

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DE MISTURAS DE SOLO, RCD E CAL VIRGEM
E HIDRATADA PARA USO EM OBRAS RODOVIÁRIAS**

LIVIA MARIA TIEMI FUJII

ORIENTADOR: JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO

DISSERTAÇÃO MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-215/12

BRASÍLIA / DF: 19 DE OUTUBRO/2012

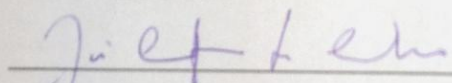
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DE MISTURAS DE SOLO, RCD E CAL VIRGEM
E HIDRATADA PARA USO EM OBRAS RODOVIÁRIAS**

LIVIA MARIA TIEMI FUJII

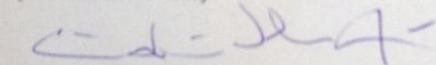
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:



JOSE CAMAPUM DE CARVALHO, Ph.D. (UnB)

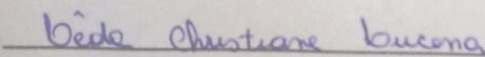
(ORIENTADOR)



GREGORIO LUIS SILVA ARAUJO, DsC. (UnB)

(EXAMINADOR INTERNO)

(EXAMINADOR INTERNO)



LÊDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, DsC. (UFCG)

(EXAMINADOR EXTERNO)

(EXAMINADOR EXTERNO)

BRASÍLIA/DF, 19 DE OUTUBRO DE 2012

FICHA CATALOGRÁFICA

FUJII, LIVIA MARIA TIEMI

Estudo de misturas de solo, RCD e cal virgem e hidratada para uso em obras rodoviárias
2012

xviii, 137 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2012)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil

1. Pavimentação

2. Resíduos de construção e demolição

3. Cal virgem

4. Cal hidratada

I. ENC/FT/UnB

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FUJII, L. M. T. Estudo de misturas de solo, RCD e cal virgem e hidratada para uso em obras rodoviárias. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-215/2012, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 137 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Livia Maria Tiemi Fujii

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Estudo de misturas de solo, RCD e cal virgem e hidratada para uso em obras rodoviárias

GRAU / ANO: Mestre / 2012

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Livia Maria Tiemi Fujii

Rua 47, nº 180, Boa Esperança

78068-365 Cuiabá – MT, Brasil

“Eu não vim até aqui, pra desistir agora.”

Até o fim – Engenheiros do Hawaii

Citada pela minha amiga Carlyne

Aos meus pais, que nunca aceitaram que eu fracassasse. Sem a exigência de vocês eu não conseguiria sequer 1/1000 do que consegui até agora, nem 1/100000 do que eu ainda quero alcançar! Obrigada pela criação e desculpe as poucas discussões que tivemos. Poucas, mas no momento, em meio a algumas lágrimas em que escrevo, sei que desnecessário comparado ao imenso amor e admiração que tenho por vocês.

Ao meu irmão, que sempre se mostrou muito amigo e companheiro, principalmente nesses últimos anos. A ele que cresceu comigo e que também dividiu a maior alegria de nossas vidas: Phillip.

Ao Rafael, que todos os dias me surpreende pela pessoa única que é. Pelo seu amor, companheirismo, amizade. Por eu perceber que eu posso amar alguém, e que esse alguém não é perfeito, mas que para mim pode ser. Ao Paulo e à Regina, que me tratam com carinho de pai e mãe.

Ao professor e orientador, José Camapum de Carvalho, não apenas por trabalhar nesta dissertação, mas também pela sua perseverança na melhoria da capacidade de reflexão dos seus alunos. Pessoas como você, apesar de raras, fazem muuuita diferença na busca da melhora da sociedade.

À Luciana Dellabianca, minha atual chefe, no DNIT. Por ser mais que compreensiva, por acreditar no meu trabalho e me dar muito apoio.

