

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL  
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE

ÁREA GEOTÉCNICA

**ESTUDO DE SOLOS MODIFICADOS POR ADIÇÃO DE POLÍMEROS  
PARA USO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

Jonny Dantas Patricio

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental

Campina Grande – Paraíba

Fevereiro de 2015

JONNY DANTAS PATRICIO

**ESTUDO DE SOLOS MODIFICADOS POR ADIÇÃO DE POLÍMEROS  
PARA USO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Área de Concentração – Geotécnica

Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues

Orientador

Profa. Dra. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena

Co - Orientadora

Campina Grande – Paraíba

Fevereiro de 2015

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Jonny Dantas Patricio

Título: **ESTUDO DE SOLOS MODIFICADOS POR ADIÇÃO DE  
POLÍMEROS PARA USO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

Área de Concentração – Geotécnica

Dissertação defendida e aprovada em: 27/02/2015

Pela Banca Examinadora

(Assinatura): \_\_\_\_\_

Prof. D.Sc. (Orientador) John Kennedy Guedes Rodrigues

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura): \_\_\_\_\_

Profa. D.Sc. (Co-Orientadora) Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura): \_\_\_\_\_

Prof. D.Sc. (Examinador Externo) Márcio Muniz de Farias

Universidade de Brasília - UNB

(Assinatura): \_\_\_\_\_

Prof. D.Sc. (Examinador Interno) Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

# DEDICATÓRIA

Aos meus pais.

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor John Kennedy por todos os anos de orientação, ensinamentos transmitidos e apoio decisivo.

A Professora Lêda Christiane pela amizade, orientação e incentivo.

Aos Professores Adriano Lucena, Ana Maria e Arimatéia Silva pelas sugestões e orientações.

A Jadilson Trigueiro pela amizade e apoio na fase experimental.

Aos amigos da UFCG, em especial ao que estiveram mais presentes: Stephanny, Manoel, Alice e Cláudio.

À empresa **ViaEncosta® Engenharia Ambiental** por disponibilizar todo material para desenvolvimento do trabalho.

À empresa ATECEL pelo apoio técnico.

À CAPES pela bolsa de estudo concedida.

E a todos que colaboram direta e indiretamente para que este trabalho pudesse ser realizado, mesmo não sendo mencionados formalmente.

*Muito obrigado!*

“Nas grandes batalhas da vida, o primeiro passo para a vitória é o desejo de vencer.”

Mahatma Gandhi

## RESUMO

Em rodovias, o solo é utilizado como material de suporte e compõe as camadas de base, sub-base, reforço do subleito e a fundação do pavimento. Para isto, deve apresentar características que confirmem estabilidade e resistência mecânica quando submetido aos esforços solicitantes do tráfego durante a sua vida útil. As técnicas de estabilização geralmente são utilizadas quando os solos locais não atendem as especificações de construção e de desempenho, viabilizando tecnicamente e economicamente materiais antes descartados. A estabilização polimérica de solos, ao contrário das outras técnicas de estabilização como a granulométrica e química, pode ser utilizada em solos de qualquer natureza e granulometria, sendo eficaz tanto na estabilização de solos granulares como de solos finos. Partindo deste pressuposto, este trabalho teve como objetivo avaliar a eficácia do efeito da associação polimérica na estabilização de solos que podem ser utilizados em camadas de base de pavimentos rodoviários. A fase experimental foi dividida em três (3) etapas: ensaios de caracterização física, química e mineralógica dos materiais (granulometria, massa específica real, limites de Atterberg, análise química – EDX, difração de raios-X – DRX, microscopia eletrônica de varredura – MEV e azul de metileno); ensaios de Comportamento Mecânico (Índice de Suporte Califórnia - ISC, Resistência à Compressão Simples - RCS, Resistência à Tração por Compressão Diametral - RT e Módulo de Resiliência -  $M_R$ ); e ensaios de Resistência ao Desgaste (Loaded Wheel Test – LWT e Wet Track Abrasion Test – WTAT). Para isso, foram utilizados quatro (4) solos diferentes com adição de associação polimérica nos teores de 2,2%, 6,2% e 10,7%, servindo como referência amostras de solo puro e adicionados estabilizantes comuns (cal e cimento). Com base nos resultados obtidos, pode-se inferir que a associação polimérica ao solo proporcionou um incremento das propriedades mecânicas em termos de ISC, RCS, RT e  $M_R$  e a redução ao desgaste mensurada com os ensaios de LWT e WTAT. Em geral, a associação polimérica, estudada nesta pesquisa, mostrou-se eficaz na estabilização dos solos estudados, tornando a técnica eficiente para uso em camadas de pavimentos rodoviários a que podem ser submetidos ao tráfego leve e/ou pesado.

**Palavras Chave: polímeros, estabilização, solos, pavimentos.**

## ABSTRACT

On highways, the soil is used as support material and compose the pavements layers. For this, should have characteristics that confer stability and mechanical strength when submitted traffic forces over its useful life. Stabilization techniques are usually used when local soil does not answer construction and performance specifications, enabling technically and economically materials before discarded. Polymeric soil stabilization, unlike others technique (granulometric and chemical), can be effective in gravel soils as clay soils. Based on this assumption, this study aimed to evaluate the efficacy of polymer association in soil stabilization that can be used in roads pavements. The experimental procedure was divided in three stages: physical-chemical-mineralogy properties (granulometry, specific mass, Atterberg limits, chemical analyses-EDX, X-ray diffraction – DRX, scanning electron micrographs and methylene blue), mechanical properties (California Bearing Ratio –CBR, Unconfined Compressive Strength – UCS, Indirect Tensile Strength, Resilient Modulus –RM) and deterioration test (Loaded Wheel Test – LWT and Wet Abrasion Test Track). It was used four(4) different soils with addition of polymer combination in amounts of 2,2%, 6,4% and 10,7% using as reference samples of pure soil and added common additives (lime and cement). Based on the obtained results, can be inferred that the polymer association with soil provided an increase of the mechanical properties (CBR,UCS, Indirect Tensile strength and MR) and reducing degradation measured by LWT and WTAT. Altogether , the polymeric association was effective in stabilizing studied soils, being an efficient technique for use in pavements layers of roads that can be submitted to light and/or heavy traffic.

**Key Words: polymers, stabilization, soils, pavements.**



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Tipos de composição granulométrica .....	6
Figura 2.2 - Partículas de areia antes(a) e depois (b) da aplicação do polímero.....	15
Figura 2.3 - Camada não tratada(a) e tratada(b) com polímero .....	16
Figura 2.4 - Microscopia eletrônica de varredura de caulinita (a) não tratada e (b)tratada com emulsão polimérica.....	19
Figura 3.1 - Polímeros utilizados na pesquisa: Polycure (a), TerraDry (b) e Polímero Acrílico Industrial (c).....	21
Figura 3.2 – Solos estudados na pesquisa.....	24
Figura 3.3 – Execução do ensaio de análise granulométrica .....	26
Figura 3.4 - Limite de liquidez (a) e plasticidade (b) .....	26
Figura 3.5 – Etapas da execução do ensaio de massa específica: dispersão (a) e amostra no picnômetro (b).....	27
Figura 3.6 – Equipamento EDX utilizado na pesquisa.....	28
Figura 3.7 - Equipamentos utilizados para realização do ensaio de difração de raios-x nesta pesquisa .....	29
Figura 3.8 - Equipamento utilizado para realização do ensaio de MEV .....	30
Figura 3.9 – Equipamento utilizado para realização do ensaio de azul de metileno .....	31
Figura 3.10 - Equipamento rotativo utilizado para execução do ensaio nesta pesquisa .....	32
Figura 3.11 – Obtenção do extrato solubilizado .....	32
Figura 3.12 – Processos de mistura solo-polímeros: adição do Polycure(a), mistura do Polímero Acrílico ao Terradry(b) e adição da mistura ao solo (c) .....	34
Figura 3.13 – Execução do ensaio de compactação .....	35
Figura 3.14 - Imersão (a) e execução do ensaio de ISC (b).....	36

Figura 3.15 – Compactador Marshall.....	37
Figura 3.16 – Ruptura do corpo de prova por tração indireta .....	37
Figura 3.17 – Prensa (a) utilizada para RCS e corpo de prova antes (b) e após execução do ensaio (c).....	38
Figura 3.18 – Etapas do ensaio de Módulo de Resiliência .....	41
Figura 3.19 – Processo de saturação (a) e execução do ensaio de permeabilidade(b) .....	42
Figura 3.20 – Equipamento utilizado no ensaio de LWT .....	43
Figura 3.21 – Compactação do corpo de prova de LWT .....	44
Figura 3.22- Critério de parada utilizado no ensaio de LWT.....	45
Figura 3.23 – Realização do ensaio de LWT .....	46
Figura 3.24 – Equipamento utilizado no ensaio de WTAT .....	46
Figura 3.25- Processos de moldagem do ensaio de WTAT .....	47
Figura 3.26 – Execução do ensaio de WTAT .....	48
Figura 4.1 – Curva de distribuição dos tamanhos das partículas .....	51
Figura 4.2 - Difratoformas de raios-X dos solos estudados: Solo 1 (a), Solo 2 (b), Solo 3 (c) e Solo 4(d) .....	55
Figura 4.3 - Microscopia eletrônica de varredura dos materiais em estudo: Solo 1 (a), Solo 2 (b), Solo 3 (c) e Solo 4(d).....	56
Figura 4.4 - Difratoforma de raios-X dos materiais após o teor ótimo: (a) Solo 1, (b) Solo 2, (c) Solo 3 e (d) Solo 4 .....	60
Figura 4.5 - Microscopia eletrônica de varredura após o teor ótimo: (a) Solo 1, (b) Solo 2, (c) Solo 3 e (d) Solo 4 .....	61
Figura 4.6 – Expansão do ensaio de ISC: (a) Solo1, (b) Solo 2, (c) Solo 3 e (d) Solo 4 .....	67
Figura 4.7 – Resultado de RCS para solo estabilizado com polímeros.....	68

Figura 4.8 – Resistência à compressão simples: (a) Solo1, (b) Solo 2, (c) Solo 3 e (d) Solo 4.....	69
Figura 4.9 - Resistência à tração por compressão diametral : (a) Solo 1 , (b) Solo 2, (c) Solo 3 e (d) Solo 4 .....	71
Figura 4.10 – Módulo de Resiliência : (a) Solo 1 , (b) Solo 2, (c) Solo 3 e (d) Solo 4.....	73
Figura 4.11 – Permeabilidade dos Solos (a) 1 e (b) 3 .....	76
Figura 4.12 – LWT : (a) Solo 1, (b) Solo 2, (c) Solo 3 e (d) Solo 4 .....	78
Figura 4.13 - WTAT : (a) Solo 1, (b) Solo 2, (c) Solo 3 e (d) Solo 4 .....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedade física de solo proveniente do Qatar .....	16
Tabela 2.2 – Teores de estabilizantes utilizados na pesquisa .....	17
Tabela 2.3 – Propriedades física dos solos estudados.....	17
Tabela 2.4 – Parâmetros de cisalhamento do ensaio traixial não-consolidado não-drenado .....	18
Tabela 3.1 – Teor da associação polimérica utilizada nesta pesquisa .....	22
Tabela 3.2- Ensaio realizados para caracterização física, química e mineralógica.....	25
Tabela 3.3 – Ensaio realizados para análise de comportamento mecânico .....	33
Tabela 3.4 – Pares de tensões e número de ciclos utilizados na fase de condicionamento .....	39
Tabela 3.5 – Pares de tensões e número de ciclos utilizados na segunda fase do ensaio .....	40
Tabela 3.6 – Ensaio realizados para análise de desgaste .....	43
Tabela 4.1 – Porcentagem retidas na análise granulométrica .....	51
Tabela 4.2 – Coeficientes de uniformidade e curvatura para os solos estudados.....	52
Tabela 4.3 – Limites de Atterberg e massa específica real .....	52
Tabela 4.4 – Classificação dos solos segundo a AASHTO .....	53
Tabela 4.5 – Composição química dos solos .....	53
Tabela 4.6 – CTC das amostras dos solos em estudo .....	54
Tabela 4.7 - Resultados de ensaio de lixiviação e solubilização para amostra de Polycure .....	57
Tabela 4.8 - Composição química dos solos estabilizados com a associação polimérica .....	58
Tabela 4.9 - CTC das amostras dos solos estabilizados com a associação polimérica .....	58
Tabela 4.10 – Valores dos coeficientes de regressão para o Solo 1.....	74
Tabela 4.11 - Valores dos coeficientes de regressão para o Solo 2.....	74

Tabela 4.12 -Valores dos coeficientes de regressão para o Solo 3..... 74

Tabela 4.13 - Valores dos coeficientes de regressão para o Solo 4..... 75

## LISTAS DE ABREVIATURAS

CNT - Confederação Nacional do Transporte

CTC – Capacidade de Troca de Íons

DEMA – Departamento de Engenharia de Materiais

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

DRX – Difração de Raios-X

EDX - Espectrometria de Florescência de Raios-X

FUNMINERAL – Fundação de Fomento a Mineração

ICL -Initial Consumption of Lime

IPEA – Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas

ISC – Índice de Suporte California

LEP – Laboratório de Engenharia de Pavimentos

LVDT - Linear Variable Differential Translucers

LWT – Loaded Wheel Test

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MR – Módulo de Resiliência

NBR – Norma Brasileira

RCS – Resistencia à Compressão Simples

RT – Resistência à Tração por Compressão Diametral

TRB - Transportation Research Board

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

USACE - U.S. Army Corps of Engineers

## WTAT – Wet Track Abrasion Test

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Objetivos .....	2
1.1.1	Objetivo Geral .....	2
1.1.2	Objetivos Específicos .....	2
1.2	Organização da Dissertação .....	2
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	4
2.1	Estabilização .....	4
2.1.1	Estabilização Mecânica .....	4
2.1.2	- Estabilização Granulométrica .....	5
2.1.3	Estabilização Química .....	6
2.1.3.1	- Solo Cimento .....	7
2.1.3.2	- Solo Cal .....	9
2.1.3.3	- Solo Emulsão .....	11
2.2	Polímeros .....	13
2.2.1	Uso dos Polímeros como Estabilizantes .....	13
2.2.2	Solo Polímero .....	14
3	MATERIAS E MÉTODOS .....	20
3.1	Materiais .....	21
3.1.1	Polímeros .....	21
3.1.2	Estabilizantes Convencionais .....	22
3.1.2.1	- Cal .....	22



3.1.2.2	- Cimento.....	23
3.1.3	Solos.....	23
3.2	Procedimento Experimental .....	25
3.2.1	Ensaio Realizados com os Materiais - Caracterização.....	25
3.2.1.1	- Análise Granulométrica.....	25
3.2.1.2	- Limites de Atterberg.....	26
3.2.1.3	- Massa Específica .....	27
3.2.1.4	- Análise Química .....	27
3.2.1.5	- Difração de Raios-X.....	28
3.2.1.6	- Microscopia Eletrônica de Varredura .....	29
3.2.1.7	- Azul de Metileno.....	30
3.2.1.8	- Espectrometria por Absorção Atômica.....	31
3.2.2	Ensaio de Comportamento Mecânico.....	33
3.2.2.1	- Processo de Mistura Solo-polímeros .....	33
3.2.2.2	- Ensaio de Compactação .....	35
3.2.2.3	- Ensaio de Índice de Suporte Califórnia –ISC.....	35
3.2.2.4	- Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral – RT.....	36
3.2.2.5	- Ensaio de Resistência à Compressão Simples – RCS.....	38
3.2.2.6	- Ensaio de Módulo de Resiliência .....	39
3.2.2.7	- Ensaio de Permeabilidade .....	42
3.2.3	Ensaio de Desgaste.....	42
3.2.3.1	- Loaded Wheel Test - LWT .....	43
3.2.3.2	- Ensaio de Wet Track Abrasion Test -WTAT .....	46

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	50
4.1	Ensaio de Caracterização Física .....	50
4.1.1	Análise Granulométrica .....	50
4.1.2	Determinação das Propriedades Físicas .....	52
4.1.3	Análise Química (EDX) .....	53
4.1.4	Capacidade de Troca de Cátions (CTC) .....	53
4.1.5	Difração de Raios-X (DRX) .....	54
4.1.6	Microscopia Eletrônica de Varredura .....	56
4.1.7	Espectrometria por Absorção Atômica .....	57
4.1.8	Caracterização química e mineralógica com adição da associação polimérica .....	57
4.1.8.1	Análise Química por Fluorescência de Raios X (EDX) .....	57
4.1.8.2	Capacidade de Troca Catiônica (CTC) .....	58
4.1.8.3	Difração de Raios-X (DRX) .....	59
4.1.8.4	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	61
4.2	Ensaio Mecânicos .....	62
4.2.1	Compactação .....	62
4.2.2	Índice de Suporte Califórnia - ISC .....	64
4.2.3	Resistência à Compressão Simples – RCS .....	68
4.2.4	Resistência à Tração por Compressão Diametral – RT .....	70
4.2.5	Módulo de Resiliência .....	72
4.2.6	Permeabilidade .....	76
4.3	Ensaio de Resistência ao Desgaste .....	77
4.3.1	Loaded Wheel Test (LWT) .....	77

4.3.1	Wet Track Abrasion Test (WTAT).....	77
4.4	Considerações Finais.....	80
4.4.1	Quanto à Caracterização Física.....	80
4.4.2	Quanto aos Ensaio de Comportamento Mecânico.....	80
4.4.3	Quanto aos Ensaio de Desgaste.....	81
4.4.4	Quanto aos Ensaio Ambientais.....	81
5	CONCLUSÕES.....	82
5.1	Conclusões.....	82
5.2	Sugestões para Futuras Pesquisas.....	82
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83

## 1 INTRODUÇÃO

O setor rodoviário brasileiro é especialmente importante por ser o principal modal utilizado no transporte de cargas. Durante as décadas de 1990 e 2000, o modal rodoviário foi responsável por mais de 60% do total de cargas transportados no país. Esta situação reflete um processo que se estendeu por várias décadas no qual predominou o crescimento rápido do segmento rodoviário relativamente ao conjunto das demais modalidades (IPEA,2010).

Segundo estudo realizado pela Confederação Nacional do Transporte - CNT (2014) a extensão da malha rodoviária brasileira é de 1.691.522 km, dos quais apenas 203.599 km são pavimentados, o que representa 12% do total existente no país. A pesquisa apontou os seguintes resultados acerca das condições dos pavimentos no Brasil: ótimo – 42,4%, bom – 7,7% , regular – 36,7%, ruim – 9,8% e péssimo – 3,4%. Ou seja, de acordo com os dados infere-se que quase metade dos pavimentos do país não apresentam boas condições para tráfego e necessitam intervenções para assegurar aos usuários conforto e segurança.

Muitas vezes a baixa condição de conforto ao rolamento e a curta vida útil das rodovias não estão relacionadas à qualidade do revestimento, e sim, com os materiais constituintes das camadas inferiores da pavimentos.

Em rodovias, os solos e/ou materiais que compõem as camadas do pavimento são considerados estrutura de sustentação. Para isto, devem apresentar características tais que confirmam estabilidade e resistência mecânica quando submetidos aos esforços solicitantes do tráfego durante a vida útil do pavimento.

Quando estes materiais não atendem as características exigidas pelo projeto, duas medidas podem ser avaliadas. Primeiramente a retirada do material de origem seguido da substituição do material com características geotécnicas desejadas. Essa medida pode se tornar inviável nos casos de rodovias que necessitam de grande volume de substituição ou de grandes distâncias de transporte. Na segunda são utilizadas técnicas de estabilização, granulométrica ou química, tornando o solo natural capaz de atender satisfatoriamente as exigências do projeto.

A escolha da técnica de estabilização deve levar em consideração tanto a finalidade da obra como as propriedades mecânicas que necessitam ser melhoradas para atender as especificações geotécnicas.

Uma das grandes mudanças tecnológicas realizadas pelo homem se deve ao surgimento dos polímeros como material alternativo. Assim, borrachas sintéticas, plásticos e fibras sintéticas revolucionaram o desenvolvimento dos setores automotivos, eletro-eletrônicos, têxteis, de embalagens, da medicina, etc (Morawets, 1998).

A estabilização polimérica de solos, ao contrario das outras técnicas de estabilização como a granulométrica e com outros agentes químicos, pode ser utilizada em solos de qualquer natureza e de granulometria, sendo eficaz tanto na estabilização de solos granulares como de solos finos.

Partindo desse pressuposto, neste trabalho são abordados estudos de estabilização de solos com polímeros, considerando que, com esta técnica, vislumbra-se a possibilidade de melhorar as propriedades mecânicas do solo no que se refere a sua resistência mecânica esforços de compressão e tração com aplicação de cargas estáticas e dinâmicas, bem como a sua durabilidade relacionada a resistência ao desgaste superficial.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho foi de avaliar a eficácia do uso de associação polimérica em estabilização de solos para utilização em camadas de pavimentos rodoviários de baixo e alto volume de tráfego.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

Como objetivos específicos desta pesquisa, podemos destacar:

- realizar caracterização química, física e mecânica dos solos estudados;
- verificar a compatibilidade entre os solos estudados e a associação polimérica;
- avaliar o efeito da adição dos polímeros, como estabilizante, nas propriedades físicas, de estado e mecânicas após mistura com os solos;
- realizar uma análise comparativa entre o comportamento mecânico de solos estabilizados com a associação polimérica e com os estabilizantes convencionais (cal e cimento).
- avaliar a resistência ao desgastes dos solos estabilizados, simulando utilização do material como base de pavimento sem revestimento.

## **1.2 Organização da Dissertação**

Esta dissertação é composta de cinco Capítulos, a seguir é apresentada uma breve descrição dos assunto abordados em cada um deles.

Capítulo 1 – Composto de introdução, objetivos e organização do trabalho.

Capítulo 2 – Compreende a fundamentação teórica, onde foram abordados os assuntos mais relevantes ao desenvolvimento deste trabalho tais como: camadas dos pavimentos, técnicas de estabilização e estudo dos polímeros.

Capítulo 3 – Consiste nos procedimentos e/ou métodos experimentais, onde foram descritos todos os materiais utilizados na pesquisa, bem como os procedimentos experimentais adotados para o alcance dos objetivos da pesquisa.

Capítulo 4 – São discutidos e analisados os resultados obtidos durante a fase experimental.

Capítulo 5 – São apresentadas as conclusões com as sugestões para pesquisas futuras.

Por fim estão inseridas as Referências Bibliográficas e os Apêndices.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste Capítulo é apresentado a Fundamentação Teórica deste trabalho onde foram abordados assuntos julgados relevantes para o alcance dos objetivos da pesquisa, tais como: os mecanismos de estabilização e os tipos de estabilizantes usados na pavimentação e a estabilização de solos com polímeros.

### **2.1 Estabilização**

A estabilização de solos, no campo da engenharia rodoviária, é um dos trabalhos mais antigos que se tem notícia, sendo empregado na conservação de estradas de terra, bem como na construção de novos pavimentos. Inúmeras são as dificuldades para solucionar adequadamente tais problemas, pois na crosta terrestre existe uma grande heterogeneidade entre solos. Fato este, que obriga, permanentemente, a realização de estudos e pesquisas para tentar equacionar sua estabilidade.

A estabilização de um solo, em seu sentido mais amplo, pode ser entendida como a alteração de qualquer propriedade do mesmo que melhore seu comportamento sob ponto de vista da aplicação da engenharia.

De uma maneira mais particular, o processo de estabilização consiste da aplicação de um fator estabilizante ao solo, visando modificar as suas propriedades físicas e mecânicas, tornando-o capaz de atender satisfatoriamente a uma dada exigência prevista em projeto. O fator estabilizante pode ser um aditivo químico, um material granular ou até mesmo a aplicação de uma energia dinâmica (GONDIM, 2008).

De uma maneira geral as técnicas de estabilização na composição de camadas de pavimento visam melhorar as propriedades mecânicas no que se refere: a redução de expansibilidade e de compressibilidade, no aumento da durabilidade e da permeabilidade. Entende-se que os processos de estabilização não melhorem todas as propriedades de maneira simultânea.

De acordo com Gondim (2008) para escolha adequada do método de estabilização a ser utilizado é importante focar quais as propriedades de solo que precisam ser modificadas e os propósitos aos quais se destinam o processo de estabilização.

#### **2.1.1 Estabilização Mecânica**

Os procedimentos que mudem o arranjo entre as partículas do solo ou sua granulometria podem ser consideradas técnicas de estabilização mecânica. Destaca-se a compactação de solos.

É um método que sempre é utilizado na execução das camadas do pavimento, sendo complementar a outros métodos de estabilização. Desse modo, a compactação por si só não estabelece um processo de estabilização, e sim é um artifício integrante das técnicas que utilizam mistura com algum agente estabilizante.

Mesmo partindo desta análise, o processo de compactação reestrutura o solo, por meio da expulsão de ar dos vazios, dando ao solo um novo rearranjo a estrutura, podendo desse modo ser entendido como uma técnica de estabilização mecânica.

O processo de compactação fornece ao solo, do ponto de vista geotécnico, visto que o processo emprega uma condição de densificação máxima relacionada a uma energia de compactação e uma umidade ótima, aumento na resistência cisalhamento e na capacidade de suporte, bem como diminui a permeabilidade, compressão e contração.

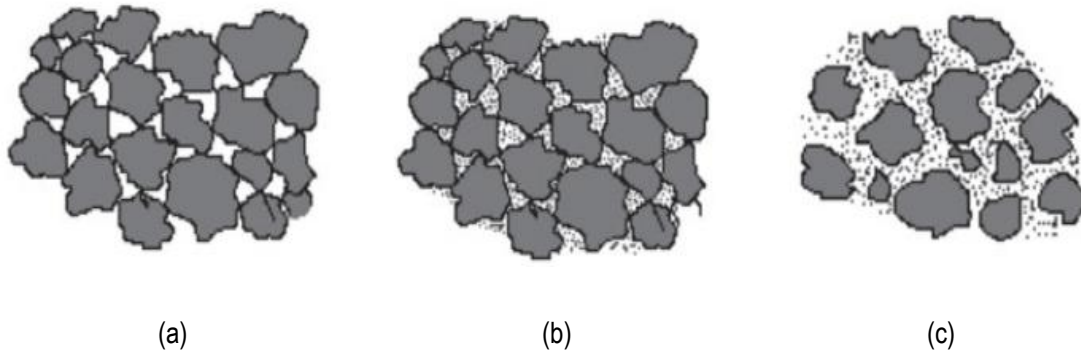
### **2.1.2 - Estabilização Granulométrica**

A estabilização granulométrica consiste na combinação e manipulação de solos, em proporção adequada, de forma a obter um produto final de estabilidade maior que os solos de origem, e adequado para a aplicação em cada caso particular .

Os fatores que influenciam no comportamento da composição granulométrica são: (i) a natureza da partícula, pois a mesma devem apresentar resistência suficiente e não sofrerem alterações indesejáveis, (ii) e a estabilização da composição deve ser levado a densificação ótima, que pode ser entendida como o melhor arranjo das partículas aprimorando a distribuição dos esforços. A Figura 2.1 (a) mostra uma granulometria formada apenas por partículas de dimensão maiores, tornando a destruição dos esforços ineficiente devido a falta de partículas finos. A Figura 2.5 (c) a distribuição analisada contem excesso de finos dando ao material uma menor resistência mecânica. A Figura 2.5 (b) ilustra o arranjo ideal desta composição granulométrica.



**Figura 2.1 - Tipos de composição granulométrica**



**Fonte:** Yoder e Witczak, 1975 *apud* Godim, 2008.

Os solos arenosos são, de um modo geral, facilmente destruídos por ações abrasivas, quando analisados separadamente, devido a falta do “ligante”. Já os solos argilosos, também analisados separadamente, são muito deformáveis, com baixa resistência ao cisalhamento, quando absorvem água. Na prática, é comum e necessário misturarmos estes dois tipos de solos, ou seja, solos com características granulares e solos com características coesivas, para obtermos uma mistura com propriedades ideais de resistência e trabalhabilidade (MARQUES, 2009).

### **2.1.3 Estabilização Química**

A estabilização química é definida como qualquer procedimento no qual um material químico, seja ele cimentante ou não, é adicionado ao solo atribuindo-lhe melhorias em suas propriedades do ponto de vista da engenharia.

Lambe e Michaels (1954) *apud* Emmert (2010) citaram três mecanismos essenciais para um estabilizante químico modificar as propriedades físicas do solo: (i) a destruição da água adsorvida e eliminação da carga superficial dos solos, tornando, assim, as partículas hidrofóbicas. Estes compostos podem ser chamados de agentes impermeabilizantes, como betume; (ii) o aumento da característica eletronegativa da superfície da partícula ou da espessura da membrana de água, aumentando, assim, a repulsão interpartícula, sendo tais compostos usualmente conhecidos como dispersantes, como por exemplo a soda caustica e (iii) a eliminação das forças de repulsão eletrostática, ou atuação das moléculas-pontes entre partículas, facilitando a coesão interparticular. Tais compostos podem ser classificados como agentes agregantes ou floculantes, como a cal.

Os estabilizantes mais empregados na pavimentação rodoviária atualmente são cal, cimento Portland e emulsão asfáltica. Visto que a estabilização química com polímeros é fonte deste trabalho, o mesmo será tratado em capítulo específico.

### 2.1.3.1 - Solo Cimento

O solo cimento é o material resultante da mistura homogênea, compactada e curada de solo, com cimento e água em proporções adequadas. O produto resultante deste processo é um material com boa resistência à compressão, impermeabilidade, baixo índice de retração volumétrica e boa durabilidade.

O cimento é um ligante hidráulico, portanto, ativação do material se dá somente pelo contato do material com água. Essa ativação faz com que o cimento una o solo como uma cola. Porém, ele não altera a estrutura do solo com a mesma intensidade e proporção que a cal faz. O solo pode apresentar algum ressecamento devido a necessidade de utilizar a água presente no solo, A sua característica de estabilizar praticamente qualquer tipo de solo dá pelo fato do material depender das reações com os minerais do solo (BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT, 2002, tradução PAULA, 2013).

Segundo Lucena (2012) a ação cimentante nos grãos do solo ocorre por meio de reações de hidratação e hidrólise, que estabelecem ligações químicas entre o cimento e a superfície rugosa dos grãos do solo, sendo mais efetiva quanto maior for o número de contatos entre o solo e as partículas de cimento.

O baixo custo inicial e a alta durabilidade são dois pontos fortes da utilização da estabilização com cimento. Essa técnica é indicada para base e sub-base de pavimentos flexíveis e de peças pré-moldadas de concreto (“intertravados”) e também sub-base de pavimentos de concreto.

Na estabilização com cimento são considerados as variáveis de maior importância: (i) teor de cimento; (ii) tipo de solo; (iii) condições de densificação, ou seja, teor de umidade da mistura, grau de compactação, grau de homogeneidade e condições de cura.

Segundo Ingles(1968) *apud* Emmert (2010) pequenos teores, da ordem de 1% a 2%, são suficientes para tornar o solo mais trabalhável, diminuir as mudanças de volume e aumentar a capacidade de suporte. Quando empregado em bases e sub bases de pavimentos, dependendo da classe escolhida do solo, são necessários teores acima de 4% de cimento (SENÇO,2001). Entretanto, a escolha do teor adicionado de cimento deve considerar as condições de tráfego bem como as condições climáticas locais.

Segundo Queiroz (2012) são tipos de solos tratados com cimento:

- Mistura de solo-cimento : Produto obtido pela compactação e cura de uma mistura de solo, cimento e água, de modo a satisfazer a critérios de estabilidade e durabilidade exigidos.
- Solo melhorado com cimento (modificado com cimento: Quando um solo mostrar-se economicamente inviável de ser estabilizado com cimento, ainda poderá ser utilizado para fins de pavimentação através da adição de pequenas quantidades de cimento (1 a 5%), que visam modificar algumas de suas propriedades físicas, por exemplo, diminuir o índice de plasticidade através do aumento do LP e da diminuição do LL ou diminuir as mudanças de volume e inchamento do solo.
- Solo-cimento plástico: Material endurecido formado pela cura de uma mistura de solo, cimento e água, em uma quantidade suficiente para produzir uma consistência de argamassa. A quantidade de água no solo-cimento é apenas para permitir uma boa compactação e completa hidratação do cimento. No solo-cimento plástico a quantidade de cimento é aproximadamente 4% a mais para satisfazer os critérios de durabilidade e estabilidade exigidos e também devido a maior quantidade de água necessária para deixar a mistura na consistência de argamassa.

Emmert (2010) relatou pesquisas que apontaram problemas da adição de cimento ocasionado pelo tipo de solo estudados. A presença de sulfatos no solo foi apontada como prejudicial por Petrucci (1978), descrevendo a existência de possíveis reações gerando compostos de natureza expansiva.

