra, onde a amostra foi recolhida de uma só vez, com ajuda de uma retroescavadeira.

As telhas cerâmicas utilizadas nesta pesquisa foram obtidas de uma residência em demolição, no geral, todas as telhas são do modelo francesa (planas de encaixe). Essas peças foram depositadas em uma estufa por 24 horas para que perdessem a umidade e assim facilitasse o processo de moagem.

A moagem foi realizada em um moinho de resíduos de construção, localizado no laboratório da área de materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Colocou-se uma quantidade pequena de telhas no moinho e deixou-o trabalhando até verificar-se a uniformidade no tamanho dos grãos, quando atingida a moagem máxima que o equipamento conseguia, retirava-se o material e reiniciava-se o processo, até obter a quantidade necessária prevista. Após a moagem, o material obtido foi depositado e armazenado em bombonas fechadas.

Misturas de solo e telha com diferentes teores de telha cerâmica moída foram preparadas, com o objetivo de avaliar a variação dos parâmetros analisados nesta pesquisa, a fim de descobrir qual teor de mistura obtém-se melhores desempenhos em termos de comportamento mecânico. As misturas utilizadas foram de 2%, 5%, 10% e 15% de telha cerâmica moída, em relação ao peso do solo seco.

Todos os ensaios relacionados ao solo e a mistura de solo levaram em consideração a norma NBR 6457/2016 que prescreve os métodos para a preparação das amostras de solo para realização dos ensaios de caracterização e compactação.

Para ilustrar como foram realizados os cálculos da quantidade de solo e resíduo para cada amostra, segue exemplo: caso seja necessário 500g de material para determinado ensaio, as quantias necessárias para cada amostra estão apresentadas na tabela 8.

Tabela 8 – Exemplo de quantidade de solo e resíduos por amostra

500g	Solo (g)	Telha Cerâmica (g)
Solo Puro	500	-
Solo + 2%	490	10
Solo + 5%	475	25
Solo + 10%	450	50
Solo + 15%	425	75

3.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA TELHA

- DNER – ME 093/94 – Determinação da densidade real;
- NBR 6459 (ABNT, 2016) – Determinação do Limite de Liquidez;
- NBR 7180 (ABNT, 2016) – Determinação do Limite de Plasticidade;
- DNER – ME 051/94 – Análise Granulométrica;

3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO E MISTURAS

- DNER – ME 093/94 – Solos – Determinação da densidade real;
- NBR 6459 (ABNT, 2016) – Solo – Determinação do Limite de Liquidez;
- NBR 7180 (ABNT, 2016) – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade;
- DNER – ME 051/94 – Solos – Análise Granulométrica;
- NBR 7182 (ABNT, 1986) – Solo – Ensaio de compactação.

Os ensaios referenciados foram realizados de acordo com as normas já citadas.

3.3 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Por tratar-se de um solo desconhecido, o qual está sendo caracterizado neste trabalho, utilizou-se de dois métodos para determinar o pH do solo, telha e das misturas. O primeiro método foi realizado em presença de H₂O deionizada, já o segundo, deu-se em solução de KCl 1M. Segue abaixo o procedimento realizado para cada um deles:

1. Leitura de pH em meio aquoso (H₂O deionizada).
 - Pesou-se 100 gramas de solo puro e 20 gramas de telha moída, colocados em louça de porcelana e posteriormente colocado em estufa à 100 °C por 24 horas para eliminar a umidade da amostra.
 - Após a secagem, o solo foi destorroado e ambos passados em peneira com malha menor que 2 mm separadamente.
 - Utilizou-se de 6 béqueres, cada um contendo 10 gramas de determinada amostra, listadas abaixo:
 - Solo puro
 - Solo 2% (10 gramas contendo 2% de telha)
 - Solo 5% (10 gramas contendo 5% de telha)
 - Solo 10% (10 gramas contendo 10% de telha)
 - Solo 15% (10 gramas contendo 15% de telha)
 - Telha pura
 - Em cada béquer foi adicionado 25 ml de H₂O deionizada e a mistura homogeneizada com um bastão de vidro por 15 minutos, seguido por um descanso de 30 minutos.
 - Após o tempo de descanso, foi realizada a leitura do pH para cada amostra, de modo que o bulbo do pHmetro estivesse na interface solo-água.

2. Leitura de pH em solução de KCl 1 M.

- Pesou-se 100 gramas de solo puro e 20 gramas de telha moída, colocados em louça de porcelana e posteriormente colocado em estufa à 100 °C por 24 horas para eliminar a umidade da amostra.
- Após a secagem, o solo foi destorroado e ambos passados em peneira com malha menor que 2 mm separadamente.
- Utilizou-se de 6 béqueres, cada um contendo 10 gramas de determinada amostra, listadas abaixo:
 - Solo puro
 - Solo 2% (10 gramas contendo 2% de telha)
 - Solo 5% (10 gramas contendo 5% de telha)
 - Solo 10% (10 gramas contendo 10% de telha)
 - Solo 15% (10 gramas contendo 15% de telha)
 - Telha pura
- Em cada béquer foi adicionado 25 ml de KCl 1M e a mistura homogeneizada com um bastão de vidro por 15 minutos, seguido por um descanso de 30 minutos.
- Após o tempo de descanso, foi realizada a leitura do pH para cada amostra, de modo que o bulbo do pHmetro estivesse na interface solo-solução KCl.

Antes de cada ensaio o phmetro foi calibrado com solução padrão de pH 7 seguido por solução padrão de pH 4.

3.4 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Para modo de classificação mecânica, foi realizado o ensaio CBR (Califórnia Bearing Ratio) ou ISC (Índice de Suporte Califórnia). O ensaio foi realizado com a moldagem do corpo de prova na umidade ótima encontrada no ensaio de compactação (Proctor Normal), apenas com a energia de compactação normal, usando 12 golpes do soquete padrão para o solo e para as quatro misturas. As medidas de expansão foram feitas durante quatro dias. No quarto dia, após a última leitura, ocorreu a penetração dos corpos de prova. O procedimento do ensaio foi seguido conforme a norma DNIT 172/2016 -ME.

4 RESULTADOS

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos neste trabalho para os ensaios de densidade relativa dos grãos, índice de plasticidade, granulometria e ph, os quais foram realizados para o solo puro, telha pura e para os quatro teores de mistura. Os ensaios de compactação (Proctor normal) e CBR não foram realizados para a telha pura devido as dificuldades de aplicação neste material.

4.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DENSIDADE RELATIVA DOS GRÃOS

Todos os resultados aqui apresentados, estão referidos à água na temperatura de 20° C, sendo realizado no mínimo quatro ensaios por amostra.

De acordo com a DNER-ME 093/94, o resultado de um ensaio só é considerado válido, quando o mesmo é obtido pela média de no mínimo dois ensaios, não diferindo de 0,009 da média. Os resultados em negrito foram descartados, seguindo a metodologia citada e os valores para cada ensaio podem ser vistos na tabela 9.

Tabela 9 – Resultados dos ensaios de densidade relativa dos grãos

	Gs 1	Gs 2	Gs 3	Gs 4
Solo Puro	2,733454	2,725672	2,726868	2,731512
Solo + 2%	2,733953	2,724785	2,715296	2,691634
Solo + 5%	2,526403	2,524056	2,543834	2,598628
Solo + 10%	2,664256	2,668449	2,604972	2,688496
Solo + 15%	2,586758	2,581390	2,580321	2,578811

O ensaio para a telha pura foi realizado em triplicata, para que este se encaixasse dentro dos padrões exigidos. Entretanto, os resultados mostraram-se

inconclusivos. Assim, utilizou-se propagação dos erros e os resultados em negrito foram descartados para cálculo da média, como pode ser visto na tabela a seguir.

Tabela 10 – Resultados dos ensaios de densidade relativa dos grãos para telha pura

		Gs			
Telha Pura		2,669651	2,638444	2,674247	2,633710
		2,523810	2,422705	2,606771	2,573265
		2,394737	2,363420	2,406250	2,548223
		2,376190			

Os resultados das densidades relativa dos grãos do solo puro, das misturas e da telha pura são apresentados na tabela 11, seguido de seus erros totais.

Tabela 11 – Densidade relativa dos grãos

	Solo Puro	Solo + 2%	Solo + 5%	Solo + 10%	Solo + 15%	Telha Pura
GS	2,7294	2,7294	2,5252	2,6664	2,5818	2,570
σ_t	0,0016	0,0032	0,0008	0,0015	0,0015	0,029

É possível perceber que a mistura de apenas 2% de resíduo no solo praticamente não causou alteração na densidade relativa dos grãos do solo, a partir de 5% todas as misturas apresentaram um valor menor se comparado ao solo puro, porém a variação não foi proporcional a quantidade de resíduo, como o esperado. A densidade específica da telha pura também se apresentou menor que o do solo.

4.2 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE IP

4.2.1 Limite de Liquidez

Para realização deste ensaio a quantidade de amostras foi determinada dependendo do número de golpes, esses deveriam ficar contidos dentro de uma faixa

de 15 a 40 em todas as tentativas. O LL é expresso pelo teor de umidade correspondente a 25 golpes de uma reta ajustada. Os valores encontrados para o ensaio do limite de liquidez podem ser vistos no Apêndice A. Os valores em negrito foram descartados considerando a metodologia citada anteriormente.

O resultado para o solo puro é apresentado na figura 1.

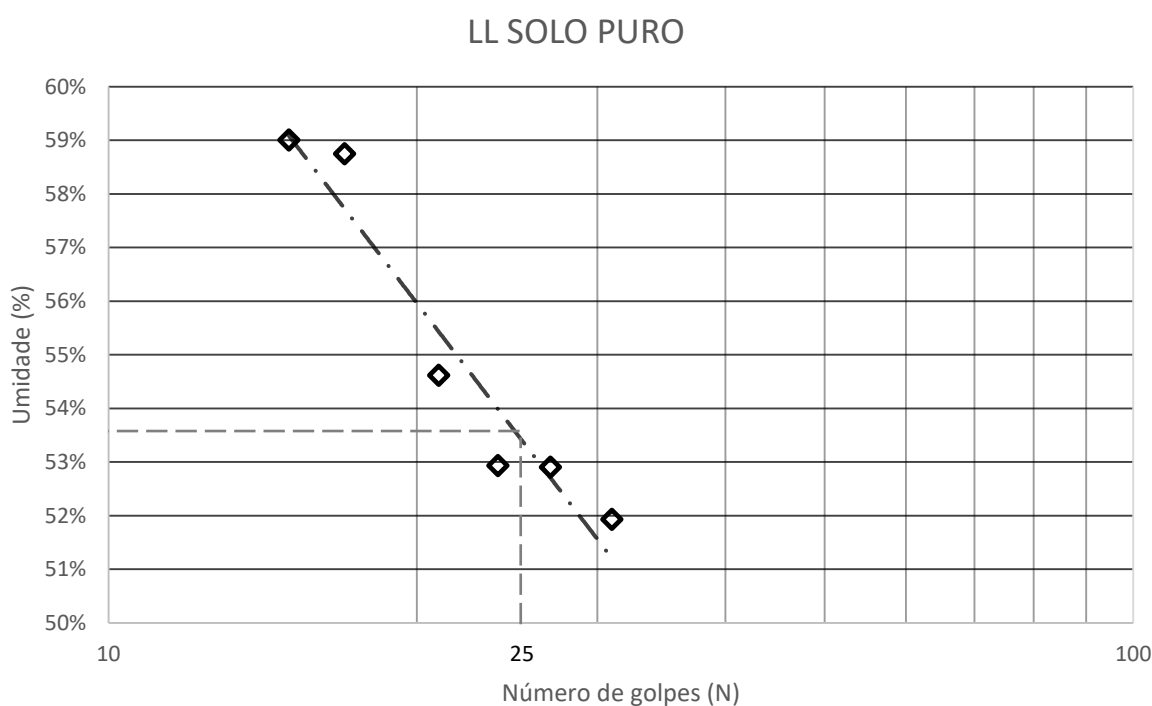


Figura 1 – Gráfico Umidade x Número de golpes do solo Puro

Através do ajuste da reta, observa-se o valor de 54% de umidade para 25 golpes, portanto o LL para o solo puro é de 54%.

Na figura 2, é apresentado o resultado para a mistura de solo com 2% de telha cerâmica moída.

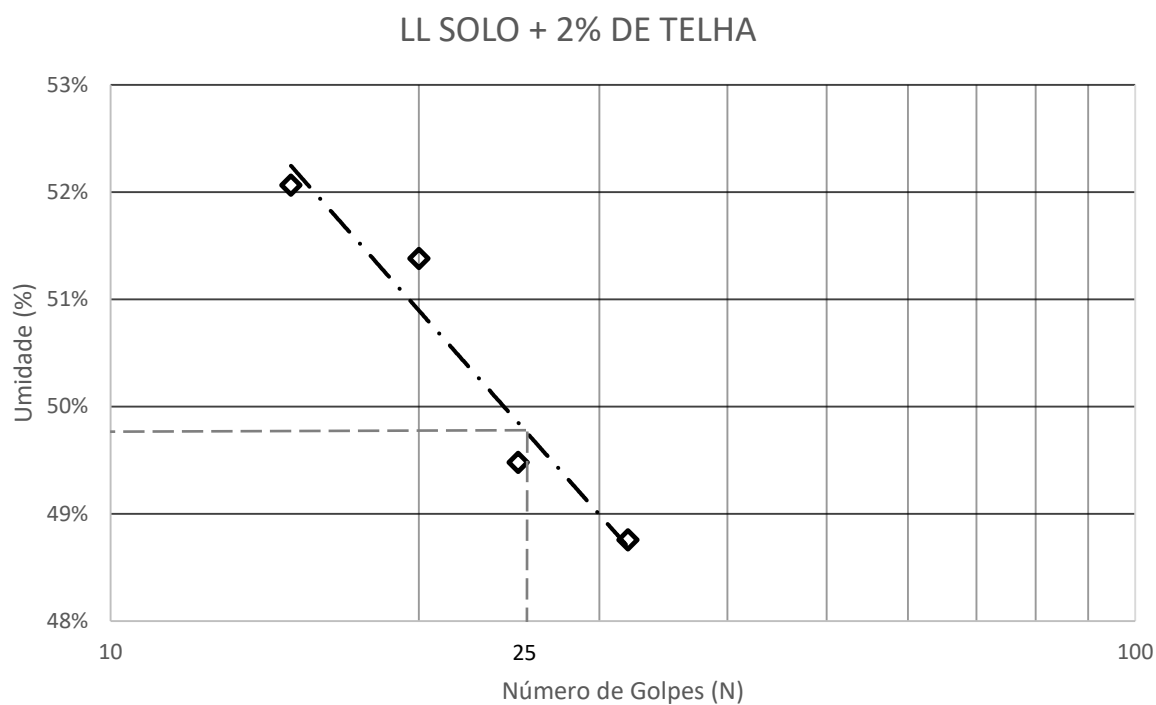


Figura 2 – Gráfico Umidade x Número de golpes do solo + 2%

Com o ajuste da reta, obteve-se que o LL para o solo com mistura de 2% de telha é de 50%.

Na figura 3, é apresentado o resultado para a mistura de solo com 5% de telha cerâmica moída.

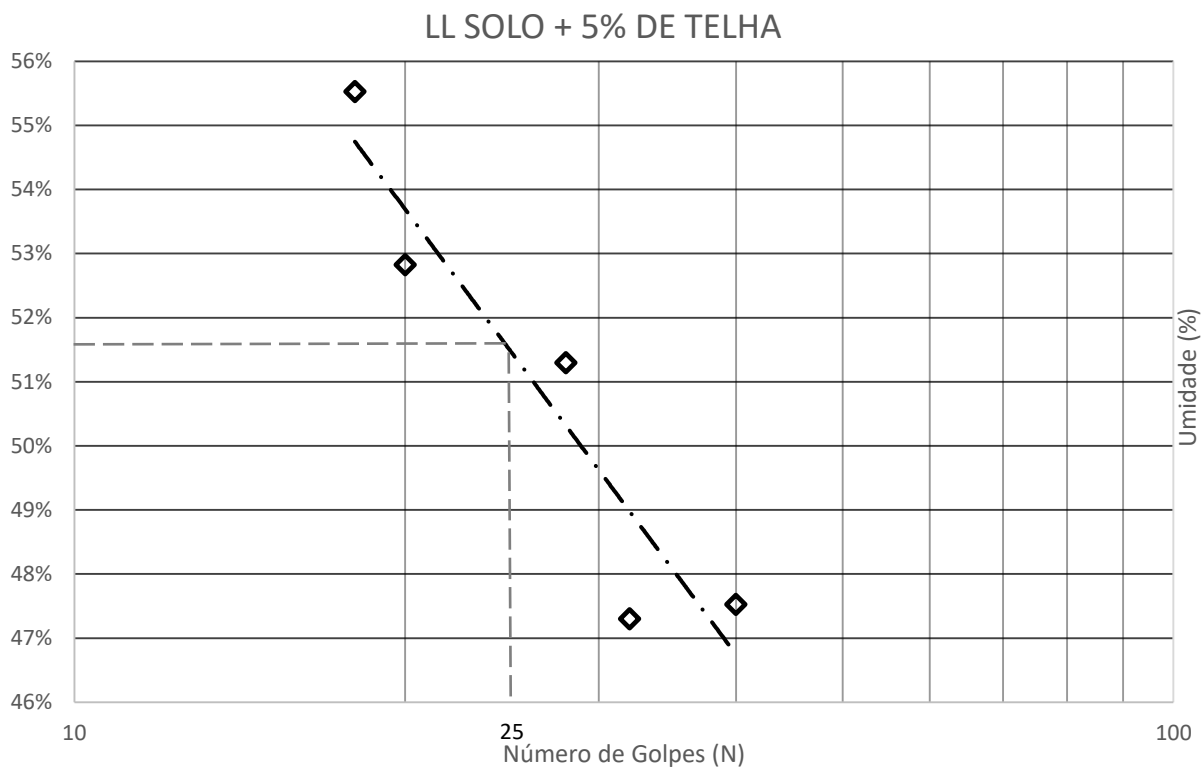


Figura 3 – Gráfico Umidade x Número de golpes do solo + 5%

Com o ajuste da reta, obteve-se que o LL para o solo com mistura de 5% de telha é de 52%.