Ao professor e ex coordenador de curso, Manoel Porfírio, pela disposição em ajudar neste trabalho.

Às minhas amigas Carlyne, Isadora, Taissa e Luana, anjas que conheci quando criança e que ainda me acompanham.

Às minhas amigas Renata, Roseli, Jéssica, Caroline e Tatiana, pelo imenso prazer da amizade em Brasília. Às minhas amigas da faculdade: Pam, Sara, Thais, Gio, Ju e Marina.

Aos amigos do DNIT: Vivi, Cynthia, Grande James, Marcela e Bruno.

Ao Programa de Pós Graduação em Geotecnia na Universidade de Brasília, aos professores e colegas, pelo convívio, principalmente aos meus amigos de turma.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo apoio financeiro.

Ao Departamento de Geociências da Universidade de Brasília, em especial ao professor Nilson Francisquini Botelho por viabilizar a utilização do britador e à professora Edi Guimarães e o bolsista Rafael, por realizarem ensaios de difração de raio-x das amostras.

À Reforsolo, em especial o engenheiro Haroldo Paranhos, por fornecer a cal hidratada calcítica e virgem, utilizadas nesse estudo.

À Brasília Demolições, em especial ao senhor Ananias, que forneceu o RCD utilizado na pesquisa.

RESUMO

Os resíduos gerados pela construção civil podem ser reutilizados em camadas de pavimentação, substituindo materiais primários que se encontram escassos. A utilização de tais resíduos podem, inclusive, melhorar algumas propriedades mecânicas e hidráulicas de camadas que compõem a estrutura do pavimento, e foi nesse sentido que se deu início a essa pesquisa. No estudo utilizou-se solo coletado no campus experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, sendo este ensaiado em estado puro e misturado ao Resíduo de Construção e Demolição (RCD) com e sem a adição de cal hidratada e virgem. As misturas se deram na proporção de 2/3 de solo + 1/3 de RCD. Quando das adições de cal estas se deram na proporção de 4% em peso seco da mistura solo + RCD. Realizaram-se ensaios de caracterização geotécnica, física, química e mineralógica. O comportamento mecânico foi estudado por meio de ensaios de CBR, compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e triaxiais realizados sobre amostras compactadas na energia Proctor intermediário e submetidas a diferentes condições de cura. Os ensaios mecânicos permitiram as seguintes constatações: para resistência à tração por compressão diametral, a mistura com cal hidratada teve o melhor comportamento, em termos de tensão e deformação; no ensaio de compressão simples, a mistura com cal virgem permitiu maiores tensões, enquanto a mistura com cal hidratada permitiu maiores deformações; a mistura com cal virgem teve o melhor comportamento imerso em relação a capacidade de suporte e a mistura com cal hidratada teve o melhor comportamento não imerso; em relação à resiliência, a mistura com cal virgem apresentou melhor comportamento; o ângulo de atrito das amostras variou com o tempo, estabilizando-se aos 14 dias para as amostras contendo cal, sendo que aos 28 dias as misturas tiveram o mesmo valor. Pelos resultados apresentados neste estudo, concluiu-se que tanto os resíduos de construção e demolição, como a cal virgem e hidratada, são materiais promissores na utilização em camadas de pavimentação.