Segundo Petrucci (1978) e Bauer (1987) *apud* Emmert (2010) a presença de matéria orgânica nos solos é prejudicial para as reações de hidratação do cimento. As impurezas prejudicam a pega e o endurecimento das argamassas e concretos podendo ocasionar perda de resistência, patologias relacionadas à sua expansão e desagregação do agregado miúdo devido a má aderência da pasta de cimento ao agregado.

Queiroz (2012) avaliou a utilização de material fresados com adição de cimento e cal como estabilizantes de solo classificado como A-2-4 (classificação TRB) para uso em camadas de pavimentos rodoviários. O autor observou que os melhores resultados foram obtidos nas misturas de solo/material fresado/ cimento, em que todos os teores de cimento adotados possibilitaram o uso do material para execução de bases de pavimentos rodoviários, com o menor valor de CBR de 92%, acima do estabelecido pelo DNIT (CBR  $\geq$  80%) para rodovias com tráfego pesado (DNIT- ES-142/10).

Santos (2010) avaliou a estabilização de solo A-6 com resíduos oleosos gerados da estabilização nas atividades de E&P de petróleo com adição de cimento.. O autor utilizou o teor fixo de 17,5% do resíduo oleoso e variou os teores de cimento em 4%, 5,5%,7%,8,5% e 9% . Nas misturas com

adição do resíduo oleoso/cimento, os valores obtidos do ensaio de ISC foram superiores aos estabelecidos pelo DNIT para uso em sub-bases de pavimentos rodoviários, porém, os valores de expansão apresentaram-se superiores aos limites pré-estabelecidos nas especificações de serviço.

Paula (2013) ao estudar a adição de cimento em silte orgânico de alta plasticidade observou aumento de resistência a tração por compressão diametral em amostras com 7, 14, 21 e 28 dias de cura. Segundo os resultados obtidos pela autora o ganho de resistência aos 28 dias de cura em relação aos 7 dias foi bastante superior a 20%. Esse aumento de resistência foi explicado pela presença de ácidos húmicos em solos orgânicos, que retardam as reações de hidratação do cimento.

### 2.1.3.2 - Solo Cal

A cal é um aglomerante formado basicamente por óxidos de cálcio (CaO) ou óxido de Magnésio (MgO) resultante da calcinação das rochas calcárias (calcitas e dolomitos). Quando submetidas a altas temperaturas o calcário calcítico reage formando o CaO, enquanto que calcários dolomitos reagem formando Cao e MgO. Neste estágio ambas as formas são chamadas de cal virgem.

A reação da cal virgem com uma quantidade de água forma o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) chamada neste estágio de cal hidratada. Na pavimentação rodoviária, a cal mais empregada é a hidratada devido a facilidade de uso. Segundo Azevêdo (2010) embora a cal virgem possua maior teor de Cao e MgO, bem como menor preço comercial, sua aplicação exige cuidados com a segurança dos trabalhadores.

Segundo Batalione (2007) a adição de cal ao solo produz benefícios e modificações no comportamento dos mesmos, tais como: redução da plasticidade, de expansão, da contração, reduz a massa específica, aumenta a umidade ótima, resistência mecânica, rigidez e durabilidade. Ainda segundo o autor tais benefícios e modificações no comportamento devido a adição de cal são resultantes de quatro reações distintas:

- *troca catiônica*: fenômeno que ocorre devido à troca de base entre os cátions da cal (carregadas positivamente) substituindo os íons metálicos de sódio, magnésio e hidrogênio, situados nas superfícies das argilas, modificando o número de cargas elétricas nesta superfície;

- *floculação e aglomeração*: ocorrem alterações na textura com a aglutinação das partículas de argila devido ao aumento do teor de eletrólito da água nos poros, devido ao aumento do pH, bem como pela troca catiônica;

- *reação pozolânica*: é a capacidade de aumento de resistência devido às reações químicas entre a cal e os argilominerais, resultando basicamente em silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, similares em natureza aos componentes cimentícios encontrados no cimento Portland;

- *carbonatação*: cimentação proveniente da reação do óxido e hidróxido de cálcio com o anidrido carbônico.

A cimentação é a principal responsável pela ação, em longo prazo, da cal na estabilização do solo. As reações pozolânicas originam a formação de silicato hidratado de cálcio e/ou aluminato de cálcio através de reações entre a cal, a sílica e a alumina livres nas partículas de argilas. A interação entre a cal e a argila conduz à dissolução da sílica e da alumina das partículas do solo no ambiente de elevado pH originado pelas moléculas de  $\text{Ca(OH)}_2$ . Os materiais dissolvidos combinam-se com os íons de cálcio formando vários tipos de agentes cimentícios, que vão interligar as partículas argilosas. Estes materiais constituem a maior contribuição para o incremento da resistência verificada nas misturas entre o solo e a cal (SANTOS,2010).

Em geral a cal reage com um solo com distribuição dos tamanhos dos grãos de média a fina produzindo reduções na sua plasticidade e expansão, e aumento na sua trabalhabilidade e resistência ao cisalhamento (LIMA et al., 1993). Dentre os solos mais reativos à ação da cal estão as argilas, argilas siltosas, cascalhos argilosos, solos classificados pela AASHTO como A-5, A-6 e A-7 (LIMA, 1981 *apud* CORDEIRO,2007).

Os resultados da estabilização variam dependendo da natureza dos minerais de argila e são melhores sob alta concentração de silicatos de alumínio, sílica e hidróxido de ferro. O cálcio, principal componente da cal, ataca quimicamente parte das argilas e até mesmo o próprio quartzo, resultando na formação de silicatos e aluminatos hidratados de cálcio, de notável capacidade cimentante pozolânica (GUIMARÃES, 1992).

Várias são as pesquisas utilizando cal como estabilizante químico de solos na pavimentação. Na estabilização de base e sub base, observa-se variações de teores entre 0,5% a 9%.

Emmert (2010) estudou a adição de 2% de cal, com cura de 1, 7 e 28 dias, a solo classificado como A-4(2), segundo classificação da *Transportation Research Board* (TRB). O autor observou ganhos de resistência à compressão simples e índice de suporte Califórnia em comparação ao solo puro, além de aumento desses parâmetros com o tempo de cura .

Lovato (2004) estudou solo classificado como o A-6 com teores de 3%, 5%, 7% e 9%, variando o tempo de cura de 14, 28, 56, 112, 140 e 168 dias observando ganhos de resistência á compressão

simples com o aumento de teor de cal cálcica e redução em relação ao tempo de cura a partir do 112º dia.

Lovato (2004) também estudou ganhos de resistência à tração por compressão diametral, para teores de 3% ,4% 5% de cal, variando a cura em 14, 28, 56 e 112 dias. Observou-se ganhos em relação ao aumento do teor de cal, embora houve redução de resistência á tração a partir 56º dias.

Rosa et al (2006) analisou solos A-6 e A-7-6 com teores de 3% e 6% de cal observando diminuição da expansão para aumento do teor de cal bem como ganho de capacidade de suporte.

Cordeiro (2007) avaliou a estabilização de solo A-6 com resíduos oleosos gerados da estabilização nas atividades de E&P de petróleo com adição de cal. O autor utilizou o teor fixo de 25% do resíduo oleoso e variou os teores de cal em 3%, 4,5%, 6%,7,5% e 9%. Após a incorporação da cal ao processo, foram observados aumentos significativos nos valores de CBR(%), no teor da umidade ótima (%), e uma diminuição dos valores de massa específica aparente seca ( $g/cm^3$ ) e expansão (%). O ganho de resistência, também, foi observado com os resultados obtidos com ensaios de compressão simples realizados para as misturas contendo 4,5% e 9,0% de cal.

#### 2.1.3.3 - Solo Emulsão

Uma emulsão é definida como uma dispersão estável de dois ou mais líquidos imiscíveis. No caso da emulsão asfáltica os dois líquidos são o asfalto e a água. As emulsões asfálticas são produzidas a partir de cimentos asfálticos de petróleo (CAP), adicionados água e agente emulsificante em pequenas proporções (0,2% a 1%), sendo a água a fase contínua, e a fase descontínua formada por pequenos glóbulos de asfalto de diâmetro de  $1\mu m$  a  $20\mu m$  que se encontra em movimento desordenado em meio à fase contínua da emulsão.

Segundo Gondim (2008) é consenso entre os diversos autores que o mecanismo de estabilização com emulsão asfáltica ou outros tipos de material betuminosos consiste em aumentar a coesão e reduzir a penetração da água pela presença de um filme de betume. Segundo Inglês e Metclaf (1972) *apud* Gondim (2008) a impermeabilização pode ocorrer através da criação de uma capa na superfície das partículas ou por meio do preenchimento dos vazios do solo. O aumento de resistência se dá com aumento de coesão, que por sua vez se deve à presença de filme contínuo de betume sobre as partículas do solo.

Segundo Lucena *et al.* (1986) em solos granulares, a utilização desta técnica proporciona um aumento de coesão enquanto em solos plásticos é visto um aumento da impermeabilização, resultante do efeito do asfalto na proteção das partículas de argila. Em geral, existe uma resistência máxima obtida com um teor ótimo de emulsão, sendo que maiores valores tendem a prejudicá-la. Para solos arenosos,

esse teor é baixo, enquanto para solos coesivos, esse teor é maior, o que serve para justificar em parte que a estabilização de solos argilosos e siltoargilosos é antieconômica.

Segundo Lucena (2012) o aumento da resistência à compressão de solos estabilizados com emulsão deve ser cuidadosamente avaliado, pois em geral é encontrado um ganho no valor deste parâmetro sem qualquer acréscimo de emulsão, apenas com a perda de umidade do solo puro por tempos determinados (7 e 28 dias).

Com relação aos teores adicionados ao solo, conforme pesquisa de Lucena (2012), em geral, solos arenosos são estabilizáveis com baixos teores e solos argilosos necessitam de teores mais altos para serem estabilizados satisfatoriamente.

Gondim (2008) estudou teores de 2%,5% e 8% adicionados a solos classificados como A-4 (Solo A) e A-2-4 (Solo B e Solo C), com cura de 7 e 28 dias. A autora observou ganhos de propriedades mecânicas, como resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, índice de suporte Califórnia, além de redução de desgaste superficial. O teor de 5% para o Solo A e de 2% para os Solos B e C obtiveram maiores valores de RCS.

Soliz (2007) estudou a adição de emulsão para solo classificado como A-1-b e A-2-4, com teores de 1%, 2% e 3% para 7 e 28 dias de cura e para solo A-7-5 teores com 4%,6% e 8%, com cura de 7 dias. O autor observou ganho de resistência à compressão simples para todos os solos estudados.

## **2.2 Polímeros**

Polímeros são macromoléculas formadas a partir da combinação de moléculas menores chamadas de monômeros, seguindo geralmente um padrão de combinação. A reação que combina quimicamente os monômeros para formar os polímeros é chamada de polimerização.

A partir da análise da estrutura química, do número do monômero na cadeia e o tipo de ligação covalente pode-se dividir os polímeros nas seguintes classes: plásticos, Borrachas (ou Elastômeros) e Fibras (Canevarolo, 2002).

Uma classificação mais abrangente cita ainda os Revestimentos, os Adesivos, as Espumas e as Películas (Callister, 2002).

### **2.2.1 Uso dos Polímeros como Estabilizantes**

Nas últimas décadas os polímeros têm sido cada vez mais utilizados nas diversas áreas da Engenharia. Por sua versatilidade, os polímeros permitem a melhoria de propriedades específicas que melhor atendam a necessidade do projeto.

A confiabilidade de produtos com controle de qualidade industrial e a disponibilidade de produtos com propriedades mecânicas e hidráulicas capazes de suportar solicitações extremas, permitem aos projetistas não apenas realizar obras com menor custo, mas também realizar obras com maior segurança, tanto em termos da proteção do meio ambiente, quanto em termos de carregamentos aplicados (IGS Brasil\*), disponível em: <[igsbrasil.org.br](http://igsbrasil.org.br)> acesso em: 20 de Outubro de 2014).

Entre as diversas áreas de utilização de polímeros como estabilizantes, destaca-se a sua utilização em concreto como redutor de água/plastificante, incorporador de ar, acelerador de pega, acelerador de resistência, entre outras.

De maneira geral o uso de polímeros em concreto visa:

- Aumento de consistência: a fluidez do concreto é aumentada sem a adição de mais água;
- Aumento da resistência à compressão: mantendo fixa a consistência do concreto, é possível reduzir consumo de água e manter o consumo de cimento constante (aumentando as resistências mecânicas);
- Diminuição do consumo de cimento: mantendo fixa a consistência do concreto, é possível reduzir consumo de cimento e água (com a mesma consistência).



Pode-se destacar ainda a utilização de polímeros como estabilizantes em ligantes asfálticos. Segundo Bernucci *et al* (2007) para as condições de volume de veículos comerciais e peso por eixo crescente, ano a ano, em rodovias especiais ou nos aeroportos, em corredores de tráfego pesado canalizado e para condições adversas de clima, com diferenças térmicas entre inverno e verão, tem sido cada vez mais necessários o uso de modificadores das propriedades de asfaltos.

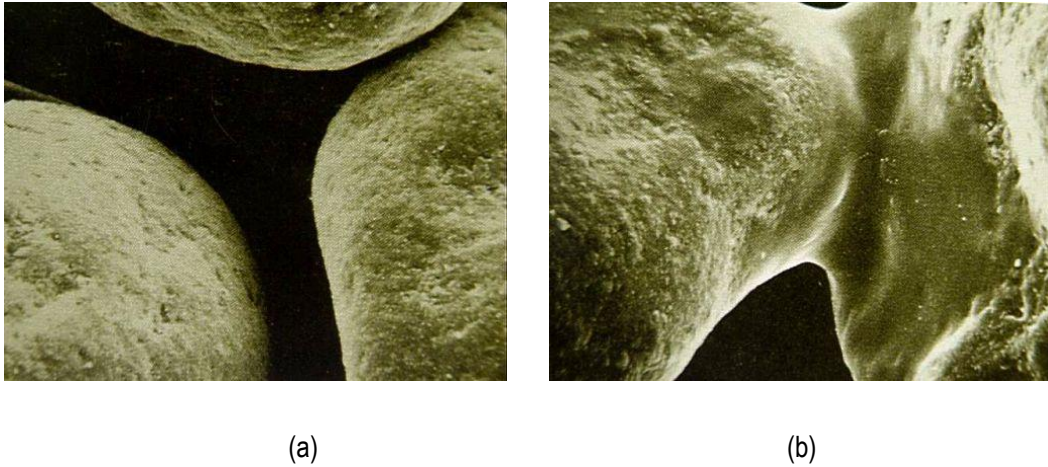
A utilização de asfalto-polímero tem como objetivo manter suas propriedades físicas e mecânicas durante a estocagem, aplicação e serviço, reduzir deformações permanentes provenientes da solitação do tráfego e reduzir a fadiga da mistura asfáltica devido as repetições de aplicação de carregamento.

### **2.2.2 Solo Polímero**

Atualmente, estuda-se a utilização de variedades de materiais poliméricos para serem utilizados em aplicações geotécnicas, ambientais, hidráulicas e de transporte. Destaca-se como técnica promissora a utilização de polímeros e associações poliméricas em camadas de pavimentos rodoviários, visto que tal técnica age melhorando as propriedades mecânicas do solo e quando utilizados em pavimentos sem revestimento aumentam a resistência ao desgaste superficial .

Segundo a PolyPavement™, empresa fornecedora de polímeros para estabilização de solo, testes realizados pela U.S. Army Corps of Engineers (USACE) em 1996 mostraram que produtos fornecidos pela empresa tiveram resultados satisfatórios referentes a ensaios de resistência a ação da água, vento , calor extremo e derramamento de combustíveis. Além de reduzir significativamente os requisitos de mão de obra e o custo de materiais, de 30% ou mais. Segundo a USACE o produto pode ser utilizado em rodovias, heliportos e outras áreas de tráfego em climas desérticos, tropicais e temperados. O produto age unindo as partículas e impermeabilizando a estrutura sólida como apresentado na Figura 2.2.

**Figura 2.2 - Partículas de areia antes(a) e depois (b) da aplicação do polímero**



**Fonte:**<http://www.polypavement.com/>

A Terratech inc.\* afirma que são benefícios da adição do produto fornecido ao solo:

- redução de migração de finos da base e sub base;
- redução de desgaste superficial e redução de irregularidade da superfície;
- redução da infiltração reduzindo a erosão;
- melhora da capacidade de suporte;
- reduz desgaste do veículo.

Segundo a empresa, a tecnologia desenvolvida é extremamente efetiva no aumento da resistência mecânica. Na Figura 2.3 são apresentados a condição final, em termos de macroestrutura, de camadas de pavimentos com solo não tratado e tratado com o polímero, respectivamente.

**Figura 2.3 - Camada não tratada(a) e tratada(b) com polímero**



Fonte: <http://www.terratechinfo.com/>

Iyengar et al (2013) avaliaram a estabilização de sub base de pavimento com adição de polímero. Para isto, estudou propriedades mecânicas de solo classificado como GM-GC proveniente do Qatar, com propriedades físicas descritas na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1 – Propriedade física de solo proveniente do Qatar**

Propriedade Física	Resultado
Limite de Liquidez (%)	27
Limite de Plasticidade (%)	22
Índice de Plasticidade (%)	5
D <sub>60</sub> (mm)	12
D <sub>30</sub> (mm)	0,6
D <sub>10</sub> (mm)	0,075

Fonte: Iyengar et al (2013)

Iyengar et al (2013) utilizaram três polímeros (Polymer R, E e S) com teores de estabilizantes conforme descritos na Tabela 2.2. A partir da análise da massa específica aparente seca máxima para os teores estudados, obteve-se como teor ótimo de 1% para todos os polímeros e de 9% para a adição de cimento Portland.

**Tabela 2.2 – Teores de estabilizantes utilizados na pesquisa**

Estabilizante	Nomenclatura	Teores utilizados (%)
Polímero	R	0,25/0,5/1
	E	0,5/1/2
	S	0,25/0,5/1
Cimento	PC	5/7/9

Fonte: Iyengar *et al.* (2013)

Melhorias nas amostras com adição de polímeros foram observadas no que se refere a resistência a compressão simples, módulo de elasticidade, módulo de resiliência em comparação com amostras de solo estabilizado com cimento Portland e solo sem estabilizante.

Rauch *et al.* (2002) avaliaram cinco tipos de solos argilosos tratados com propriedades físicas dos solos conforme apresentado na Tabela 2.3. Os dois primeiros são provenientes do Estado do Texas (EUA) e foram escolhidos por apresentarem alta plasticidade e mineralogia mista, os demais apresentam comportamentos típicos da argila que os nomeiam. Os solos foram estabilizados com três diferentes tipos de não tradicionais estabilizantes líquidos: estabilizante iônico, estabilizante polimérico e enzima estabilizante, com teores de 0,02%, 0,1% e 0,002%, respectivamente. Todas as amostras tratadas foram submetidas a cura de sete dias.

**Tabela 2.3 – Propriedades física dos solos estudados**

Solo	Limites de Atterberg (%)			Classificação (USCS)	Umidade Ótima (%)
	LP	LL	IP		
Bryan	20	68	48	CH	16
Mesquite	23	60	37	CH	17
Caulinita	32	51	19	MH	24
Ilita	24	44	20	CL	12
Montmorilonita	32	567	535	CH	24

Fonte: Rauch *et al.* (2002).

Rauch *et al.* (2002) estudaram o comportamento dos solos tratados e não tratados por meio dos ensaios de limites de Atterberg, compactação e triaxial não-consolidado não-drenado. Observou-se que o estabilizante polimérico não mudou significativamente a plasticidade, umidade ótima e massa específica aparente seca máxima de nenhum dos solos.

Os resultados encontrados por Rauch *et al.* (2002) no ensaio triaxial não-consolidado não-drenado para as amostras tratadas e não tratadas estão apresentados na Tabela 2.4.

**Tabela 2.4 – Parâmetros de cisalhamento do ensaio traixial não-consolidado não-drenado**

Solo	Não Tratado		Estabilizante Iônico		Estabilizante Polimérico		Enzima Estabilizante	
	c (kPa)	$\Phi$ (°)	c (kPa)	$\Phi$ (°)	c (kPa)	$\Phi$ (°)	c (kPa)	$\Phi$ (°)
Bryan	780	1	260	13	660	3	250	7
Mesquite	490	18	390	30	650	9	760	7
Caulinita	260	0	200	35	210	31	390	3
Ilita	150	51	270	33	350	14	380	24
Montmorilonita	220	51	550	33	270	49	700	22

Fonte: Rauch *et al.* (2002).

Como apresentado na Tabela 2.4, a adição do estabilizante polimérico apenas elevou os parâmetros de cisalhamento nas amostras dos solos com presença dos argilominerais ilita e montmorilonita.

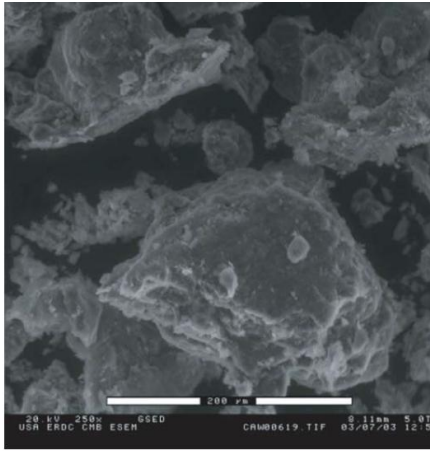
Tingle *et al.* (2007) estudaram o mecanismo que une as partículas de solo de aditivos não tradicionais. Estudou-se sete grupos de estabilizantes: iônico, enzimas, sais, resinas de petróleo, resinas de árvores, sulfatos e polímeros.

Estabilizantes poliméricos são normalmente acetatos de vinila ou copolímeros acrílicos suspensos em emulsão. O estabilizante polimérico envolve a partícula de solo, onde ligações físicas são formadas quando a água evapora, deixando uma matrix solo-polímero (TINGLE *et al.* ,2007)

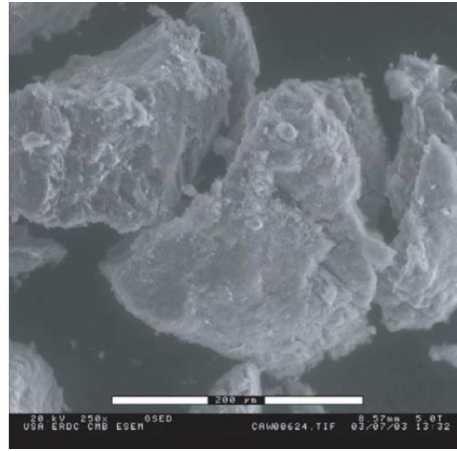
Segundo Tingle *et al.* (2007), como o mecanismo de ligação é físico, a melhoria da resistência do solo depende da capacidade que o estabilizante polimérico tem em revestir as partículas de solo. Assim, estabilizações com emulsão polimérica são apropriadas para solos granulares, sendo menos eficazes em solos finos pois possuem grande área específica superficial.

A Figura 2.4 ilustra microscopias eletrônicas de varredura de caulinita tratada com emulsão polimérica. É possível verificar que a adição de emulsão polimérica possibilitou uma aproximação maior entre as partículas o que pode-se traduzir numa melhor coesão da mistura.

Figura 2.4 - Microscopia eletrônica de varredura de caulinita (a) não tratada e (b) tratada com emulsão polimérica



(a)



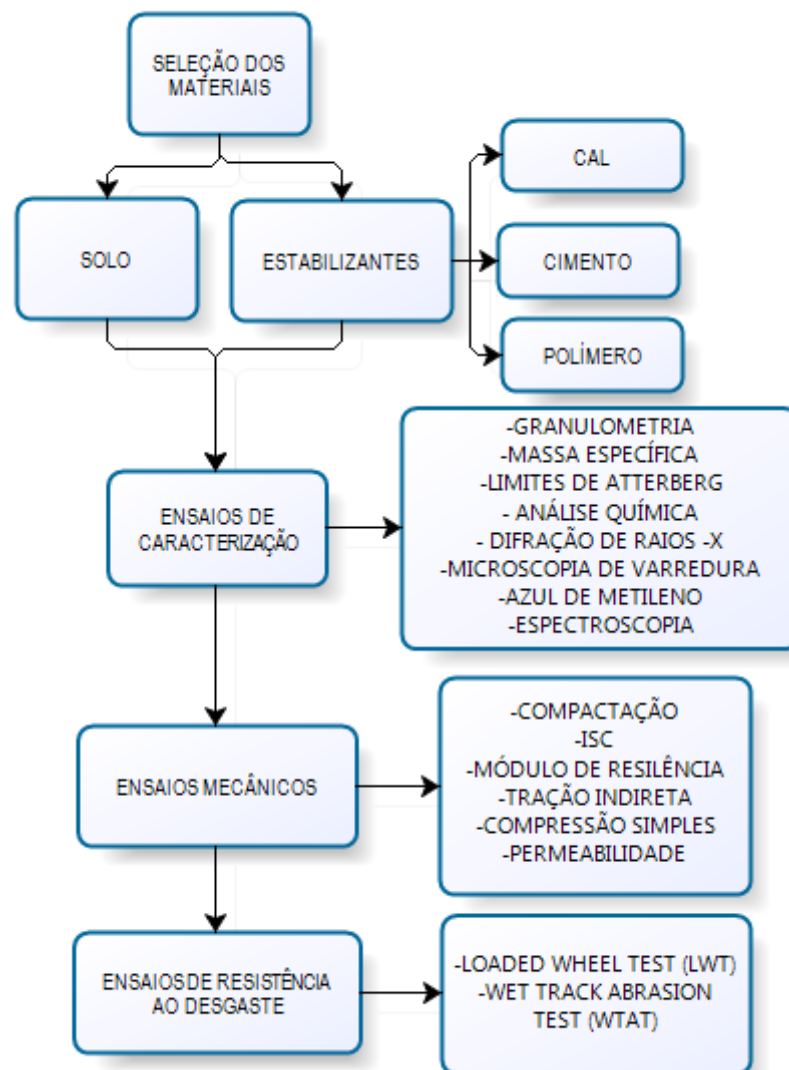
(b)

Fonte: Tingle *et al.* (2007).

### 3 MATERIAS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os solos e estabilizantes usados, os procedimentos utilizados durante a fase experimental da pesquisa e as especificações para a obtenção das propriedades físicas, de comportamento mecânico dos solos e de resistência ao desgaste. O Fluxograma 3.1 apresenta a sequencia das atividades utilizadas neste trabalho para alcançar os objetivos da pesquisa.

**Fluxograma 3.1 – Sequencia das atividades utilizadas na pesquisa**



Fonte: Dados da Pesquisa, 2015.

O programa experimental dessa pesquisa foi dividido em três etapas. A primeira etapa foram utilizados dados com o objetivo de preparar e classificar os solos selecionados para as misturas com polímeros. Na segunda etapa foram estudados os comportamentos mecânicos das misturas solo-estabilizante por meio da resistência mecânica (Índice de Suporte Califórnia, da Resistência à

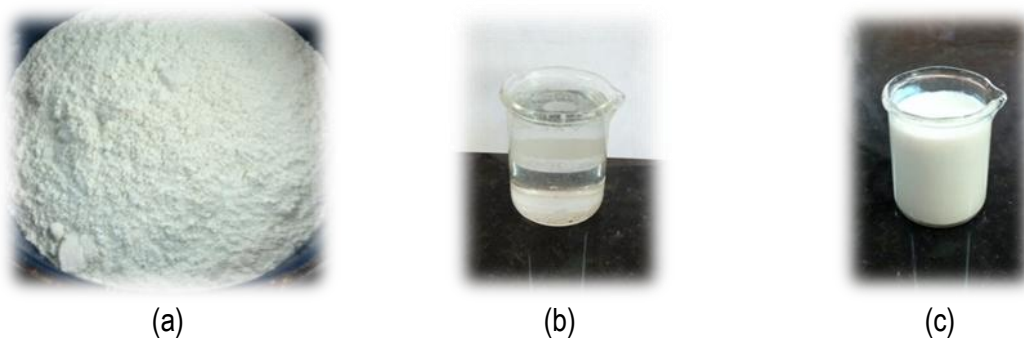
Compressão Simples, do Módulo de Resiliência Ed a Resistência à Tração por Compressão Indireta). Na terceira etapa foram avaliados os parâmetros de resistência ao desgaste (Loaded Wheel Test - LWT e Wet Track Abrasion Test - WTAT modificados) dos solos estabilizados.

### 3.1 **Materiais**

#### 3.1.1 **Polímeros**

Os polímeros utilizados nessa pesquisa foram fornecidos pela empresa VIAENCOSTA Engenharia Ambiental<sup>®</sup>. Utilizou-se a associação dos seguintes polímeros: Polycure, TerraDry e Polímero Acrílico Industrial (Figura 3.1).

**Figura 3.1 - Polímeros utilizados na pesquisa: Polycure (a), TerraDry (b) e Polímero Acrílico Industrial (c)**



Fonte: Dados da Pesquisa,2015.

Os polímeros utilizados nessa pesquisa foram produzidos pela DirtGlue Enterprises<sup>®</sup>. Segundo a fabricante o Polímero Acrílico Industrial tem como principal função unir as partículas do solo, formando uma estrutura compósita. O produto TerraDry é um agente impermeabilizante empregado para reduzir a sensibilidade das partículas de solos em relação a ação da água. O produto Polycure funciona como um catalisador que melhora e acelera o processo de cura do Polímero Acrílico Industrial.

Os teores de associação polimérica estudadas nesta pesquisa estão indicadas na Tabela 3.1.



**Tabela 3.1 – Teor da associação polimérica utilizada nesta pesquisa**

<b>Polímero Acrílico Industrial (%)</b>	<b>TerraDry(%)</b>	<b>PolyCure(%)</b>	<b>Teor Total da Associação Polimérica (%)</b>
<b>1</b>	0,29	0,86	<b>2,2</b>
<b>3</b>	0,86	2,57	<b>6,4</b>
<b>5</b>	1,43	4,29	<b>10,7</b>

Fonte: Dados da Pesquisa,2015.

### **3.1.2 Estabilizantes Convencionais**

A utilização de estabilizantes convencionais nesta pesquisa serviu como referência para análise de comportamento mecânico e do desgaste dos solos estabilizados com polímero. A adição de cal torna-se mais eficiente em solos argilosos, enquanto a incorporação de cimento tem melhor ação em solos granulares. Desse modo, tomou-se como critério para a escolha do estabilizante para as amostra de referência a classificação HRB dos solos estudados. Foi estabelecido o teor intermediário de 3% para a análise do comportamento mecânico e de desgaste das amostras de referência tanto para adição de cal como de cimento, valor usualmente utilizados em estabilização química.

#### *3.1.2.1 - Cal*

A cal utilizada nesta pesquisa foi do tipo hidratada, classificada como CH-I de acordo com a NBR 7175/2003. Com isso, os solos foram misturados facilmente com a água (com baixa produção de calor) e não houve necessidade de condições especiais de estocagem. O Quadro 3.1 apresenta os critérios exigidos pela NBR 7175/2003.

**Quadro 3.1 - Características químicas e físicas exigidas para a cal**

Exigências Químicas		Limites
Compostos		CH-I
Anidrido Carbônico (CO <sub>2</sub> )	Fábrica	≤5%
	Depósito	≤7%
Óxidos de cálcio e magnésio não hidratado calculado (CaO + MgO)		≤10%
Óxidos totais na base de não-voláteis		≥90%
Exigências Físicas		
Finura (% retida acumulada)	peneira 0,60mm	≤0,5%
	peneira 0,074mm	≤10%
Retenção de água		≥75%
Incorporação de areia		≥3,0%
Estabilidade		Ausência de cavidade ou protuberância
Plasticidade		≥110%

Fonte: NBR 7175/2003.

### 3.1.2.2 - Cimento

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o CP IV-32 RS. O cimento foi adquirido no mercado varejista em sacos de 50 kg e posteriormente acondicionado em sacos plásticos para evitar ocorrência da hidratação do produto. A utilização do cimento como estabilizante teve como objetivo a melhoria das características do solo, no que se refere a resistência com a redução da sensibilidade à umidade. No Quadro 3.2 são apresentados os critérios estabelecidos pela NBR 5736/1991 para o cimento utilizado nesta pesquisa.

**Quadro 3.2 – Características físicas e mecânicas exigidas para o cimento**

Características e propriedades		Unidade	Limites
Finura		%	- 8
Tempo e início de pega		h	- 1
Expansibilidade à quente		mm	- 5
Resistência à Compressão Simples	3 dias	MPa	- 10,0
	7 dias	MPa	- 20,0
	28 dias	MPa	- 32,0

Fonte: NBR 5736/1991.

### 3.1.3 Solos

Os solos estudados nesta pesquisa foram fornecidos pela empresa VIAENCOSTA Engenharia Ambiental<sup>®</sup>. Na escolha destes materiais foram levados em consideração os solos

com baixa capacidades de suporte (menores que 5%) que podem ser utilizados na região da grande Recife. Deste modo, foram coletados 600 kg de três solos diferentes e transportados para o Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), onde foram armazenados em sacos de 50 kg.