Na figura 4, é apresentado o resultado para a mistura de solo com 10% de telha cerâmica moída.

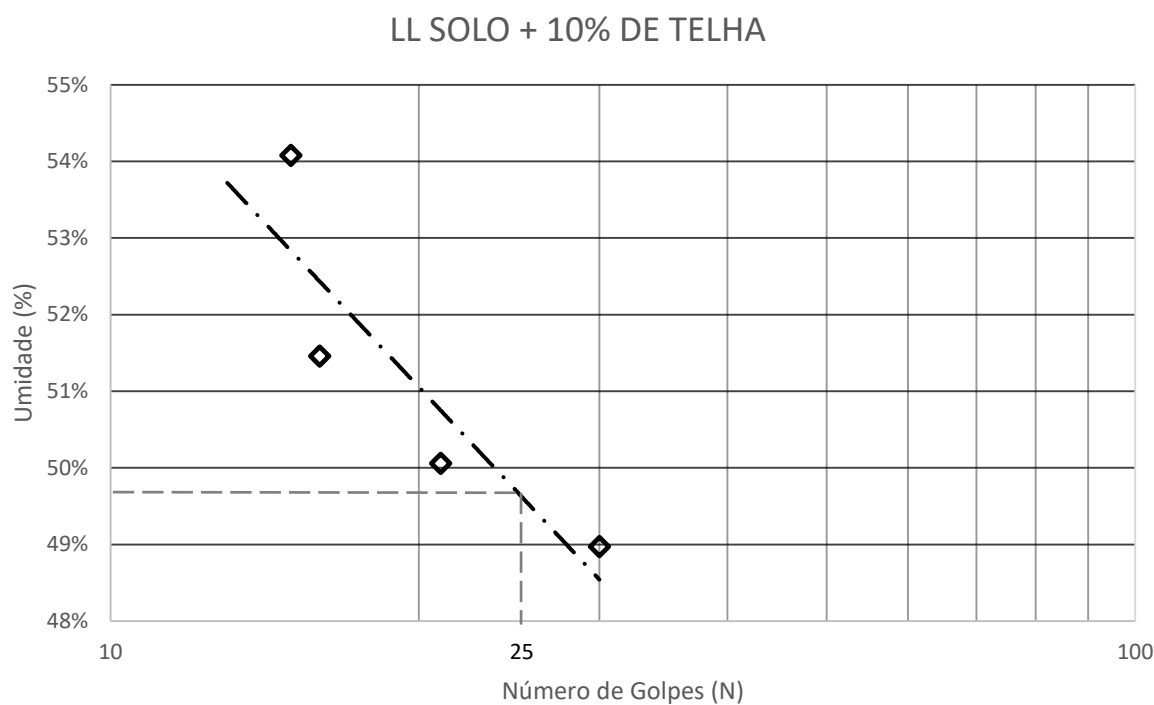


Figura 4 – Gráfico Umidade x Número de golpes do solo + 10%

Com o ajuste da reta, obteve-se que o LL para o solo com mistura de 10% de telha é de 50%.

Para o solo com teor de 15% de telha, o ensaio apresentou uma maior dificuldade na sua realização, havendo grande diferença entre o número de golpes, devido a uma pequena alteração na porcentagem de umidade na amostra.

Na figura 5, é apresentado o resultado para a mistura de solo com 15% de telha cerâmica moída.

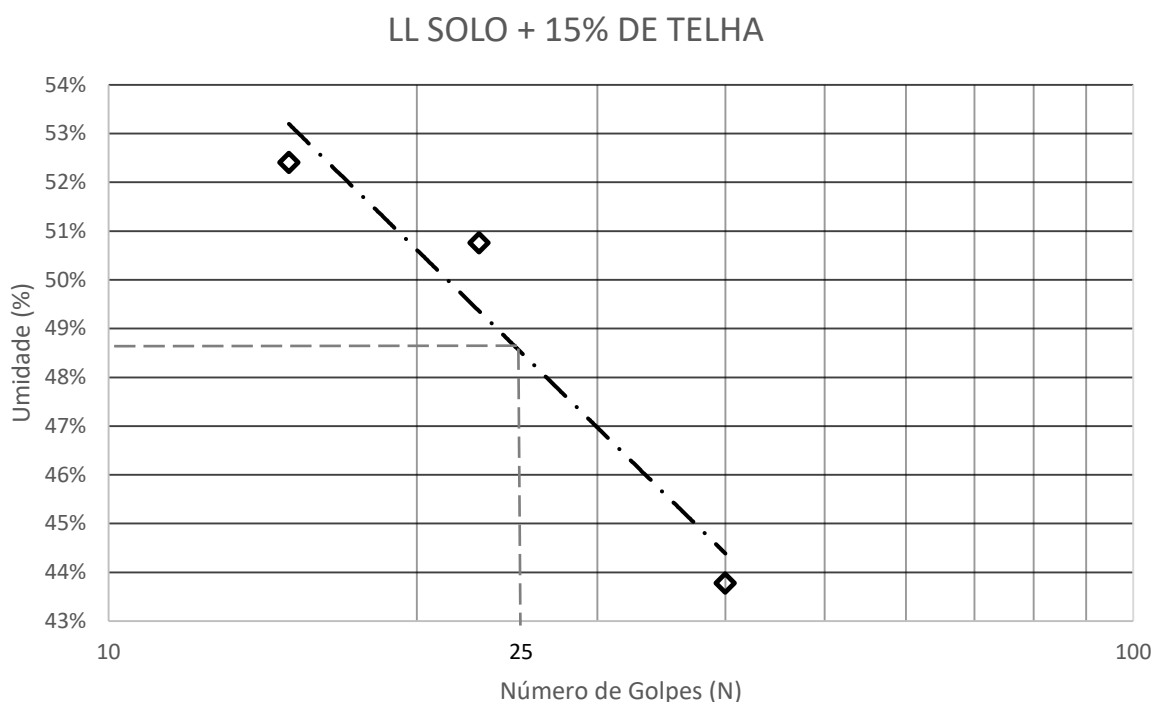


Figura 5 – Gráfico Umidade x Número de golpes do solo + 15%

Com o ajuste da reta, obteve-se que o LL para o solo com mistura de 15% de telha é de 49%.

Para a telha pura não foi possível atribuir um valor para o limite de liquidez, pois encontrou-se apenas um único ponto, devido à dificuldade de realização do ensaio. Na amostra de telha com umidade menor que o ponto encontrado não ocorria o “fechamento” com o máximo de 40 golpes. Já com umidade levemente maior, a ranhura fechava-se muito antes do mínimo 15 golpes necessários.

4.2.2 Limite de Plasticidade

Para obtenção do valor do Limite de Plasticidade, repetiu-se cinco vezes os ensaios para cada amostra, o valor final só foi considerado válido quando se encontrou no mínimo três valores que não diferiram da média em cerca de 5%.

Os valores encontrados para o ensaio do limite de plasticidade podem ser vistos nos apêndices A. Os valores em negrito foram descartados considerando a metodologia citada anteriormente.

Os resultados finais do solo, telha e misturas estão apresentados na tabela 12.

Tabela 12 – Resultados do Limite de Plasticidade

	LP
Solo Puro	48
Solo + 2%	46
Solo + 5%	51
Solo + 10%	54
Solo + 15%	50
Telha Pura	36

4.2.3 Índice de Plasticidade

O Índice de Plasticidade é a diferença numérica entre o Limite de Liquidez e o Limite de Plasticidade, quando algum desses ensaios não pode ser determinado, ou o limite de plasticidade for igual ou maior que o Limite de Liquidez, o material é caracterizado como não plástico.

Na tabela 13, o resultado do IP é apresentado.

Tabela 13 – Resultados do Índice de Plasticidade

	LL	LP	IP
Solo Puro	54	48	6
Solo + 2%	50	46	4
Solo + 5%	52	51	1
Solo + 10%	50	54	NP
Solo + 15%	49	50	NP
Telha Pura	-	36	NP

O solo puro ficou caracterizado como um material de plasticidade baixa. As misturas de telhas cerâmicas moídas ao solo apresentaram diminuição no índice de plasticidade do solo. As primeiras duas misturas transformaram o solo em um material ligeiramente plástico e a partir do teor de 10%, a mistura do solo com a telha apresentou-se como um material não-plástico, assim como a própria telha moída.

4.3 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA

A seguir serão apresentados os gráficos com a curva granulométrica obtida para cada ensaio e sua composição granulométrica. Percebe-se que o efeito da inclusão da telha cerâmica na granulometria do solo, é o aumento da porção dos grãos com diâmetros equivalentes ao de areia e pedregulho, proporcionalmente ao aumento do resíduo no solo.

As tabelas com os valores encontrados nos ensaios de peneiramento grosso, fino lavado e sedimentação, do solo puro e de todas as misturas podem ser vistos no apêndice B.

4.3.1 Análise Granulométrica do solo Puro

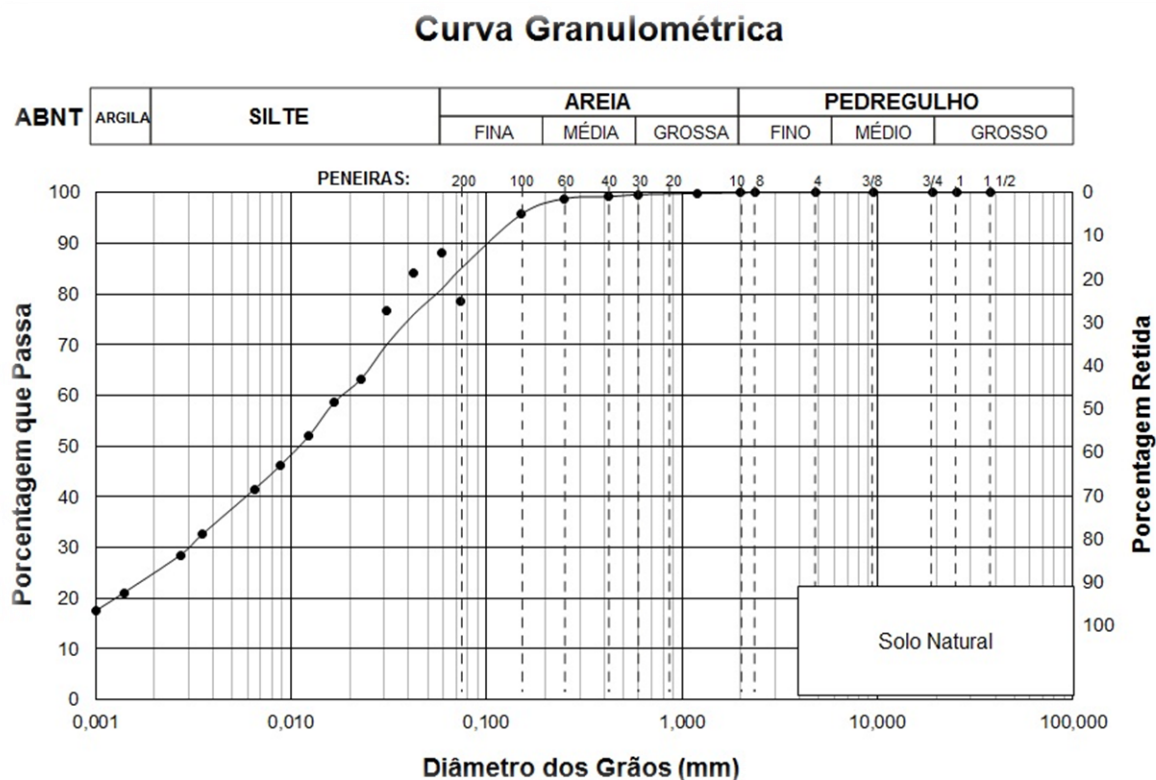


Figura 6 – Gráfico Curva Granulométrica - solo puro

Tabela 14 – Composição granulométrica do solo puro

Composição Granulométrica (%)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
26	62	10	2	0	0

De acordo com a classificação unificada (ASTM), o solo é classificado como um silte plástico com areia - MH.

4.3.2 Análise Granulométrica do solo + 2% de telha cerâmica

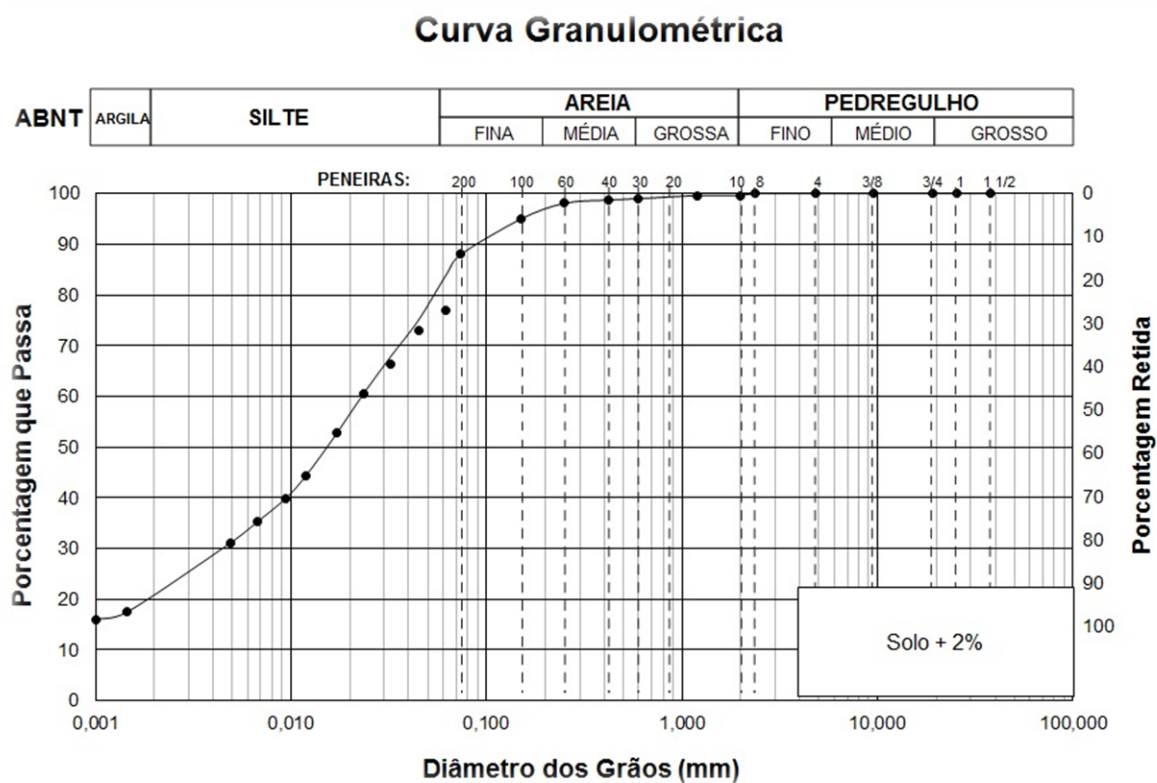


Figura 7 – Gráfico Curva Granulométrica - solo + 2%

Tabela 15 – Composição granulométrica do solo + 2%

Composição Granulométrica (%)						
Argila	Silte	Areia			Pedregulho	
		Fina	Média	Grossa		
21	55	20	2	1	0	

De acordo com a classificação unificada (ASTM), esta mistura é classificada como um silte plástico - MH.