ABSTRACT

The construction and demolition waste can be reused in layers of pavements, replacing primary materials that are scarce. The use of such waste can even improve some mechanical and hydraulic properties of the pavement structure, and this sense marked the beginning of this research. In the study was used a soil collected on the experimental campus of the Graduate Program in Geotechnical of the University of Brasilia, which is tested pure and mixed with the Construction and Demolition Waste (CDW) with and without the addition of hydrated and quicklime. The mixtures are given in the proportion of 2/3 of soil + 1/3 CDW. The additions of limes were given at the rate of 4% by weight of dry soil mixture + RCD. Trials of geotechnical, physic, chemical and mineralogy characterization were made. The mechanical behavior was studied by trials of CBR tests, compressive, tensile strength by diametral compression and triaxial performed on samples compacted at Proctor intermediate and under different curing conditions. The mechanical tests led to the following findings: for tensile strength by diametrical compression, the mixture with hydrated lime had the better performance in terms of stress and strain; on the compressive test, the mixture with quicklime allowed higher stresses, while mixture with hydrated lime allowed larger deformations; mixing with quicklime had the best behavior immersed in relation to carrying capacity and mix with hydrated lime had the best behavior not immersed; about resilience, mixing with quicklime showed better behavior; the angle of friction of the samples varied with time, stabilizing at 14 days for samples containing lime, and the mixtures after 28 days had the same value. From the results presented in this study, it was concluded that construction and demolition waste and quicklime and hydrated lime are promising materials for use in pavement layers.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1.	DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	4
2.2.	DO PROCESSO DE RECICLAGEM DO RCD	8
2.3.	PROPRIEDADES DO RCD	13
2.3.1.	PROPRIEDADES DO CONCRETO RECICLADO	14
2.4.	USO DO RCD EM CAMADAS GRANULARES DE PAVIMENTAÇÃO	15
2.5.	SOLOS TROPICAIS	18
2.5.1.	EXPERIÊNCIAS DA MISTURA DE RCD E SOLOS TROPICAIS	19
2.6.	ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS COM A UTILIZAÇÃO DA CAL	20
2.6.1.	DO PROCESSO DA ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA	22
2.7.	EXPERIÊNCIAS DA UTILIZAÇÃO DA CAL NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	23
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1.	MATERIAIS	25
3.1.1	SOLO	25
3.1.2.	RCD	26
3.1.3	CAL VIRGEM E HIDRATADA CALCÍTICA CH-III	28
3.2	MÉTODOS	29
3.2.1	PREPARO	29
3.2.2	ENSAIOS REALIZADOS	32
3.2.2.1	CLASSIFICAÇÃO TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (TRB)	32
3.2.2.2	CLASSIFICAÇÃO EXPEDITA MCT	34
3.2.2.3	MINI MCV E PERDA DE MASSA POR IMERSÃO	35
3.2.2.4	ENSAIOS QUÍMICOS	36
3.2.2.5	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X	37
3.2.2.6	MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS	37
3.2.2.7	POROSIMETRIA E SUPERFÍCIE ESPECÍFICA	38
3.2.2.8	SUCÇÃO	39
3.2.2.9	MICROSCOPIA	41
3.2.2.10.	ABSORÇÃO	42

3.2.2.11	MINI COMPACTAÇÃO	43
3.2.2.12	COMPRESSÃO SIMPLES	44
3.2.2.13	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	45
3.2.2.14	TRIAxIAL CÍCLICO	46
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	49
4.1.	CLASSIFICAÇÃO TRB	49
4.1.1.	GRANULOMETRIA	49
4.1.2.	LIMITES DE ATTERBERG	52
4.2.	CLASSIFICAÇÃO EXPEDITA MCT	55
4.3.	MINI MCV E PERDA DE MASSA POR IMERSÃO	57
4.4.	ENSAIOS QUÍMICOS	59
4.5.	DIFRAÇÃO DE RAIOS X	60
4.6.	MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS	61
4.7.	POROSIMETRIA	61
4.8.	SUPERFÍCIE ESPECÍFICA	62
4.9.	MICROSCOPIA	64
4.10.	ABSORÇÃO DO RCD GRANULAR	67
4.11.	CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA	67
4.12.	MINI COMPACTAÇÃO	73
4.13.	CBR E EXPANSÃO	74
4.14.	COMPRESSÃO SIMPLES	87
4.15.	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	98
4.16.	RESILIÊNCIA	109
4.17.	ENSAIO DE CISALHAMENTO RÁPIDO	116
5.	CONCLUSÕES	118
5.1	CONCLUSÕES GERAIS	118
5.2	CONCLUSÕES ESPECÍFICAS	118
5.1.1	DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	118
5.1.2	DOS ENSAIOS MECÂNICOS	120
6.	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	122