A empresa também forneceu o pó-de-pedra utilizado para a estabilização granulométrica de um dos solos totalizando assim neste estudo quatro amostras diferentes.

As misturas de solos estudados foram denominados Solo 1 (Figura 3.2 - a), Solo 2 (Figura 3.2 - b), Solo 3 (Figura 3.2 - c) e Solo 4 (Figura 3.2 - d), sendo o ultimo, a estabilização granulométrica do Solo 2 com pó-de-pedra na proporção 50% de solo e 50% de pó-de-pedra em massa.

**Figura 3.2 – Solos estudados na pesquisa**



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Dados da Pesquisa, 2015.

### 3.2 Procedimento Experimental

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, foram abordados métodos e procedimentos de trabalho contidos em normas correntes, para análises dos resultados a partir dos ensaios realizados em laboratórios. Os métodos de ensaios utilizados foram propostos pelo DNIT, Normas Brasileiras – NBR e Normas Francesas - NF.

Foram realizados os ensaios de caracterização física, de mineralógica e de química dos materiais, além de ensaios mecânicos e de resistência ao desgaste para as amostras de misturas solo/estabilizante.

#### 3.2.1 Ensaios Realizados com os Materiais - Caracterização

Na Tabela 3.2 são apresentados os ensaios, com suas respectivas normas, utilizados para a caracterização física, química, mineralógica dos solos estudados nessa pesquisa.

**Tabela 3.2- Ensaio realizados para caracterização física, química e mineralógica**

Ensaio	Norma Utilizada
Análise granulométrica – Solo	ABNT- NBR 7181/1984
Determinação da massa específica	ABNT- NBR 6508/1984
Determinação do limite de liquidez	ABNT- NBR 6459/1984
Determinação do limite de plasticidade	ABNT- NBR 7180/1984
Análise Química – EDX	*
Difração de Raios X – DRX	*
Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV	*
Azul de Metileno	NF P 18-592

**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2015. \* Norma inexistente.

Os ensaios de caracterização física (granulometria, massa específica e limites de Atterberg) foram realizados no LEP/UFCG. A preparação das amostras dos solos foram realizadas de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 1986) – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.

Os ensaios de análise química e mineralógica (análise química, difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura, e azul de metileno) foram realizados no Laboratório de Engenharia de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMA) da UFCG.

##### 3.2.1.1 - Análise Granulométrica

Os ensaios para a obtenção da distribuição dos tamanhos das partículas por peneiramento dos solos estudados foram realizados segundo a norma NBR 7181 (1984) – Solo – Análise granulométrica (Figura 3.3).

**Figura 3.3 – Execução do ensaio de análise granulométrica**



**Fonte:** Dados da Pesquisa,2015.

O ensaio de granulometria é o processo utilizado para a determinação da porcentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de partículas representa na massa total ensaiada. A construção da curva de distribuição granulométrica é possível com obtenção dos resultados obtidos nesses ensaio. Esta é importante para a classificação dos solos bem como a estimativa de parâmetros para filtros, bases estabilizadas, permeabilidade, capilaridade, entre outros.

#### 3.2.1.2 - Limites de Atterberg

Os ensaios de limite de plasticidade e o limite de liquidez foram realizados de acordo com as normas NBR 7180 (1988) – Solo - Determinação do limite de plasticidade – e NBR 6459 (1984) – Solo - Determinação do limite de liquidez (Figura 3.4).

**Figura 3.4 - Limite de liquidez (a) e plasticidade (b)**



**(a)**



**(b)**

**Fonte:** Dados da Pesquisa,2015.

Os limites de Atterberg foram utilizados como parâmetros para classificação de solos. Pode-se definir o limite de liquidez como sendo a umidade em que a ranhura feita no solo fecha após a aplicação de 25 golpes no aparelho de Casagrande. O limite de plasticidade é a menor umidade em que se pode moldar um cilindro com 3 mm de diâmetro. O índice de plasticidade do solo é a diferença entre os limites de liquidez e plasticidade.

### 3.2.1.3 - Massa Específica

A massa específica do solo foi determinada pela norma NBR 6508 (1984) – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Na execução deste ensaio as amostras de solo são agitadas pelo dispersor mecânico (Figura 3.5-a) e em seguida transferidas para um picnômetro (Figura 3.5-b), onde são submetidas à aplicação de vácuo com finalidade de retirar todo ar contido na amostra. Pesa-se o conjunto picnômetro mais amostra e a partir de relação de massas calcula-se a massa específica dos solos.

**Figura 3.5 – Etapas da execução do ensaio de massa específica: dispersão (a) e amostra no picnômetro (b)**



(a)



(b)

Fonte: Dados da Pesquisa, 2015.

### 3.2.1.4 - Análise Química

Para determinação da composição química dos solos estudados, foi utilizada a técnica de espectrometria de fluorescência de raios-X (EDX). Esta técnica baseia-se no princípio de que a absorção de raios-X pelo material provoca ionização interna dos átomos, gerando uma radiação característica

conhecida como “fluorescência”. Esta análise permitiu obter a presença de óxidos como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Ti}_2\text{O}$ , entre outros.

As análises químicas foram realizadas no Laboratório de Caracterização da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da UFCG. As amostras foram passadas em peneira ABNT N° 200 (abertura de 0,074mm) e submetidas à análise química por fluorescência de raios X em equipamento EDX 720 da Shimadzu (Figura 3.6) . A geração de raios X é feita por meio de um tubo com alvo de Rh.

**Figura 3.6 – Equipamento EDX utilizado na pesquisa**



**Fonte:** Dados da Pesquisa,2015.

#### 3.2.1.5 - Difração de Raios-X

Para caracterização mineralógica dos solos estudados, as amostras foram submetidas a análise mediante a utilização do equipamento Shimadzu XDR-6000 utilizando radiação de  $\text{CuK}\alpha$ , tensão de 40kV, corrente de 30mA, varredura de  $2^\circ < 2\theta < 30^\circ$  e  $\lambda = 1,54\text{\AA}$  (Figura 3.7).

**Figura 3.7 - Equipamentos utilizados para realização do ensaio de difração de raios-x nesta pesquisa**



**Fonte:** Dados da Pesquisa,2015.

#### *3.2.1.6 - Microscopia Eletrônica de Varredura*

O método de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) consiste na geração de dados que permite a observação e a caracterização de materiais orgânicos e inorgânicos heterogêneos em uma escala micrométrica. O MEV oferece uma imagem ampliada da superfície do material que é muito similar ao esperado se fosse possível na verdade “olhar” esta superfície. Não apenas a informação da topografia do material é produzida como também, informação de sua composição.

As micrografias dos corpos de prova deste material foram realizadas em equipamento Superscam da SHIMADZU SSX 550. No processo de preparação das amostras os solos foram metalizados com ouro. Considera-se que os espécimes sólidos não condutivos devem ser cobertos com uma camada de material condutivo. Uma cobertura ultrafina de material eletricamente condutiva é depositada tanto por evaporação de alto vácuo quanto por *sputter* de baixo vácuo. Este procedimento foi realizado para prevenir a acumulação de campos elétricos estáticos no espécime devido irradiação elétrica durante a produção da imagem. A Figura 3.8 apresenta o equipamento utilizado para realização deste ensaio.



**Figura 3.8 - Equipamento utilizado para realização do ensaio de MEV**



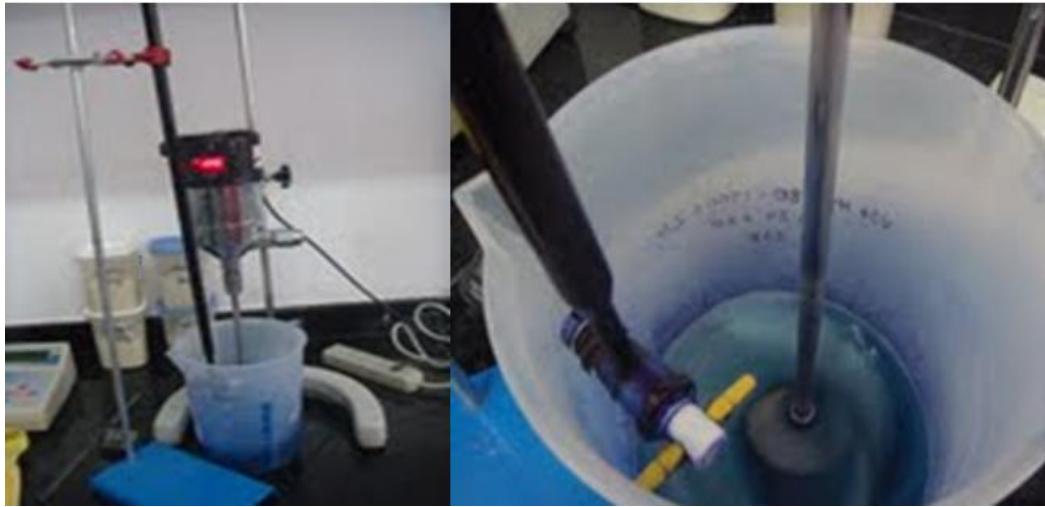
**Fonte:** Dados da Pesquisa,2015.

#### *3.2.1.7 - Azul de Metileno*

O ensaio de adsorção de azul de metileno é uma alternativa bastante eficiente, rápida e econômica para determinação da atividade expansiva “plástica” de solos, uma vez que para aplicações rodoviárias, sabe-se que os sistemas tradicionais são inapropriados para caracterização de alguns solos tropicais.

O mecanismo da adsorção de azul de metileno pelas partículas consiste na permuta iônica entre os cátions existentes na superfícies dessas partículas, como por exemplo os cátions de cálcio, sódio, magnésio e potássio, e os cátions resultantes da dissociação da molécula de azul de metileno em solução aquosa. Em consequência desta troca catiônica forma-se à volta da partícula uma camada monomolecular de azul de metileno. A Figura 3.9 apresenta o equipamento utilizado para realização deste ensaio.

**Figura 3.9 – Equipamento utilizado para realização do ensaio de azul de metileno**



Fonte: Dados da Pesquisa, 2015.

#### 3.2.1.8 - Espectrometria por Absorção Atômica

O produto Polycure foi classificado por meio da NBR 10004 (2004) – Resíduos sólidos – classificação, para analisar se sua incorporação aos solos estudados teria riscos potencial ao meio ambiente e à saúde pública.

Para tal análise foram submetidas ao ensaio de Espectroscopia por Absorção Atômica amostras de extratos lixiviados e solubilizados, confeccionados seguindo os procedimentos prescritos nas normas NBR 10005 (2004) – Procedimento para obtenção de extrato de lixiviado de resíduos sólidos e NBR 10006 (2004) - Procedimento para obtenção de extrato de solubilizado de resíduos sólidos ,respectivamente. O ensaio foi realizado no Fundo de Fomento à Mineração (FUNMINERAL) – GO, utilizando-se o espectrômetro de absorção atômica marca Perkin Elmer, AAnalyst 200.

A análise do extrato de lixiviado teve como objetivo diferenciar os resíduos classificados pela NBR 10004 como Classe I – Perigosos e Classe II – não Perigosos. Para obtenção do extrato, uma amostra representativa de 100g de Polycure foi colocada em frasco de 2.000 mL com água deionizada e isenta de matéria orgânica mais solução lixiviante (ácido acético glacial, hidróxido de sódio e água em concentrações estabelecidas pela NBR 10005). Em seguida, a solução foi submetida à agitação em equipamento rotativo (Figura 3.10) com 30 rotações por minuto, relação líquido/sólido igual a 20:1 e tempo de contato com o meio lixiviante igual a  $18 \pm 2$  horas.

**Figura 3.10 - Equipamento rotativo utilizado para execução do ensaio nesta pesquisa**



Fonte: Dados da Pesquisa,2015.

A análise do extrato de solubilizado teve como objetivo distinguir os resíduos classificados pela NBR 10004 como Classe II A – não inertes e Classe II B – inertes. Para obtenção do extrato, uma amostra representativa de 250g do material foi colocada em frasco de 1.500 mL. Em seguida, foram adicionados 1.000mL de água deionizada e isenta de orgânicos. Os metais foram quantificados após repouso por sete dias, em temperatura de 25°C. A Figura 3.11 apresenta a obtenção do extrato solubilizado para o ensaios de Espectroscopia por Absorção Atômica.

**Figura 3.11 – Obtenção do extrato solubilizado**



Fonte: Dados da Pesquisa,2015.

### 3.2.2 Ensaios de Comportamento Mecânico

Na Tabela 3.3 são apresentados a descrição dos tipos de ensaios utilizados para análise do comportamento mecânico das amostras com e sem associação polimérica, bem como as suas respectivas normas. Os ensaios de comportamento mecânicos foram realizados no LEP da UFCG.

**Tabela 3.3 – Ensaios realizados para análise de comportamento mecânico**

Ensaio	Norma Utilizada
Ensaio de compactação	DNIT – ME 162/1994
Determinação do Índice de Suporte Califórnia	DNIT – ME 049/1994
Determinação da resistência à tração por compressão diametral	DNIT – ME 136/2010
Ensaio de resistência à compressão simples	ABNT - NBR 12025/1990
Módulo de Resiliência	DNIT – ME 134/2010
Permeabilidade	ABNT - NBR 14545/2000

**Fonte:** Dados da Pesquisa,2015.

#### 3.2.2.1 - Processo de Mistura Solo-polímeros

Para adição da associação polimérica utilizada nesta pesquisa foram utilizados três procedimentos conforme orientação do fabricante: (i) adição do Polycure ao solo seguido de homogeneização sem tempo para aeração do produto (Figura 3.12 - a);(ii) mistura do TerraDry ao Polímero Acrílico Industrial, com auxílio de haste (Figura 3.12 - b);(iii) homogeneização sem aeração (Figura 3.12 - c).

Após a execução dos procedimento de mistura solo-polímero, adicionou-se a água necessária para atingir a umidade ótima para todos ensaios mecânicos e de desgaste. A pequena parcela da mistura TerraDry-Polímero Acrílico Industrial retida no becker foi retirado com a água adicionada ao solo.

A adição do polímero ao solo necessita de cuidados com relação a umidade, dado que o Polímero Acrílico Industrial por ser um produto líquido, parte da quantidade de água necessária para atingir a umidade ótima deve ser corrigida a partir da Equação 3.1.

Figura 3.12 – Processos de mistura solo-polímeros: adição do Polycure(a), mistura do Polímero Acrílico ao Terradry(b) e adição da mistura ao solo (c)



(a)



(b)



(c)

Fonte: Dados da Pesquisa,2015.

$$A = wot - Mss * \%PA$$

Equação 3.1

A = Água necessária para atingir a umidade ótima (ml)

Wot = Umidade ótima (ml)

Mss = Massa do solo seco (g)

%PA= Teor de Polímero Acrílico

### 3.2.2.2 - Ensaio de Compactação

Para realização do ensaio de compactação foi utilizada a energia intermediária, uma vez que as normas DNIT-ES 301/1997 e DNIT-ES 303/1997 permitem a escolha da energia de acordo com os parâmetros de projetos. Realizou-se ensaios com amostras de solos puros e com adições dos diferentes teores e tipos de estabilizantes. Para cada composição descrita anteriormente foi realizada uma réplica visando eliminar divergências superiores a 10%, caso isto ocorresse seria realizada uma tréplica. Na Figura 3.13 são ilustrados os procedimentos de execução do ensaio.

**Figura 3.13 – Execução do ensaio de compactação**



Fonte: Dados da Pesquisa,2015.

### 3.2.2.3 - Ensaio de Índice de Suporte Califórnia –ISC

O ensaio de Índice de Suporte Califórnia foi realizado de acordo com a norma DNIT – ME 049/1994. Os corpos de prova foram moldados em umidade ótima e peso específico aparente seco máximo, ambos determinados no ensaio de compactação, utilizando-se a energia intermediária. Os ensaios foram realizados ensaios com amostras de solos puros e com adições dos diferentes teores e tipos de estabilizantes. Para cada composição citada anteriormente foi realizada uma réplica, e caso houvesse divergência superior a 10% seria executada uma tréplica.

Os solos estabilizados foram submetidos a cura seca ao ar de sete dias antes do período de imersão (Figura 3.14 - a) de quadro dias que precede a execução do ensaio de ISC (Figura 3.14 - b).

**Figura 3.14 - Imersão (a) e execução do ensaio de ISC (b)**



(a)



(b)

Fonte: Dados da Pesquisa, 2015.

#### *3.2.2.4 - Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral – RT*

A adição de estabilizantes a solos podem oferecer ganhos de coesão gerando tensões de flexão na camada estabilizada agindo como misturas asfálticas ou até mesmo placas de concreto. Desse modo a determinação da resistência à tração por compressão diametral torna-se importante parâmetro a ser controlado nesta pesquisa.

Embora não exista normas para execução desse ensaio em solos, adaptou-se a norma DNIT-ME 136 (2010), que trata de misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral. As adaptações desse ensaio baseou-se em estudo realizado por Lucena (2012).

Para moldagem do corpo de prova foi utilizado o compactador Marshall (Figura 3.15) aplicando-se para a energia intermediária cem golpes em camada única. A quantidade de golpes utilizadas para atingir a energia de compactação no ensaio de RT baseou-se no estudo de Sobreira (2014)

**Figura 3.15 – Compactador Marshall**



**Fonte:** Dados da Pesquisa,2015.

Para a realização dos ensaios de resistência a tração foram moldados corpos de prova para solos puros e com adições dos diferentes teores e tipos de estabilizantes. Para cada composição citada anteriormente realizou-se uma réplica, e caso houvesse divergência superior a 10% executou-se tréplica. Os mesmos foram submetidos a processo de cura seca ao ar de sete e vinte oito dias, antes da ruptura que ocorreu em prensa eletromecânica com velocidade de deslocamento de 0,8 mm/s. A Figura 3.16 mostra a ruptura do corpo de prova.

**Figura 3.16 – Ruptura do corpo de prova por tração indireta**



**Fonte:** Dados da Pesquisa,2015.



### 3.2.2.5 - Ensaio de Resistência à Compressão Simples – RCS

Na execução do ensaio de RCS foram utilizadas amostras de solos puros e amostras com adições dos diferentes teores e tipos de estabilizantes. Para cada composição foram realizadas réplicas, e caso houvesse divergência superior a 10% seria executada uma tréplica. O corpos de prova foram moldados em umidade ótima com energia intermediária conforme preconizado na NBR 7182/86. Após moldados os corpos de prova foram submetidos a cura úmida de sete e vinte oito dias.

A prensa utilizada foi a SHIMADZU AG-IS (Figura 3.17-a) com célula de 100 kN , com velocidade de 1 mm/min, que permite traçado simultâneo da curva de resistência conforme execução do ensaio. Tomou-se como critério de parada do ensaio a queda de dez por cento da tensão máxima suportado pelo corpo de prova. A Figura 3.17 (b) e (c) mostram os corpos de prova antes e após execução do ensaio.

**Figura 3.17 – Prensa (a) utilizada para RCS e corpo de prova antes (b) e após execução do ensaio (c)**



(a)



(b)



(c)

Fonte: Dados da Pesquisa,2015.

### 3.2.2.6 - Ensaio de Módulo de Resiliência

Para a realização do ensaio de módulo de resiliência foram moldados corpos de prova com amostras dos solos puros e com os diferentes teores e tipos de estabilizantes, obedecendo aos parâmetros de compactação determinados no ensaio Proctor Intermediário. Estes foram moldados em cinco camadas com dimensões de aproximadamente 100mm de diâmetro e 200mm de altura aplicando-se vinte golpes em cada camada com soquete grande. Após moldados os corpos de prova foram submetidos a cura seca ao ar de sete dias.

A primeira etapa do ensaio consistiu na fase de condicionamento onde aplicou-se seiscentos pulsos de carregamento, sendo esses com 0,1 segundo de aplicação de carga e 0,9 segundos de descanso.

A Tabela 3.4 são apresentadas os pares de tensões de confinamento e tensão desvio, bem como as quantidades de pulsos aplicados para cada par de tensão. Segundo Lucena (2012) o objetivo dessa fase é eliminar as deformações permanentes que ocorrem após as primeiras aplicações da tensão-desvio, como também minimizar os efeitos decorrentes da história de tensões da amostra a ser ensaiada.

**Tabela 3.4 – Pares de tensões e número de ciclos utilizados na fase de condicionamento**

$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	Número de ciclos
20,7	20,7	100
68,9	68,9	100
102,9	309,0	100

**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2015.

A segunda etapa do ensaio consistiu em submeter os corpos de prova a dezoito estágios de carregamento formados por aplicação de três valores de tensão-desvio para cada uma das tensões de confinamento pré-estabelecida (Tabela 3.5). A cada ciclo aplicado foram medidos os deslocamentos axiais com auxílio de instrumentos do tipo LVDT (Linear Variable Differential Transducers).

**Tabela 3.5 – Pares de tensões e número de ciclos utilizados na segunda fase do ensaio**

$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	Número de ciclos
20,7	20,7	100
	41,4	100
	62,1	100
34,5	34,5	100
	68,9	100
	102,9	100
50,4	50,4	100
	102,9	100
	155,2	100
68,9	68,9	100
	137,9	100
	206,8	100
102,9	102,9	100
	206,8	100
	309,0	100
137,9	137,9	100
	274,7	100
	412,0	100

Fonte: Dados da Pesquisa,2015.

A relação entre os deslocamentos e as tensões aplicadas permitiram o cálculo do Módulo de Resiliência para cada estágio de tensão.

Na Figura 3.18 é ilustrada as etapas de preparação do corpos para execução do ensaio de módulo de resiliência: (i) colocação do revestimento para distribuição dos esforços (Figura 3.18 -a);(ii) colocação dos LVDT's (Figura 3.18 -b); (iii) colocação da câmara (Figura 3.18-c) e (iv) execução do ensaio (Figura 3.18-d). A Figura 3.18 ilustra a prensa de resiliência triaxial utilizada no ensaio.

**Figura 3.18 – Etapas do ensaio de Módulo de Resiliência**



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Fonte: Dados da Pesquisa, 2015.

### 3.2.2.7 - Ensaio de Permeabilidade

A permeabilidade dos solos estudados foi determinada utilizando-se a norma *NBR 14545 – determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos*. Conforme prescrito nesta norma, para aplicação desta metodologia, os corpos de prova devem apresentar coeficientes de permeabilidade inferior à  $10^{-3}$  cm/s. Deste modo, mesmos os solos classificados como arenosos foram submetidos a este procedimento, pois possuíam coeficientes de permeabilidade menores que os exigidos. Os corpos de prova estabilizados foram submetidos a cura seca ao ar de sete dias, seguido do processo de saturação (Figura 19-a) onde aplicou-se vácuo de 67 kPa durante período de aproximadamente duas horas, atribuindo pressão negativa suficiente para inundação das amostras. Após a etapa de saturação foi realizado o ensaio de permeabilidade com carga variável (Figura 19-b).

**Figura 3.19 – Processo de saturação (a) e execução do ensaio de permeabilidade(b)**



(a)



(b)

Fonte: Dados da Pesquisa, 2015.

### 3.2.3 Ensaios de Desgaste

Na Tabela 3.6 são descritas as normas utilizadas para realização dos ensaios de desgaste para os solos estabilizados.

A análise de desgaste em solos visa simular a ação do tráfego para bases de pavimentos sem revestimentos. Solos estabilizados com baixo desgaste podem ser utilizados em rodovias vicinais e estradas de escoamento de produção, pois as mesmas necessitam boa qualidade e baixos investimentos. Os ensaios de desgaste foram realizados no LEP da UFCG.

**Tabela 3.6 – Ensaio realizados para análise de desgaste**

Ensaio	Norma Utilizada
Loaded Wheel Test – LWT	NBR 14756/2014
Wet Track Abrasion Test –WTAT	NBR 14841/2002

**Fonte:** Dados da Pesquisa,2015.

### 3.2.3.1- Loaded Wheel Test - LWT

O ensaio de LWT foi adaptado da NBR 14841 que trata de Microrrevestimentos a frio e lama asfáltica — Determinação do excesso de asfalto e adesão de areia pela máquina LWT. Essa adequação teve como objetivo avaliar o efeito da compactação e estudo das deformações das camada de amostras de solo estabilizadas quando submetida as solicitações da ação do tráfego simulada pelo equipamento. Na Figura 3.20 é apresentado o equipamento utilizado nesta pesquisa.

**Figura 3.20 – Equipamento utilizado no ensaio de LWT**



**Fonte:** Dados da Pesquisa,2015.

As modificações realizados neste ensaio seguiram procedimentos utilizados por Duque Neto (2004), com modificações que estão descritas a seguir:

- molde é composto de chapas de 12,7 mm de espessura compondo uma caixa fechada na base nas dimensões internas de 50,0 mm de altura, 50,8 mm de largura e 381,0 mm de comprimento e base desmontável;

- base de fixação de 450 mm com 20,0 mm de espessura;

- êmbolo de compactação com 50 mm de largura e 380 mm de comprimento com espessura de 20,0 mm.

Para moldagem dos corpos de prova utilizou-se a prensa SHIMADZU AG-IS com célula de 100 kN seguindo os seguintes passos:

- homogeneização de 3 kg do material a ser compactado sob energia intermediária;
- colocação da primeira metade do material no molde sobre a base de fixação;
- inserção do êmbolo de compactação no molde e aplicação do carregamento de 40 kN na prensa;
- escarificação da camada e repetiu-se todo o processo para a segunda camada.

Na Figura 3.21 é ilustrado o processo de compactação do corpo de prova de LWT.

**Figura 3.21 – Compactação do corpo de prova de LWT**



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2015.

Os corpos de provas após moldados foram submetidos a cura seca de sete dias. Seguindo a metodologia de Duque Neto (2004) foram etapas da execução do ensaio:

- pesagem do conjunto do molde com solo;
- alinhamento do eixo longitudinal do molde com da roda do equipamento, fixando-o com parafusos prisioneiros;

- determinação da leitura zero com o auxílio do paquímetro de profundidade em um ponto fixo sobre o ponto central do corpo de prova, que deverá estar marcado na lateral do molde.

- rebaixamento da roda e colocação do peso padrão (56 kg) com fixação do zero do contador de ciclos;

- acionamento do aparelho para a realização dos estágios de 20, 50, 100, 200, 300, 500 e 1000 ciclos, com verificação do afundamento com o auxílio do paquímetro de profundidade;

- repetição da pesagem do conjunto do molde com solo, após retirada do material solto com auxílio de um pincel.

Os critérios de parada para a execução do ensaio foram o término de todos os estágios de ciclos ou o toque do equipamento no molde causado pelo afundamento excessivo da amostra. Estes critérios foram levados em consideração para que não houvesse danos no equipamento (Figura 3.22).

**Figura 3.22- Critério de parada utilizado no ensaio de LWT**

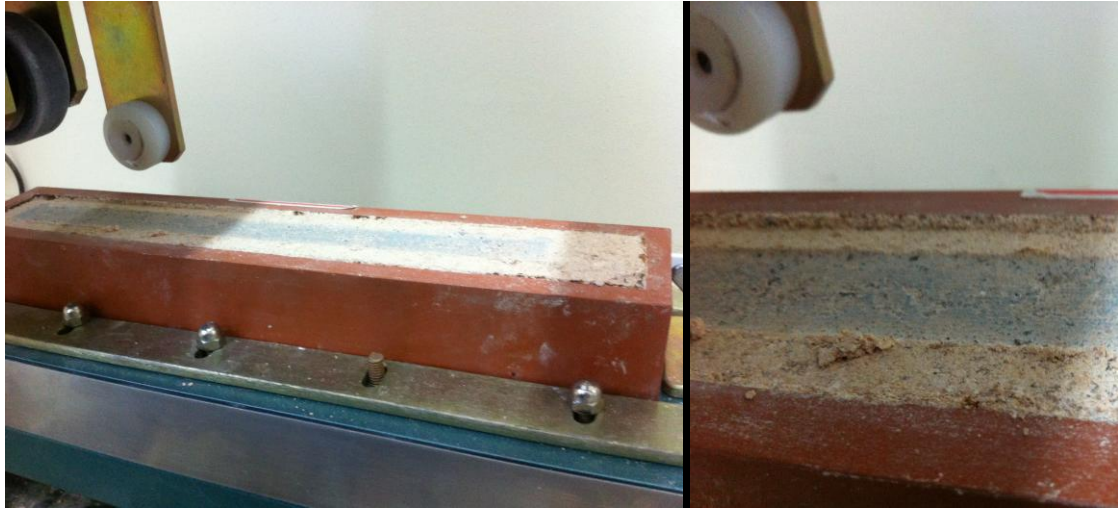


**Fonte:** Dados da Pesquisa,2015.

Na Figura 3.23 é apresentado um afundamento típico causado pela passagem da roda do equipamento de LWT. Com os dados do afundamento de cada ciclo foram lançados em gráfico as curvas afundamento versus número de ciclos.



**Figura 3.23 – Realização do ensaio de LWT**



**Fonte:** Dados da Pesquisa,2015.

### 3.2.3.2- Ensaio de Wet Track Abrasion Test -WTAT

O ensaio WTAT foi adaptado segundo a norma NBR 14746 que trata de Microrrevestimento – Determinação da perda por abrasão úmida. Neste ensaio são analisados os desgastes por meio da rotação de uma mangueira de borracha sobre o corpo de prova de solo em forma de pixa ou bolo (Figura 3.24).

**Figura 3.24 – Equipamento utilizado no ensaio de WTAT**



**Fonte:** Dados da Pesquisa,2015.

Os procedimentos de moldagem e de realização do ensaio seguiram as adaptações sugeridas por Duque Neto (2004).

Para moldagem do corpo de prova foram utilizados moldes com 300 mm de diâmetro por 50 mm de altura. As amostras de solos puros e estabilizados foram compactados seguindo os seguintes procedimentos:

- homogeneização de 9 kg de material;
- colocação de metade do material no molde e compactação com aplicação de 85 golpes do soquete Marshall (Figura 3.25-a);
- escarificação da camada e repetição da operação pra segunda camada;
- eliminação do excesso de material na superfície de modo que não houvesse elevações (Figura 3.25-b).

Após a moldagem, as amostras estabilizadas foram submetidas a cura seca de sete dias consecutivos.

**Figura 3.25- Processos de moldagem do ensaio de WTAT**



(a)



(b)

**Fonte:** Dados da Pesquisa,2015.

Seguindo o procedimento de acordo com Micelli Júnior (2006) a execução do ensaio foi realizada com:

- pesagem do conjunto molde + solo antes de começar o ensaio;
- pesagem do mesmo conjunto e retirada do excesso com pincel;

- determinação de três (03) alturas no centro do molde com auxílio da régua de aço e do paquímetro de profundidade com verificação das condições iniciais do corpo de prova;
  - centralização do molde de forma com relação ao eixo do equipamento;
  - travamento do cabeçote de abrasão da mangueira de borracha no eixo da máquina;
  - elevação da plataforma da máquina;
  - regulagem da máquina para 110 rpm e tempo de operação de 5 minutos;
  - acionamento do equipamento e realização do ensaio;
  - retirada do material desprendido após o ensaio com pincel;
  - pesagem do conjunto molde mais solo depois do ensaio;
- determinação de três (03) alturas no centro do molde com auxílio da régua de aço e do paquímetro de profundidade nos pontos onde foram feitas as determinações iniciais, verificando as condições finais do corpo de prova.

Na Figura 3.26 é ilustrado parte do procedimento do ensaio como WTAT.

**Figura 3.26 – Execução do ensaio de WTAT**



Fonte: Dados da Pesquisa, 2015.

A diferença entre a massa inicial e a massa após a execução do ensaio permite o cálculo da perda por abrasão, deste modo o resultado foi representado em medidas de porcentagem. Na literatura para este ensaio aplicado a microrrevestimentos, o valor da perda de massa é dividido pelo área do raio de ação do equipamento, obtendo-se assim uma medida de perda de massa por unidade de área. Nesta pesquisa os resultados serão apresentados em ambas as formas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A apresentação dos resultados e discussões está divididas em três partes. Na primeira são apresentados os ensaios de caracterização física dos solos tais como granulometria, massa específica real, limites de Atterberg, análise química, difração de raios-x, microscopia eletrônica de varredura, azul de metileno e espectroscopia por absorção atômica. Estão inseridos neste item os ensaios de caracterização química e mineralógica para adição da associação polimérica nos solos estudados.

Na segunda parte são apresentados os resultados de ensaios mecânicos, tais como compactação, índice de suporte Califórnia, Módulo de Resiliência, Resistência à Compressão Simples, Resistência à Tração por Compressão Diametral e Permeabilidade.