4.3.3 Análise Granulométrica do solo + 5% de telha cerâmica

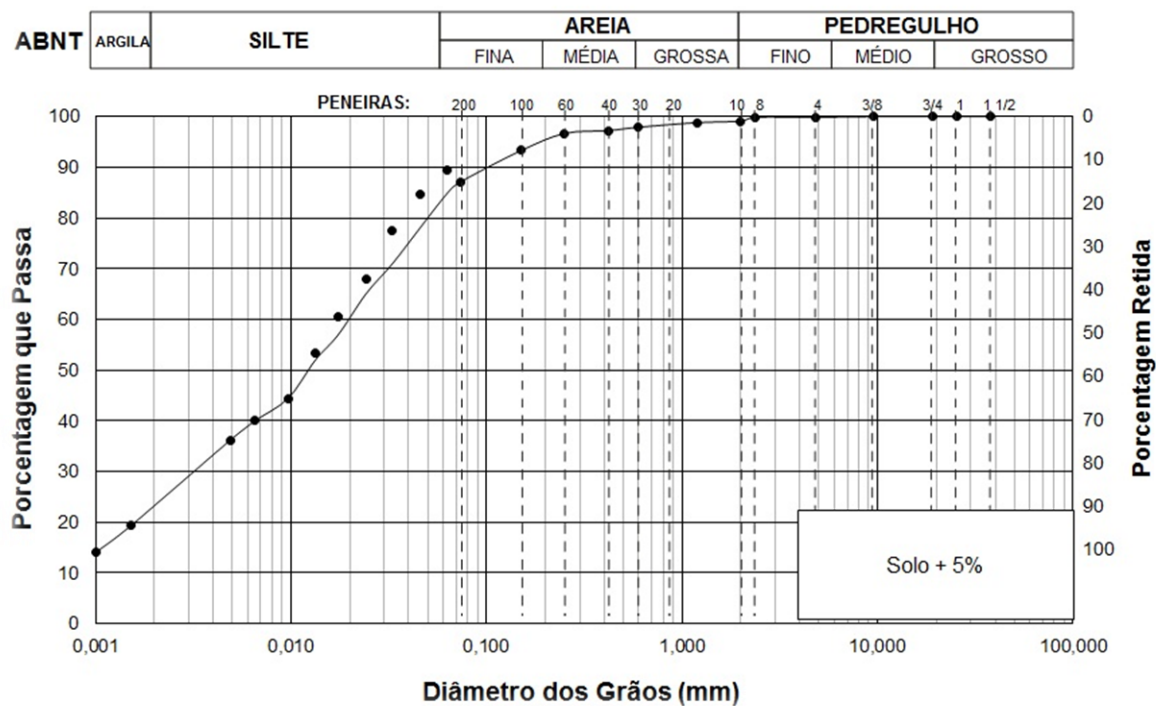
Curva Granulométrica

Figura 8 – Gráfico Curva Granulométrica - solo + 5%

Tabela 16 – Composição granulométrica do solo + 5%

Composição Granulométrica (%)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
23	65	7	3	1	1

De acordo com a classificação unificada (ASTM), esta mistura é classificada como um silte plástico - MH.

4.3.4 Análise Granulométrica do solo + 10% de telha cerâmica

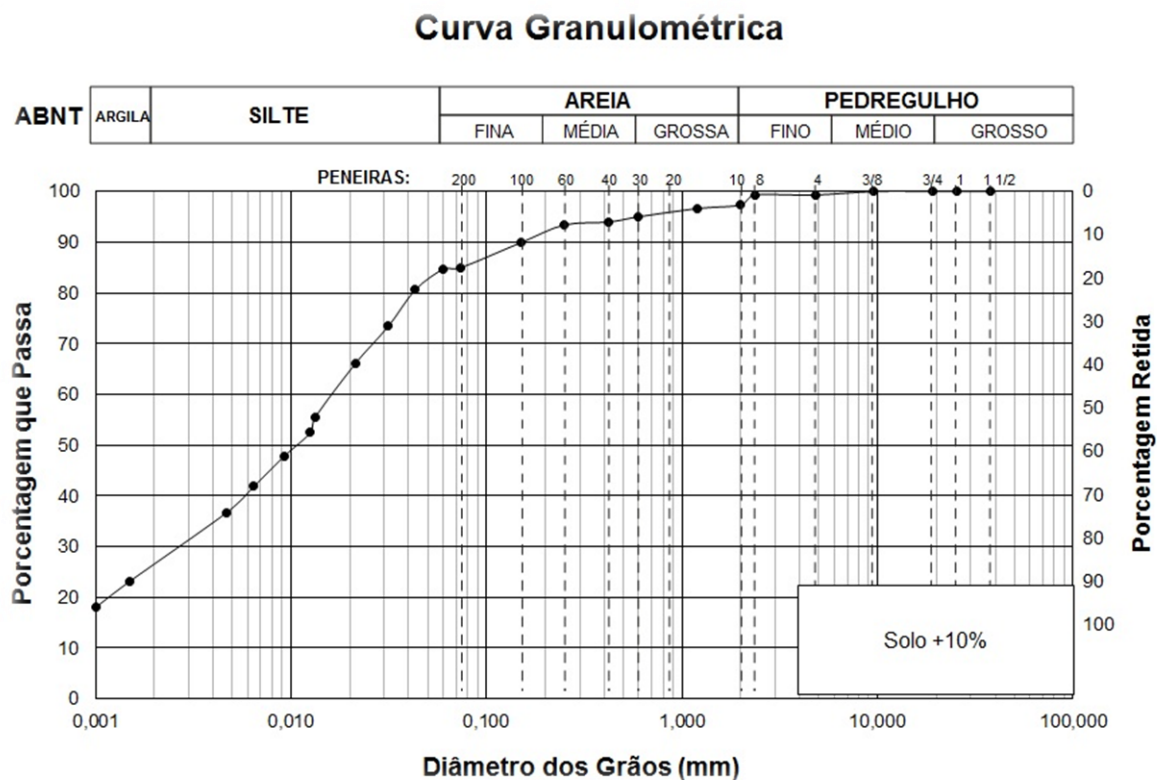


Figura 9 – Gráfico Curva Granulométrica - solo + 10%

Tabela 17 – Composição granulométrica do solo + 10%

Composição Granulométrica (%)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
27	58	7	3	2	3

De acordo com a classificação unificada (ASTM), esta mistura é classificada como um silte plástico com areia - MH.

4.3.5 Análise Granulométrica do solo + 15% de telha cerâmica

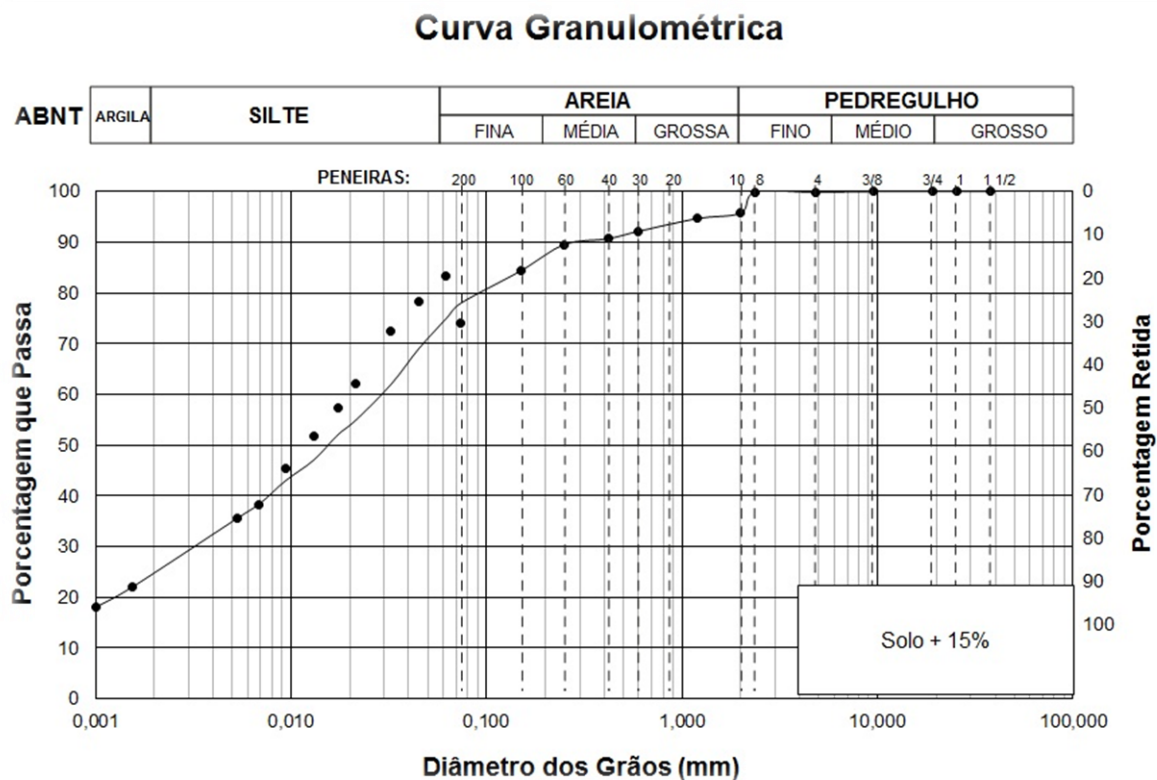


Figura 10 – Gráfico Curva Granulométrica - solo + 15%

Tabela 18 – Composição granulométrica do solo + 15%

Composição Granulométrica (%)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
25	58	4	5	4	4

De acordo com a classificação unificada (ASTM), esta mistura é classificada como um silte com areia - ML.

4.3.6 Análise Granulométrica da telha cerâmica

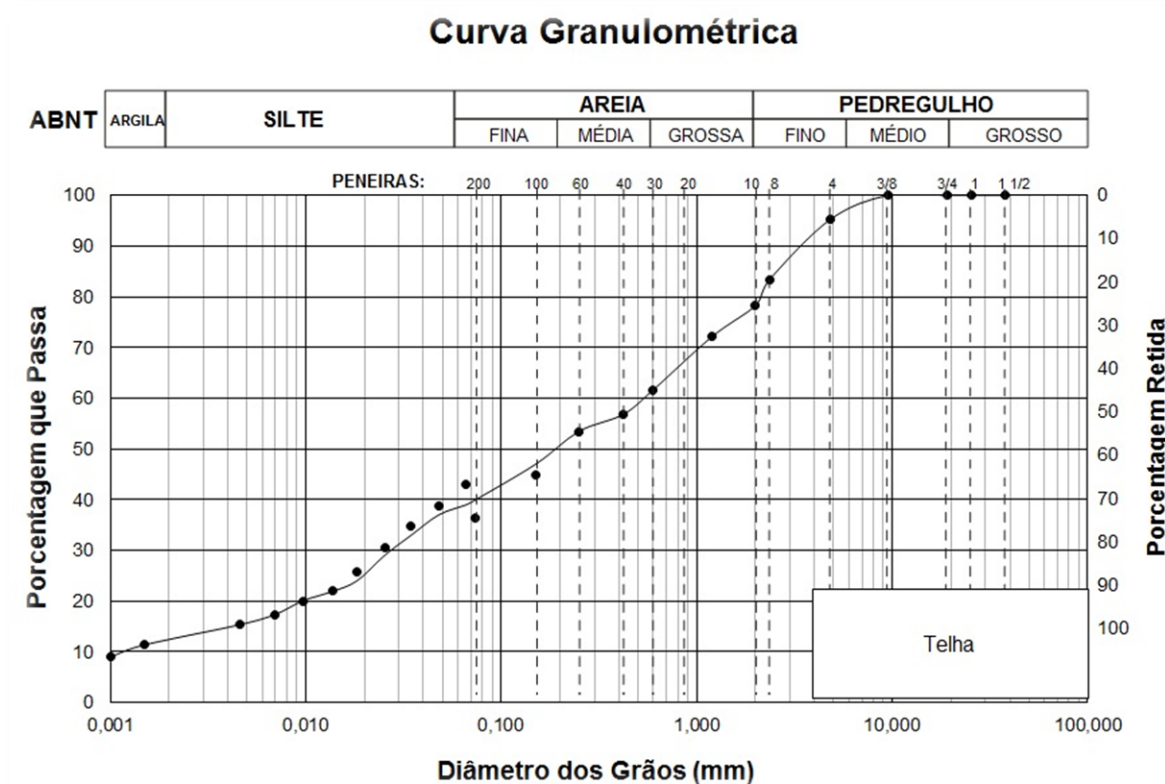


Figura 11 – Gráfico Curva Granulométrica da telha pura

Tabela 19 – Composição granulométrica da telha pura

Composição Granulométrica (%)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
12	29	8	12	17	22

Considerando o produto da telha moída como solo, de acordo com a classificação unificada (ASTM), é classificada como areia bem-graduada com silte e pedregulho (SW – SM). Contudo, esta classificação serve apenas para compararmos com que tipo de solo a granulometria da amostra de telha é similar. Portanto, o processo de moagem utilizado, proporcionou um material bem graduado.

4.3.7 Análise Granulométrica – Comparação

Na figura 12, pode ser visto a comparação das curvas granulométricas do solo com as misturas e a telha pura. E na tabela 20 a composição granulométrica.

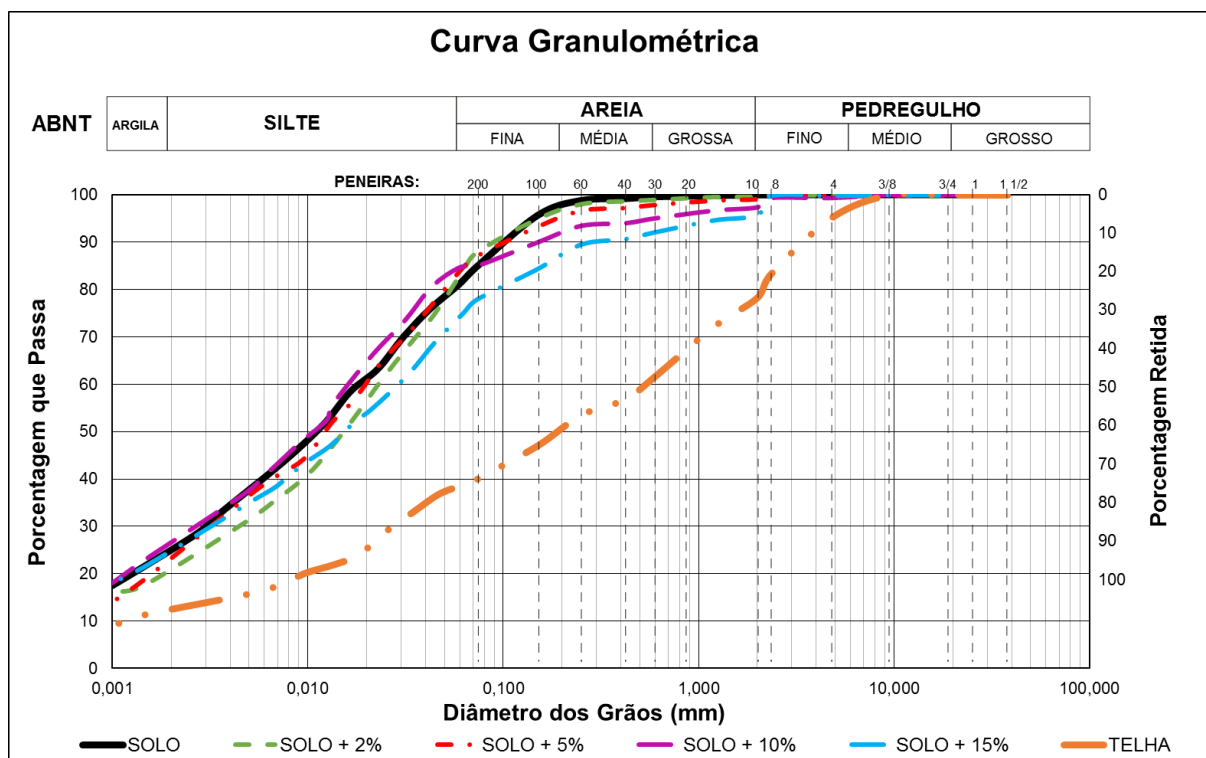


Figura 12 – Gráfico Curva Granulométrica - Comparação

Tabela 20 – Composição granulométrica - Comparação

	Composição Granulométrica (%)					
	Argila	Silte	Areia			Pedregulho
			Fina	Média	Grossa	
Solo Puro	26	62	10	2	0	0
Solo + 2%	21	55	20	2	1	0
Solo + 5%	23	65	7	3	1	1
Solo + 10%	27	58	7	3	2	3
Solo + 15%	25	58	4	5	4	4
Telha	12	29	8	12	17	22

4.4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PROCTOR NORMAL

A seguir serão apresentados os resultados para os ensaios de compactação (Proctor Normal) com reutilização de solo, para o solo puro e para os quatro teores de mistura. Os gráficos foram gerados com no mínimo 5 pontos, com dois deles contidos no ramo seco, dois no ramo úmido e um tendendo ao ponto de máxima. Nos mesmo gráficos foram plotados as curvas de saturação de 80%, 90% e 100%.

Os valores encontrados para plotagem dos gráficos de compactação podem ser vistos no apêndice C.