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Amostras ensaiadas	31
Tabela 4.1 – Limites de Atterberg e Índice de Plasticidade	53
Tabela 4.2 – Classificação Expedita MCT	55
Tabela 4.3 – Classificação Expedita MCT	56
Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios químicos das amostras	59
Tabela 4.5 – Difração de Raio X	60
Tabela 4.6 – Massa Específica Real das amostras	61
Tabela 4.7 – Resultados do ensaio de porosimetria e diâmetro dos grãos	62
Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de Superfície Específica	66
Tabela 4.9– Umidades de saturação dos microporos das amostras	69
Tabela 4.10 – Ângulo de atrito dos materiais	116

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Resíduo de Construção e Demolição	4
Figura 2.2 - Exemplo de deposição ilegal do RCD	5
Figura 2.3 – Reciclagem do RCD (Fonte: Biurrarrena, 2012)	6
Figura 2.4 – Utilização de RCD em camadas de pavimentação (Fonte: Leite, 2007)	7
Figura 2.5 - Fluxograma de Reciclagem dos resíduos (Lima & Lima, 2011)	9
Figura 2.6 Fluxograma de reciclagem sustentável para o RCD (Neto & Schalch, 2010)	10
Figura 2.7 - Usinas de reciclagem de RCD classe A inaugurada ao longo dos anos no país (Miranda, 2009)	11
Figura 2.8 – Micro e macroestrutura de um solo laterítico típico (Nogami & Villibor, 1995)	18
Figura 2.9 - Utilização de cal em camadas de pavimentos (Fonte: Minascal, 2012)	21
Figura 2.10 – Reação da cal com a argila (Fonte: Bento, 2006)	22
Figura 3.1 – Coleta do material	25
Figura 3.2 – Localização da coleta do RCD	26
Figura 3.3 – RCD no momento da coleta	27
Figura 3.4 – Britagem do RCD	27
Figura 3.5 – Cal virgem	28
Figura 3.6 – Cal hidratada	28
Figura 3.7 – Preparo do solo	29

Figura 3.8 – À esquerda, grãos retidos na peneira #4; à direita os grãos passantes nesta peneira	30
Figura 3.9 – Aumento da temperatura na preparação de amostra com cal virgem	32
Figura 3.10 – Sedimentação	33
Figura 3.11 – Peneiramento fino do solo retido nas peneiras: a) #16; b) #30; c) #40; d) #50; e) #100; #200.	33
Figura 3.12 – Limite de Liquidez e Plasticidade	34
Figura 3.13 – Classificação Expedita MCT do Solo	34
Figura 3.14 - Classificação Expedita MCT do Solo (2)	35
Figura 3.15 – Perda de massa por imersão	35
Figura 3.16 – Difração de Raio X	37
Figura 3.17 – Massa Específica real dos grãos	38
Figura 3.18 – Porosimetria e Superfície Específica	38
Figura 3.19 - Tipos de fluxo do solo para o papel filtro (Marinho 1995)	39
Figura 3.20 – Sucção – corpos submetidos à secagem	40
Figura 3.21 – Interface do programa ProScope HR	42
Figura 3.22 – Absorção de água do RCD	43
Figura 3.23 – Mini CBR	44
Figura 3.24 – Compressão Simples	45
Figura 3.25 – Preparo do corpo de prova para Compressão Simples	45
Figura 3.26 – Resistência à tração por compressão diametral	46
Figura 3.27 – Ensaio Triaxial Cíclico	47
Figura 3.28 – Rompimento da amostra de solo puro do ensaio triaxial cíclico	47
Figura 4.1 – Granulometria do solo puro com e sem o uso de defloculante	49
Figura 4.2 – Granulometria da mistura solo + RCD com e sem o uso de defloculante	50
Figura 4.3 – Granulometria do RCD com e sem defloculante	51