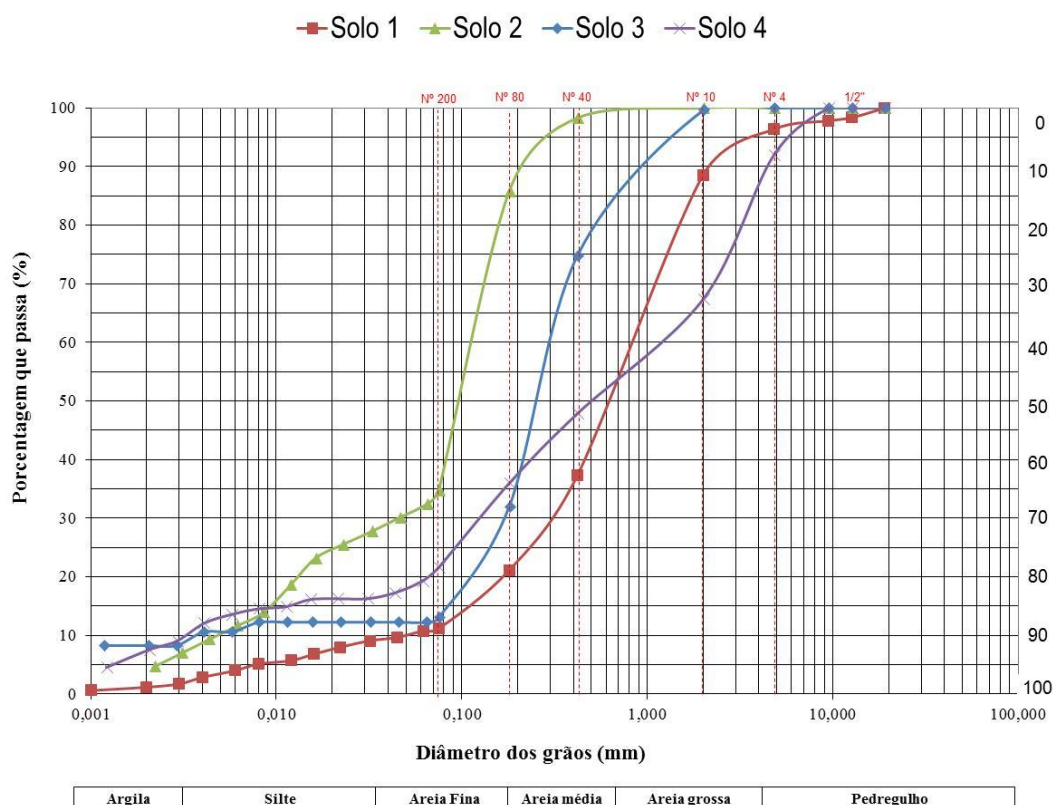
Na terceira parte são abordados os resultados dos ensaios de resistência ao desgaste, *loaded wheel test* (LWT) e *wet track abrasion test* (WTAT).

### 4.1 Ensaio de Caracterização Física

#### 4.1.1 Análise Granulométrica

Na Figura 4.1 foram lançadas em gráfico as curvas de distribuição dos tamanhos das partículas dos solos estudados. Na Tabela 4.1 estão apresentados os valores de porcentagem de material retidos que formam a curva granulométrica.

**Figura 4.1 – Curva de distribuição dos tamanhos das partículas**



Fonte: Dados da Pesquisa, 2015.

Os solos apresentam em sua maioria uma quantidade de finos típicos de solos arenosos com exceção da amostra de Solo 2 que apresentou uma porcentagem de 68,81% de material que passa na peneira de número 200, o que pode indicar uma atividade plástica de solos finos.

**Tabela 4.1 – Porcentagem retidas na análise granulométrica**

Peneiras	Solo 1	Solo 2	Solo 3	Solo 4
- mm	% Passante			
3/4"	19,1	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,7	98,36	100,00	100,00
3/8"	9,5	97,80	100,00	100,00
Nº4	4,8	96,34	100,00	99,98
Nº 10	2,0	88,55	100,00	99,57
Nº 40	0,42	37,29	98,30	74,79
Nº 80	0,18	21,09	85,74	31,92
Nº 200	0,075	11,12	68,81	12,98

Fonte: Dados da Pesquisa, 2015.

Na Tabela 4.2 estão inseridos o Coeficiente de Uniformidade (Cu) e o Coeficiente de Curvatura (Cc), para amostras com dos solos estudadas.

**Tabela 4.2 – Coeficientes de uniformidade e curvatura para os solos estudados**

Nomenclatura	Cu	Cc
Solo 1	18	1,68
Solo 2	22	3,68
Solo 3	85,71	30,85
Solo 4	406	4,06

Fonte: Dados da Pesquisa,2015.

Os solos que apresentam  $Cu < 5$  são denominados uniformes e com  $Cu > 15$  desuniformes, os que apresentam valores são denominados medianamente uniformes. Para os solos estudados, todos foram considerados desuniformes. Com relação ao Coeficiente de curvatura, para um solo bem graduado o valor de Cc deverá estar entre 1 e 3, portanto, apenas o Solo 1 é considerado bem graduado.

#### 4.1.2 Determinação das Propriedades Físicas

Na Tabela 4.2 estão apresentados os valores obtidos de limite de liquidez e plasticidade, bem como as massa específicas reais dos solos estudados.

De acordo com os resultados de limites de Atterberg e da análise granulométrica classificou-se os solos estudos segundo o sistema de classificação TRB (Transportation Research Board) (Tabela 4.4).

**Tabela 4.3 – Limites de Atterberg e massa específica real**

Nomenclatura	Média dos Resultados
Solo 1	Massa Específica → 2,655 g/cm <sup>3</sup>
	Limites de Liquidez → 34,22%
	Limites de Plasticidade → NP
Solo 2	Massa Específica → 2,602 g/cm <sup>3</sup>
	Limites de Liquidez → 49,25%
	Limites de Plasticidade → NP
Solo 3	Massa Específica → 2,703 g/cm <sup>3</sup>
	Limites de Liquidez → NP
	Limites de Plasticidade → NL
Solo 4	Massa Específica → 2,762 g/cm <sup>3</sup>
	Limites de Liquidez → 42,25%
	Limites de Plasticidade → NP

Fonte: Dados da Pesquisa,2015.

**Tabela 4.4 – Classificação dos solos segundo a AASHTO**

Nomenclatura	Classificação
Solo 1	A-2-6
Solo 2	A-5
Solo 3	A-2-4
Solo 4	A-1-b

Fonte: Dados da Pesquisa,2015.

O Solo 1 foi classificado como areia fina contendo argila plástica (A-2-6). O Solo 2 como solo fino siltoso altamente elástico (A-5), entretanto não apresentou níveis de plasticidade acentuados quando analisados os resultados dos limites de atterberg. O Solo 3 como areia fina com silte não plástico (A-2-4) e o Solo 4 como areia grossa com aglutinante (A-1-b).

#### 4.1.3 Análise Química (EDX)

Na Tabela 4.5 estão listados os resultados da composição química dos solos.

**Tabela 4.5 – Composição química dos solos**

Amostras(solos)	PF	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Outros
Solo 1	12,25	49,04	31,67	1,28	-	4,59	0,89	-	0,28
Solo 2	13,85	44,64	33,22	6,98	0,77	-	-	-	0,54
Solo 3	6,82	57,70	26,56	5,71	1,23	-	-	-	1,98
Solo 4	6,98	55,14	25,63	5,69	-	2,43	1,46	1,36	1,31

Fonte: Dados da Pesquisa,2015. PF: Perda ao Fogo

De acordo com os resultados obtidos, pode observar que para o Solo 1, uma composição com elevados teores de sílica (49%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (31%) e K<sub>2</sub>O(4%) e baixos teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e MgO. O Solo 2 é constituído basicamente de sílica (44%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (33%) e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (6%) e teor de TiO<sub>2</sub> inferior a 1% o que pode explicar a incoerência dos resultados dos índices de consistência obtidos pelo ensaio de Casa Grande.

O Solo 3 é constituído basicamente de sílica (57%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (26%) e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (5%) e baixos teores de TiO<sub>2</sub>. O Solo 4 é constituído por teores de sílica (55%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (25%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (5%) e baixos teores de K<sub>2</sub>O, MgO e de CaO.

#### 4.1.4 Capacidade de Troca de Cátions (CTC)

Para determinação da capacidade de troca de cátions foram realizados os ensaios de azul de metileno. A Tabela 4.6 apresenta os valores de CTC obtidos para os solos em estudo.



**Tabela 4.6 – CTC das amostras dos solos em estudo**

Amostra (solos)	CTC (meq/100g argila seca)
Solo 1	28
Solo 2	24
Solo 3	20
Solo 4	20

**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2015.

Uma análise conjunta dos resultados revela que as amostras dos solos apresentam CTC da ordem de 20 a 28 meq/100g de argila seca, indicando que estes solos possuem baixo índice de troca de cátions. Estes valores são justificados pela presença de óxidos de Ferro e alumínio que apresentam CTC (20-50), além da presença da caulinita que contribui significativamente para redução da CTC.

A CTC é a capacidade de partículas sólidas trocarem íons positivamente carregados com uma solução presente no solo, esta caracteriza então a capacidade de adsorção do mineral presente em um sólido por compostos inorgânicos. Os principais sólidos adsorventes são os argilominerais, os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio e a matéria orgânica.

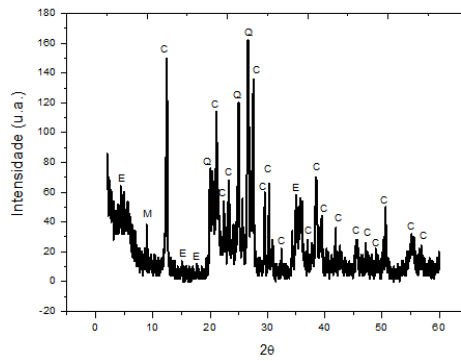
A baixa capacidade de troca de cátions dos solos estudados indica que as reações entre as partículas de solo e os estabilizantes comuns (cal e cimento) foram reduzidas, prejudicando na melhoria das propriedades mecânica e de desgaste para as amostras de referência.

#### **4.1.5 Difração de Raios-X (DRX)**

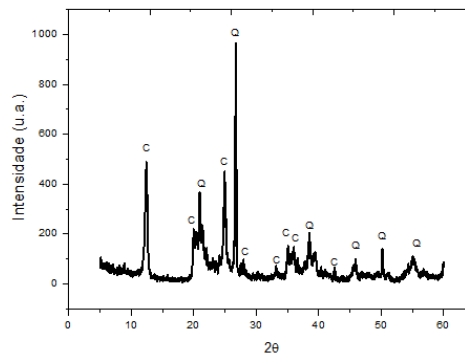
Na Figura 4.2 serão apresentados os Difractogramas de raios-X dos solos estudados. De acordo com os Difractogramas de raios-X da Figura 4.2, pode-se observar que as fases mineralógicas presentes no Solo 1 e no Solo 4 são: caulinita, esmectita e quartzo. Para o Solo 2 e o Solo 3 verificou-se as seguintes fases mineralógicas: caulinita e quartzo. O argilomineral Caulinita pode explicar a baixa plasticidade do Solo 2 apesar do alto valor de finos passando na peneira 200.

Figura 4.2 - Difratomogramas de raios-X dos solos estudados: Solo 1 (a), Solo 2 (b), Solo 3 (c) e Solo 4(d)

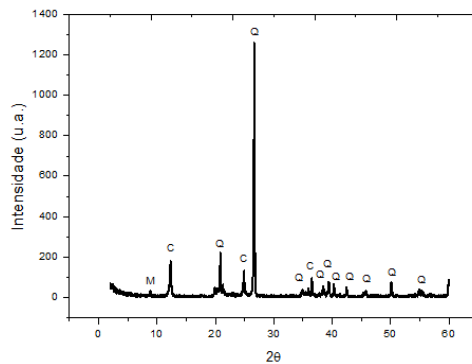
Legenda:  
 C=Caulinita  
 E = Esmectita  
 M=Mica  
 Q= Quartzo



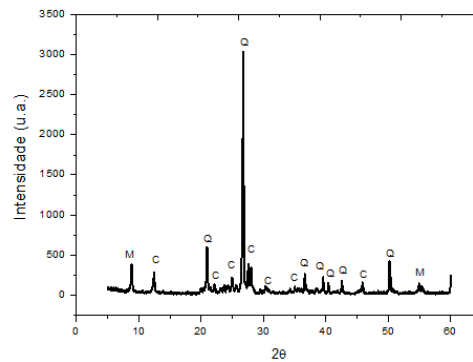
(a)



(b)



(c)



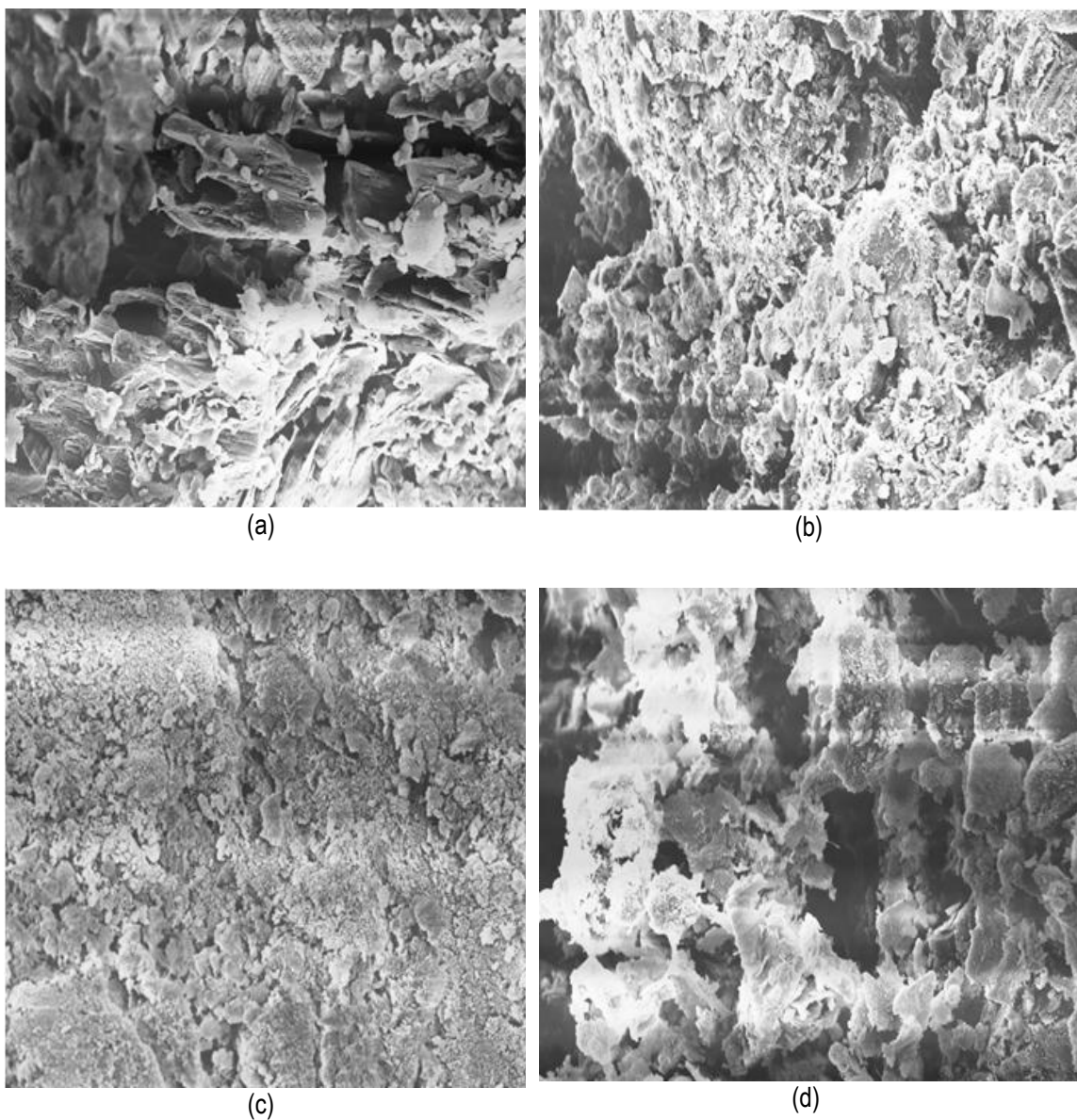
(d)

Fonte: Dados da Pesquisa,2015.

#### 4.1.6 Microscopia Eletrônica de Varredura

Na Figura 4.3 (a, b, c e d) estão apresentados as micrografias das amostras dos solos em estudo.

**Figura 4.3 - Microscopia eletrônica de varredura dos materiais em estudo: Solo 1 (a), Solo 2 (b), Solo 3 (c) e Solo 4(d)**



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2015.

De acordo com a Figura 4.3 (a e b), observa-se para o Solo 1 e Solo 2, respectivamente, têm uma estrutura morfológica bastante grosseira e heterogênea com presença de poros, e partículas dispersas, indicando que não ocorreu uma boa interação entre as partículas constituintes do material. O Solo 3 apresenta uma estrutura morfológica grosseira, com regiões densificadas e presença de poros,

característico de solos com menor diâmetro médio de partículas.. Para Solo 4, observa-se uma superfície heterogênea com muitos poros, e grãos irregulares, indicativo de materiais que apresentam pouco ou nenhuma plasticidade.

#### 4.1.7 Espectrometria por Absorção Atômica

Na Tabela 4.7 estão apresentados os valores dos constituintes químicos encontrados nos extratos lixiviados e solubilizados com o auxílio do ensaio de Espectrofotometria por Absorção Atômica para a amostra de Polycure.

**Tabela 4.7 - Resultados de ensaio de lixiviação e solubilização para amostra de Polycure**

Polycure	Cd	Pb	Cr	Al	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
Lixiviado	<0,01	<0,01	<0,01						
Limites (NBR 10004/04)	0,5	1,0	5,0	-	-	-	-	-	-
Solubilizado	<0,01	<0,01	<0,01	<0,10	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Limites (NBR 10004/04)	0,005	0,01	0,05	0,2	2,0	0,3	0,1	-	5,0

**Fonte:** Dados da Pesquisa,2015.

Os resultados para a amostra não obteve valores significativos de toxicidade, periculosidade e inerticidade para os extratos lixiviados e solubilizados onde todos os constituintes, apresentam concentrações inferiores aos limites estabelecidos pela NBR 10004/2004 (ABNT), caracterizando assim o resíduo com Classe II B – Não Perigoso (Inerte).

#### 4.1.8 Caracterização química e mineralógica com adição da associação polimérica

A realização dos ensaios de caracterização química e mineralógica dos solos com a adição da associação polimérica avaliou as mudanças na escala micro, oferecendo informações para entendimento das mudanças acarretadas na estabilização. Para os ensaios de EDX, CTC, DRX e MEV, foram utilizados a adição do teor intermediário de 6,4% da associação polimérica em todos os solos estudados.

##### 4.1.8.1 Análise Química por Fluorescência de Raios X (EDX)

Na Tabela 4.8 esta inserida a composição química dos solos com a adição do teor de 6,4% da associação polimérica.

**Tabela 4.8 - Composição química dos solos estabilizados com a associação polimérica**

Amostras	PF	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Outros
Solo 1	18,1	43,17	30,10	1,31	-	2,10	0,84	3,7	1,04
Solo 2	16,4	39,60	32,55	8,0	0,96	-	-	1,91	0,58
Solo 3	19,5	35,03	32,54	4,50	1,20	-	-	4,70	2,53
Solo 4	16,3	39,41	30,60	7,47	0,89	-	-	3,36	1,97

Fonte: Dados da Pesquisa,2015.

Observando os resultados da Tabela 4.8, verifica-se que o Solo 1 apresenta uma composição com elevados teores de sílica (43%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (30%), CaO (3%), teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1%) e K<sub>2</sub>O (2%) e teor de MgO inferior a 1%. Para o Solo 2 tem-se uma composição com teores de sílica (39%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (32%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(8%) e baixos teores de TiO<sub>2</sub> e CaO

Para o Solo 3 observa-se uma composição. teores de sílica (35%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (32%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (4%), CaO (4%) e baixos teores de TiO<sub>2</sub> e MgO. O Solo 4 é constituído por sílica (39%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (30%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (7%) e CaO (3%) e teor de TiO<sub>2</sub> inferior a 1%.

De modo geral, os resultados indicam que a adição da associação polimérica ocasionou uma elevação da perda ao fogo, possivelmente por ser um material orgânico. Pode-se verificar a presença de CaO em todas as amostras de solos, podendo ser justificado pela presença de cálcio inorgânico na composição química do Polycure.

#### 4.1.8.2 Capacidade de Troca Catiônica (CTC)

Na Tabela 4.9 estão inseridos os resultados dos valores de CTC obtidos para as amostras dos solos com a adição do teor de 6,4% da associação polimérica.

**Tabela 4.9 - CTC das amostras dos solos estabilizados com a associação polimérica**

Amostra	CTC (meq/100g argila seca)
Solo 1	20
Solo 2	20
Solo 3	20
Solo 4	20

Fonte: Dados da Pesquisa,2015.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.9, verifica-se que após adição da associação polimérica ocorreu a redução da adsorção do azul de metileno, o que indica que nestas condições estes solos terão uma menor troca de cátions. Esta ocorrência deve-se ao processo de cristalização dos grãos dos argilominerais presentes nos solos. Estes tiverem suas partículas envolvidas pelos polímeros adicionados, gerando uma barreira que impede a troca de cátions. Observa-se ainda que

houve uma redução nos teores de óxidos de ferro e alumínio após a adição da associação polimérica que contribui para redução da capacidade de adsorção do azul de metileno. Esta redução pode indicar uma diminuição significativa na atividade dos argilominerais ocasionando uma diminuição na plasticidade dos solos estudados.

#### *4.1.8.3 Difração de Raios-X (DRX)*

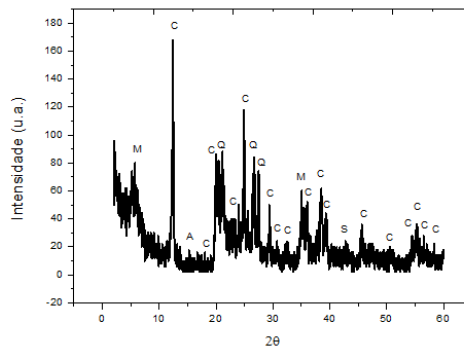
Na Figura 4.4 estão inseridos os Difratoograma de raios-X dos materiais após a adição do teor de 6,4% da associação polimérica.

De acordo com o Difratoograma da Figura 4.4, verifica-se que o Solo 1 têm as fases mineralógicas: Anortita, caulinita, quartzo, sanidina e mica. Para o Solo 2 observa-se a presença das fases mineralógicas: caulinita e quartzo.

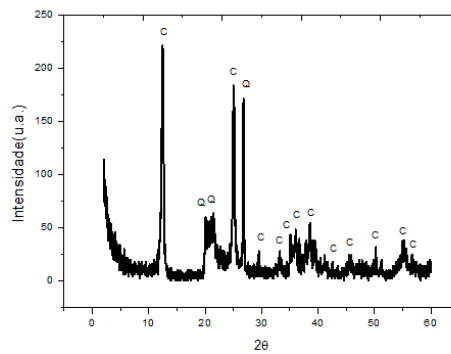
Para o Solo 3 observa-se a presença das fases mineralógicas: mica, portlandita, quartzo e caulinita. Para o Solo 4 observou-se as seguintes fases mineralógicas: caulinita, mica e quartzo.

Figura 4.4 - Difratoograma de raios-X dos materiais após o teor ótimo: (a) Solo 1, (b) Solo 2, (c) Solo 3 e (d) Solo 4

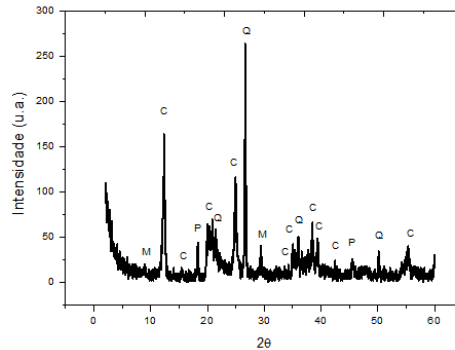
Legenda:  
 A= Anortita  
 C=Caulinita  
 E = Esmectita  
 M=Mica  
 P=Potlandita  
 Q= Quartzo  
 S=Sanidina



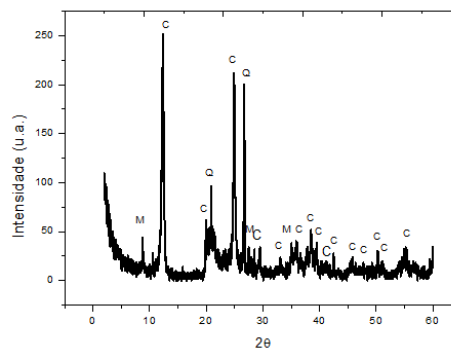
(a)



(b)



(c)



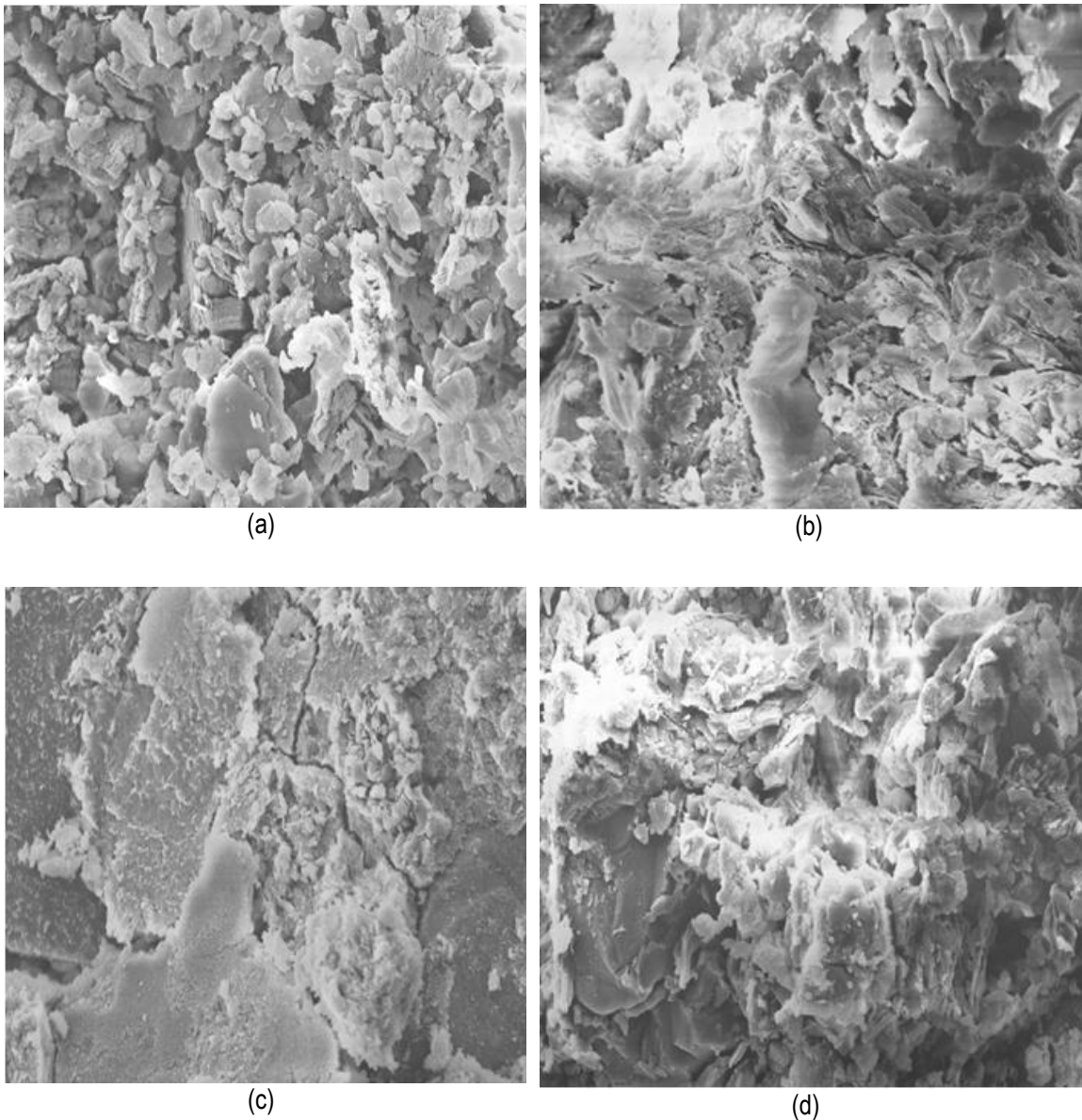
(d)

Fonte: Dados da Pesquisa,2015.

#### 4.1.8.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Na Figura 4.5 (a, b, c e d) estão apresentadas as micrografias das amostras dos Solos 1, 2, 3 e 4, respectivamente, após a adição do teor de 6,4% da associação polimérica nos solos estudados.

**Figura 4.5 - Microscopia eletrônica de varredura após o teor ótimo: (a) Solo 1, (b) Solo 2, (c) Solo 3 e (d) Solo 4**



**Fonte:** Dados da Pesquisa, 2015.

De acordo com a Figura 4.5 (a), observa-se que o Solo 1 apresenta estrutura morfológica heterogênea com presença de poucos poros, cristais hexagonais e aciculados. Para o Solo 2 (Figura 4.5 - b), observa-se uma estrutura morfológica com textura grosseira, regiões densificadas, poros arredondados e partículas dispersas na matriz que podem ser grãos de quartzo ou presença de



impurezas. O Solo 3 (Figura 4.5 - c) apresenta estrutura bastante densificada, e algumas partículas dispersas na matriz, que podem ser grãos de quartzo e poucos poros. Para o Solo 4, (Figura 4.5 - d) observa-se uma estrutura morfológica ligeiramente rugosa com regiões densificadas, apresentando grande redução da porosidade.

## **4.2 Ensaios Mecânicos**

### **4.2.1 Compactação**

A realização dos ensaios de compactação teve como objetivo observar eventuais modificações impostas pela adição da associação polimérica no teor de umidade ótima, no peso específico aparente seco máximo e na forma das curvas de compactação das misturas em estudo.

Na Figura 4.6 estão apresentados as tendências do comportamento efeito da estabilização dos solos estudados.

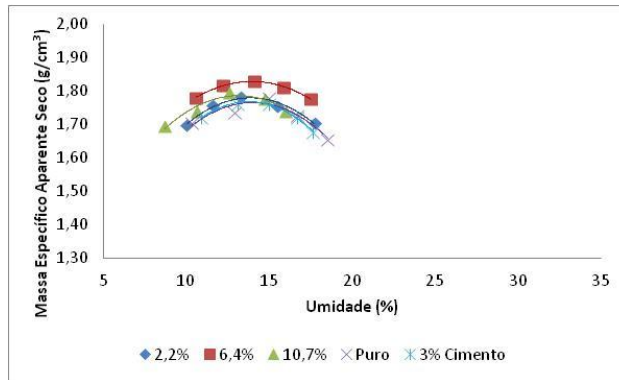
Os resultados obtidos para o ensaio de Compactação indicam que a adição da associação polimérica aos solos estudados resultou em um aumento do peso específico aparente seco máximo, possivelmente ocasionado pela ação do Polímero Acrílico Industrial que em o poder de unir as partículas de solo formando uma estrutura compósita, nos Solos 1, 2 e 3.

Para o Solo 4 houve redução gradual com o aumento do teor da associação polimérica possivelmente não ocorrendo o mesmo efeito dos outros solos por se tratar de uma estabilização granulométrica com adição do pó de pedra. Entende-se que o Polímero Acrílico Industrial agiu apenas na partículas do solos tornando uma mistura com pouca quantidade de finos e assim maior índices de vazios e menor peso específico aparente seco máximo.

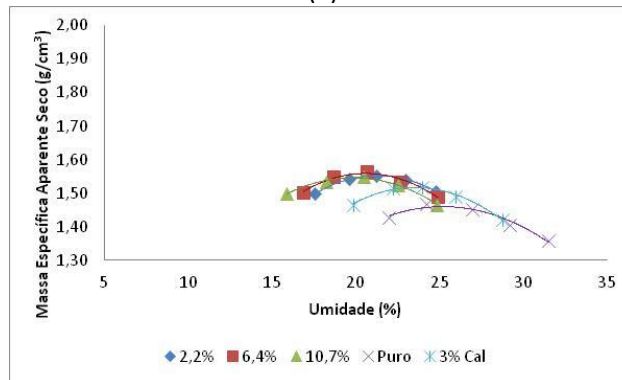
Ainda referente a estes resultados, pode-se observar que uma redução do teor de umidade ótima para todos os todos os solos estudados, possivelmente ocasionado pela ação do polímero Terradry que reduz a sensibilidade da ação da água nas partículas de solo.

Os solos estudados, com a adição de estabilizantes comuns (cal e cimento), não apresentaram variações semelhantes as que ocorreram com a associação polimérica.