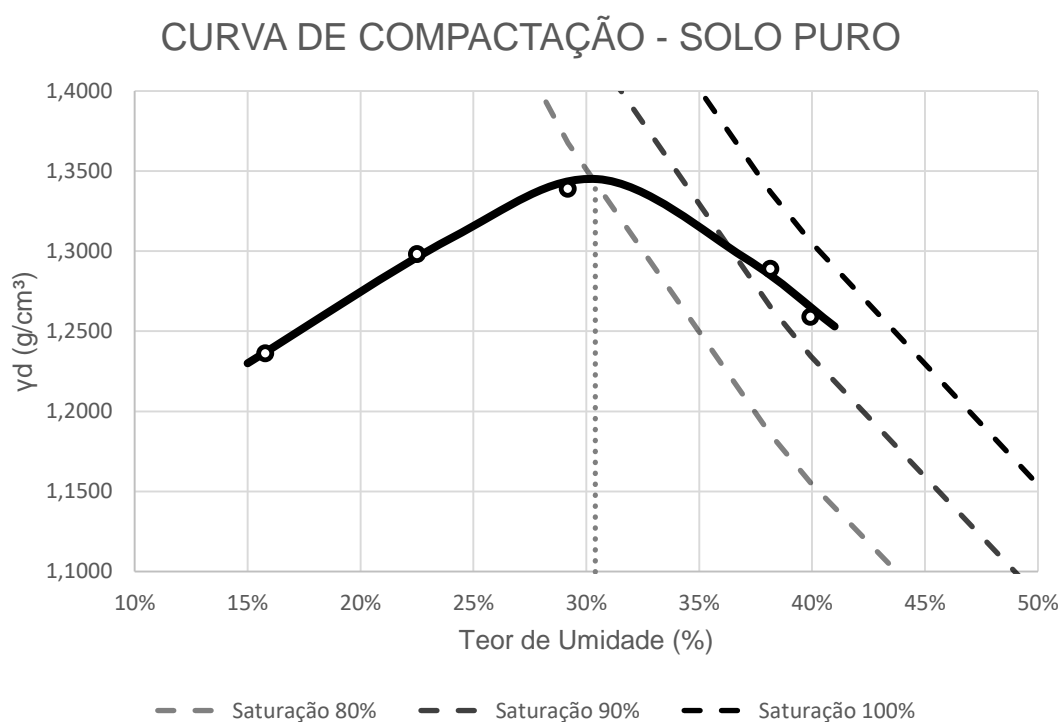


Figura 13 – Gráfico peso específico seco x umidade - solo puro

É possível perceber, pela figura 13, que para uma máxima compactação, a umidade do solo estudado fica em torno de 30% e a densidade específica seca fica 1,345 g/cm³. Com o ponto máximo entre as curvas de 80% e 90% de saturação.

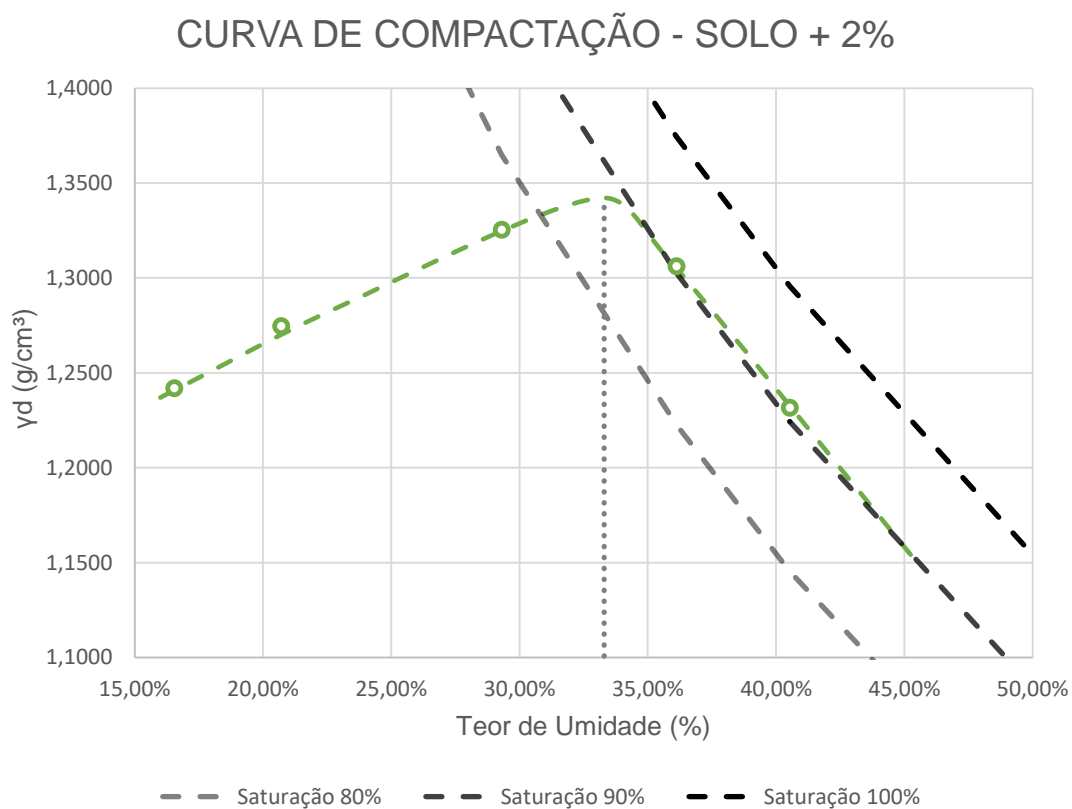


Figura 14 – Gráfico peso específico seco x umidade - solo + 2%

Com 2% de resíduo, a umidade ótima deslocou-se para próximo de 33% e a densidade específica seca fica 1,342 g/cm³.

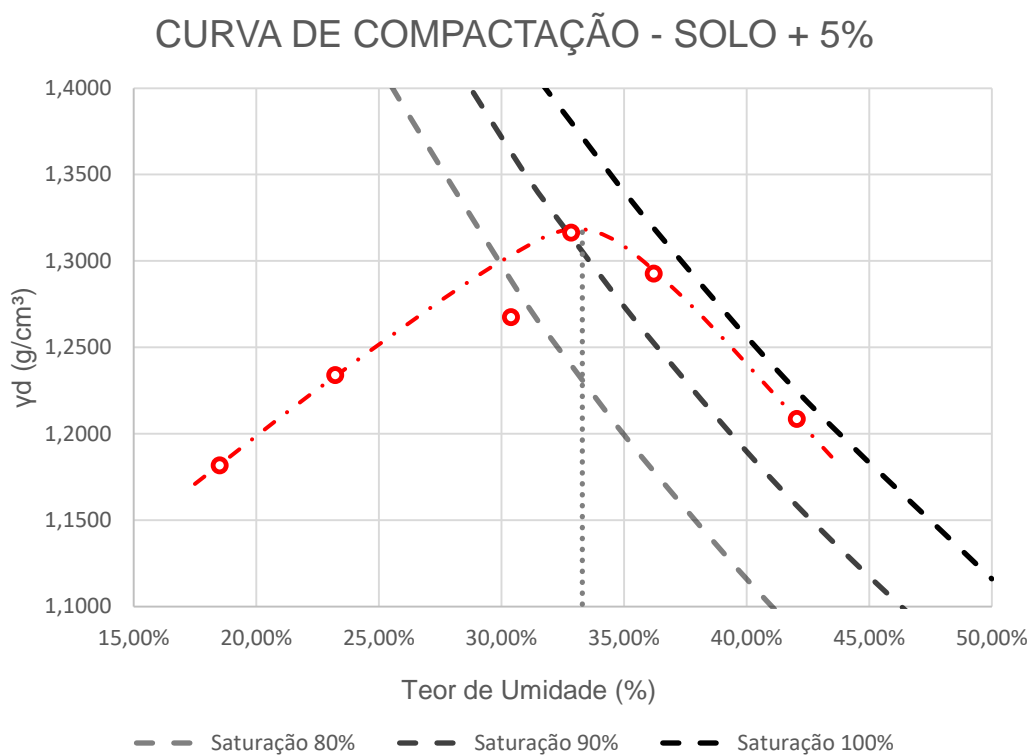


Figura 15 – Gráfico peso específico seco x umidade - solo + 5%

Para solo com 5% de telha cerâmica, a umidade ótima encontrada ficou em torno de 33%, assim como o solo mais 2% e a densidade específica seca fica 1,318 g/cm³.

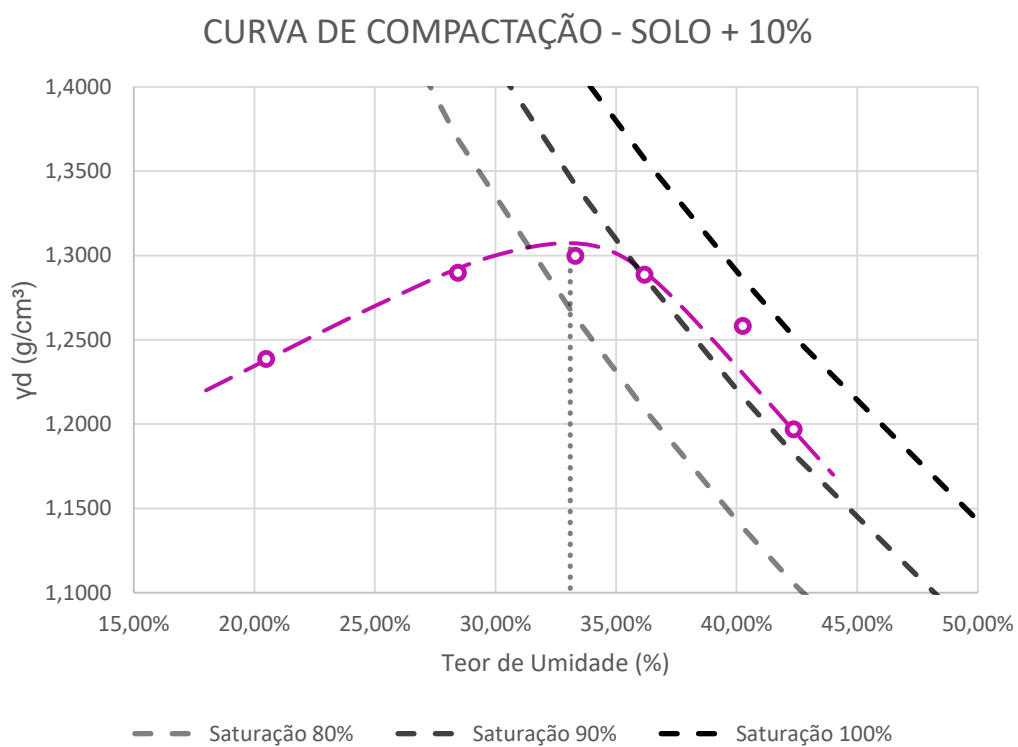


Figura 16 – Gráfico peso específico seco x umidade - solo + 10%

Com 10% de telha, obteve-se o mesmo comportamento das misturas anteriores a umidade ficou em torno de 33% e a densidade específica seca fica 1,307 g/cm³.

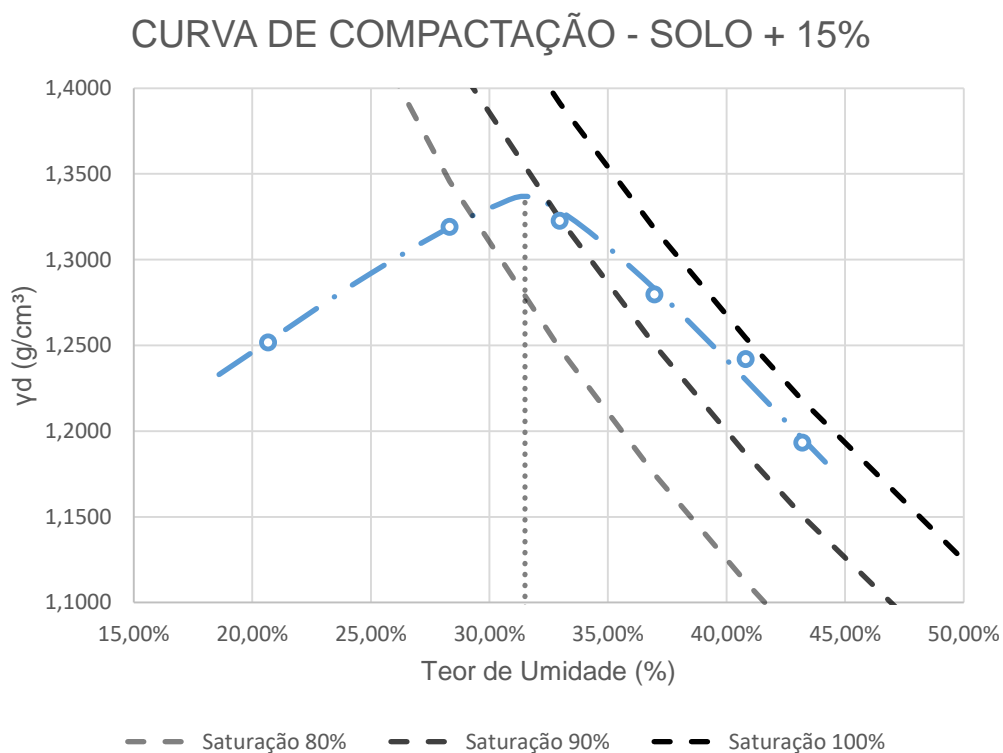


Figura 17 – Gráfico peso específico seco x umidade - solo + 15%

Com 15% de telha cerâmica misturada ao solo, notou-se uma pequena variação na umidade ótima, a qual ficou em torno de 31 a 32% e a densidade específica seca fica 1,336 g/cm³.

Todos os ensaios ficaram com a umidade ótima entre 80% e 90% das curvas de saturação, com pequenas variações.

É possível visualizar melhor o comportamento das misturas em relação a compactação na figura 18.

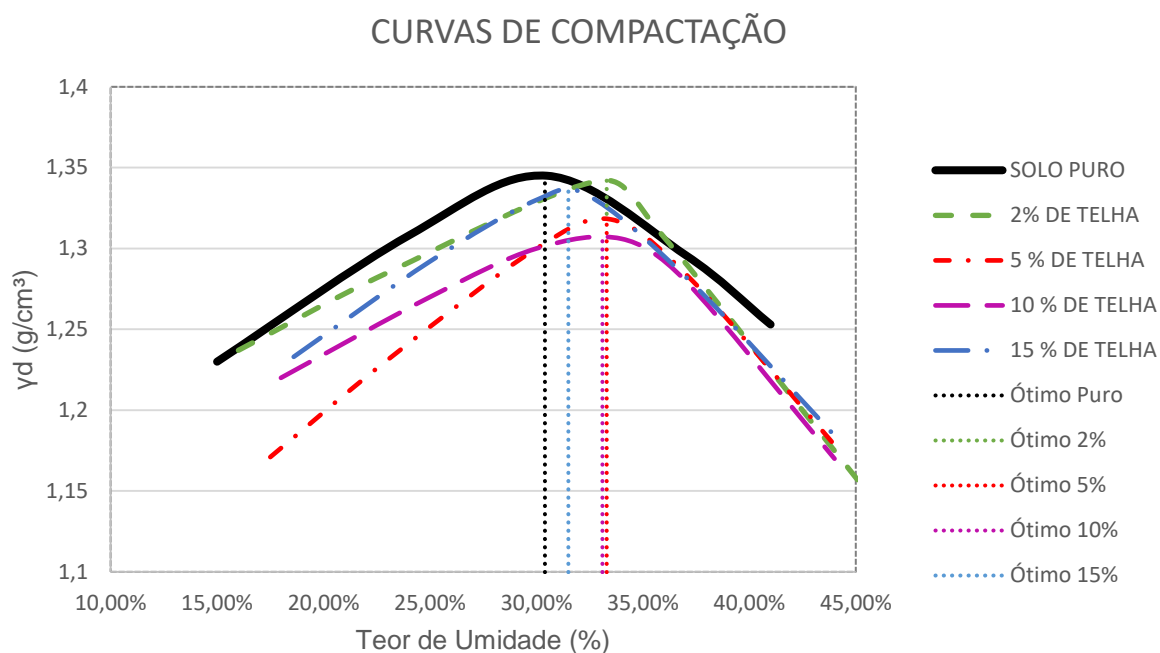


Figura 18 – Gráfico peso específico seco x umidade

Obteve-se, portanto, um aumento na umidade ótima de todas as misturas se comparadas ao solo puro e um menor peso específico. Novamente as misturas não demonstram um padrão de acordo com o teor de telha misturada.

4.5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PH

Pode-se dizer que o valor do pH é uma das medidas mais simples realizadas no solo, mas de maneira alguma, de menor importância, pois faz parte da caracterização do mesmo.

A determinação da acidez é utilizada amplamente na área agrícola, florestal e no polo agrário como um todo. Entretanto, na área da engenharia civil, o ponto de vista geotécnico é o aspecto mais importante, tendo em vista que o valor de pH interfere diretamente na corrosão de estruturas e construções. Por estes motivos, a caracterização é de grande valia, pois quanto mais baixo o valor do pH, mais ácido é o solo, fazendo com que os problemas citados acima ocorram com maior intensidade,

o que se vê com maior frequência em organossolos, devido a maior concentração de ácidos orgânicos, o que não ocorre em solos minerais, os quais possuem um valor mais alto do pH.

Porém, para este trabalho, as medidas do pH são importantes para descobrir se o produto da telha cerâmica moída misturada ao solo em diferentes teores, causam algum tipo de reação indesejada.

A seguir nas tabelas 21 e 22 são apresentadas as medidas de pH para o solo, as misturas e a telha, em solução de H₂O e KCl.

Tabela 21 – Resultados pH medidos em solução de H₂O

pH em H ₂ O	
Solo puro	4,7
Solo + 2%	4,7
Solo + 5%	4,7
Solo + 10%	4,7
Solo + 15%	4,9
Telha pura	6,4

Tabela 22 – Resultados pH medidos em solução de KCl

pH em KCl	
Solo puro	4,2
Solo + 2%	4,2
Solo + 5%	4,2
Solo + 10%	4,2
Solo + 15%	4,2
Telha pura	6,7

É possível concluir que a adição de telha ao solo não altera o pH, portanto, evidencia a não reação da mistura.

4.6 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS CBR

Todos os ensaios CBR realizados deram-se nas umidades ótimas encontradas no ensaio de proctor normal. Foram feitos ensaios para o solo puro e para os quatro teores de mistura. As expansões foram medidas todos os dias, durante quatro dias. Os resultados obtidos e tabelados podem ser vistos no apêndice D.

O solo puro obteve sua expansão total logo no primeiro dia sem nenhuma variação posterior a esta medida.

Com 2% de resíduo a expansão do solo continuou a crescer até o segundo dia, a partir do terceiro houve uma retração.

Com 5% de telha cerâmica a retração do solo iniciou-se no segundo dia, e continuou até o último dia de medição.

Para 10% de telha cerâmica, o comportamento do solo em relação a expansão foi similar ao da mistura de 5%.

Com 15% de telha cerâmica misturada ao solo, a expansão continuou até o segundo dia, em seguida repetiu o comportamento das outras misturas, onde ocorreu a retração do solo.

Devido a irregularidade da superfície do corpo de prova é preciso realizar a correção da curva tensão x penetração obtida pela prensa. A obtenção da pressão corrigida para os ensaios CBR pode ser visto no apêndice E.

A seguir é apresentado, na figura 19, as curvas de pressão pela deformação devido a penetração do pistão para todos os ensaios, seguido da figura 20, onde é possível ver os valores encontrados em todos os ensaios CBR realizados, no qual o maior valor encontrado de CBR foi para o solo com mistura de 15% de telha cerâmica, já o menor valor de retração do solo, foi para a mistura com 5% do resíduo.

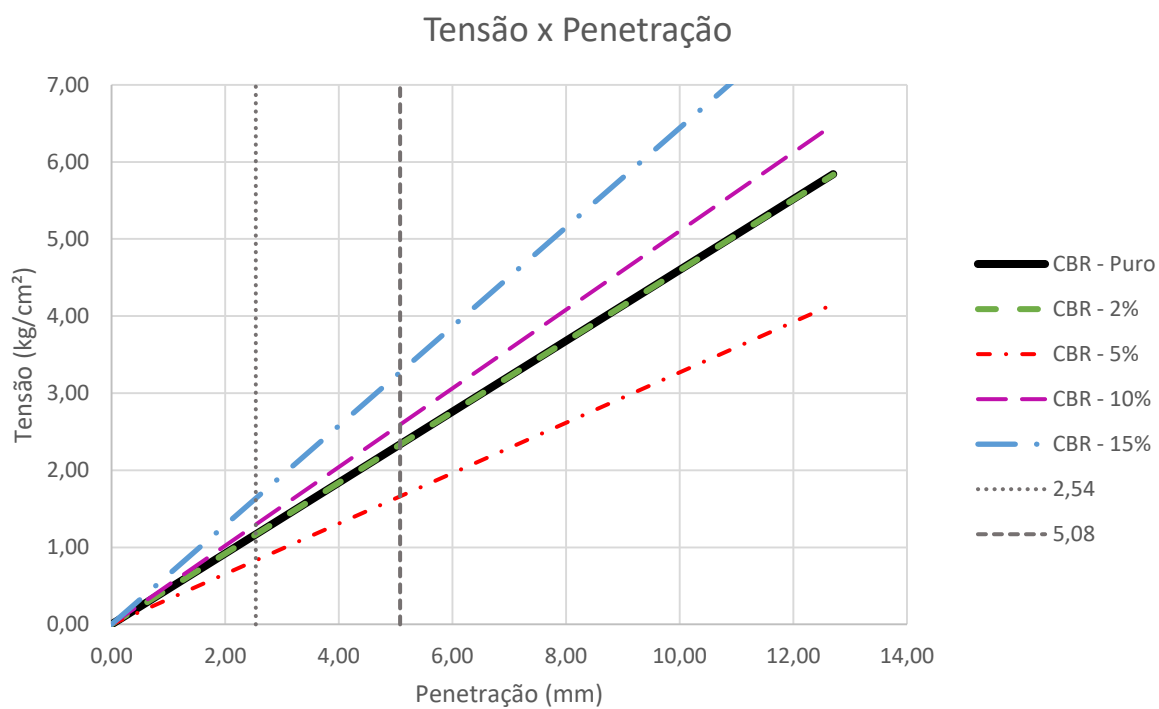


Figura 19 – Gráfico Tensão x Penetração dos ensaios de CBR

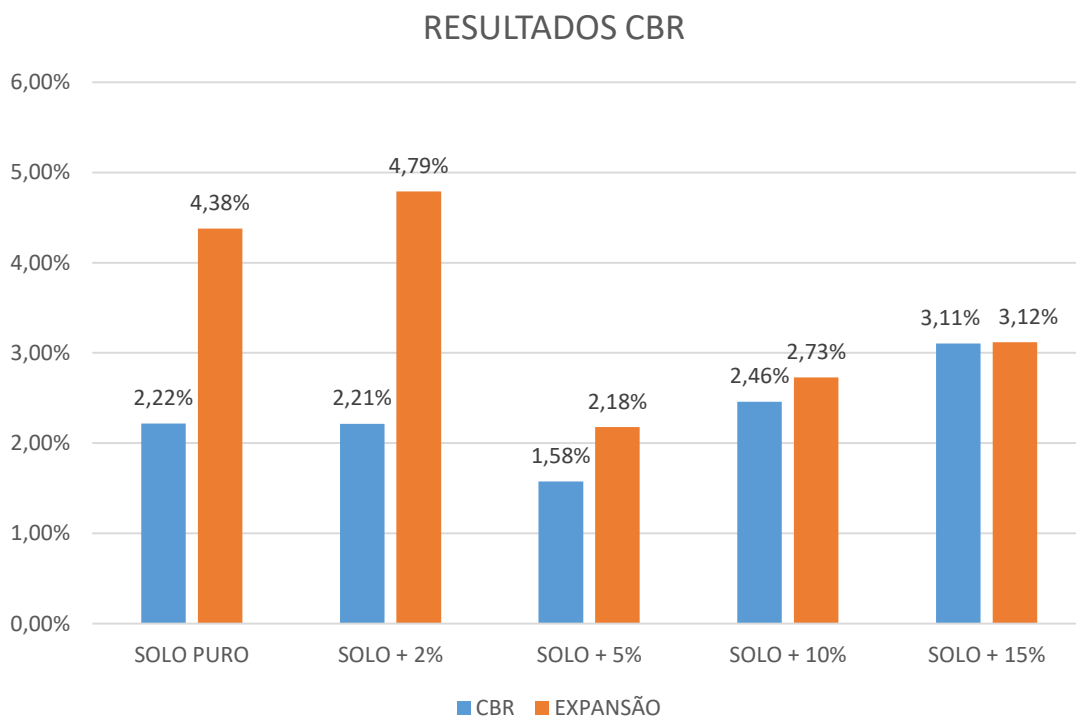


Figura 20 – Gráfico resumo dos resultados de CBR

Desta maneira, pode-se afirmar que a melhora encontrada neste ensaio se deve a granulometria das misturas, com 5% de resíduo os grãos da telha acabaram por aumentar os vazios da mistura se comparado ao solo natural, tornando a mistura mecanicamente fraca. Com o acréscimo do teor de resíduo, os vazios foram preenchidos, o que tornou a mistura mais resistente.

5 CONCLUSÃO

Devido à realização desta pesquisa, evidenciou-se que a mistura de telha cerâmica moída ao solo, altera as características físicas analisadas, além de melhorar o aspecto mecânico estudado.

A falta de um padrão proporcional a quantidade de telha adicionada, esperado em alguns ensaios, como a densidade relativa dos grãos, pode vir a ser explicado pelo fato de a telha cerâmica ser um material poroso, do qual não se pode afirmar que tenham sido destruídos durante a moagem. Fazendo com que alguns dos grãos adicionados fossem mais leves que outros

Para os aspectos físicos, uma das vantagens da aplicação da telha moída ao solo, visando fins rodoviários, foi em relação ao índice de plasticidade, que diminui com o aumento da telha cerâmica e para o solo estudado a partir dos 10% de resíduo no solo, começa a comportar-se como não-plástico.

Em relação aos parâmetros mecânicos, obtém-se um aumento do índice CBR, proporcional à quantidade de resíduo estudado nesta pesquisa e maior que ao do solo puro a partir dos 10% de telha. Apresenta também, uma menor expansão do solo se comparado ao solo puro. Para a mistura de 15% de telha cerâmica, obteve-se um melhoramento de 40,06% do índice CBR.

Com o acréscimo da telha ao solo, o peso específico do solo compactado diminui e o teor de umidade ótima aumenta, em todos os teores comparado ao solo puro, visto que para a umidade ótimo a adição do resíduo faz com que o solo compactado suporte maiores tensões nos teores de 10% e 15%, a adição de telha ao solo pode ser usada para melhorar a resistência de aterros e ao mesmo tempo deixá-los mais leves.

Outro ponto importante a ser analisado está relacionado com a adição de 2% de telha ao solo, visto que, a mistura mantém praticamente o mesmo comportamento do solo puro para todos os parâmetros estudados, sofrendo apenas pequenas variações. Assim, o resíduo pode ter uma destinação adequada sem causar alterações significativas no solo, quando o mesmo não precisa de modificação.

Mesmo que o resultado final tenha sido um valor baixo de índice CBR comparado com padrões necessários, pode-se afirmar que a mistura da telha cerâmica ao solo, obtêm diminuição no índice de plasticidade, diminuição da expansão e aumento do valor de CBR, características que podem ser muito bem exploradas para fins rodoviários, utilizando apenas o resíduo para o melhoramento.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para próximos trabalhos, adicionar telha cerâmica moída nas mesmas proporções, porém com outro tipo de solo para verificar se os padrões se repetem.

Outra sugestão interessante, seria comparar o comportamento da mistura de solo-telha cerâmica com solo-telha cerâmica-cal e solo-cal, para verificar se a mistura dos dois produtos altera o resultado final expressivamente.

REFERÊNCIAS

ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). **Dosagem de misturas de solo-cimento: normas de dosagem e método de ensaio**. São Paulo, 1986.

_____. **Solo-cimento**. 2009. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/aplicacoes/solo-cimento>>. Acesso em: 17 abr. 2016.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 6457 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Associação Brasileira de normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6459 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez**. Associação Brasileira de normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7180 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7182 – Ensaio normal de compactação de solos**. Rio de Janeiro, 1986.

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

_____. **NBR 15310 – Componentes cerâmicos — Telhas — Terminologia, requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2004.

ALMEIDA, J. **Viabilidade técnica do uso e econômica da produção do agregado de RCD em pavimentação de vias urbanas**. 2015. 118 f. Universidade de Passo Fundo, Rio Grande do Sul, 2015.

BASTOS, C. A. B. **Estabilização de solos - Slides de aula**, 2008, Rio Grande. Disponível em: <<ftp://ftp.ifes.edu.br/cursos/Transportes/CelioDavilla/Solos/Literatura%20compleментар/Apostila%20FURG%20Solos/09%20-%20ESTABILIZACAO.pdf>> Acesso em: 25 de março de 2016.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 2001. Volume 2.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº. 307**, de 05 de julho de 2002. Brasília DF, 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm>> Acesso em: 8 de maio de 2016.

_____. **Resolução nº. 431**, de 24 de maio de 2011. Brasília DF, 2011. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm>> Acesso em: 8 de maio de 2016.

_____. **Resolução nº. 469**, de 30 de julho de 2015. Brasília DF, 2015. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm>> Acesso em: 8 de maio de 2016.

CALLISTER Jr, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 2002.

CASTRO, F. J. C. de O. **Contribuição ao conhecimento e à determinação da reatividade de solos sesquióxicos utilizando o hidróxido de cálcio: Aplicação ao processo de geopolimerização (Estabilização)**. 1995. 344f. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

CRISTELO, N. C. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. Dissertação. Portugal, 2001. (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Minho, Portugal, 2001.

DNER – ME 093. **Solos – Determinação da densidade real – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER – ME 051. **Solos – Análise Granulométrica – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT 172 – ME. **Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: IPR, 2016.

FRANCO, K. L. B. **Caracterização do comportamento geotécnico de misturas de resíduo de pneus e solo laterítico**. 2012. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

GRUBBA, D. C. **Estudo do comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção rodoviária**. 2009. 139 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil: Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, 2009.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **SOIL STABILIZATION: Principles and Practice**. New York – Toronto: Halsted Press Book, 1973.

ISAIA, G. C. **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1. ed. São Paulo: Ispis Gráfica e Editora, 2007. Volume 1.

LIEDI, B. B. et al. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro, 2016.

LOPES JUNIOR, L. S. **Parâmetros de controle da resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica**. 2007. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

MAKUSA, G. P. **Soil stabilization methods and materials**. 2012. 35 f. Lulea University of technology, Sweden, 2012.

MOTTA, J. F. M. *et al.* **AS MATÉRIAS-PRIMAS CERÂMICAS. Parte I: O Perfil das Principais Indústrias Cerâmicas e Seus Produtos**. Divisão de Geologia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2001.

OLIVEIRA, Eduardo de. **Emprego da cal na estabilização de solos finos de baixa resistência e alta expansão: estudo de caso no município de ribeirão das neves/mg**. 2010. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

PINHEIRO, R. **Princípios da estabilização dos solos**. In: Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2011, Santa Maria. Disponível em: <<http://docslide.com.br/documents/estabilizacao-dos-solos.html>>. Acesso em: 16 de abril de 2016.

REPSOLD, L. M. **ANÁLISE DO DESEMPENHO DE NOVOS MATERIAIS GEOTÉCNICOS PARA APROVEITAMENTO EM REFORÇO DE SOLOS - Avaliação do Comportamento de Solos Reforçados com Resíduos de Madeira para Aplicação em Geotecnia**. Relatório final de Iniciação Científica. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

RIBEIRO, G. C. **Avaliação do gerenciamento de resíduos de construção e demolição (rcd) no município de Torres, Rio Grande do Sul.** 2013. 100 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

ROCHA, L. V.; NOVO, B. M. **APLICABILIDADE DE NOVOS MATERIAIS GEOTÉCNICOS VISANDO O REFORÇO DE SOLOS - “Estudo experimental de solo argiloso reforçado com pó de PET”.** Relatório final de Iniciação Científica. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

SANTOS, V. R.; TEIXEIRA, Y.C. **Aplicabilidade de Novos Materiais Geotécnicos Visando o Reforço de Solos - Avaliação do Comportamento de Solos Reforçados com Fibra de Coco.** Relatório final de Iniciação Científica. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

SILVA, C. C. **Comportamento de solos siltosos quando reforçados com fibras e melhorados com aditivos químicos e orgânicos.** 2007. 157 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, 2007.

SOTOMAYOR, J. M.; CASAGRANDE, M. T. Avaliação do solo reforçado com fibras de coco mediante ensaios de placa em verdadeira grandeza para aplicações geotécnicas. In: **44ª RAPV – REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO E 18º ENACOR – ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA.** 2015, Foz do Iguaçu.

VENDRUSCOLO, M. A. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para a aplicação como reforço de base de fundações superficiais.** Porto Alegre, 2003. 224 f. Tese (Doutorado em engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

VIEIRA, C.M.F. et al. **MASSAS CERÂMICAS PARA TELHAS: características e comportamento de queima.** Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2003.