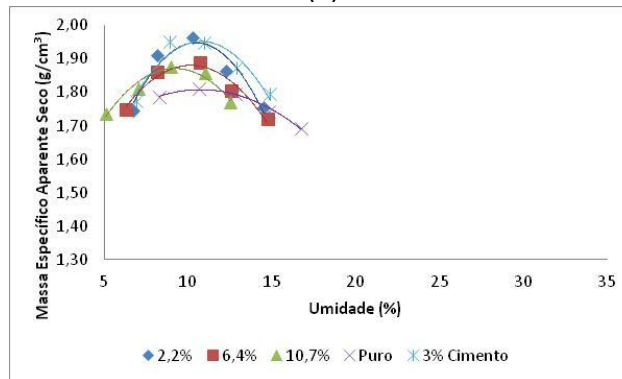
Figura 4.6 - Curvas de compactação: (a) Solo1, (b) Solo 2, (c) Solo 3 e (d) Solo 4



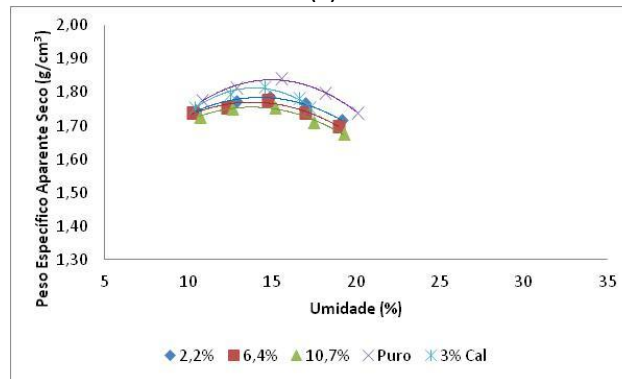
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Dados da Pesquisa, 2015.

#### 4.2.2 Índice de Suporte Califórnia - ISC

Na Figura 4.6 estão inseridos os resultados obtidos nos ensaios de ISC (CBR) para as amostras de solos misturados estudadas.

Em função dos resultados obtidos, observa-se que a adição da associação polimérica, para todos os solos estudados, acarretou em aumento gradativo no valor de ISC conforme aumento do teor da associação polimérica. A adição da composição de 10,7% da associação polimérica no Solo 3 apresentou resultado 34 vezes maior do que as amostras de solo puro.

Malanconi (2013) ao estudar solos com mesma Classificação HRB, observou aumento de 200% com a adição de 6% cimento, resultado este 16 vezes menor do que as amostras estabilizadas com o teor de 5% associação polimérica.

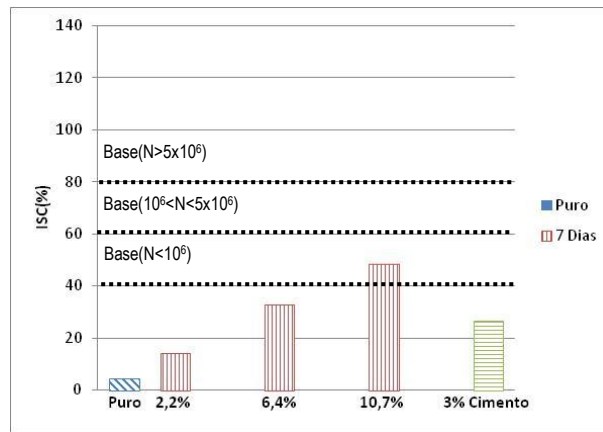
O comportamento mecânico, em termos de ISC, é explicado pela adição do Polímero Acrílico Industrial que age aumentando a peso específico aparente seco máximo do solo e conseqüente a capacidade de suporte do solo. A ação do Terradry que diminui a sensibilidade do solo ação da água auxiliando no aumento já que as amostra foram submetidas a inundação reduzindo a perda de capacidade de suporte devido a saturação.

Para as amostras de referência, pode-se observar um aumento significativo dos resultados para os Solos 1 e Solo 3, chegando no segundo, a ser maior que a composição com 6,4% da associação polimérica. Esse aumento significativo deve-se a presença de cimento, que aumenta a rigidez do solo e conseqüentemente dificulta a penetração do pistão.

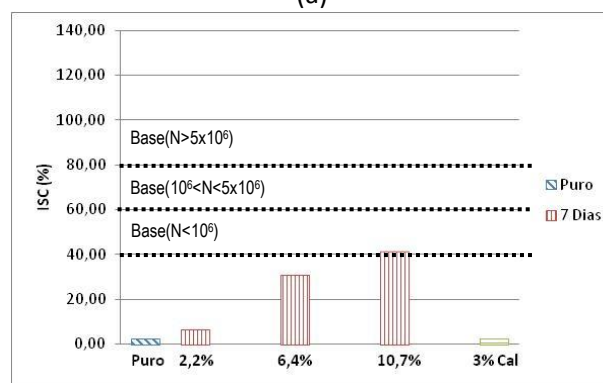
Analisando-se os resultados de ISC de acordo com a sua aplicação em camada de pavimentos rodoviários, verificou-se que a Norma DNIT ES- 098/2007 estabelece critérios, em termos de valores de ISC, para a utilização de solos em base granular de acordo com a solicitação do tráfego (número N) que o pavimento deverá suportar durante sua vida de serviço.

Para uma via com baixo volume de tráfego, correspondente a um número  $N < 10^6$ , o DNIT admite a utilização de uma camada de base com ISC mínimo de 40%. Para um número N entre  $10^6$  e  $5 \times 10^6$ , o DNIT especifica um valor de ISC igual ou maior do que 60%. Para  $N > 5 \times 10^6$  o valor de ISC mínimo é de 80%. Desse modo, a adição da associação polimérica elevou o ISC para valores de modo que o Solo 3 com 10,7% da associação polimérica pode ser utilizado para base com solicitações de tráfego pesado ( $N > 5 \times 10^6$ ), bem como os Solos 1 e 2, ambos adicionados a composição polimérica de 10,7% e o Solo 3 adicionado a composição de 6,4%, podem ser utilizados em bases de pavimentos de tráfego leve.

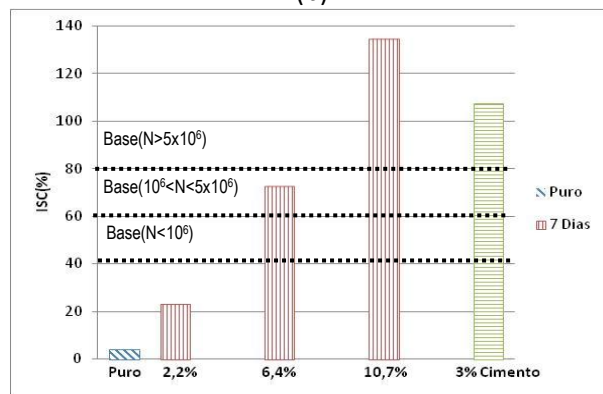
Figura 4.7 – Índice de suporte Califórnia: (a) Solo1, (b) Solo 2, (c) Solo 3 e (d) Solo 4



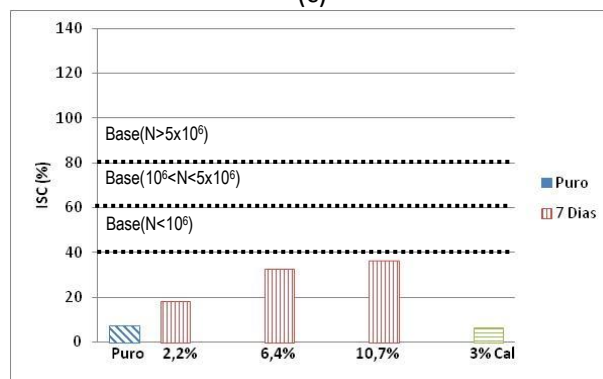
(a)



(b)



(c)



(d)

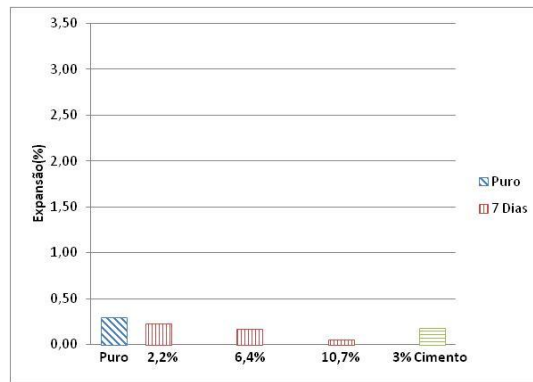
Fonte: Dados da Pesquisa, 2015.

Na Figura 4.7 estão inseridos os resultados de expansão para as amostras de solos em estudo. Em relação aos dados de expansão, é possível observar que a associação polimérica reduziu essa variável significativamente para todos os solos estudados. Para o Solo 2, a adição de 10,7% da associação polimérica resultou reduziu em 18 vezes a expansão em relação as amostra de solo puro. Comportamento mecânico explicado pela ação do polímero Terradry que impede a troca de íons entre as partículas de solo e água, deste modo, não ocorrendo a expansão.

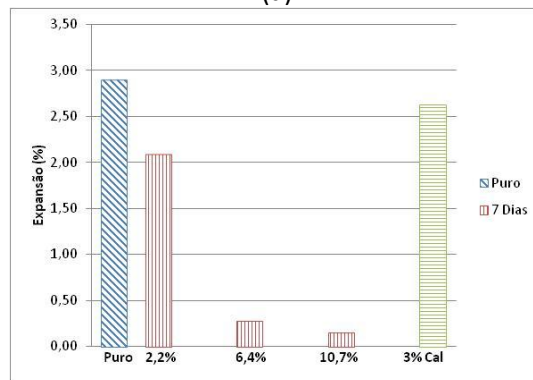
Segundo especificações do DNIT, os valores de expansão para sub-leito, reforço de sub-leito e sub-base e base devem ser inferiores a 2%,1% e 0,5%, respectivamente. Deste modo os Solos 2 e 4 que não atendiam as especificações do DNIT, com a adição de 6,4% e 10,7% da associação polimérica apresentaram valores de expansão menores que as preconizadas, possibilitando o uso destes solos para qualquer uma das camadas do pavimento.

A adição de estabilizantes comuns aos solos estudados não teve o efeito significativo quando comparado com o efeito da associação polimérica em termos de valores de expansão.

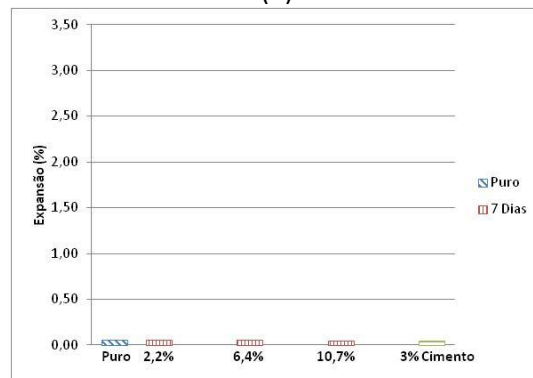
Figura 4.6 – Expansão do ensaio de ISC: (a) Solo1, (b) Solo 2, (c) Solo 3 e (d) Solo 4



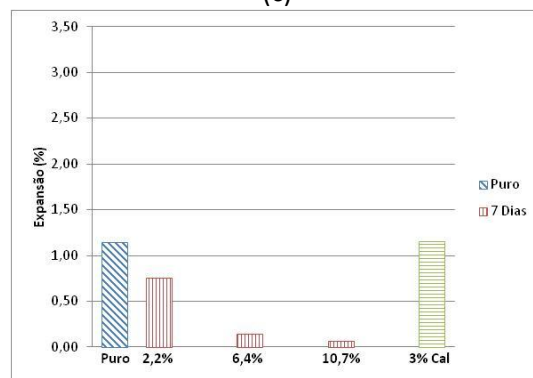
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Dados da Pesquisa, 2015.

### 4.2.3 Resistência à Compressão Simples – RCS

Na Figura 4.8 estão inseridos os resultados obtidos no ensaio de Resistência à Compressão Simples.

Os resultados de RCS indicam um aumento dos valores mediante o aumento do teor da associação polimérica, chegando a valores 6 vezes maiores para o Solo 3 com 28 dias de cura em relação ao solo puro.

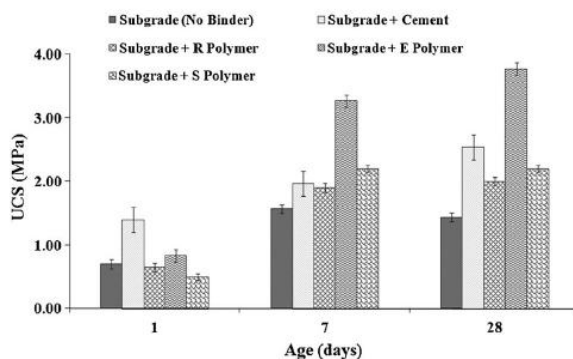
Foram observados ganhos com relação a variação do tempo de cura para todos os solos estudados, de modo que a amostra do Solo 4 com 10,7% de polímeros obtiveram valores de RCS maiores que o dobro com 28 dias de cura em relação a amostra com 7 dias de cura.

O aumento de RCS se dá pela ação do Polímero Acrílico Industrial que age aglutinando as partículas de solo formando uma estrutura compósita. As possíveis explicações para o aumento de RCS com o prolongamento do tempo de cura são devidos a ação do Polycure que tem como finalidade catalisar a ação do Polímero Acrílico Industrial.

As amostras estabilizadas com cimento apresentaram ganhos significativos, chegando ao aumento de 408% do Solo 3 com adição de 3% de cimento. Para os solos estabilizados com cal, o aumento máximo de RCS foi de 173% do Solo 2 com adição de 3% de cal, valor este inferior aos obtidos para o mesmo solo com adição de 3% e 5% de polímeros para 7 e 28 dias de cura.

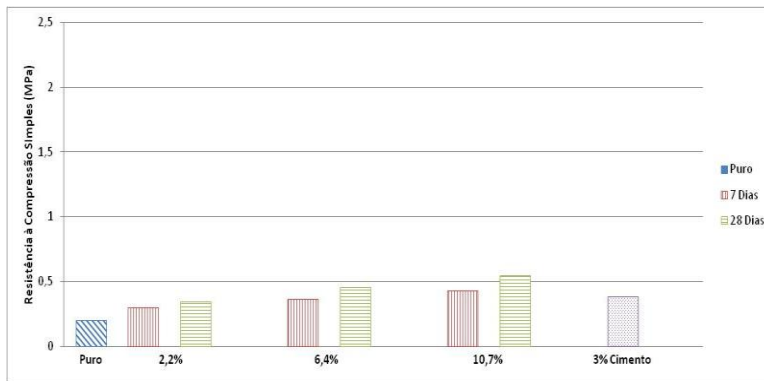
A pesquisa realizada por Iyengar *et al* (2013) evidenciou que o aumento nos valores de RCS, conforme a adição de polímeros bem como aumento no tempo de cura, como ilustrado na Figura 4.7.

**Figura 4.7 – Resultado de RCS para solo estabilizado com polímeros**

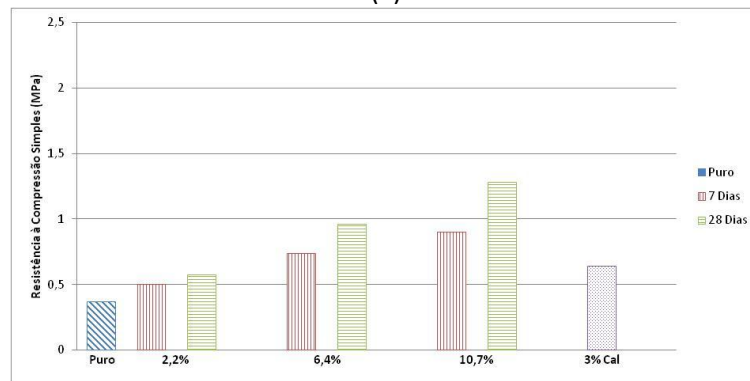


Fonte: Iyengar *et al* (2013)

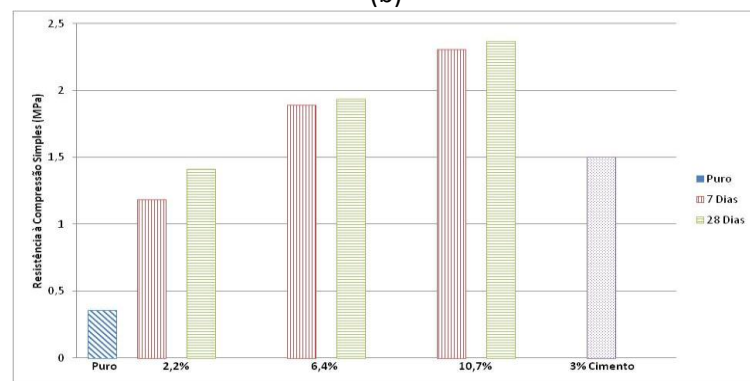
Figura 4.8 – Resistência à compressão simples: (a) Solo 1, (b) Solo 2, (c) Solo 3 e (d) Solo 4



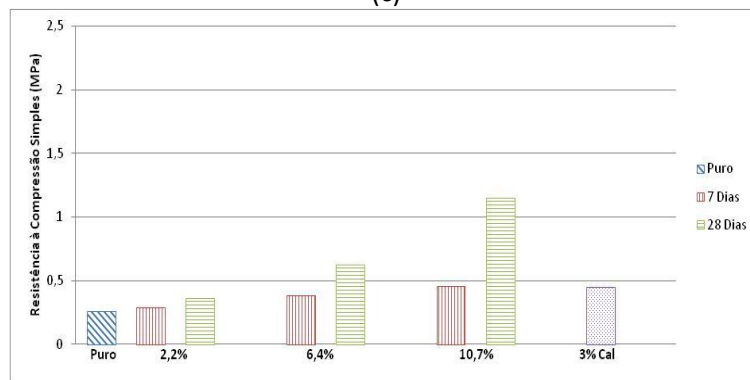
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Dados da Pesquisa, 2015.



Os resultados encontrados por Iyengar *et al* (2013) ainda indicam a influência do aumento da sucção conforme aumento do tempo de cura de solo não estabilizado. Pode-se inferir que a partir dos 7 dias de cura os polímeros utilizados na pesquisa se mostraram eficientes em relação ao aumento nos valores de RCS.

#### **4.2.4 Resistência à Tração por Compressão Diametral – RT**

Na Figura 4.9 estão inseridos os resultados do ensaio de tração por compressão diametral.

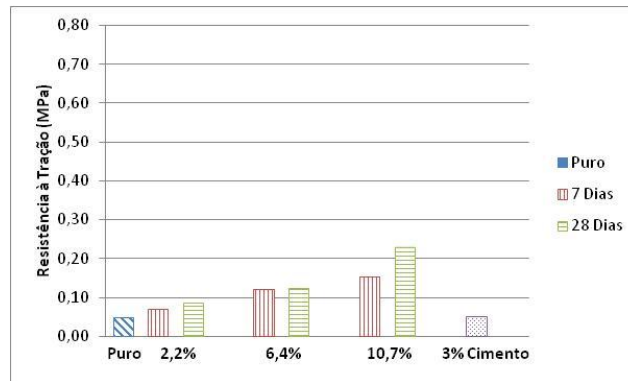
Os resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral indicam um crescimento nos valores conforme o aumento da adição da associação polimérica e o tempo de cura. Embora todos os solos estudados apresentem baixa resistência a tração, o Solo 3 com adição da composição polimérica de 10,7% apresentou RT médio de 0,77 MPa, valor esse considerado alto para solos, mostrando assim, elevando em aproximadamente 6 vezes a resistência à tração em relação as amostras do solo puro.

Observou-se a influência significativa do tempo de cura para o incremento da ação da associação polimérica, visto que todos os solos estudados tiveram ganhos de resistência a tração com o aumento da cura, chegando o Solo 4 a elevar a RT em 70% após 21 dias de cura para adição do teor de 10,7% da associação polimérica.

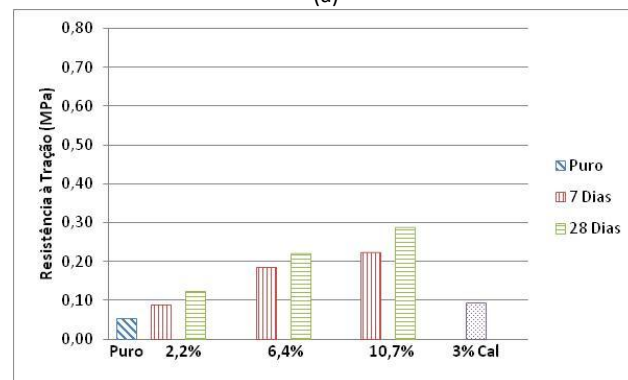
Em relação às amostra de referência, a adição de estabilizantes comuns não alteraram de maneira significativa os valores de RT para os Solos 1 e 4.

Para os outros solos, as adições resultaram em ganhos significativos, entretanto não atingiram a valores superiores aos obtidos pela adição de 2,2% de polímeros.

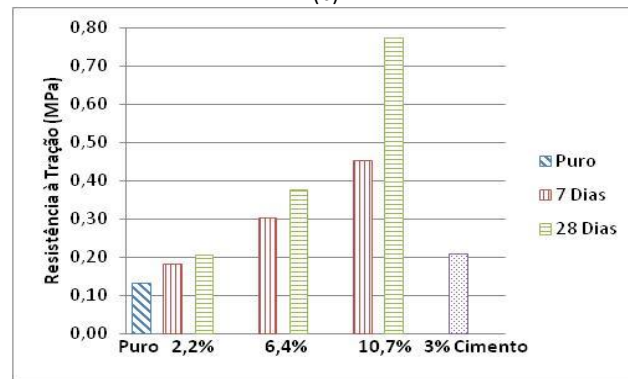
Figura 4.9 - Resistência à tração por compressão diametral : (a) Solo 1 , (b) Solo 2, (c) Solo 3 e (d) Solo 4



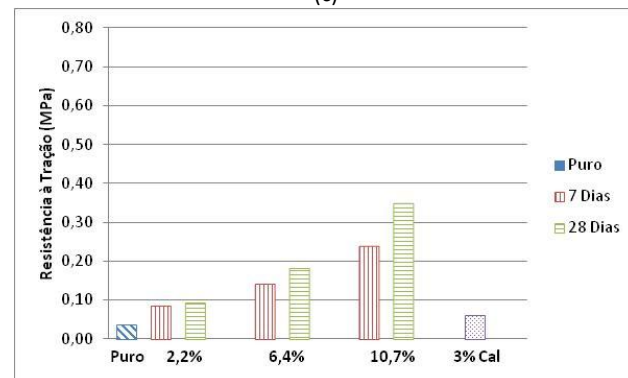
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Dados da Pesquisa, 2015.

#### 4.2.5 Módulo de Resiliência

A realização deste ensaio teve como objetivo avaliar o comportamento dos solos estabilizados analisando o seu comportamento em termos de resiliência, considerando-se a influência, nesta variável, do teor e tipo de estabilizante. Estes estudos se justificam pela maior representatividade deste procedimento para a análise em relação aos estudos utilizando o ISC e RCS na previsão do comportamento mecânico real das estruturas dos pavimentos quando considerado apenas as energias externas provenientes do carregamento repetidos.

Os modelos matemáticos clássicos utilizados nesta pesquisas são os que relacionam o Módulo de Resiliência com a tensão de confinamento( $\sigma_3$ ) e a tensão desvio ( $\sigma_d$ ), conforme descritos nas Equações 4.1 e 4.2, respectivamente.

$$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$$

**Equação 4.1**

$$M_R = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$$

**Equação 4.2**

$M_R$  : Módulo de Resiliência;

$\sigma_d$  : tensão desvio;

$\sigma_3$ : tensão de confinamento;

k: parâmetros de modelagem que definem numericamente cada modelo.

Um terceiro modelo foi utilizado relacionando as tensões de confinamento e de desvio com  $M_R$ , gerando assim Modelo Composto. A Equação 4.3 representa o Modelo Composto utilizado nesta pesquisa.

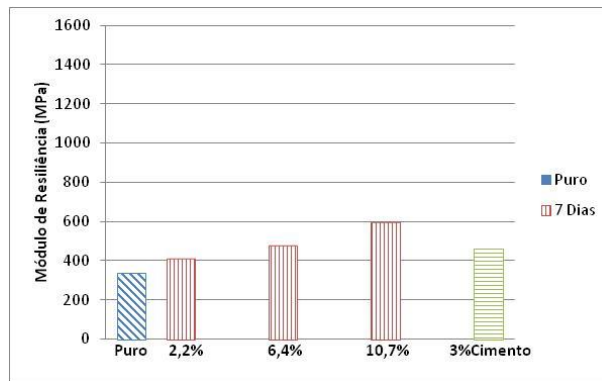
$$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$$

**Equação 4.3**

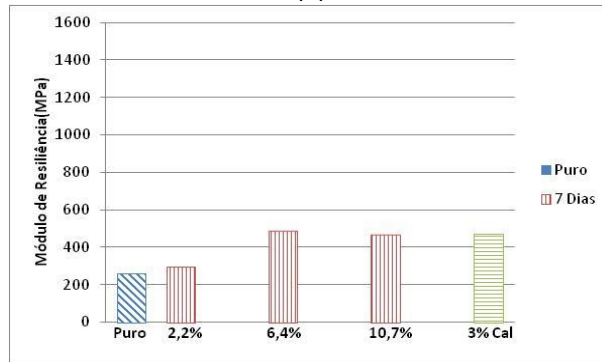
Os gráficos dos modelos clássicos e composto de todos os solos estudos com e sem estabilizantes estão ilustrados nos apêndices deste trabalho.

Na Figura 4.10 estão inseridos os resultados obtidos para ensaio de Módulo de Resiliência. Para realizar a avaliação dos parâmetros do comportamento de cada amostra estudada e para fins de comparação de seus resultados com os de outras pesquisas, o Módulo de Resiliência de cada amostra, dado pelo modelo composto, foi o resultante da aplicação do último par de tensões do ensaio triaxial dinâmico, que representa o nível de tensões mais severo do ensaio -  $\sigma_d = 0,412$  MPa e  $\sigma_3 = 0,137$  MPa.

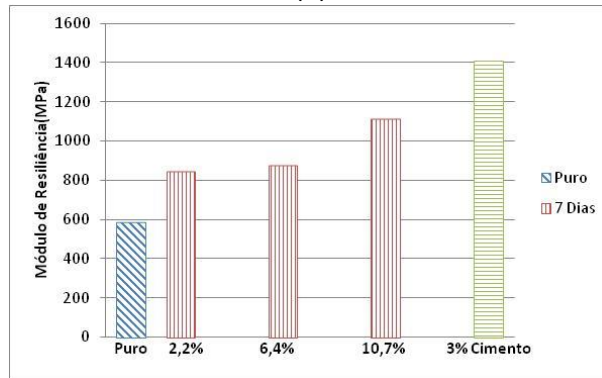
Figura 4.10 – Módulo de Resiliência : (a) Solo 1 , (b) Solo 2, (c) Solo 3 e (d) Solo 4



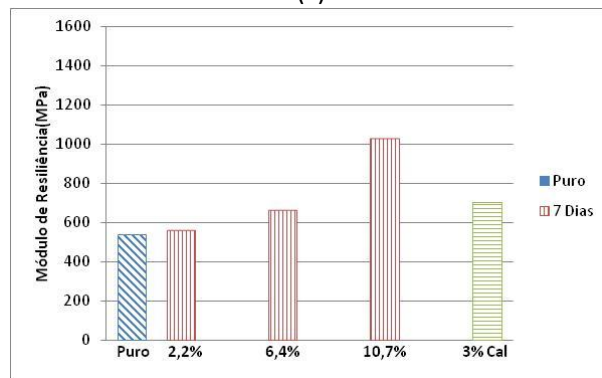
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Dados da Pesquisa, 2015.

Nas Tabelas 4.10, 4.11 e 4.12 estão inseridos os parâmetros de modelagem e os Coeficientes de Determinação obtidos para os três modelos utilizados nesta pesquisa para os Solos 1,2,3 e 4, respectivamente, estabilizados e sem estabilizantes

**Tabela 4.10 – Valores dos coeficientes de regressão para o Solo 1**

Solo 1	$M_R=k_1*\sigma_3^{k_2}$			$M_R=k_1*\sigma_d^{k_2}$			$M_R=k_1*\sigma_3^{k_2*}\sigma_d^{k_3}$			
	$k_1$	$k_2$	$R^2$	$k_1$	$k_2$	$R^2$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$R^2$
Puro	385	0,11	0,54	313	0,05	0,14	414	0,19	-0,08	0,69
2,2%	374	-0,05	0,06	328	-0,13	0,47	426	0,21	-0,27	0,80
6,4%	544	0,03	0,01	417	-0,08	0,19	635	0,31	-0,29	0,88
10,7%	717	0,08	0,19	560	-0,01	0,01	810	0,27	-0,19	0,80
REF	460	-0,02	0,01	378	-0,12	0,37	545	0,27	-0,30	0,86

Fonte: Dados da Pesquisa,2015.

**Tabela 4.11 - Valores dos coeficientes de regressão para o Solo 2**

Solo 2	$M_R=k_1*\sigma_3^{k_2}$			$M_R=k_1*\sigma_d^{k_2}$			$M_R=k_1*\sigma_3^{k_2*}\sigma_d^{k_3}$			
	$k_1$	$k_2$	$R^2$	$k_1$	$k_2$	$R^2$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$R^2$
Puro	136	-0,25	0,72	176	-0,20	0,71	144	-0,11	-0,15	0,84
2,2%	271	-0,10	0,18	250	-0,16	0,69	319	0,18	-0,28	0,89
6,4%	632	0,08	0,27	450	-0,00	0,00	709	0,27	-0,19	0,98
10,7%	593	0,04	0,03	438	-0,08	0,15	732	0,37	-0,33	0,85
REF	462	-0,06	0,08	413	-0,12	0,56	545	0,19	-0,24	0,88

Fonte: Dados da Pesquisa,2015.

**Tabela 4.12 -Valores dos coeficientes de regressão para o Solo 3**

Solo 3	$M_R=k_1*\sigma_3^{k_2}$			$M_R=k_1*\sigma_d^{k_2}$			$M_R=k_1*\sigma_3^{k_2*}\sigma_d^{k_3}$			
	$k_1$	$k_2$	$R^2$	$k_1$	$k_2$	$R^2$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$R^2$
Puro	673	0,13	0,47	526	0,06	0,14	707	0,20	-0,07	0,54
2,2%	1987	0,45	0,88	1048	0,29	0,54	2306	0,51	-0,01	0,92
6,4%	1114	0,21	0,68	955	0,19	0,90	1030	0,03	0,19	0,91
10,7%	1852	0,36	0,78	1321	0,31	0,85	1909	0,20	0,22	0,92
REF	2670	0,32	0,95	1644	0,18	0,50	2919	0,40	-0,07	0,98

Fonte: Dados da Pesquisa,2015.

**Tabela 4.13 - Valores dos coeficientes de regressão para o Solo 4**

Solo 4	$M_R = k_1 * \sigma_3^{k_2}$			$M_R = k_1 * \sigma_d^{k_2}$			$M_R = k_1 * \sigma_3^{k_2} * \sigma_d^{k_3}$			
	$k_1$	$k_2$	$R^2$	$k_1$	$k_2$	$R^2$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$R^2$
Puro	556	0,04	0,03	440	-0,06	0,09	6536	0,27	-0,24	0,59
2,2%	564	0,03	0,37	526	0,01	0,08	575	0,06	-0,03	0,50
6,4%	658	-0,02	0,01	558	-0,10	0,36	747	0,22	-0,25	0,83
10,7%	1983	0,27	0,88	1262	0,15	0,38	2043	0,38	-0,12	0,95
REF	768	0,01	0,01	627	-0,07	0,21	899	0,26	-0,24	0,81

Fonte: Dados da Pesquisa, 2015.

Os resultados obtidos indicam um aumento no Módulo de Resiliência para todos os solos estudados conforme o incremento no teor da associação polimérica. Fato este explicado pela ação do Polímero Acrílico Industrial que iteração unindo as partículas de solo, tornando o as amostras estabilizadas mais rígidas.

A adição de 3% de cimento ao Solo 3 resultou em Módulos de Resiliência superiores aos obtidos com adição da associação polimérica. Segundo COLLARTE-CONCHA (1986) a adição de cimento a solos geram reações químicas do cimento hidratado, no qual são desenvolvidos vínculos químicos entre a superfície do grão de cimento hidratado e a parte da partícula de solo que contacta esse grão de cimento .

Macedo (2004) ao estudar o efeito no Módulo de Resiliência de solos estabilizados com cimento encontrou valores na faixa de 2000 MPa para adição de 3% do estabilizante a solo A – 2 - 4 aos 7 dias de cura, valor esse cinco vezes maior do que o  $M_R$  do solo puro.

Analisando os parâmetros dos diferentes modelos estudados, verificou-se que os coeficientes de determinação relativos aos modelos em função da tensão de confinamento e do invariante de tensões foram significativos para os modelos clássicos, com exceção do Solo 3, Fato esse explicado por ser um solo granular com baixa coesão.