**APÊNDICE A – RESULTADOS PARA OS ENSAIOS DE LIMITE DE LIQUIDEZ E
LIMITE DE PLASTICIDADE**

Tabela A1 – Limite de Liquidez do Solo puro

Número da cápsula	LLP06	LLP05	LLP04	LLP03	LLP02	LLP01
Peso da cápsula (g)	7,60	6,51	6,72	7,86	7,64	6,64
Peso da cápsula + solo úmido (g)	16,25	16,13	16,43	19,33	19,49	18,46
Peso da cápsula + solo seco (g)	13,04	12,57	13,00	15,36	15,39	14,42
Peso do solo úmido (g)	8,65	9,62	9,71	11,47	11,85	11,82
Peso do solo seco (g)	5,44	6,06	6,28	7,50	7,75	7,78
Peso de água (g)	3,21	3,56	3,43	3,97	4,10	4,04
Teor de umidade	59,01%	58,75%	54,62%	52,93%	52,90%	51,93%
Número de golpes (N)	15	17	21	24	27	31

Tabela A2 – Limite de Liquidez do Solo + 2%

Número da cápsula	LL204	LL203	LL202	LL201
Peso da cápsula (g)	6,72	6,69	6,92	7,64
Peso da cápsula + solo úmido (g)	17,03	15,47	16,95	14,81
Peso da cápsula + solo seco (g)	13,50	12,49	13,63	12,46
Peso do solo úmido (g)	10,31	8,78	10,03	7,17
Peso do solo seco (g)	6,78	5,80	6,71	4,82
Peso de água (g)	3,53	2,98	3,32	2,35
Teor de umidade	52,06%	51,38%	49,48%	48,76%
Número de golpes (N)	15	20	25	32

Tabela A3 – Limite de Liquidez do Solo + 5%

Número da cápsula	LL505	LL504	LL503	LL502	LL501
Peso da cápsula (g)	7,01	7,75	7,61	8,23	7,85
Peso da cápsula + solo úmido (g)	19,95	20,19	19,88	21,59	16,79
Peso da cápsula + solo seco (g)	15,33	15,89	15,72	17,30	13,91
Peso do solo úmido (g)	12,94	12,44	12,27	13,36	8,94
Peso do solo seco (g)	8,32	8,14	8,11	9,07	6,06
Peso de água (g)	4,62	4,30	4,16	4,29	2,88
Teor de umidade	55,53%	52,83%	51,29%	47,30%	47,52%
Número de golpes (N)	18	20	28	32	40

Tabela A4 – Limite de Liquidez do Solo + 10%

Número da cápsula	LL104	LL103	LL102	LL101
Peso da cápsula (g)	7,45	7,54	7,86	6,72
Peso da cápsula + solo úmido (g)	21,81	18,46	21,11	18,28
Peso da cápsula + solo seco (g)	16,77	14,75	16,69	14,48
Peso do solo úmido (g)	14,36	10,92	13,25	11,56
Peso do solo seco (g)	9,32	7,21	8,83	7,76
Peso de água (g)	5,04	3,71	4,42	3,80
Teor de umidade	54,08%	51,46%	50,06%	48,97%
Número de golpes (N)	15	16	21	30

Tabela A5 – Limite de Liquidez do Solo + 15%

Número da cápsula	LL154	LL153	LL152	LL151
Peso da cápsula (g)	7,18	7,89	10,32	7,49
Peso da cápsula + solo úmido (g)	20,47	19,83	24,64	16,53
Peso da cápsula + solo seco (g)	15,90	15,81	20,28	13,86
Peso do solo úmido (g)	13,29	11,94	14,32	9,04
Peso do solo seco (g)	8,72	7,92	9,96	6,37
Peso de água (g)	4,57	4,02	4,36	2,67
Teor de umidade	52,41%	50,76%	43,78%	41,92%
Número de golpes (N)	15	23	40	76

Tabela A6 – Limite de Liquidez da Telha Pura

Número da cápsula	-	-	LLT01
Peso da cápsula (g)	-	-	7,93
Peso da cápsula + solo úmido (g)	-	-	23,90
Peso da cápsula + solo seco (g)	-	-	19,95
Peso do solo úmido (g)	-	-	15,97
Peso do solo seco (g)	-	-	12,02
Peso de água (g)	-	-	3,95
Teor de umidade	-	-	32,86%
Número de golpes (N)	-	-	16

Tabela A7 – Limite de Plasticidade do Solo Puro

Número da cápsula	LPP01	LPP02	LPP03	LPP04	LPP05
Peso da cápsula (g)	6,84	6,80	8,38	8,08	7,38
Peso da cápsula + solo úmido (g)	7,27	7,46	8,83	8,55	8,12
Peso da cápsula + solo seco (g)	7,13	7,22	8,68	8,40	7,86
Peso do solo úmido (g)	0,43	0,66	0,45	0,47	0,74
Peso do solo seco (g)	0,29	0,42	0,30	0,32	0,48
Peso de água (g)	0,14	0,24	0,15	0,15	0,26
Teor de umidade	48,28%	57,14%	50,00%	46,88%	54,17%
Limite de Plasticidade (LP)	48	57	50	47	54
Limite de Plasticidade médio (LP)	48				

Tabela A8 – Limite de Plasticidade do Solo + 2%

Número da cápsula	LP201	LP202	LP203	LP204	LP205
Peso da cápsula (g)	7,03	7,40	7,89	6,51	7,74
Peso da cápsula + solo úmido (g)	7,59	7,98	8,49	7,00	8,29
Peso da cápsula + solo seco (g)	7,41	7,80	8,30	6,87	8,11
Peso do solo úmido (g)	0,56	0,58	0,60	0,49	0,55
Peso do solo seco (g)	0,38	0,40	0,41	0,36	0,37
Peso de água (g)	0,18	0,18	0,19	0,13	0,18
Teor de umidade	47,37%	45,00%	46,34%	36,11%	48,65%
Limite de Plasticidade (LP)	47	45	46	36	49
Limite de Plasticidade médio (LP)	46				

Tabela A9 – Limite de Plasticidade do Solo + 5%

Número da cápsula	LP501	LP502	LP503	LP504	LP505
Peso da cápsula (g)	7,47	6,98	11,15	7,42	7,99
Peso da cápsula + solo úmido (g)	8,09	7,49	11,59	7,99	8,55
Peso da cápsula + solo seco (g)	7,86	7,34	11,45	7,79	8,36
Peso do solo úmido (g)	0,62	0,51	0,44	0,57	0,56
Peso do solo seco (g)	0,39	0,36	0,30	0,37	0,37
Peso de água (g)	0,23	0,15	0,14	0,20	0,19
Teor de umidade	58,97%	41,67%	46,67%	54,05%	51,35%
Limite de Plasticidade (LP)	59	42	47	54	51
Limite de Plasticidade médio (LP)	51				

Tabela A10 – Limite de Plasticidade do Solo + 10%

Número da cápsula	LP101	LP102	LP103	LP104	LP105
Peso da cápsula (g)	7,84	7,82	7,93	8,25	7,75
Peso da cápsula + solo úmido (g)	8,42	8,42	8,68	8,98	8,17
Peso da cápsula + solo seco (g)	8,24	8,21	8,42	8,72	8,04
Peso do solo úmido (g)	0,58	0,60	0,75	0,73	0,42
Peso do solo seco (g)	0,40	0,39	0,49	0,47	0,29
Peso de água (g)	0,18	0,21	0,26	0,26	0,13
Teor de umidade	45,00%	53,85%	53,06%	55,32%	44,83%
Limite de Plasticidade (LP)	45	54	53	55	45
Limite de Plasticidade médio (LP)			54		

Tabela A11 – Limite de Plasticidade do Solo + 15%

Número da cápsula	LP151	LP152	LP153	LP154	LP155
Peso da cápsula (g)	7,92	7,55	8,24	7,61	7,65
Peso da cápsula + solo úmido (g)	8,48	8,21	8,83	8,31	8,36
Peso da cápsula + solo seco (g)	8,29	7,99	8,64	8,08	8,12
Peso do solo úmido (g)	0,56	0,66	0,59	0,70	0,71
Peso do solo seco (g)	0,37	0,44	0,40	0,47	0,47
Peso de água (g)	0,19	0,22	0,19	0,23	0,24
Teor de umidade	51,35%	50,00%	47,50%	48,94%	51,06%
Limite de Plasticidade (LP)	51	50	47	49	51
Limite de Plasticidade médio (LP)			50		

Tabela A12 – Limite de Plasticidade da Telha Pura

Número da cápsula	LPT01	LPT02	LPT03	LPT04	LPT05
Peso da cápsula (g)	7,67	7,88	7,76	6,23	7,26
Peso da cápsula + solo úmido (g)	8,51	8,31	8,50	6,71	7,88
Peso da cápsula + solo seco (g)	8,29	8,16	8,31	6,58	7,74
Peso do solo úmido (g)	0,84	0,43	0,74	0,48	0,62
Peso do solo seco (g)	0,62	0,28	0,55	0,35	0,48
Peso de água (g)	0,22	0,15	0,19	0,13	0,14
Teor de umidade	35,48%	53,57%	34,55%	37,14%	29,17%
Limite de Plasticidade (LP)	35	54	35	37	29
Limite de Plasticidade médio (LP)			36		

**APÊNDICE B – RESULTADOS PARA OS ENSAIOS DE ANÁLISE
GRANULOMÉTRICA**

Tabela B1 – Peneiramento grosso do solo puro

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA TOTAL					
Peneira nº	Material retido			% que passa da amostra total	Peneira (mm)
	Peso acumulado (g)	% amostra total	% acumulada		
1 1/2 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	38,10
1 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	25,40
3/4 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	19,10
3/8 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	9,50
4	0,00	0,00	0,00	100,00	4,80
10	0,20	0,04	0,04	99,96	2,00

Tabela B2 – Peneiramento lavado do solo puro

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA PARCIAL						
Amostra parcial úmida (g):	70,30			Amostra parcial seca (g):	68,05	
Peneira nº	Material retido			% passa amost. parc.	% passa amost. total	Peneira (mm)
	Peso acumulado (g)	% amostra parcial	% acumulada			
16	0,08	0,12	0,12	99,88	99,84	1,20
30	0,25	0,25	0,37	99,63	99,59	0,60
40	0,51	0,38	0,75	99,25	99,21	0,42
60	0,78	0,40	1,15	98,85	98,81	0,25
100	2,92	3,14	4,29	95,71	95,67	0,15
200	14,64	17,22	21,51	78,49	78,46	0,074

Tabela B3 – Sedimentação do solo puro

SEDIMENTAÇÃO								
Massa específica real (g/cm ³):		2,729		Densímetro Nº vermelho				
Seção da proveta (cm ²):		27,43						
Tempo (min)	Leitura do Densímetro	Temperatura °C	Leitura em Meio Dispersor	Leitura Corrigida	Viscosidade (g.s/cm ²)	Altura de queda (cm)	Diâmetro (mm)	% amost. total
0,5	1,0326	24,4	0,9945	0,0381	9,34E-06	10,79	0,0590	88,18
1	1,0308	24,4	0,9945	0,0363	9,34E-06	11,15	0,0424	84,02
2	1,0277	24,4	0,9945	0,0332	9,34E-06	11,77	0,0308	76,76
4	1,0218	24,5	0,9945	0,0273	9,34E-06	12,92	0,0228	63,25
8	1,0200	23,2	0,9947	0,0253	9,56E-06	13,28	0,0166	58,54
15	1,0172	23,1	0,9947	0,0225	9,56E-06	13,83	0,0123	52,02
31	1,0148	22,5	0,9948	0,0200	9,80E-06	14,30	0,0088	46,24
59	1,0128	22,2	0,9949	0,0179	9,80E-06	14,70	0,0065	41,50
210	1,0090	22,1	0,9949	0,0141	9,80E-06	15,45	0,0035	32,67
362	1,0072	22,2	0,9949	0,0123	9,80E-06	15,80	0,0027	28,54
1428	1,0040	22,1	0,9949	0,0091	9,80E-06	16,43	0,0014	21,09

Tabela B4 – Peneiramento grosso do solo + 2%

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA TOTAL						
Peneira nº	Material retido			% que passa da amostra total	Peneira (mm)	
	Peso acumulado (g)	% amostra total	% acumulada			
1 1/2 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	38,10	
1 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	25,40	
3/4 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	19,10	
3/8 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	9,50	
4	0,00	0,00	0,00	100,00	4,80	
10	1,77	0,36	0,36	99,64	2,00	

Tabela B5 – Peneiramento lavado do solo + 2%

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA PARCIAL						
Amostra parcial úmida (g):	70,07			Amostra parcial seca (g):	67,65	
Peneira nº	Material retido			% passa amost. parc.	% passa amost. total	Peneira (mm)
	Peso acumulado (g)	% amostra parcial	% acumulada			
16	0,03	0,04	0,04	99,96	99,60	1,20
30	0,43	0,59	0,64	99,36	99,01	0,60
40	0,63	0,30	0,93	99,07	98,72	0,42
60	1,06	0,64	1,57	98,43	98,08	0,25
100	3,17	3,12	4,69	95,31	94,98	0,15
200	7,91	7,01	11,69	88,31	87,99	0,074

Tabela B6 – Sedimentação do solo + 2%

SEDIMENTAÇÃO								
Massa específica real (g/cm ³):			2,729		Densímetro Nº vermelho			
Seção da proveta (cm ²):			27,43					
Tempo (min)	Leitura do Densímetro	Temperatura °C	Leitura em Meio Dispersor	Leitura Corrigida	Viscosidade (g.s/cm ²)	Altura de queda (cm)	Diâmetro (mm)	% amost. total
0,5	1,0322	20,5	0,9946	0,0376	1,03E-05	10,87	0,0622	76,97
1	1,0302	20,5	0,9946	0,0356	1,03E-05	11,27	0,0448	72,87
2	1,0270	20,5	0,9946	0,0324	1,03E-05	11,90	0,0325	66,31
4	1,0242	20,5	0,9946	0,0296	1,03E-05	12,45	0,0235	60,59
8	1,0204	20,2	0,9947	0,0257	1,03E-05	13,20	0,0171	52,72
18	1,0164	19,5	0,9948	0,0216	1,05E-05	13,99	0,0119	44,32
30	1,0142	19,6	0,9948	0,0194	1,05E-05	14,42	0,0094	39,84
60	1,0120	19,3	0,9948	0,0172	1,05E-05	14,85	0,0067	35,25
120	1,0100	18,9	0,9948	0,0152	1,08E-05	15,25	0,0049	31,05
212	1,0088	19,1	0,9948	0,0140	1,05E-05	15,49	0,0036	28,64
1462	1,0034	18,8	0,9949	0,0085	1,08E-05	16,55	0,0015	17,50

Tabela B7 – Peneiramento grosso do solo + 5%

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA TOTAL						
Peneira nº	Material retido			% que passa da amostra total	Peneira (mm)	
	Peso acumulado (g)	% amostra total	% acumulada			
1 1/2 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	38,10	
1 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	25,40	
3/4 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	19,10	
3/8 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	9,50	
4	0,67	0,13	0,13	99,87	4,80	
10	4,45	0,75	0,89	99,11	2,00	

Tabela B8 – Peneiramento lavado do solo + 5%

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA PARCIAL						
Amostra parcial úmida (g):	70,75			Amostra parcial seca (g):	68,38	
Peneira nº	Material retido			% passa amost. parc.	% passa amost. total	Peneira (mm)
	Peso acumulado (g)	% amostra parcial	% acumulada			
16	0,21	0,31	0,31	99,69	98,81	1,20
30	0,84	0,92	1,23	98,77	97,89	0,60
40	1,29	0,66	1,89	98,11	97,24	0,42
60	1,69	0,58	2,47	97,53	96,66	0,25
100	4,02	3,41	5,88	94,12	93,28	0,15
200	8,24	6,17	12,05	87,95	87,17	0,074

Tabela B9 – Sedimentação do solo + 5%

SEDIMENTAÇÃO								
Massa específica real (g/cm ³):		2,525						
Seção da proveta (cm ²):		27,43		Densímetro N ^o vermelho				
Tempo (min)	Leitura do Densímetro	Temperatura °C	Leitura em Meio Dispensor	Leitura Corrigida	Viscosidade (g.s/cm ²)	Altura de queda (cm)	Diâmetro (mm)	% amost. total
0,5	1,0318	24,4	0,9945	0,0373	9,34E-06	10,95	0,0633	89,36
1	1,0298	24,4	0,9945	0,0353	9,34E-06	11,35	0,0456	84,57
2	1,0269	24,4	0,9945	0,0324	9,34E-06	11,92	0,0330	77,62
4	1,0228	24,4	0,9945	0,0283	9,34E-06	12,73	0,0241	67,82
8	1,0198	24,3	0,9945	0,0253	9,34E-06	13,32	0,0175	60,59
15	1,0170	22,8	0,9948	0,0222	9,80E-06	13,87	0,0133	53,25
30	1,0134	22,3	0,9949	0,0185	9,80E-06	14,58	0,0097	44,43
67	1,0116	22,0	0,9949	0,0167	9,80E-06	14,93	0,0065	40,00
122	1,0100	22,1	0,9949	0,0151	9,80E-06	15,25	0,0049	36,21
221	1,0086	22,6	0,9948	0,0138	9,80E-06	15,52	0,0037	33,05
1373	1,0030	22,0	0,9949	0,0081	9,80E-06	16,63	0,0015	19,40

Tabela B10 – Peneiramento grosso do solo + 10%

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA TOTAL					
Peneira nº	Material retido			% que passa da amostra total	Peneira (mm)
	Peso acumulado (g)	% amostra total	% acumulada		
1 1/2 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	38,10
1 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	25,40
3/4 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	19,10
3/8 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	9,50
4	3,53	0,70	0,70	99,30	4,80
10	13,40	1,96	2,66	97,34	2,00

Tabela B11 – Peneiramento lavado do solo + 10%

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA PARCIAL						
Amostra parcial úmida (g):	71,00			Amostra parcial seca (g):	68,93	
Peneira nº	Material retido			% passa amostr. parc.	% passa amostr. total	Peneira (mm)
	Peso acumulado (g)	% amostra parcial	% acumulada			
16	0,5	0,73	0,73	99,27	96,63	1,20
30	1,65	1,67	2,39	97,61	95,01	0,60
40	2,39	1,07	3,47	96,53	93,96	0,42
60	2,79	0,58	4,05	95,95	93,40	0,25
100	5,25	3,57	7,62	92,38	89,93	0,15
200	8,74	5,06	12,68	87,32	85,00	0,074

Tabela B12 – Sedimentação do solo + 10%

SEDIMENTAÇÃO								
Massa específica real (g/cm ³):		2,666		Densímetro Nº vermelho				
Seção da proveta (cm ²):		27,43						
Tempo (min)	Leitura do Densímetro	Temperatura °C	Leitura em Meio Dispersor	Leitura Corrigida	Viscosidade (g.s/cm ²)	Altura de queda (cm)	Diâmetro (mm)	% amostr. total
0,5	1,0313	25,6	0,9938	0,0375	9,13E-06	11,05	0,0602	84,67
1	1,0295	25,6	0,9938	0,0357	9,13E-06	11,41	0,0432	80,61
2	1,0263	25,6	0,9938	0,0325	9,13E-06	12,04	0,0314	73,40
4,5	1,0232	25,1	0,9939	0,0293	9,13E-06	12,65	0,0215	66,19
13	1,0188	23,5	0,9941	0,0247	9,56E-06	13,51	0,0134	55,60
15	1,0174	23,5	0,9941	0,0233	9,56E-06	13,79	0,0126	52,40
30	1,0156	21,9	0,9944	0,0212	1,00E-05	14,15	0,0092	47,78
63	1,0130	21,8	0,9944	0,0186	1,00E-05	14,66	0,0065	41,88
123	1,0108	21,3	0,9945	0,0163	1,00E-05	15,09	0,0047	36,74
220	1,0086	21,0	0,9946	0,0140	1,00E-05	15,52	0,0036	31,68
1357	1,0050	19,9	0,9947	0,0103	1,05E-05	16,23	0,0015	23,20

Tabela B13 – Peneiramento grosso do solo + 15%

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA TOTAL					
Peneira nº	Material retido			% que passa da amostra total	Peneira (mm)
	Peso acumulado (g)	% amostra total	% acumulada		
1 1/2 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	38,10
1 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	25,40
3/4 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	19,10
3/8 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	9,50
4	0,70	0,14	0,14	99,86	4,80
10	21,23	4,10	4,24	95,76	2,00

Tabela B14 – Peneiramento lavado do solo + 15%

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA PARCIAL						
Amostra parcial úmida (g):	71,20	Amostra parcial seca (g):			69,31	
Peneira nº	Material retido			% passa amostr. parc.	% passa amostr. total	Peneira (mm)
	Peso acumulado (g)	% amostra parcial	% acumulada			
16	0,79	1,14	1,14	98,86	94,67	1,20
30	2,61	2,63	3,77	96,23	92,16	0,60
40	3,67	1,53	5,30	94,70	90,69	0,42
60	4,5	1,20	6,49	93,51	89,54	0,25
100	8,24	5,40	11,89	88,11	84,38	0,15
200	15,67	10,72	22,61	77,39	74,11	0,074

Tabela B15 – Sedimentação do solo + 15%

SEDIMENTAÇÃO								
Massa específica real (g/cm ³):		2,582		Densímetro Nº			vermelho	
Seção da proveta (cm ²):		28,80						
Tempo (min)	Leitura do Densímetro	Temperatura °C	Leitura em Meio Dispersor	Leitura Corrigida	Viscosidade (g.s/cm ²)	Altura de queda (cm)	Diâmetro (mm)	% amost. total
0,5	1,0315	24,7	0,9944	0,0371	9,34E-06	11,01	0,0623	83,42
1	1,0292	24,7	0,9944	0,0348	9,34E-06	11,46	0,0450	78,24
2	1,0266	24,7	0,9944	0,0322	9,34E-06	11,98	0,0325	72,39
5	1,0222	23,9	0,9946	0,0276	9,56E-06	12,84	0,0215	62,18
8	1,0200	23,9	0,9946	0,0254	9,56E-06	13,28	0,0173	57,22
15	1,0178	22,9	0,9948	0,0230	9,80E-06	13,71	0,0130	51,88
30	1,0150	22,1	0,9949	0,0201	9,80E-06	14,26	0,0094	45,28
60	1,0120	21,5	0,9950	0,0170	1,00E-05	14,85	0,0069	38,31
101	1,0108	21,5	0,9950	0,0158	1,00E-05	15,09	0,0053	35,61
387	1,0074	20,6	0,9951	0,0123	1,03E-05	15,76	0,0028	27,65
1357	1,0050	19,9	0,9952	0,0098	1,05E-05	16,23	0,0015	22,03

Tabela B16 – Peneiramento grosso da telha pura

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA TOTAL					
Peneira nº	Material retido			% que passa da amostra total	Peneira (mm)
	Peso acumulado (g)	% amostra total	% acumulada		
1 1/2 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	38,10
1 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	25,40
3/4 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	19,10
3/8 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	9,50
4	24,43	4,79	4,79	95,21	4,80
8	84,66	11,81	16,60	83,40	2,36
10	110,70	16,92	21,71	78,29	2,00

Tabela 17 – Peneiramento lavado da telha pura

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA PARCIAL						
Amostra parcial úmida (g):	90,41	Amostra parcial seca (g):				90,10
Peneira nº	Material retido			% passa amost. parc.	% passa amost. total	Peneira (mm)
	Peso acumulado (g)	% amostra parcial	% acumulada			
16	7,03	7,80	7,80	92,20	72,19	1,20
30	19,11	13,41	21,21	78,79	61,69	0,60
40	24,75	6,26	27,47	72,53	56,79	0,42
60	28,56	4,23	31,70	68,30	53,48	0,25
100	38,33	10,84	42,54	57,46	44,99	0,15
200	48,22	10,98	53,52	46,48	36,39	0,074

Tabela B18 – Sedimentação da telha pura

SEDIMENTAÇÃO								
Massa específica real (g/cm³):		2,570		Densímetro Nº			vermelho	
Seção da proveta (cm²):		28,80						
Tempo (min)	Leitura do Densímetro	Temperatura °C	Leitura em Meio Dispensor	Leitura Corrigida	Viscosidade (g.s/cm²)	Altura de queda (cm)	Diâmetro (mm)	% amost. total
0,5	1,0249	24,1	0,9945	0,0303	9,34E-06	12,32	0,0662	43,04
1	1,0219	24,1	0,9945	0,0273	9,34E-06	12,91	0,0479	38,79
2	1,0190	24,1	0,9945	0,0245	9,34E-06	13,48	0,0346	34,72
4	1,0160	23,9	0,9946	0,0214	9,56E-06	14,07	0,0253	30,42
8	1,0128	23,9	0,9946	0,0182	9,56E-06	14,70	0,0183	25,87
15	1,0102	22,9	0,9948	0,0154	9,80E-06	15,21	0,0138	21,93
31	1,0090	22,1	0,9949	0,0141	9,80E-06	15,45	0,0096	20,04
62	1,0072	21,5	0,9950	0,0122	1,00E-05	15,80	0,0070	17,35
144	1,0058	21,5	0,9950	0,0108	1,00E-05	16,08	0,0046	15,37
296	1,0044	20,6	0,9951	0,0093	1,03E-05	16,35	0,0033	13,18
1512	1,0032	19,9	0,9952	0,0080	1,05E-05	16,59	0,0015	11,34

**APÊNDICE C – RESULTADOS PARA A COMPACTAÇÃO E SATURAÇÃO
REFERENTES AOS ENSAIOS PROCTOR NORMAL**

Tabela C1 – Resultados Compactação e Saturação – Solo Puro

teor de umidade (%)	15,78%	22,51%	29,19%	38,16%	39,93%
γ_d (g/cm ³)	1,2363	1,2983	1,3389	1,2889	1,2590
Gs	2,7294	2,7294	2,7294	2,7294	2,7294
S	100	100	100	100	100
S	90	90	90	90	90
S	80	80	80	80	80
γ_w (g/cm ³)	1	1	1	1	1
γ_{d100} (g/cm ³)	1,9076	1,6905	1,5191	1,3370	1,3059
γ_{d90} (g/cm ³)	1,8458	1,6219	1,4478	1,2653	1,2344
γ_{d80} (g/cm ³)	1,7741	1,5437	1,3675	1,1857	1,1553

Tabela C2 – Resultados Compactação e Saturação – Solo + 2%

teor de umidade (%)	16,55%	20,72%	29,31%	36,12%	40,54%
γ_d (g/cm ³)	1,2419	1,2745	1,3253	1,3060	1,2315
Gs	2,7294	2,7294	2,7294	2,7294	2,7294
S	100	100	100	100	100
S	90	90	90	90	90
S	80	80	80	80	80
γ_w (g/cm ³)	1	1	1	1	1
γ_{d100} (g/cm ³)	1,8801	1,7434	1,5164	1,3745	1,2958
γ_{d90} (g/cm ³)	1,8173	1,6762	1,4451	1,3026	1,2243
γ_{d80} (g/cm ³)	1,7444	1,5990	1,3648	1,2227	1,1454

Tabela C3 – Resultados Compactação e Saturação – Solo + 5%

teor de umidade (%)	18,52%	23,23%	30,40%	32,85%	36,23%	42,06%
γ_d (g/cm ³)	1,1816	1,2338	1,2674	1,3163	1,2925	1,2084
Gs	2,5252	2,5252	2,5252	2,5252	2,5252	2,5252
S	100	100	100	100	100	100
S	90	90	90	90	90	90
S	80	80	80	80	80	80
γ_w (g/cm ³)	1	1	1	1	1	1
γ_{d100} (g/cm ³)	1,7206	1,5915	1,4286	1,3802	1,3187	1,2245
γ_{d90} (g/cm ³)	1,6618	1,5287	1,3628	1,3140	1,2522	1,1583
γ_{d80} (g/cm ³)	1,5937	1,4569	1,2887	1,2397	1,1780	1,0848

Tabela C4 – Resultados Compactação e Saturação – Solo + 10%

teor de umidade (%)	20,50%	28,46%	33,32%	36,20%	40,27%	42,37%
γ_d (g/cm ³)	1,2386	1,2896	1,2996	1,2884	1,2581	1,1968
Gs	2,6664	2,6664	2,6664	2,6664	2,6664	2,6664
S	100	100	100	100	100	100
S	90	90	90	90	90	90
S	80	80	80	80	80	80
γ_w (g/cm ³)	1	1	1	1	1	1
γ_{d100} (g/cm ³)	1,7240	1,5160	1,4119	1,3568	1,2858	1,2519
γ_{d90} (g/cm ³)	1,6588	1,4467	1,3418	1,2866	1,2159	1,1823
γ_{d80} (g/cm ³)	1,5840	1,3684	1,2633	1,2085	1,1384	1,1054

Tabela C5 – Resultados Compactação e Saturação – Solo + 15%

teor de umidade (%)	20,68%	28,33%	32,98%	36,97%	40,81%	43,20%
γ_d (g/cm ³)	1,2517	1,3190	1,3225	1,2797	1,2418	1,1932
Gs	2,570	2,570	2,570	2,570	2,570	2,570
S	100	100	100	100	100	100
S	90	90	90	90	90	90
S	80	80	80	80	80	80
γ_w (g/cm ³)	1	1	1	1	1	1
γ_{d100} (g/cm ³)	1,6782	1,4872	1,3910	1,3179	1,2543	1,2178
γ_{d90} (g/cm ³)	1,6159	1,4207	1,3235	1,2502	1,1868	1,1505
γ_{d80} (g/cm ³)	1,5442	1,3455	1,2478	1,1748	1,1120	1,0762

APÊNDICE D – RESULTADOS PARA OS ENSAIOS CBR

Tabela D1 – Expansão CBR – Solo Puro

DATA	HORA	TEMPO DECORRIDO (min)	LEITURA DO EXTENSOMETRO (mm)	DIFERENÇA DE LEITURA (mm)	EXPANSÃO (%)
26/09/2016	19:30	0	0	0	0,00%
27/09/2016	18:00	1350	4,99	4,99	4,38%
28/09/2016	19:30	2880	4,99	0	4,38%
29/09/2016	18:00	4230	4,99	0	4,38%
30/09/2016	18:00	5670	4,99	0	4,38%

Tabela D2 – CBR – Solo Puro

Penetração		Pressão padrão (kgf/cm ²)	Pressão		ISC (%)
mm	pol		Calculada (kgf/cm ²)	Corrigida (kgf/cm ²)	
0	0	-	0	0	-
0,63	0,025	-	0,319255	0,294249	-
1,27	0,050	-	0,532109	0,586222	-
1,90	0,075	-	0,798111	0,878195	-
2,54	0,100	70,31	1,117366	1,170122	1,66%
3,81	0,150	-	1,649475	1,754114	-
5,08	0,200	105,48	2,234785	2,33806	2,22%
7,62	0,300	-	3,458605	3,505952	-
10,16	0,400	-	4,682371	4,673614	-
12,7	0,500	-	5,799578	5,841506	-

Tabela D3 – Expansão CBR – Solo + 2%

DATA	HORA	TEMPO DECORRIDO (min)	LEITURA DO EXTENSOMETRO (mm)	DIFERENÇA DE LEITURA (mm)	EXPANSÃO (%)
26/09/2016	19:30	0	0	0	0,00%
27/09/2016	18:00	1350	5,53	5,53	4,81%
28/09/2016	19:30	2880	5,54	0,01	4,82%
29/09/2016	18:00	4230	5,53	-0,01	4,81%
30/09/2016	18:00	5670	5,50	-0,03	4,79%

Tabela D4 – CBR – Solo + 2%

Penetração		Pressão padrão (kgf/cm ²)	Pressão		ISC (%)
mm	pol		Calculada (kgf/cm ²)	Corrigida (kgf/cm ²)	
0	0	-	0	0	-
0,63	0,025	-	0,266044	0,291422	-
1,27	0,050	-	0,478883	0,585774	-
1,90	0,075	-	0,69171	0,872498	-
2,54	0,100	70,31	1,010965	1,168958	1,66%
3,81	0,150	-	1,649475	1,752142	-
5,08	0,200	105,48	2,341186	2,335326	2,21%
7,62	0,300	-	3,511805	3,501694	-
10,16	0,400	-	4,629171	4,669118	-
12,7	0,500	-	5,693602	5,835486	-

Tabela D5 – Expansão CBR – Solo + 5%

DATA	HORA	TEMPO DECORRIDO (min)	LEITURA DO EXTENSOMETRO (mm)	DIFERENÇA DE LEITURA (mm)	EXPANSÃO (%)
26/09/2016	18:20	0	0	0	0,00%
27/09/2016	18:00	1420	2,62	2,62	2,29%
28/09/2016	18:00	2860	2,57	-0,05	2,24%
29/09/2016	18:00	4300	2,54	-0,03	2,22%
30/09/2016	18:00	5740	2,50	-0,04	2,18%

Tabela D6 – CBR – Solo + 5%

Penetração		Pressão padrão (kgf/cm ²)	Pressão		ISC (%)
mm	pol		Calculada (kgf/cm ²)	Corrigida (kgf/cm ²)	
0	0	-	0	0	-
0,63	0,025	-	0,266044	0,207019	-
1,27	0,050	-	0,478883	0,417216	-
1,90	0,075	-	0,69171	0,621365	-
2,54	0,100	70,31	1,010965	0,832412	1,18%
3,81	0,150	-	1,649475	1,247575	-
5,08	0,200	105,48	2,341186	1,662738	1,58%
7,62	0,300	-	3,511805	2,493064	-
10,16	0,400	-	4,629171	3,323455	-
12,7	0,500	-	5,693602	4,153781	-

Tabela D7 – Expansão CBR – Solo + 10%

DATA	HORA	TEMPO DECORRIDO (min)	LEITURA DO EXTENSOMETRO (mm)	DIFERENÇA DE LEITURA (mm)	EXPANSÃO (%)
26/09/2016	18:30	0	0	0	0,00%
27/09/2016	18:00	1410	3,3	3,3	2,84%
28/09/2016	18:00	2850	3,25	-0,05	2,80%
29/09/2016	18:00	4290	3,22	-0,03	2,78%
30/09/2016	18:00	5730	3,17	-0,05	2,73%