Segundo Medina (1997) os modelos matemáticos que melhor representam a dependência do Módulo de Resiliência ao estado de tensões atuante para os materiais granulares são definidos principalmente em função das tensões confinantes ( $\sigma_3$ ) ou da soma das tensões principais ( $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ )

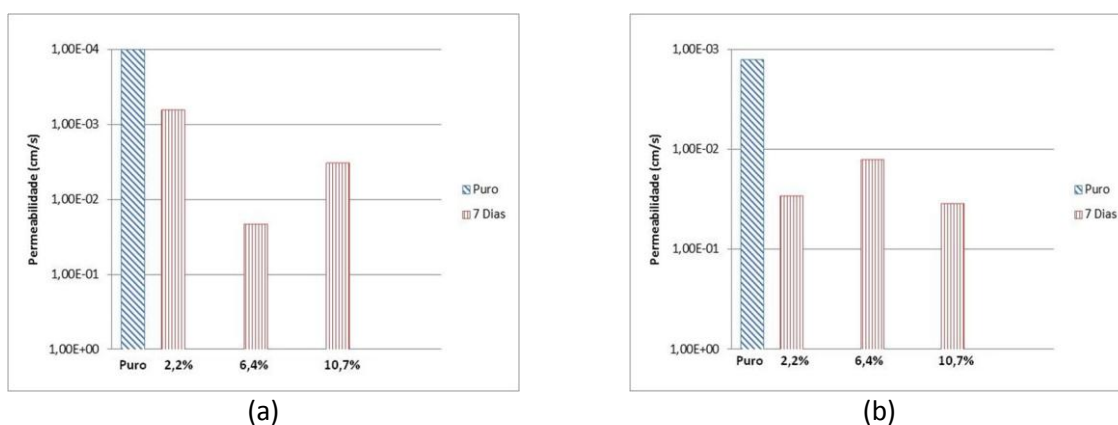
Na análise dos valores  $R^2$  apresentados para o Modelo Composto, observamos uma maior relação entre as variáveis em relação aos modelos clássicos, chegando a valores na ordem de 0,98.

Ainda em relação aos coeficientes obtidos para os modelos estudados foi observado um aumento no coeficiente  $k_1$  em todos os modelos conforme o incremento no teor da associação polimérica, causado pelo acréscimo do Modulo de Resiliência.

#### 4.2.6 Permeabilidade

Na Figura 4.11 estão inseridos os resultados obtidos com o ensaio de permeabilidade. Não foi possível executar o ensaio nos Solos 2 e 4 pois o permeâmetro disponível no Laboratório de Engenharia de Pavimentos – LEP não realiza leituras em solos com permeabilidade baixa.

Figura 4.11 – Permeabilidade dos Solos (a) 1 e (b) 3



Fonte: Dados da Pesquisa, 2015.

Os resultados de permeabilidade indicam incremento dos valores deste parâmetro mediante a adição da associação polimérica. Para as amostra do Solo 1, que possuía permeabilidade da ordem  $10^{-4}$ , típicas de areias argilosas e de siltes, com a adição da associação polimérica, a permeabilidade aumentou para ordem  $10^{-2}$ , típicas de areias médias, com a adição de 6,4%. O mesmo foi observado para a amostra do Solo 3 que aumentou a permeabilidade da ordem  $10^{-3}$ , típicos de areias siltosas, para ordem de  $10^{-2}$ . O aumento da permeabilidade é explicada pela ação de conjunta do Polímero Acrílico Industrial e do polímero Terradry, que formam uma estrutura compósita e diminuem a sensibilidade do solo à ação da água.

### **4.3 Ensaios de Resistência ao Desgaste**

Os ensaios de LWT e WTAT tiveram como objetivo avaliar a capacidade dos solos puros e estabilizados a resistirem aos esforços abrasivos gerados pelo tráfego, ou seja, verificar a potencialidade da aplicação de solos estabilizados em pavimentos não revestidos.

#### **4.3.1 Loaded Wheel Test (LWT)**

Na Figura 4.12 estão inseridos os resultados obtidos como o ensaio de LWT para as amostras de solos estudados.

A adição da associação polimérica mostrou-se eficiente na análise de desgaste pelo ensaio de LWT. Para todos os solos estudados, a adição de 6,4% e 10,7% da associação polimérica reduziu o afundamento da trilha de roda de modo que os solos estudados suportaram a ação dos ciclo máximo preconizado para este ensaio. As amostras de referência apresentaram desgaste menores do que o solo puro. Com exceção do Solo 4, não que suportou o desgaste promovido pelos os ciclos de aplicação de carga.

#### **4.3.1 Wet Track Abrasion Test (WTAT)**

Na Figura 4.13 estão inseridos os resultados obtidos com o ensaio de WTAT.

A analisar os resultados obtidos no ensaio de WTAT, pode-se observar que a adição polimérica reduz o desgaste para todos os solos estabilizados. Para o solo Solo 1 houve diminuição gradativa do desgaste, conforme aumento no teor de polímero, redução esta também observada para a adição de cimento. Entretanto a redução com este estabilizante foi inferior a encontrada com a adição de 5% de polímeros.

Para o Solo 2 pode-se observar uma continuidade em relação a redução desgaste, provavelmente devido a característica argilosa da amostra de solo estabilizada a qual apresentou um desgaste superficial baixo.

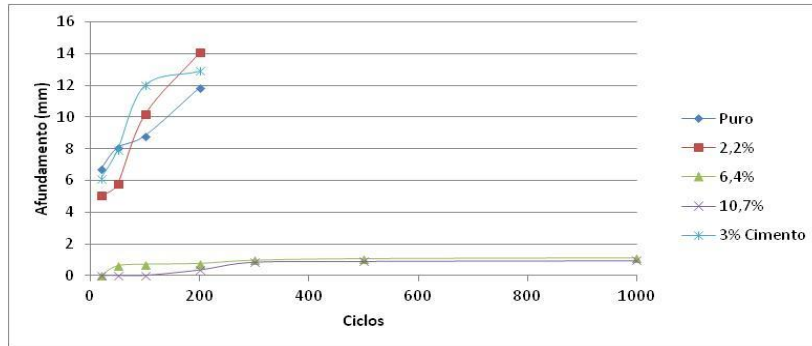
O Solo 3 apresentou redução gradativa conforme aumento do teor de polímeros, chegando a reduzir em 14 vezes o desgaste superficial para a adição de 10,7% da associação polimérica em relação as amostra de solo puro. A amostra de referência obteve redução de desgaste mas não maior do que a adição de 2,2% de polímero.

A adição da associação polimérica ao Solo 4 também mostrou-se eficiente na redução do desgaste, reduzindo em cerca de 3 vezes o desgaste superficial para a composição com 10,7% de

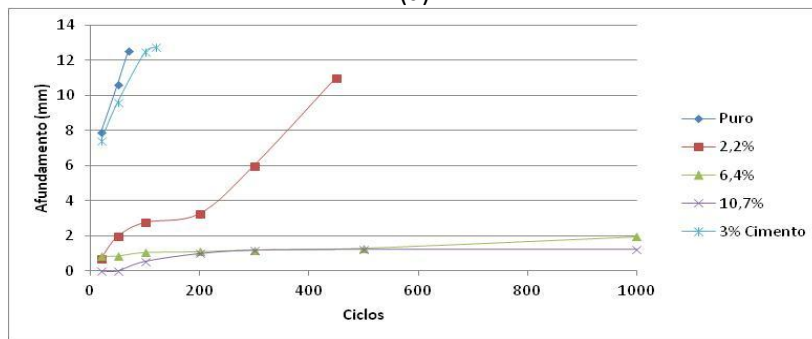


polímeros. A adição de 3% de cal ao solo reduziu o desgaste em 67,5%, diminuição essa inferior ao obtido para 2,2% de adição da associação polimérica.

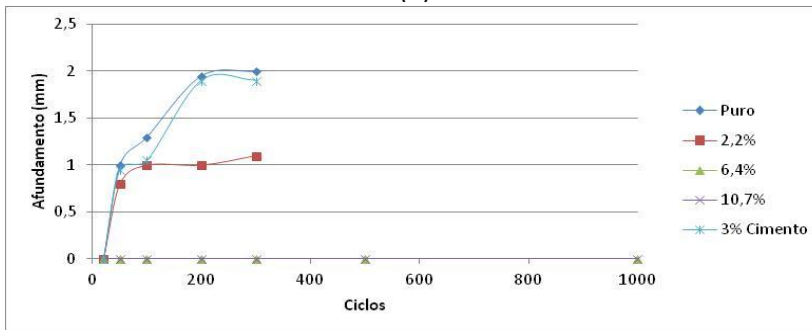
Figura 4.12 – LWT : (a) Solo 1, (b) Solo 2, (c) Solo 3 e (d) Solo 4



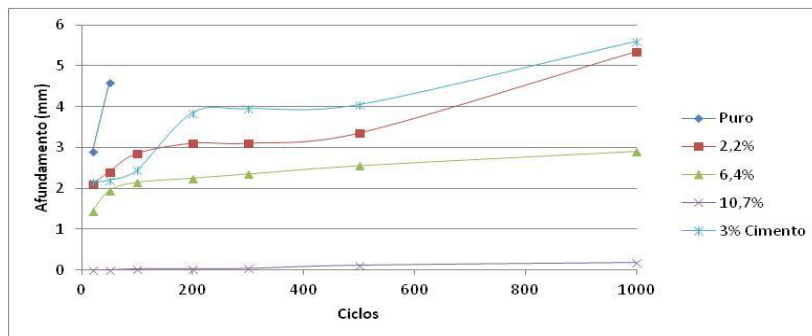
(a)



(b)



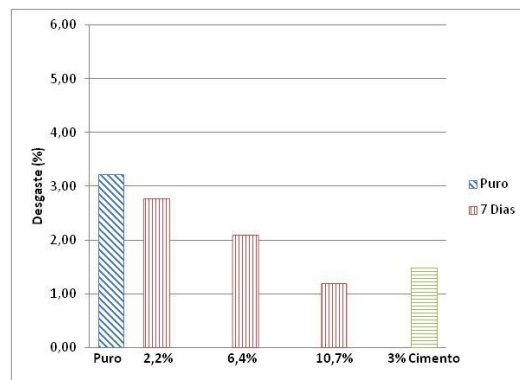
(c)



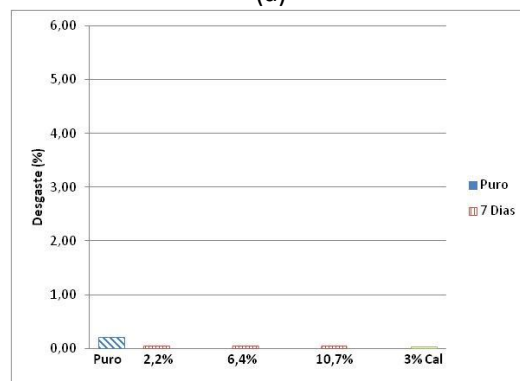
(d)

Fonte: Dados da Pesquisa, 2015.

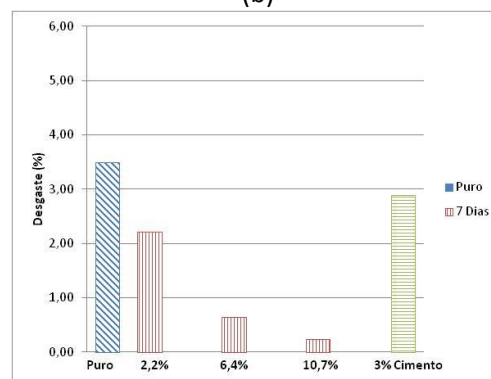
Figura 4.13 - WTAT : (a) Solo 1, (b) Solo 2, (c) Solo 3 e (d) Solo 4



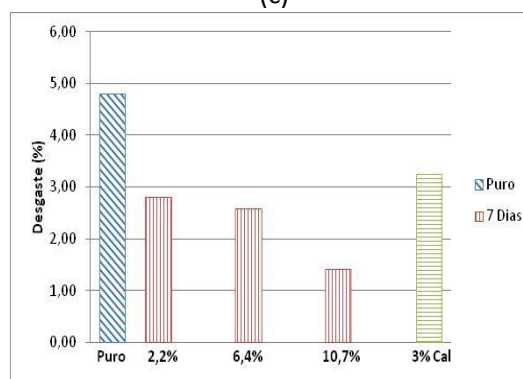
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Dados da Pesquisa, 2015.

#### **4.4 Considerações Finais.**

##### **4.4.1 Quanto à Caracterização Física**

Observou-se nos solos estudados a predominância de sílica e óxido de alumínio

Os argilominerais encontrados nos solos estudados foram basicamente quartzo e caulinita.

A partir da microscopia de varredura observou-se para o Solo 1 e Solo 2, uma estrutura morfológica bastante grosseira e heterogênea com presença de poros, e partículas dispersas.. O Solo 3 apresenta uma estrutura morfológica grosseira, com regiões densificadas e presença de poros e o Solo 4 observou-se uma superfície heterogênea com muitos poros, e grãos irregulares.

##### **4.4.2 Quanto aos Ensaio de Comportamento Mecânico**

A adição da associação polimérica aumentou o peso específico aparente seco máximo dos Solos 1,2 e 3, reduzindo a umidade ótima.

No Solo 4 a adição da associação polimérica reduziu o peso específico aparente seco máximo e a umidade ótima.

A adição da associação polimérica elevou gradativamente conforme aumento no teor de associação polimérica para todos os ensaios de comportamento mecânico (ISC, RCS, RT, MR)

Entre os teores estudados, a adição de 10,7% da associação polimérica obteve os melhores resultados para os ensaios de comportamento mecânico.

Para todos os ensaios de comportamento mecânico, as amostras de referencia tiveram resultados inferiores aos obtidos com a adição de 10,7% da associação polimérica.

Verificou-se a importância do tempo de cura para a reação da associação polimérica, pois todos as amostras estabilizados com 28 dias de cura tiveram melhores resultados que as amostras estabilizadas com 7 dias de cura.

A adição da associação polimérica elevou o ISC para valores de modo que o Solo 3 com 5% da associação polimérica possa ser utilizado para base com solicitações de tráfego pesado ( $N > 5 \times 10^6$ ),

Os Solos 1 e 2, ambos com a adição da composição polimérica de 10,7% e o Solo 3 adicionado a composição de 6,4% podem ser utilizados em bases de pavimentos de tráfego leve.

Com relação aos resultados de expansão os Solos 2 e 4 que não atendiam as especificações do DNIT, com a adição de 6,4% e 10,7% da associação polimérica apresentaram valores de expansão

menores que as preconizadas, possibilitando o uso destes solos para qualquer uma das camadas do pavimento.

Para os Solos 1 e 3, estabilizados com associação polimérica observou o aumento da permeabilidade.

#### **4.4.3 Quanto aos Ensaio de Desgaste**

Para o ensaio de LWT, as amostras estabilizados com associação polimérica reduziram o desgaste da trilha de roda, de modo que para a adição dos teores de 6,4% e 10,7%, as amostras resistiram a todos os ciclos preconizados pelo ensaio.

Verificou-se a redução do desgaste superficial a partir dos resultados do ensaio de WTAT visto que as amostras estabilizadas com a associação polimérica tiveram menor deterioração.

#### **4.4.4 Quanto aos Ensaio Ambientais**

O polímero Polycure não obteve valores significativos de toxicidade, periculosidade e inerticidade para os extratos lixiviados e solubilizados onde todos os constituintes, apresentam concentrações inferiores aos limites estabelecidos pela NBR 10004/2004 (ABNT), caracterizando assim o resíduo com Classe II B – Não Perigoso (Inerte).

## 5 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho bem como as sugestões para futuras pesquisas.

### 5.1 *Conclusões*

A adição da associação polimérica elevou os parâmetros de resistência mecânica (capacidade de suporte), em termos de Índice de Suporte Califórnia (ISC), de Resistência a Compressão Simples (RCS), Resistência a Tração por Compressão Indireta ou Diametral (RT) e do Módulo de Resiliência (MR).

A partir da análise dos resultados em termos de Resistência ao Desgaste, quando submetidos aos ensaios- WTAT e LWT, pode-se inferir que adição da associação polimérica mostrou-se bastante eficiente na estabilização dos solos estudados.

Os resultados possibilitam inferir que, para os solos estudados, a adição da associação polimérica é eficaz e viável tecnicamente para ser utilizada como material estabilizante de camadas de pavimentos rodoviários revestidos ou como base de pavimentos não revestidos e que podem ser submetidos a tráfegos leves a pesados onde o Numero de Operações do Eixo Padrão poderá ser superior ao valor de  $10^6$  ( $N > 10^6$ ).

### 5.2 *Sugestões para Futuras Pesquisas*

No estudo realizado ficou evidenciado a eficácia do uso da associação polimérica em estabilização de solos para utilização em pavimentos rodoviários, porém será necessária a realização de outros estudos com vistas a consolidação do uso destes aditivos na estabilização de solos para uso em camadas de pavimentos rodoviários.

Com isso, sugere-se para futuras pesquisas:

- a) verificar a influência da sucção nas amostras estabilizadas com a associação polimérica mediante o uso da técnica de papel filtro;
- b) estudar a relação entre tensões e deformações para misturas de solos estabilizados com a associação polimérica por meio de ensaios triaxiais com carregamentos estáticos e de cisalhamento direto;
- c) construir um trecho experimental com base composta por solo estabilizado com a associação polimérica com frequentes medições de desempenho para possibilitar correlacionar o comportamento em campo com os resultados dos ensaios adaptados de LWT e WTAT.

## 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- \_\_\_\_\_. (1982). NBR 7207. *Terminologia e classificação de pavimentação*. Rio de Janeiro.
- \_\_\_\_\_. (1984). NBR 6459. *Solo - Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- \_\_\_\_\_. (1984). NBR 6508. *Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica e os procedimentos para determinação do Limite de Plasticidade e Limite de Liquidez*. Rio de Janeiro.
- \_\_\_\_\_. (1984). NBR 7180. *Solo - Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- \_\_\_\_\_. (1984). NBR 7181. *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- \_\_\_\_\_. (1986). NBR 6457. *Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro.
- \_\_\_\_\_. (1986). NBR 7182. *Solo - Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- \_\_\_\_\_. (1990). NBR 12025. *Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.
- \_\_\_\_\_. (1991). NBR 5736. *Cimento Portland pozolânico*. Rio de Janeiro.
- \_\_\_\_\_. (2002). NBR 14545. *Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável*. Rio de Janeiro.
- \_\_\_\_\_. (2002). NBR 14841. *Microrrevestimentos a frio e lama asfáltica — Determinação de excesso de asfalto e adesão de areia pela máquina LWT*. Rio de Janeiro.
- \_\_\_\_\_. (2003) NBR 7175. *Cal hidratada para argamassas – Especificações*. Rio de Janeiro
- \_\_\_\_\_. (2004). NBR 10004. *Resíduos sólidos – classificação*. Rio de Janeiro
- \_\_\_\_\_. (2004). NBR 10005. *Procedimento para obtenção de extrato de lixiviado de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro.
- \_\_\_\_\_. (2004). NBR 10006. *Procedimento para obtenção de extrato de solubilizado de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro.
- \_\_\_\_\_. (2014). NBR 14756. *Microrrevestimentos a frio e lama asfáltica — Determinação de perda por abrasão úmida (WTAT)*. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. DNIT – ES 301/97 (1997). *Pavimentação – sub-base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço*. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. DNIT – ES 303/97 (1997). *Pavimentação – base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço*. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. DNIT – ME 049/94 (1994). *Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas*. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. DNIT – ME 134/2010 (2010). *Pavimentação asfáltica – Solos – Determinação do módulo de resiliência– Método de ensaio*. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. DNIT – ME 136/2010 (2010). *Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. DNIT – ME 138/2010 (2010). *Pavimentação – Reforço do subleito - Especificação de serviço*. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. DNIT – ME 162/94 (1994). *Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas*. Rio de Janeiro.

AZAMBUJA, M. A. A. *Contribuição ao estudo geotécnico de solos em Viçosa – MG*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Viçosa, 1981.

AZEVEDO, A. L. C. *Estabilização de solos com adição de cal: um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem após a adição de cal*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.

BALBO, J. T. *Pavimentação asfáltica – materiais, projeto e restauração*. São Paulo; Oficina de Textos, 2007

BATALIONE, G. *Estabilização de solos tropicais com a utilização de rejeitos finos de pedreira de uma rocha granítica* Dissertação de Mestrado. Brasília, 2007.

BAUER, L. A. F. *Materiais de construção*. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1987.

BERNUCCI, L. B; MOTTA, L. M. G; CERATTI, J. A. P; SOARES, J. B. *Pavimentação asfáltica – formação básica para Engenheiros*. ABEDA, Rio de Janeiro, 2007.

CALLISTER, W. D., *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. John Wiley & Sons, Inc., 2002

- CANEVAROLO, S. V. *Ciências dos polímeros*. Artliber, São Paulo, 2002.
- CNT, Pesquisa de Rodovias, Confederação Nacional de Transporte, 18ª Edição, Goiânia, GO, 2014.
- COLLARTE-CONCHA, L.M. (1986). "Estudo da Fadiga de duas Misturas de Solo Cimento". Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- CORDEIRO, J. F. Estabilização química é solidificação do resíduo oleoso gerado nas atividades de E & P de petróleo, com solo para uso em camadas de bases e/ou sub-bases de pavimentos rodoviários. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.
- DUQUE NETO, F.S. *Proposição de metodologia para a escolha de solo e dosagem de antipo com emulsão de xisto*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.
- EMMERT, F. *Avaliação do emprego de técnica de estabilização de solo na melhoria de estradas florestais da região de Niquelândia-GO*. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, UNB, Brasília, 2010.
- GONDIM, L. M. *Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do Agropólo do baixo jaguaribe/estado do Ceará*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, 2008.
- GUIMARÃES, J.E.P. *Estabilização de solos com cal – Princípios básicos*. Associação Brasileira dos Produtores de Cal. São Paulo, 1992, 102p.
- GUIMARÃES, P. A. *Estudo da aderência entre camadas asfálticas de pavimentos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012
- INGLES, O. G. *Advances in soil stabilization*. Revista Pure Appl. Chem, v. 18, n. 11, pp. 201-309, 1968.
- INGLES, O.G. & METCALF, J.B. *Soil Stabilization Principles and Practice*. Butterworths, Sydney, Australia, 374p, 1972
- IPEA, Brasil em Desenvolvimento : Estado, planejamento e políticas públicas. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada., Brasília , 2010.



IYENGAR, S. R; MASAD, E; RODRIGUEZ, A. K., BAZZI, H. S; LITTLE, D.; HANLEY, H. J. M., *Pavement Subgrade Stabilization Using Polymers: Characterization and Performance*. Journal of Materials In Civil Engineering, pp 472-483, 2013.

LAMBE, T. W., MICHAELS, A. *Altering soil properties with chemicals*. Chem. Eng. N., v. 32, n.6, pp 488-492, 1954.

LIMA, D.C.; RÖHM, S. A. & BARBOSA, P. S. A. *Estabilização de solos II – Técnicas e aplicações a solos da microrregião de Viçosa*. Empresa Universitária, Viçosa-MG, 32p, 1993.

LOVATO, R. S. Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

LUCENA, L. C. F. L, *Estudo da aplicação da mistura solo-lodo em base e subbase de pavimentos*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil– Universidade Federal de Pernambuco, 2012.

LUCENA, F.B., Ferreira, H.C e Araújo, R.N.A *Uso de emulsão catiônica na estabilização de solos lateríticos* In: Anais da 17ª Reunião Anual de Pavimentação Anais. Curitiba, PR, 1986.

MALANCONI, M. *Considerações sobre misturas de solos tropicais estabilizados quimicamente para uso como camada de pavimento urbano*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de São Carlos, 2013.

MICIELLI JR, *Comportamento de Solos do Estado do Rio de Janeiro Estabilizados com Emulsão Asfáltica*. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006.

MACÊDO, M. M.. Solos modificados com cimento - efeito no módulo de resiliência e no dimensionamento de pavimentos. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife , 2004.

MARQUES, G. L. O. *Estabilização dos Solos para Fins de Pavimentação*. Notas de Aula, Capítulo 4. Juiz de Fora, 2009.

MORAWETS, H. *Polymers: the origins and growth of a science*. John Wiley, New York, 1998.

PETRUCCI, E. G. R. *Material de construção*. Porto Alegre, Globo, 1978.

PAULA, T. M. *Melhoramento de solos: adição de cimento, microsilica e cinza de casca de arroz em um silte orgânico*. Trabalho de diplomação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

QUEIROZ, F. A. *Utilização de material fresado para aplicação em camadas estabilizadas de sub-bases de pavimentos rodoviários*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2011.

RAUCH, A. F., HARMON, J. S., KATZ, L. E., LILJESTRAND, H. M. Measured effects of liquid soil stabilizers on engineering properties of clay. *Transp. Res. Rec.*, 1787, 33–41, 2002.

ROSA, J. B.; FERREIRA, C. J; GUIMARARÃES. R.C. *Estabilização de solos com cal para uso em pavimentação*. UEG, Anápolis, 2006

SANTOS, C.B. *Utilização de resíduos oleosos provenientes das atividades de exploração e produção de petróleo para aplicação em camadas estabilizadas de bases e sub-bases de pavimentos rodoviários*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2011.

SENÇO, W. *Manual de técnicas de pavimentação*. São Paulo, PINI, 2001.

SOBREIRA, D. S. V. *Comparação entre os métodos de compactação de solos por impacto e por amassamento*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

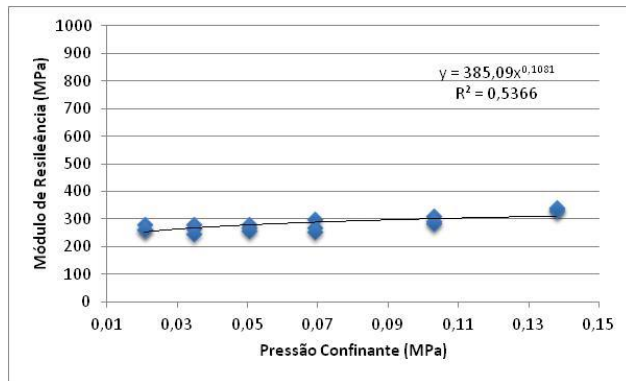
SOLIZ, V. V. P. *Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2007.

TINGLE, J. S., NEWMAN, J. K., LARSON, S. L., WEISS, C. A., and RUSHING J. F. *Stabilization Mechanisms of Nontraditional Additives*. *Journal of the Transportation Research Board*, No. 1989, Vol. 2, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2007.

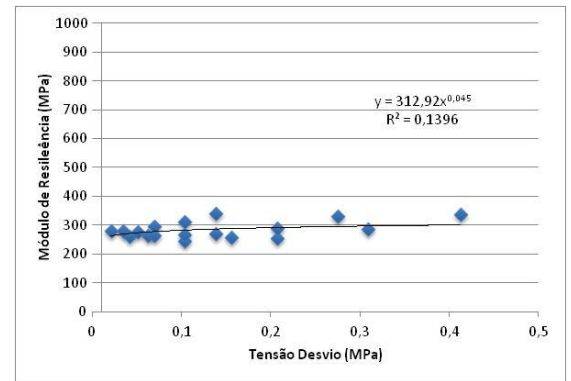
YODER, E.J, WITCZAK, M.W. *Principles of Pavement Design* 2° edição, John Wiley & Sons, Inc, New York, Estados Unidos, 1975.

# APÊNDICES

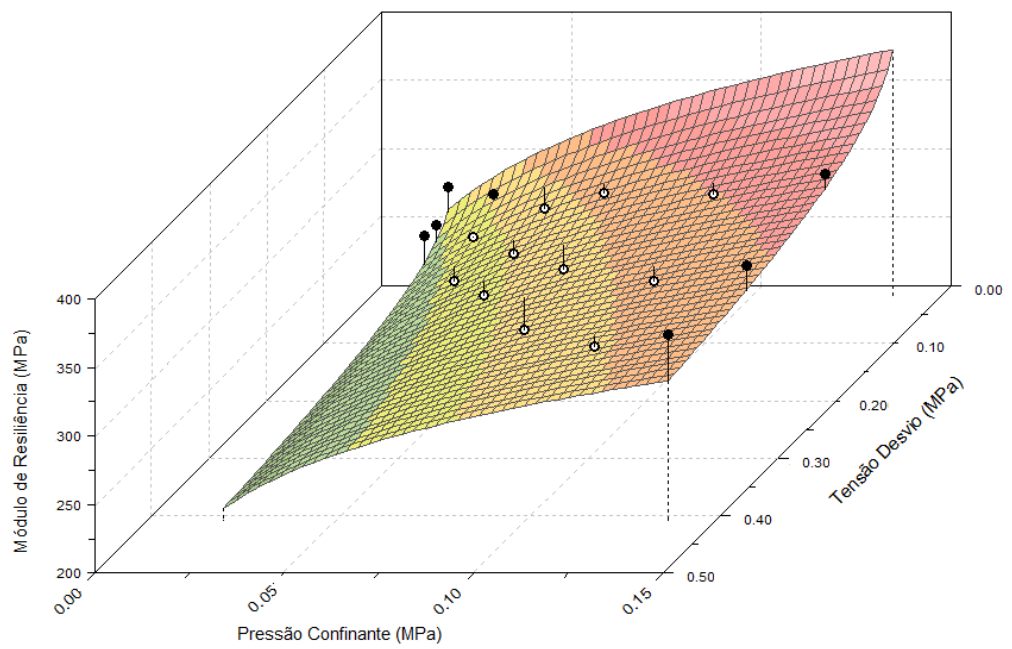
APÊNDICE A – Módulo de Resiliência do Solo 1-Puro em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio



(a)

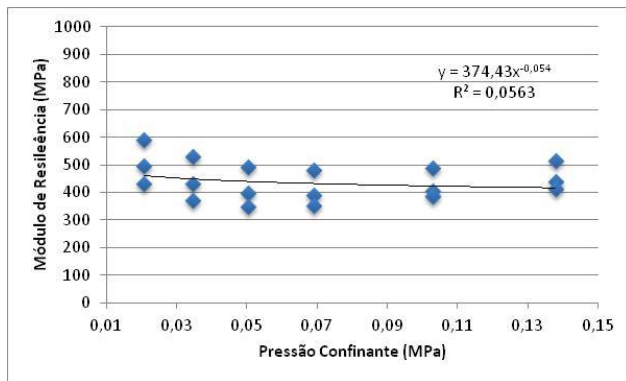


(b)

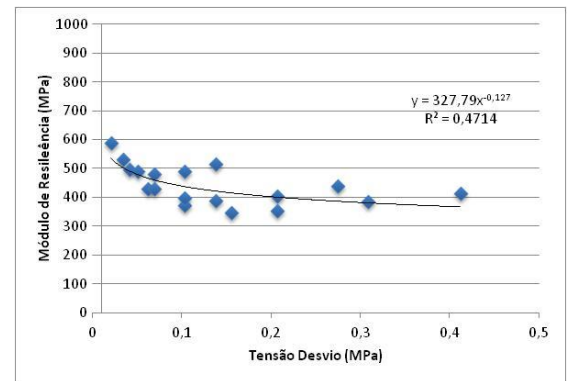


(c)

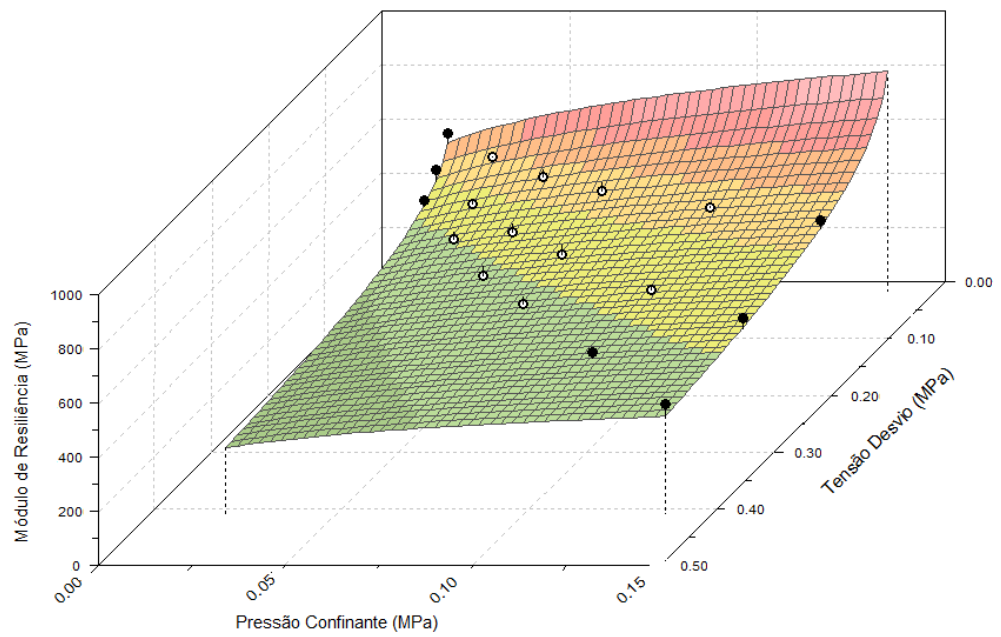
APÊNDICE B – Módulo de Resiliência do Solo 1-2,2% em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio



(a)

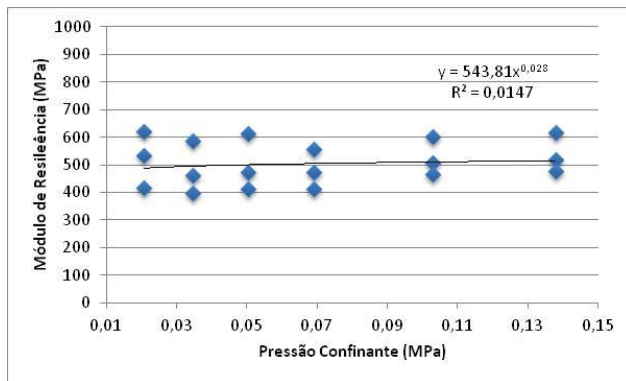


(b)

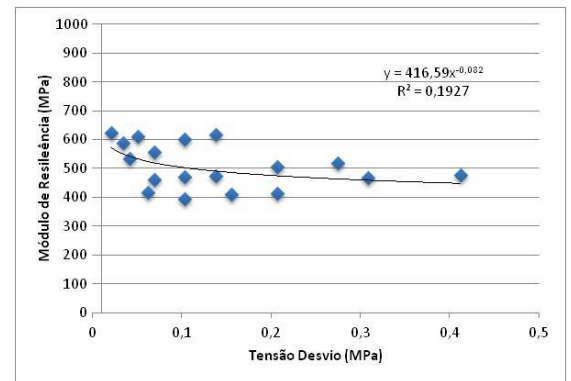


(c)

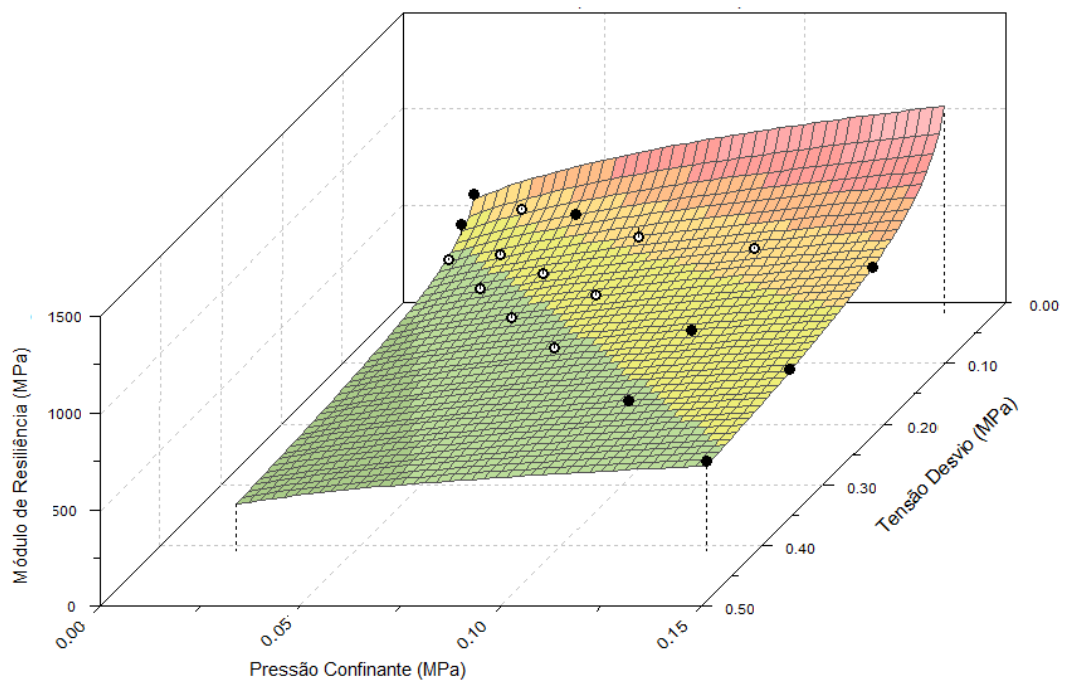
APÊNDICE C – Módulo de Resiliência do Solo 1-6,4% em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio



(a)

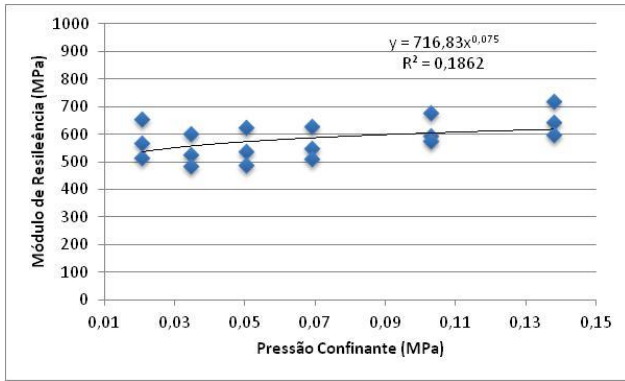


(b)

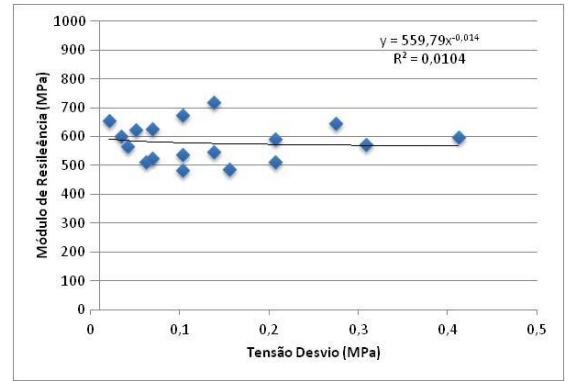


(c)

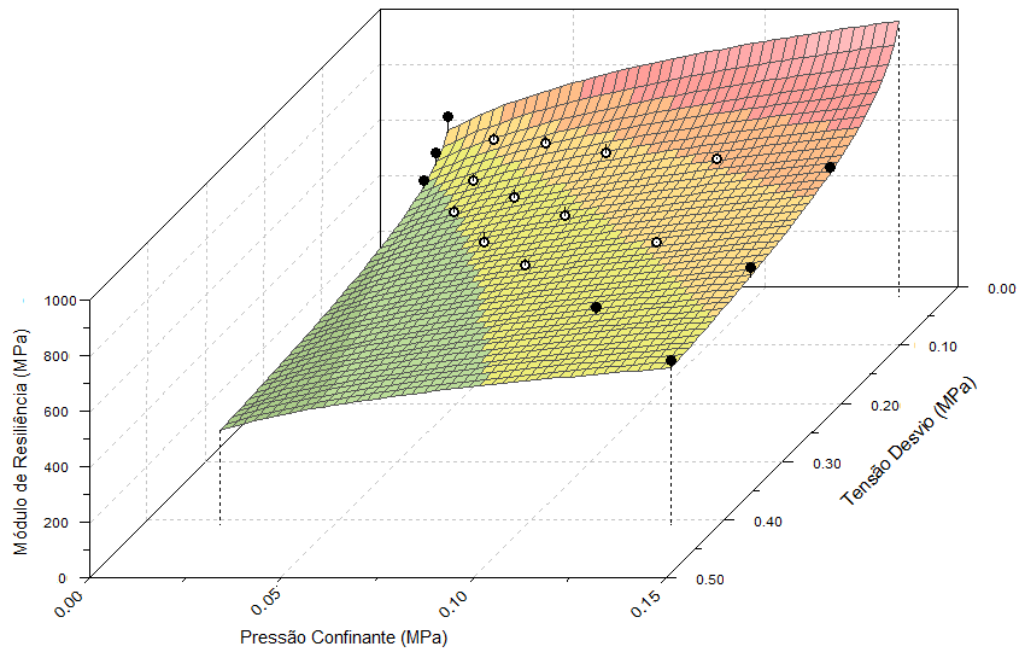
APÊNDICE D – Módulo de Resiliência do Solo 1-10,7% em função dos Modelos Clássicos (a)  
 MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X  
 Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio



(a)

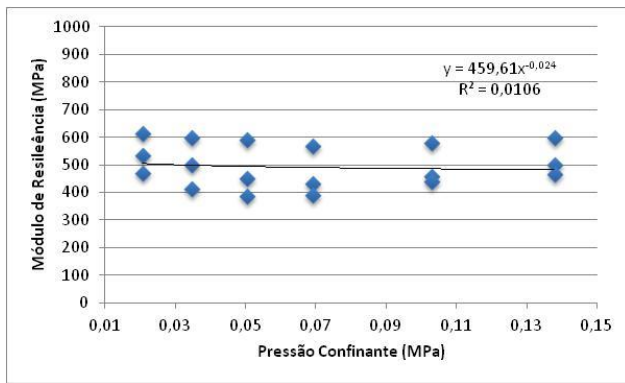


(b)

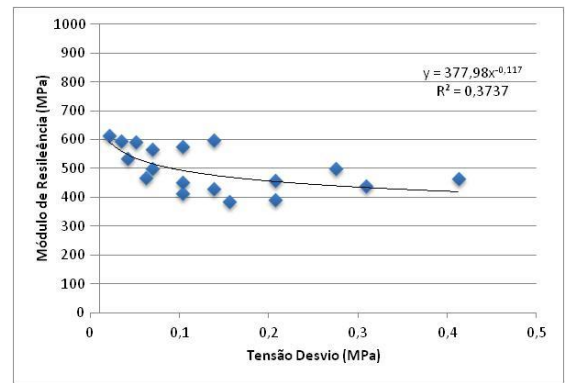


(c)

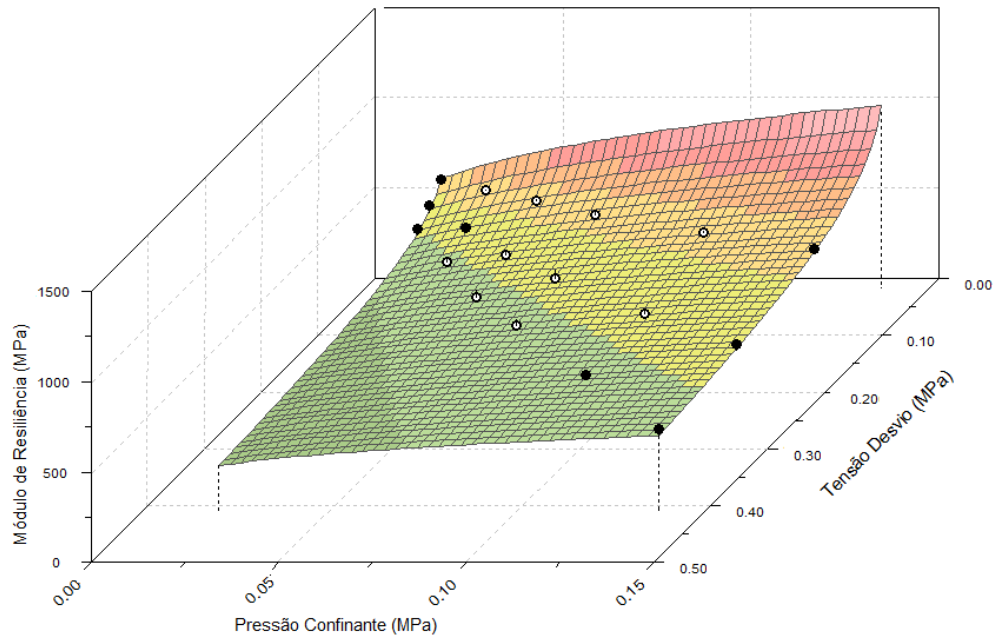
APÊNDICE E – Módulo de Resiliência do Solo 1-3% Cimento em função dos Modelos Clássicos  
 (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR  
 X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio



(a)



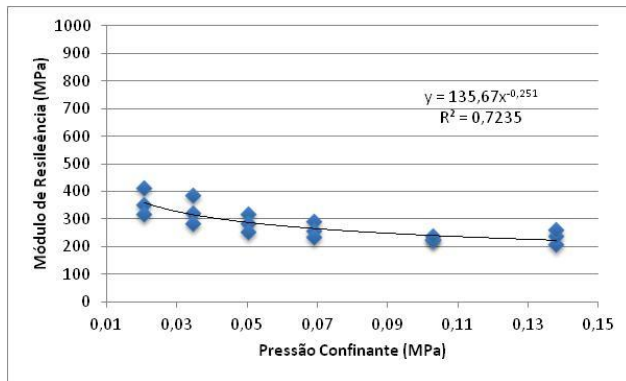
(b)



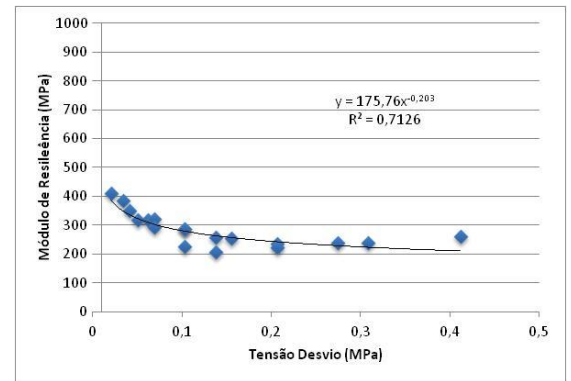
(c)



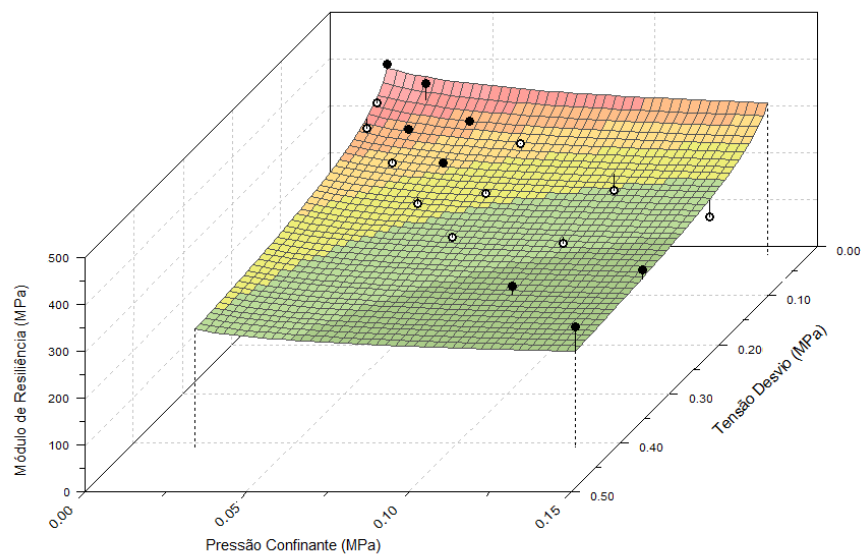
APÊNDICE F – Módulo de Resiliência do Solo 2- Puro em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio



(a)

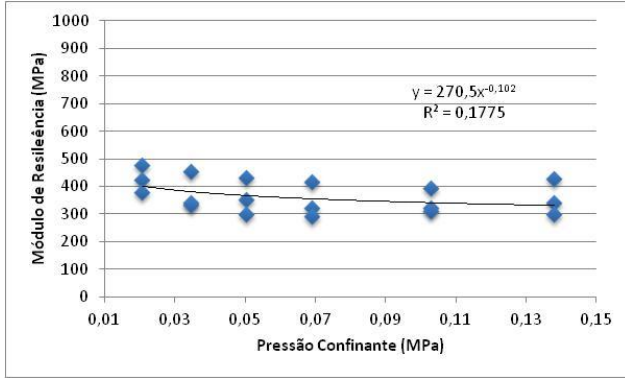


(b)

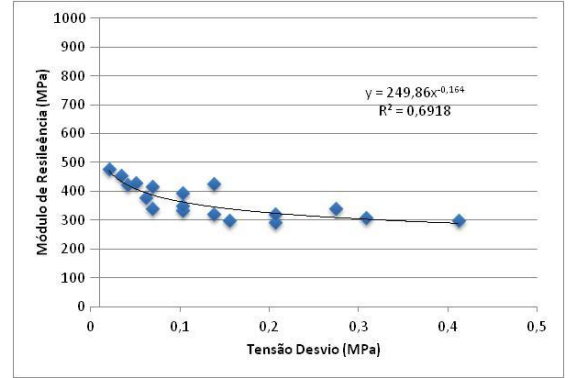


(c)

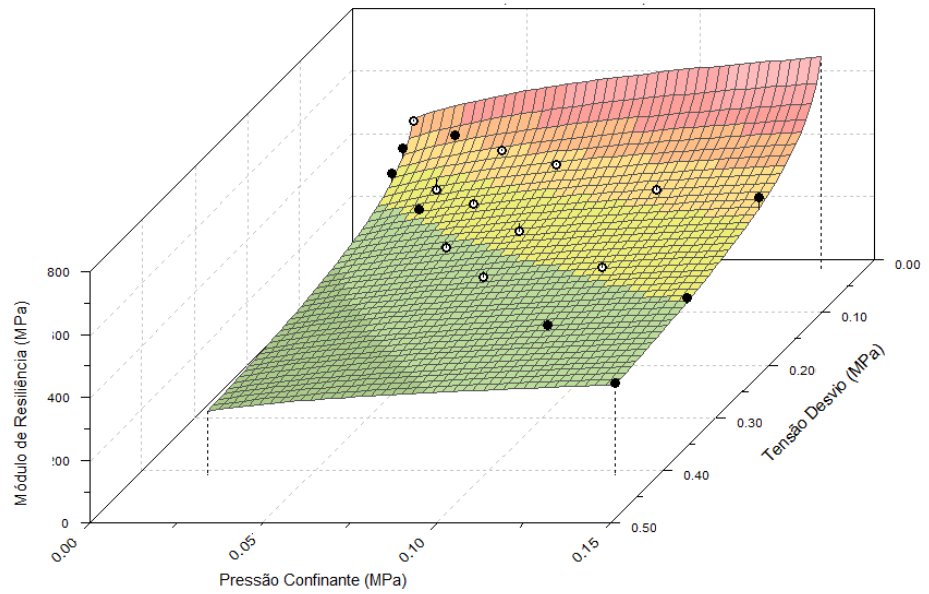
APÊNDICE G – Módulo de Resiliência do Solo 2- 2,2% em função dos Modelos Clássicos (a)  
 MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X  
 Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio



(a)

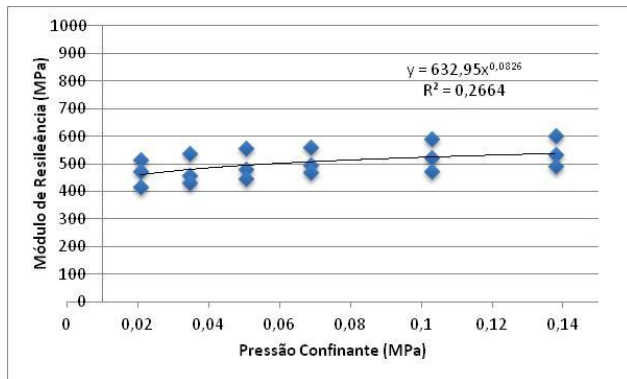


(b)

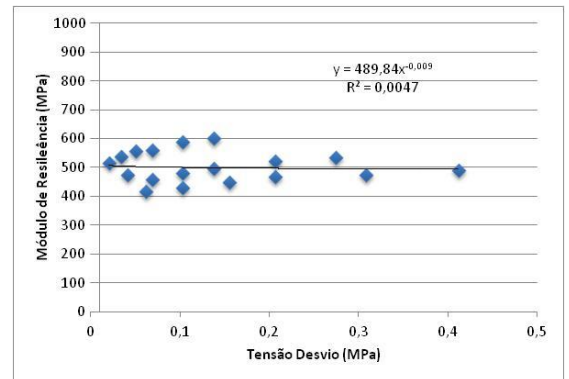


(c)

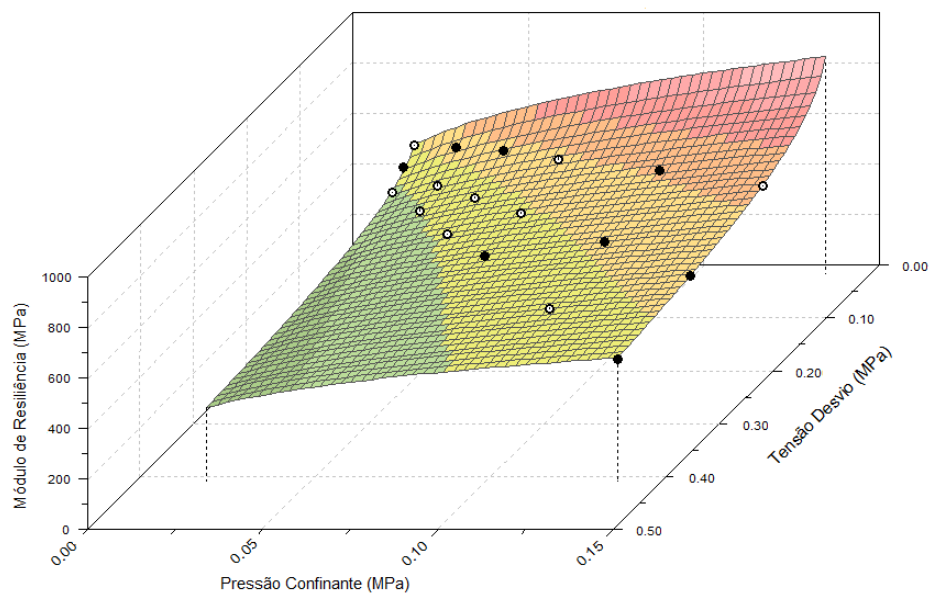
APÊNDICE G – Módulo de Resiliência do Solo 2- 6,4% em função dos Modelos Clássicos (a)  
 MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X  
 Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio



(a)

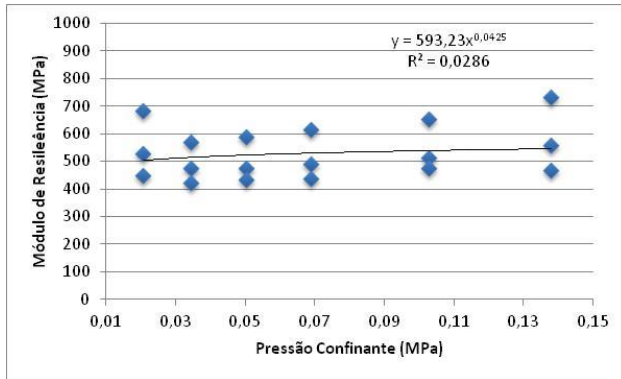


(b)

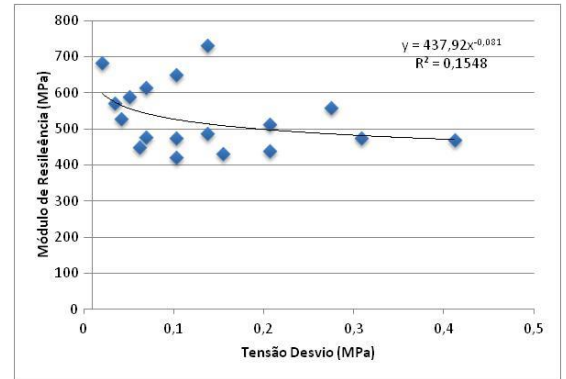


(c)

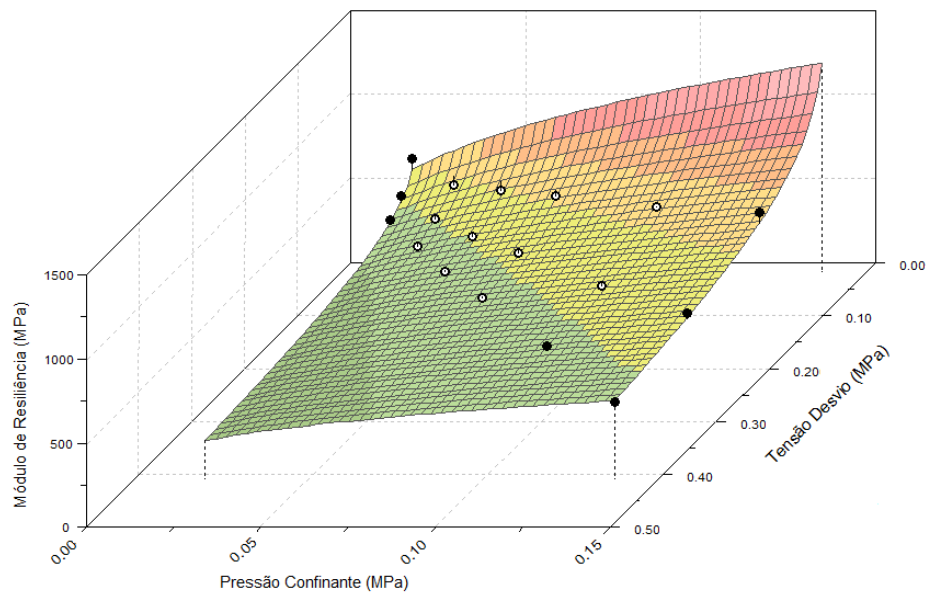
APÊNDICE H – Módulo de Resiliência do Solo 2- 10,7% em função dos Modelos Clássicos (a)  
 MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X  
 Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio



(a)

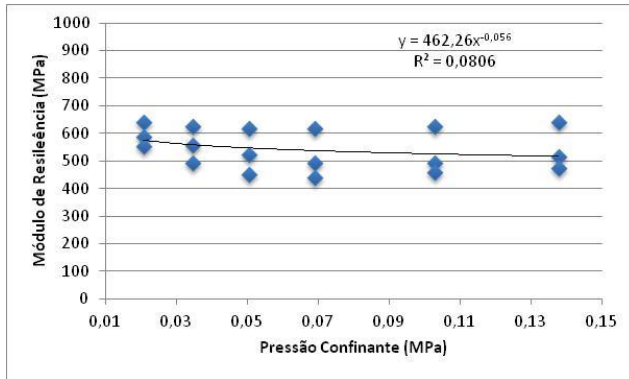


(b)

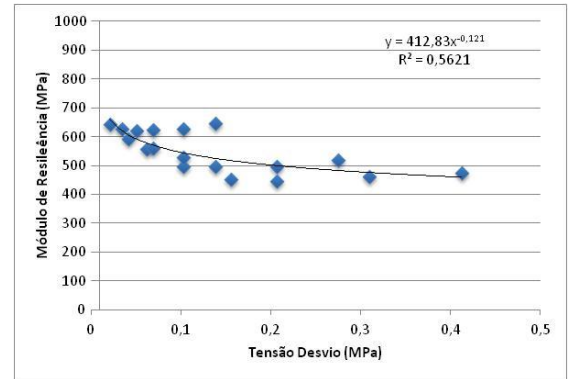


(c)

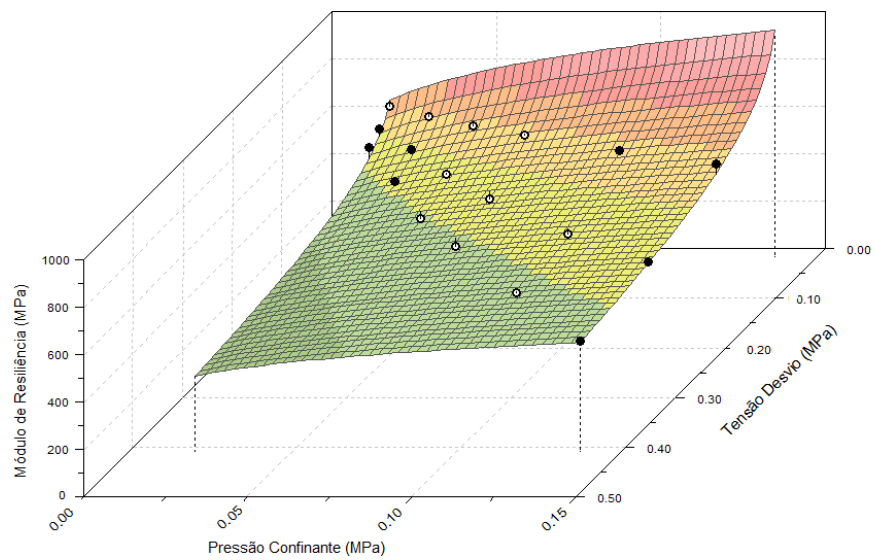
APÊNDICE I – Módulo de Resiliência do Solo 2- 3% Cal em função dos Modelos Clássicos (a)  
 MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X  
 Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio



(a)

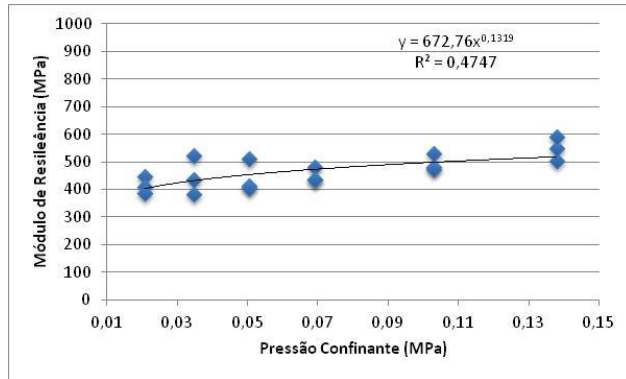


(b)

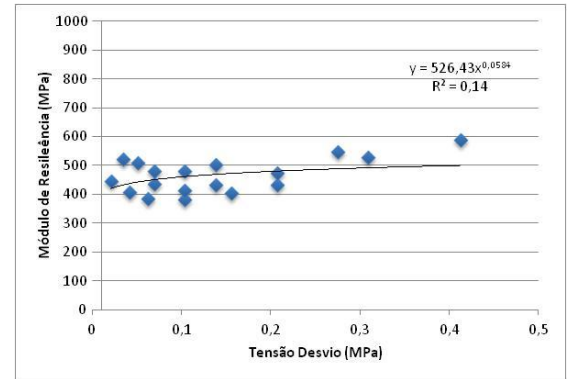


(c)

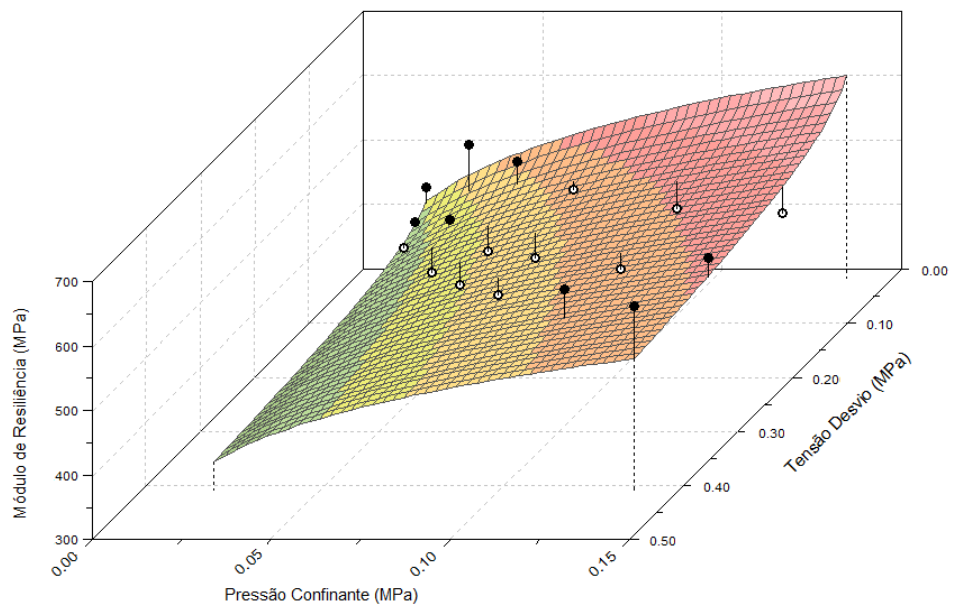
APÊNDICE K – Módulo de Resiliência do Solo 3- Puro em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio



(a)

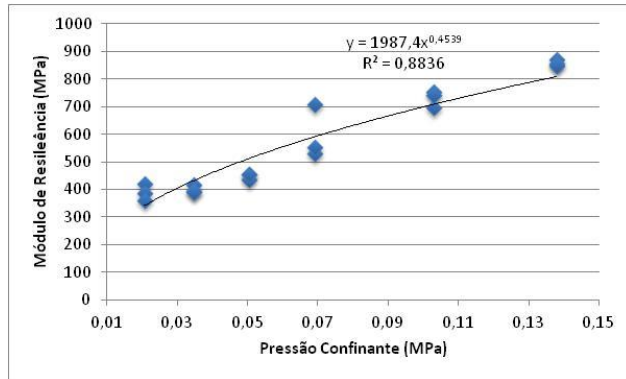


(b)