Tabela D8 – CBR – Solo + 10%

Penetração		Pressão padrão (kgf/cm ²)	Pressão		ISC (%)
mm	pol		Calculada (kgf/cm ²)	Corrigida (kgf/cm ²)	
0	0	-	0	0	-
0,63	0,025	-	0,212838	0,325360	-
1,27	0,050	-	0,266044	0,650607	-
1,90	0,075	-	0,425672	0,973870	-
2,54	0,100	70,31	0,69171	1,297847	1,85%
3,81	0,150	-	1,117366	1,945801	-
5,08	0,200	105,48	1,649475	2,593755	2,46%
7,62	0,300	-	2,873295	3,889663	-
10,16	0,400	-	4,203515	5,185673	-
12,7	0,500	-	5,480588	6,481581	-

Tabela D9 – Expansão CBR – Solo + 15%

DATA	HORA	TEMPO DECORRIDO (min)	LEITURA DO EXTENSOMETRO (mm)	DIFERENÇA DE LEITURA (mm)	EXPANSÃO (%)
26/09/2016	18:55	0	0	0	0,00%
27/09/2016	18:00	1385	3,58	3,58	3,16%
28/09/2016	18:00	2825	3,6	0,02	3,18%
29/09/2016	18:00	4265	3,59	-0,01	3,17%
30/09/2016	18:00	5705	3,54	-0,05	3,12%

Tabela D10 – CBR – Solo + 15%

Penetração		Pressão padrão (kgf/cm ²)	Pressão		ISC (%)
mm	pol		Calculada (kgf/cm ²)	Corrigida (kgf/cm ²)	
0	0	-	0	0	-
0,63	0,025	-	0,053211	0,408432	-
1,27	0,050	-	0,106417	0,82226	-
1,90	0,075	-	0,212838	1,223474	-
2,54	0,100	70,31	0,425672	1,639112	2,33%
3,81	0,150	-	0,904565	2,456865	-
5,08	0,200	105,48	1,489874	3,274618	3,10%
7,62	0,300	-	3,032896	4,910124	-
10,16	0,400	-	4,735572	6,545887	-
12,7	0,500	-	6,332112	8,181393	-

**APÊNDICE E – CORREÇÃO DA CURVA TENSÃO X PENETRAÇÃO PARA
OBTENÇÃO DA PRESSÃO CORRIGIDA**

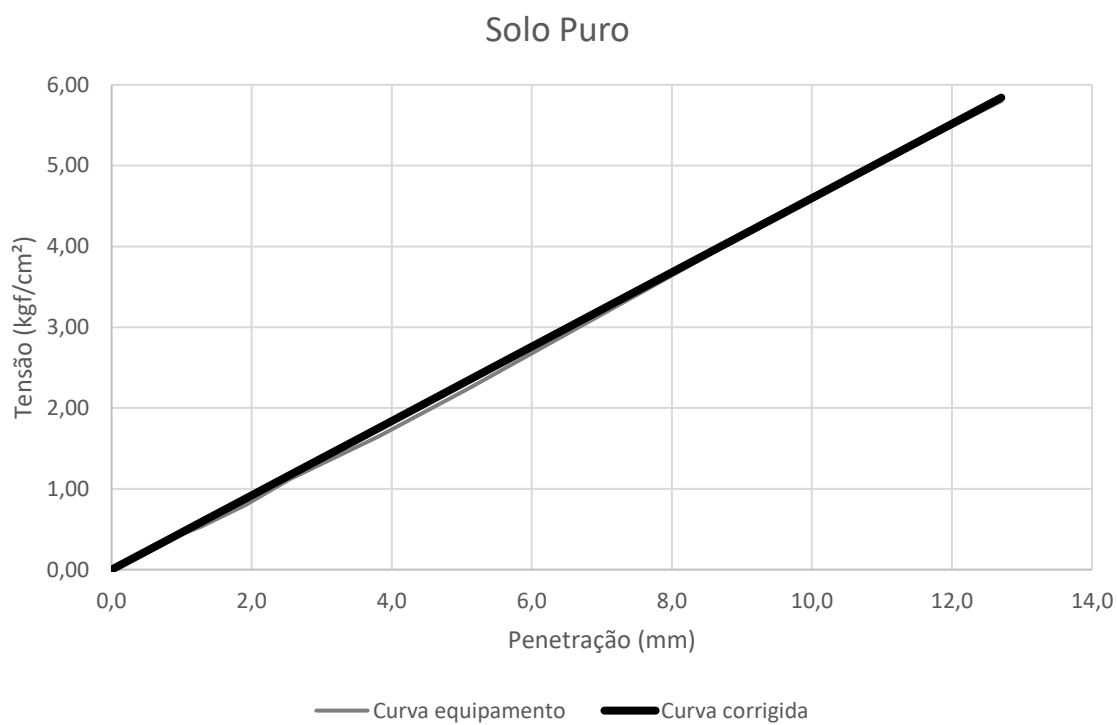


Figura E1 – Correção da curva de tensão x Penetração para o Solo Puro

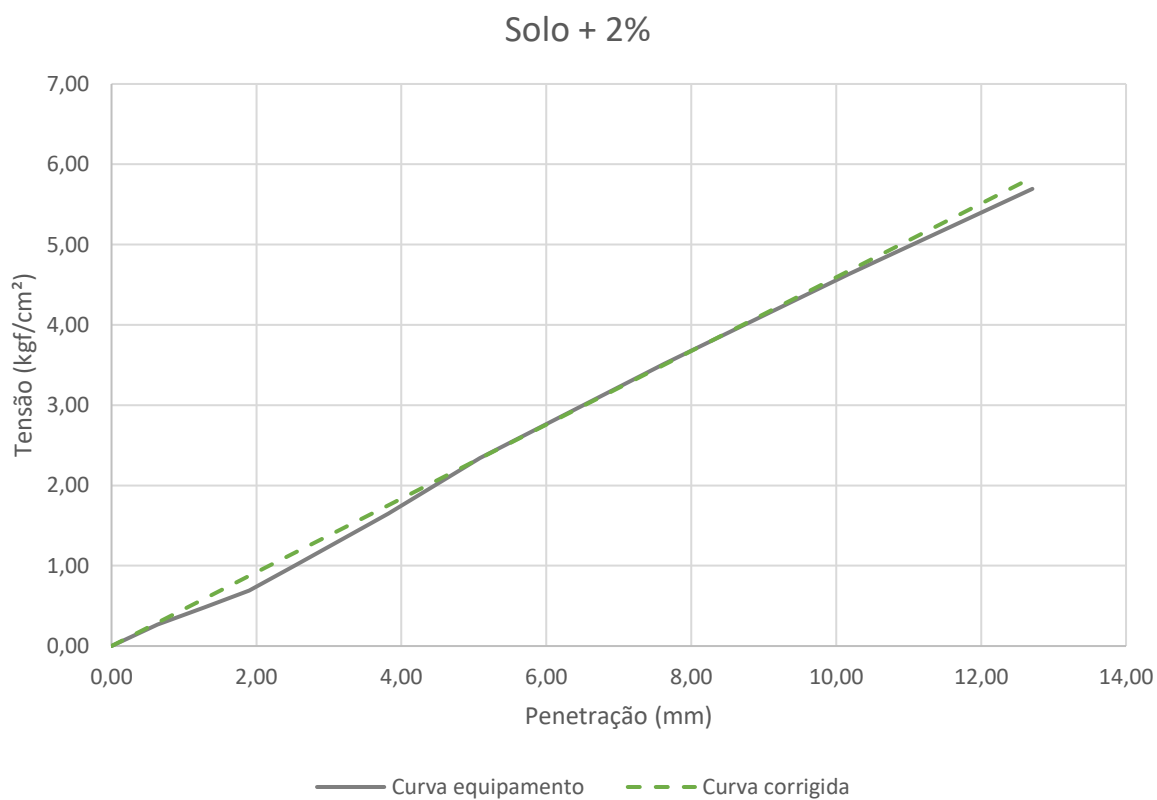


Figura E2 – Correção da curva de tensão x Penetração para o Solo + 2%

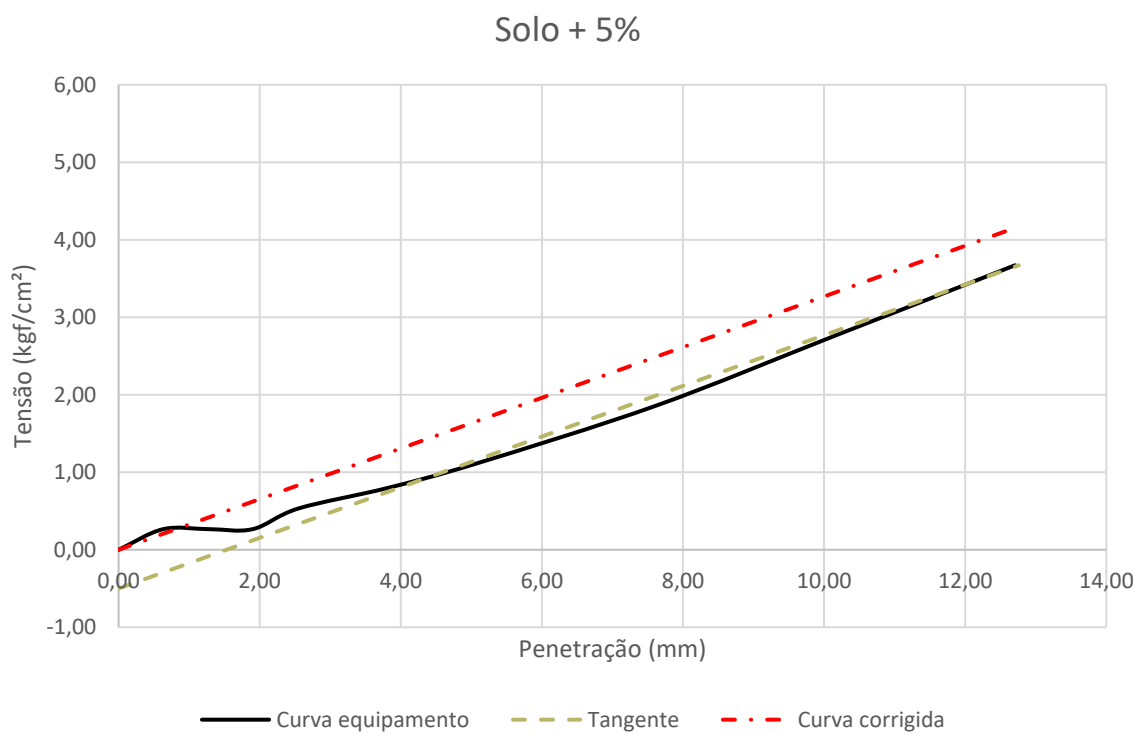


Figura E3 – Correção da curva de tensão x Penetração para o Solo + 5%

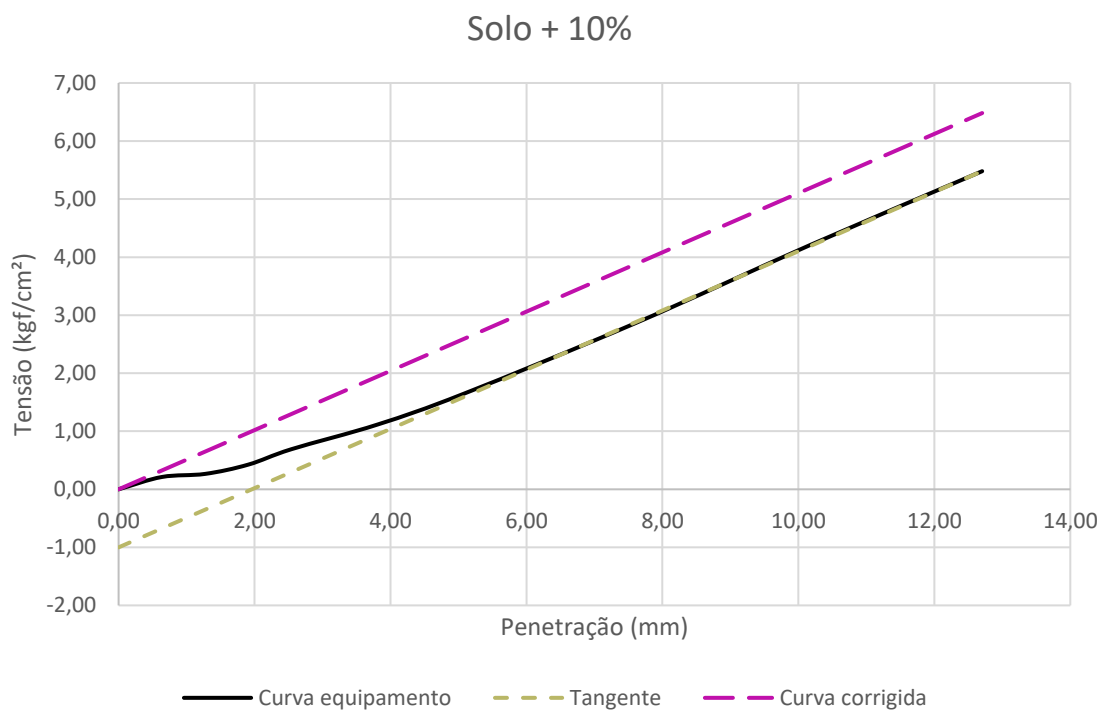


Figura E4 – Correção da curva de tensão x Penetração para o Solo + 10%

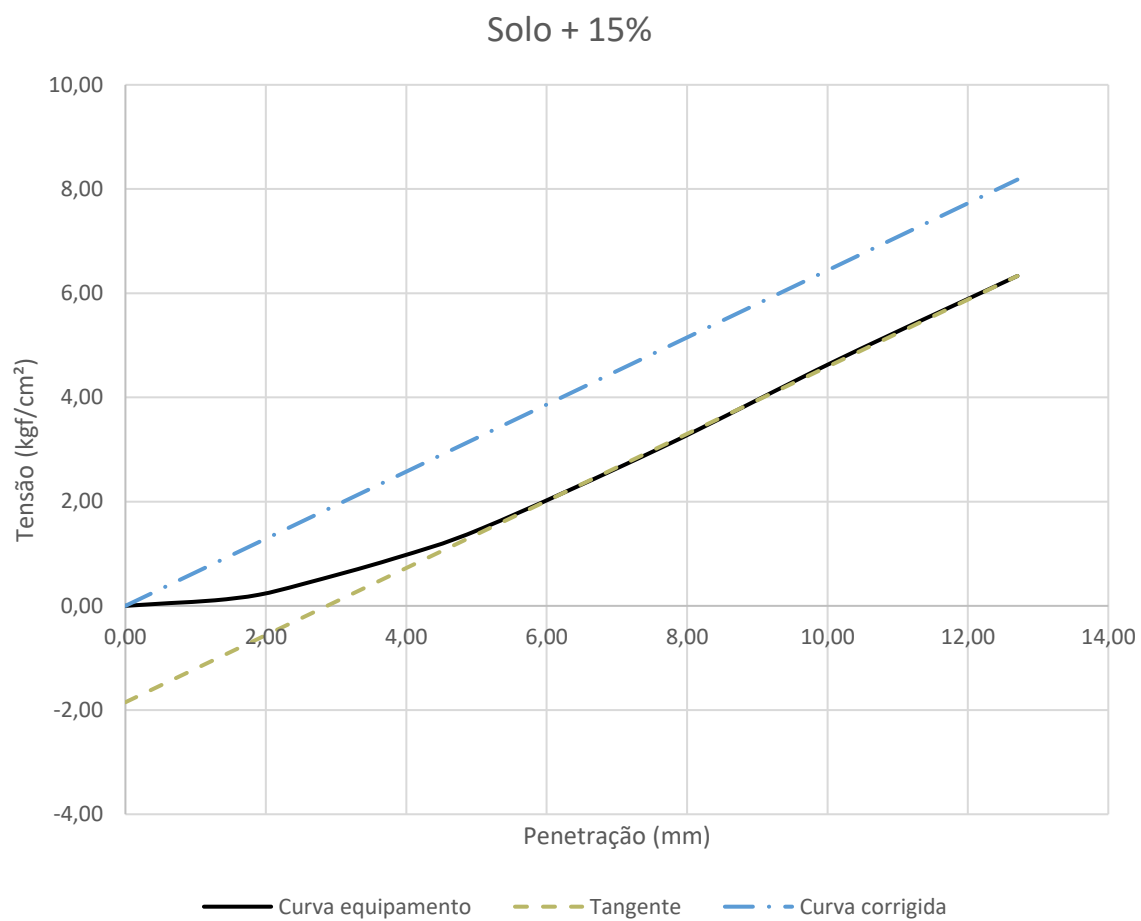


Figura E5 – Correção da curva de tensão x Penetração para o Solo + 15%