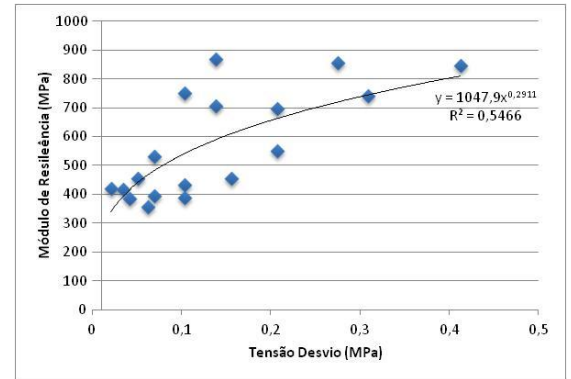


(c)

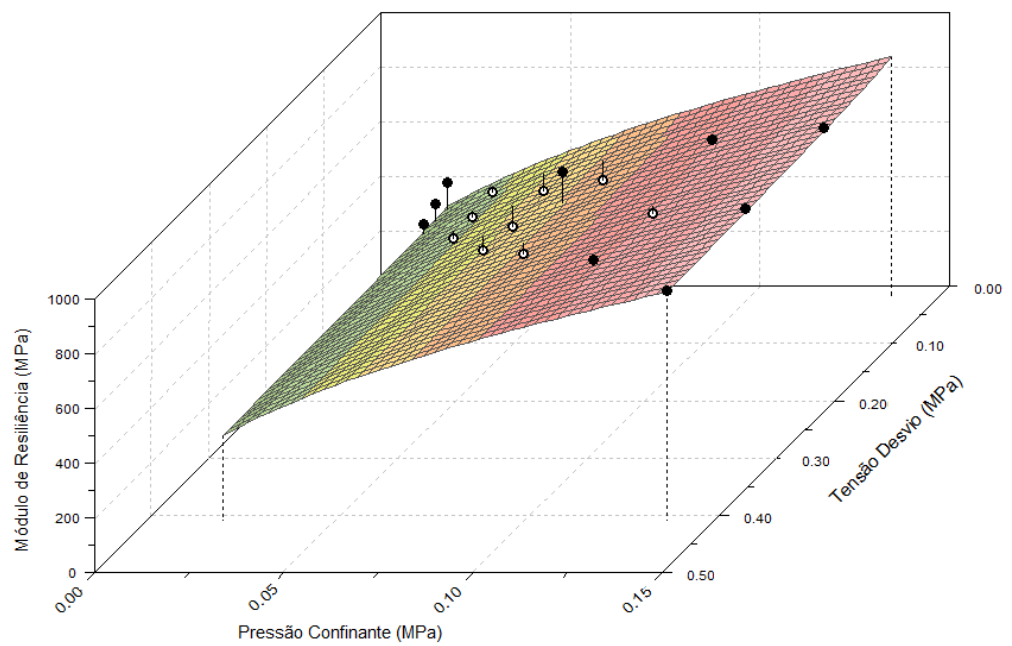
APÊNDICE L– Módulo de Resiliência do Solo 3- 2,2% em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio



(a)

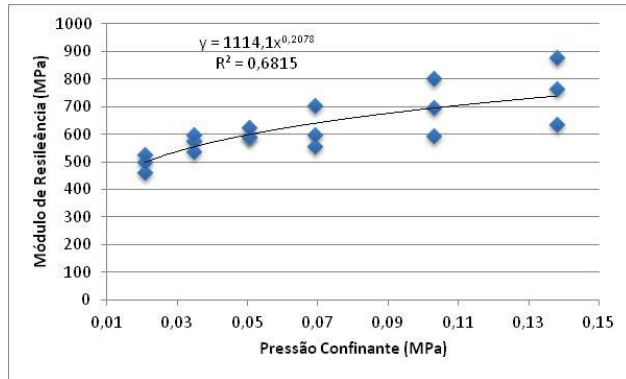


(b)

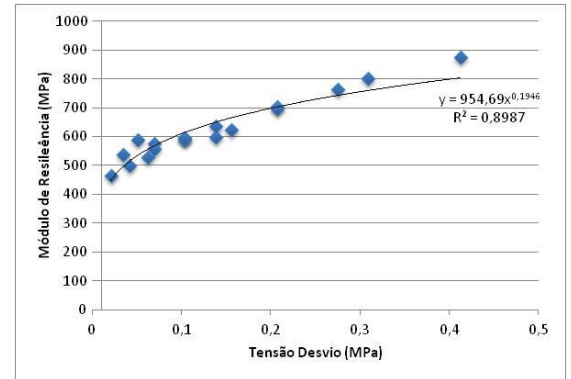


(c)

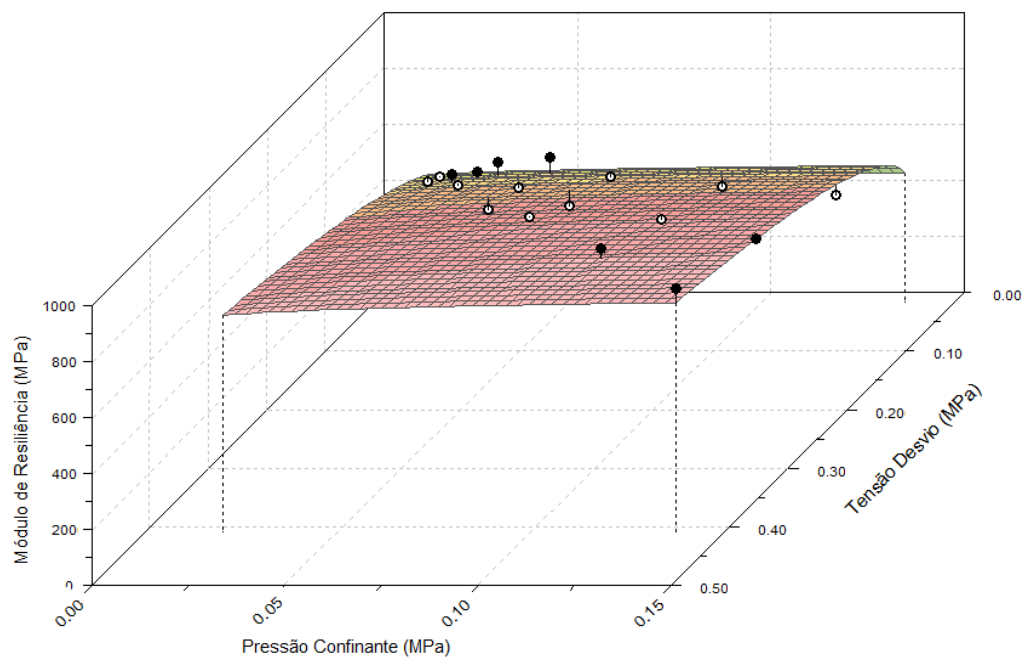
APÊNDICE M– Módulo de Resiliência do Solo 3- 6,4% em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio



(a)



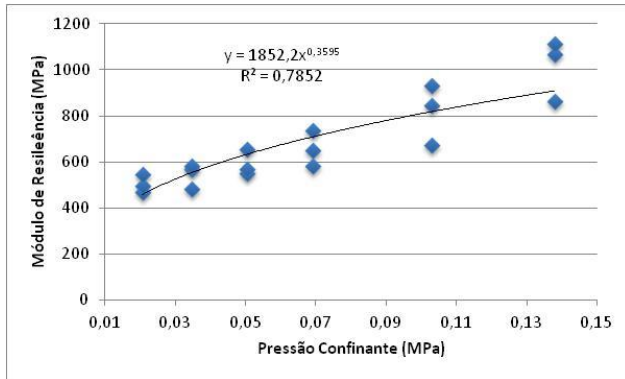
(b)



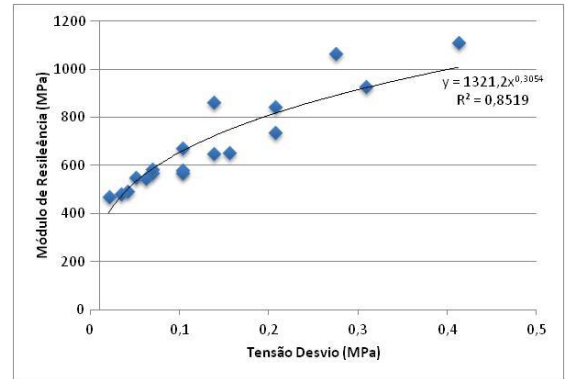
(c)



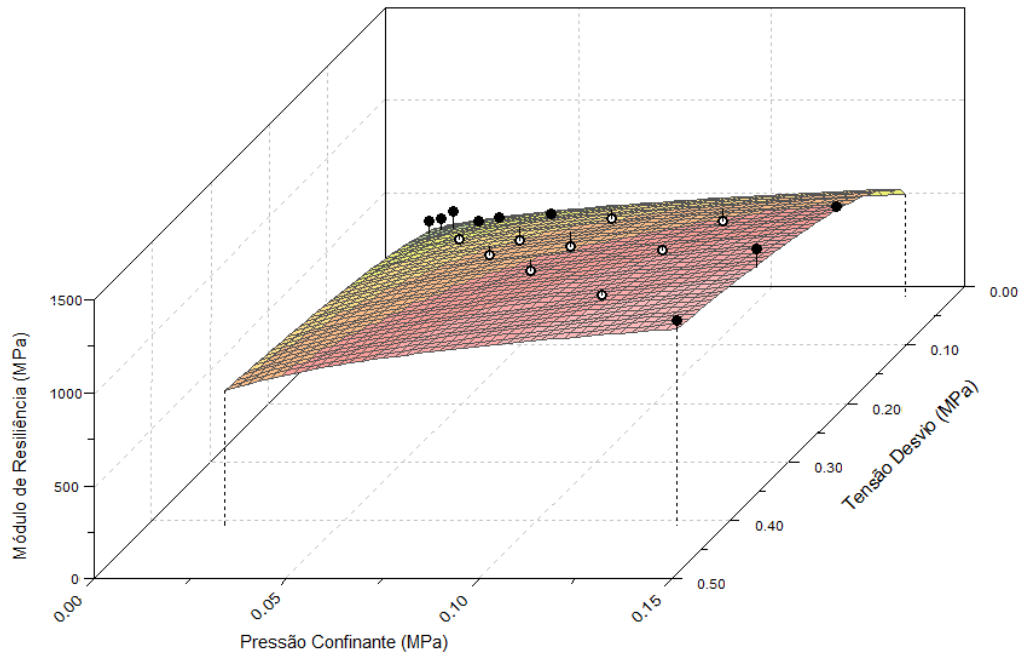
APÊNDICE N– Módulo de Resiliência do Solo 3- 10,7% em função dos Modelos Clássicos (a)  
 MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X  
 Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio



(a)

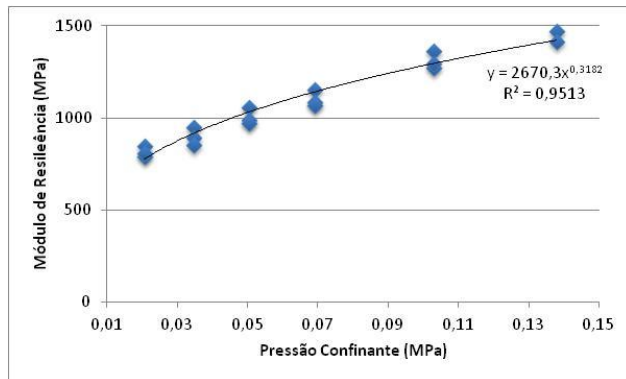


(b)

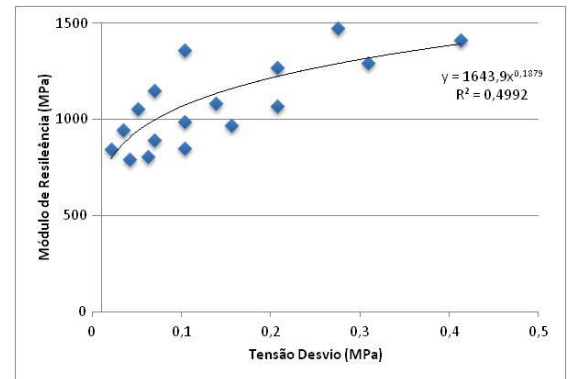


(c)

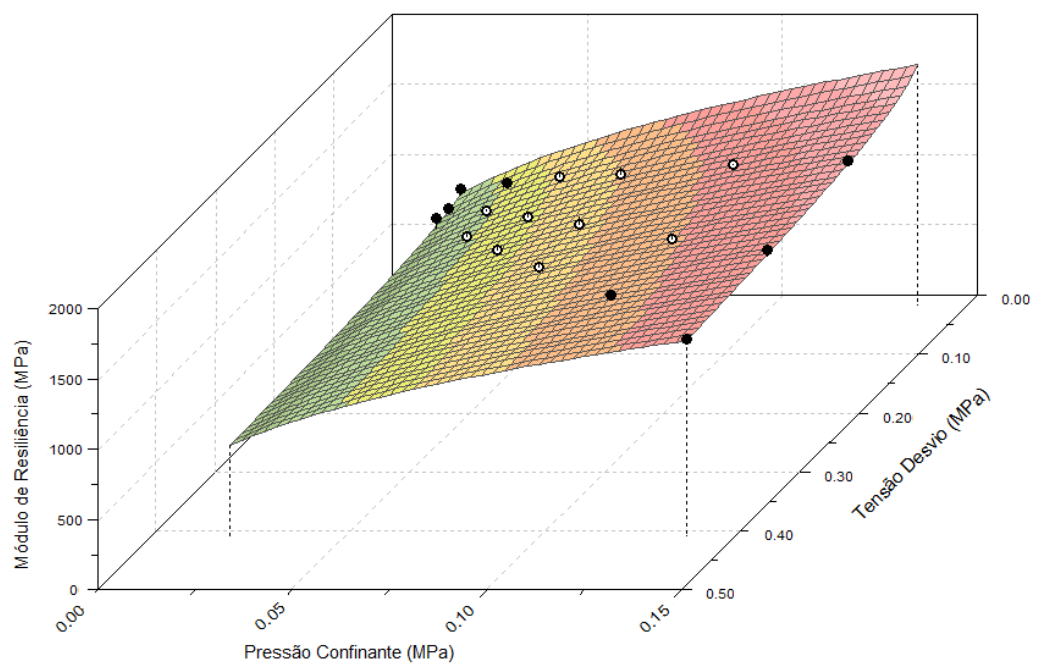
APÊNDICE O– Módulo de Resiliência do Solo 3- 3% Cimento em função dos Modelos Clássicos  
 (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR  
 X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio



(a)

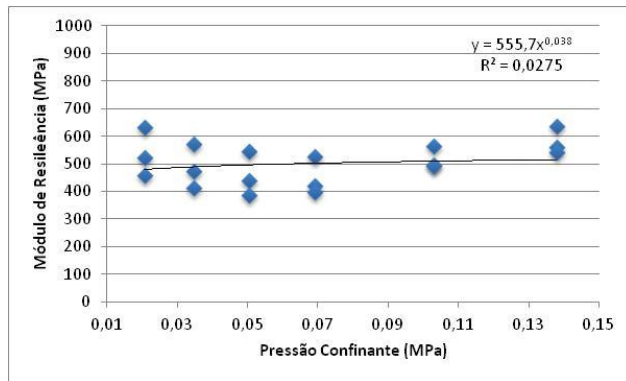


(b)

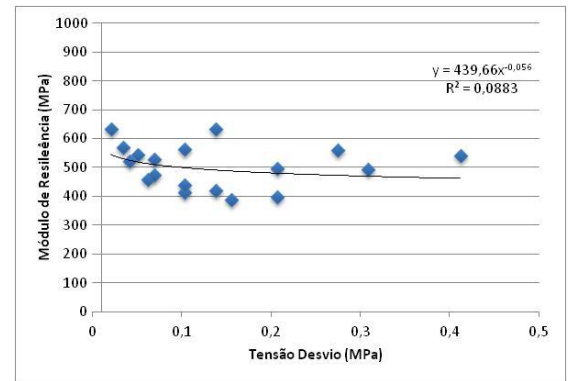


(c)

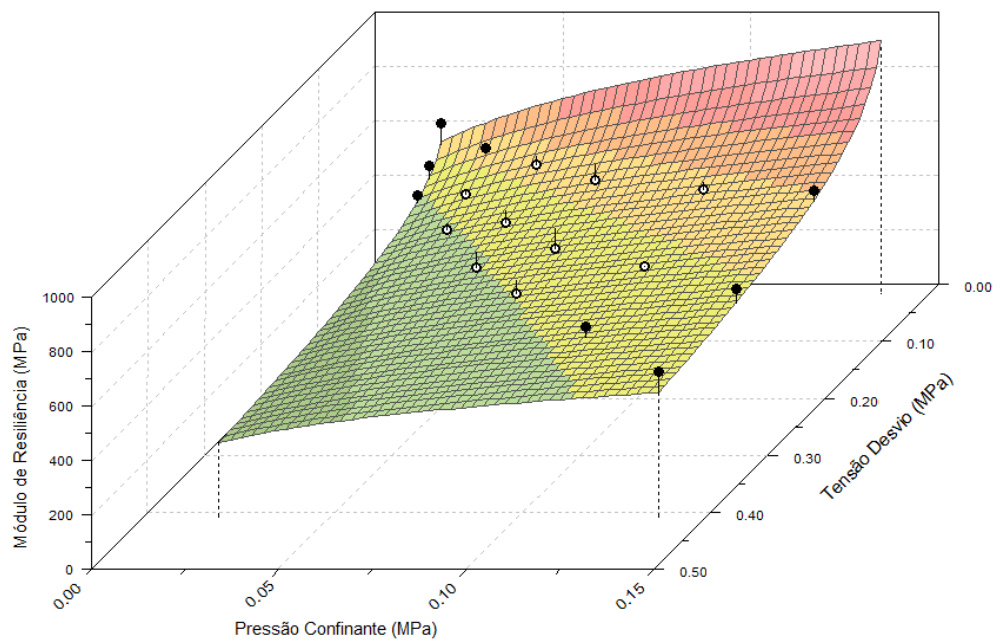
APÊNDICE P– Módulo de Resiliência do Solo 4- Puro em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio



(a)

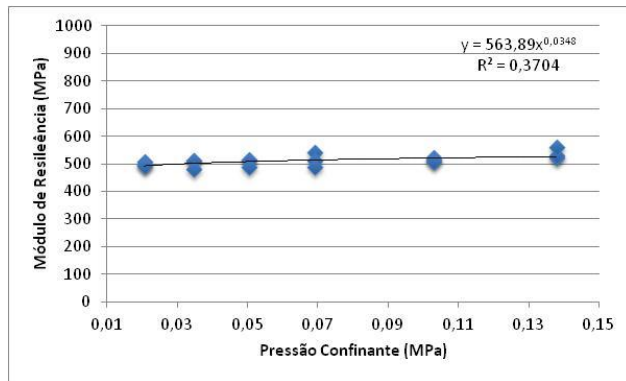


(b)

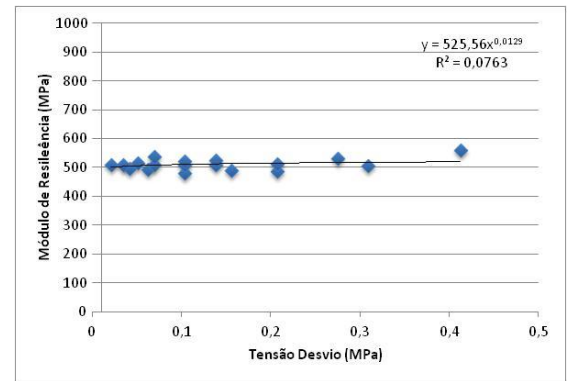


(c)

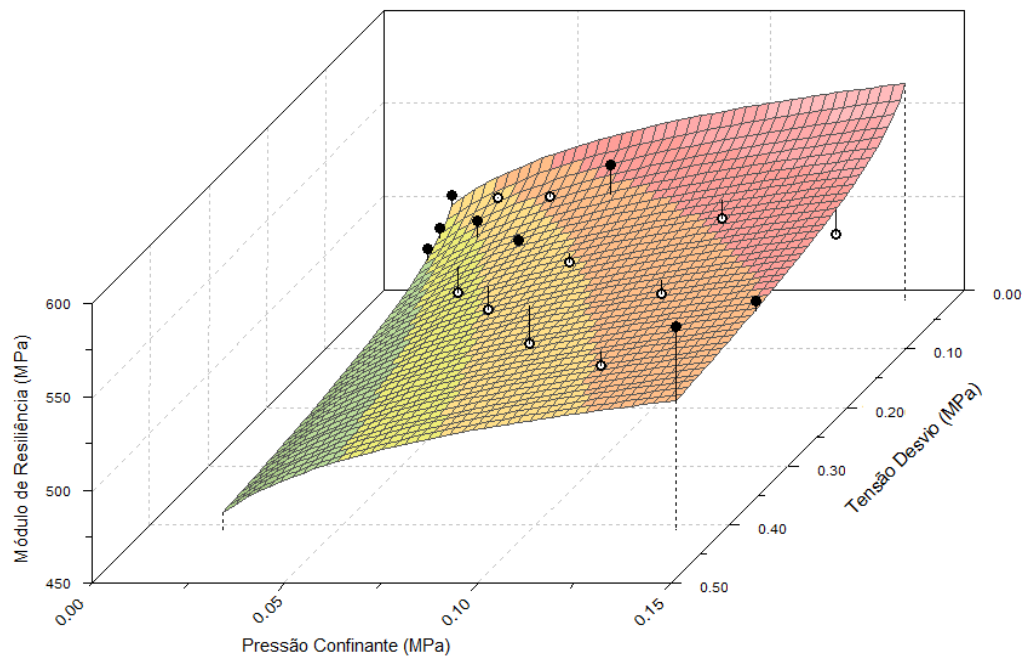
APÊNDICE Q– Módulo de Resiliência do Solo 4- 2,2% em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio



(a)

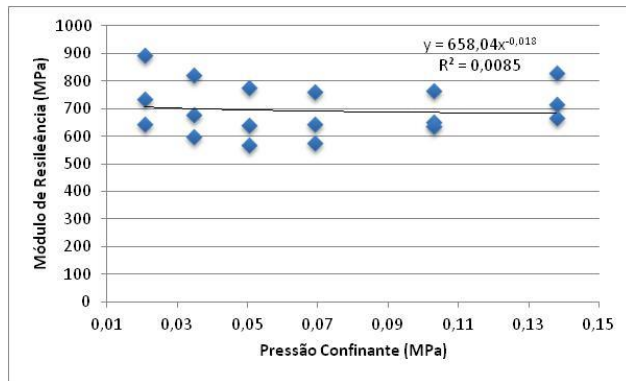


(b)

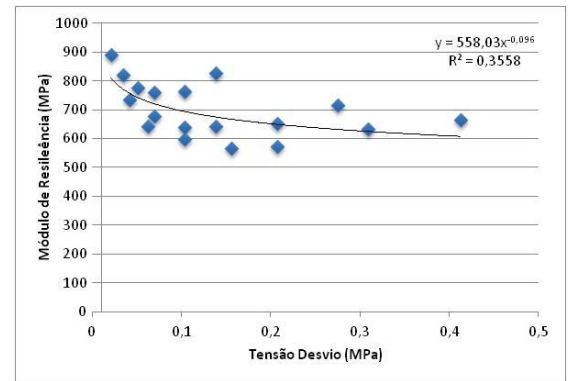


(c)

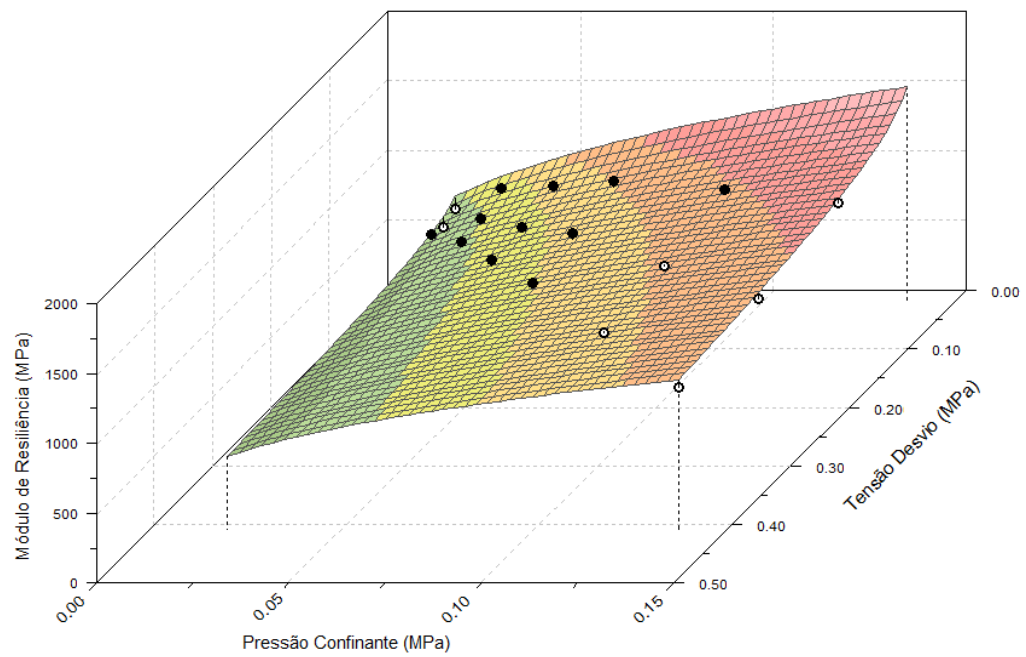
APÊNDICE R– Módulo de Resiliência do Solo 4- 6,4% em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio



(a)

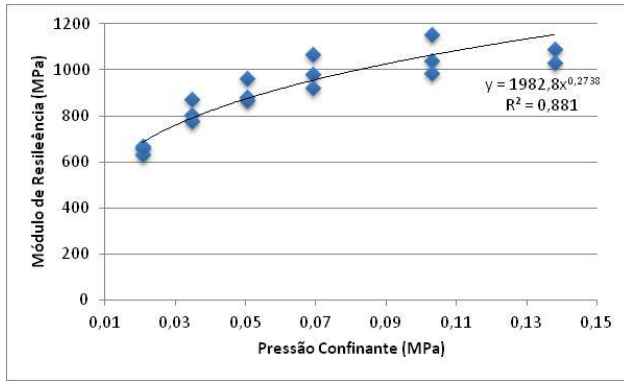


(b)

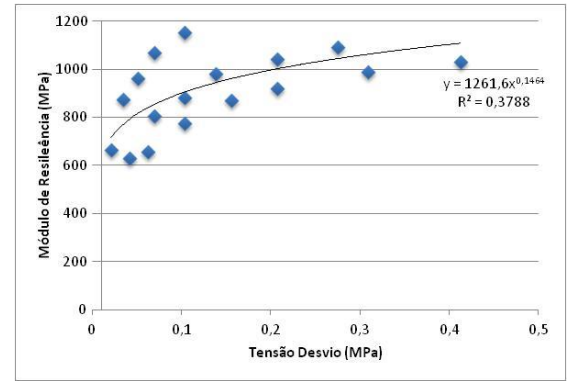


(c)

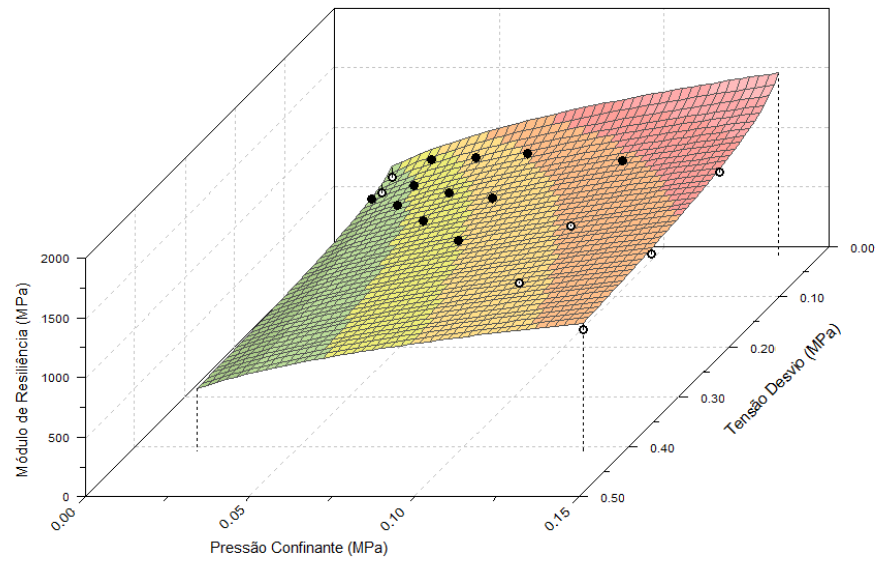
APÊNDICE S– Módulo de Resiliência do Solo 4- 10,7% em função dos Modelos Clássicos (a)  
 MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X  
 Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio



(a)

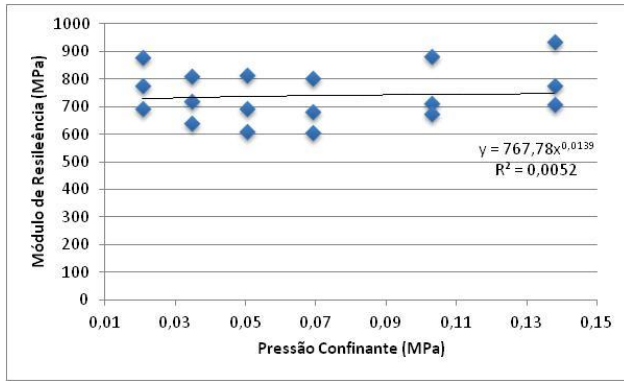


(b)

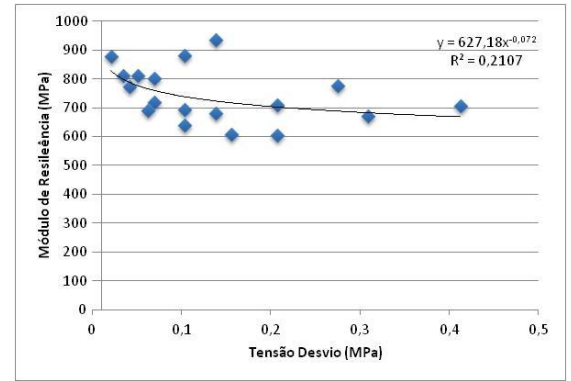


(c)

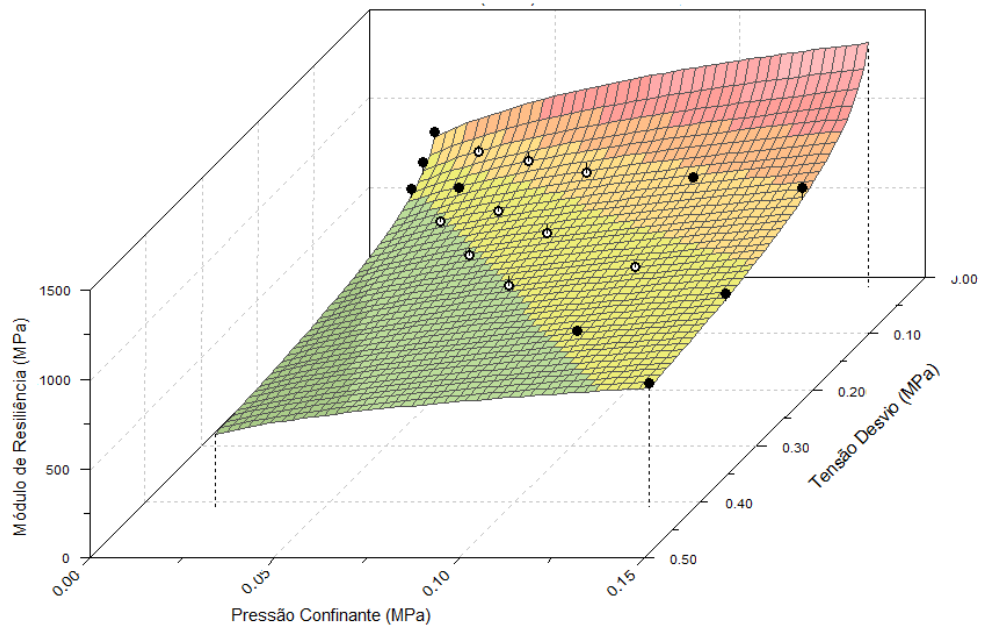
APÊNDICE S– Módulo de Resiliência do Solo 4- 3% Cal em função dos Modelos Clássicos (a)  
 MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X  
 Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio



(a)



(b)



(c)