Figura 4.4 – Granulometria do solo puro; mistura solo + RCD; RCD puro	51
Figura 4.5 – Granulometrias das misturas	52
Figura 4.6 – Ensaio de Limite de Liquidez	54
Figura 4.7 – Classificação dos materiais segundo a TRB	55
Figura 4.8 – Resistência ao esmagamento da bola seca do solo puro	56
Figura 4.9 – Ensaio de Mini MCV	58
Figura 4.10 – Perda de massa por imersão do solo (a) e do solo + RCD (b)	59
Figura 4.11 – Relação da Superfície específica com o grau de saturação	64
Figura 4.12 – Microscopia do solo puro: a) 100x; b) 200x; c) 400x; d) 200x compactado	64
Figura 4.13 – Microscopia do RCD puro: a) 100x; b) 200x; c) 400x	65
Figura 4.14 – Microscopia da cal virgem pura: a) 100x; b) 200x; c) 400x	65
Figura 4.15 – Microscopia da cal hidratada: a) 100x; b) 200x; c) 400x	66
Figura 4.16 – Microscopia da mistura do solo + RCD: a) 100x; b) 200x; c) 400x	66
Figura 4.17 – Microscopia do Solo + RCD + cal virgem: a) 100x; b) 200x; c) 400x	67
Figura 4.18 – Microscopia do Solo + RCD + hidratada: a) 100x; b) 200x; c) 400x	67
Figura 4.19 – Umidade versus sucção das amostras	68
Figura 4.20 – Curvas características de retenção de água sobrepostas	69
Figura 4.21 – Relação da umidade dos macroporos com o grau de saturação dos macroporos	70
Figura 4.22 – Relação da umidade dos macroporos e o grau de saturação global	70
Figura 4.23 – Grau de saturação versus sucção	71
Figura 4.24 – Relação da saturação com o índice de vazios e a sucção	72
Figura 4.25 – Grau de saturação x epF a) S_r x epF separando em ambos o entra e o einter; b) S_r gobar x e pF separando entra e o einter	72
Figura 4.26 – Mini Compactação das amostras	73

Figura 4.27 – Massa específica aparente seca em função do grau de saturação	74
Figura 4.28 – Mini CBR do solo puro	75
Figura 4.29 – Mini CBR do solo + RCD	75
Figura 4.30 – Mini CBR do solo + RCD + cal virgem	76
Figura 4.31 – Mini CBR do solo + RCD + cal hidratada	77
Figura 4.32 – Curas x CBR não imerso	77
Figura 4.33 – Curas x CBR imerso	78
Figura 4.34 – Dias de cura x CBR do solo	78
Figura 4.35 – Sr x CBR não imerso	79
Figura 4.36 – Grau de saturação x CBR não imerso aos 28 dias	80
Figura 4.37 – Sr x CBR imerso	81
Figura 4.38 – Sr x CBR imerso aos 28 dias	82
Figura 4.39 – Relação do índice de vazios com o CBR não imerso	82
Figura 4.40 – Relação do índice de vazios com o CBR não imerso aos 28 dias	83
Figura 4.41 – Relação do índice de vazios global com os valores de CBR imerso	83
Figura 4.42 – Relação do índice de vazios e o CBR imerso aos 28 dias	84
Figura 4.43 – Relação da sucção com o CBR não imerso	85
Figura 4.44 – Relação da sucção com o CBR não imerso aos 28 dias	85
Figura 4.45 – Relação da sucção e inverso do índice de vazios com o CBR não imerso	86
Figura 4.46 – Relação pF/e x CBR não imerso aos 28 dias	87
Figura 4.47 – Compressão Simples	87
Figura 4.48 – Deformação x Tensão aos 28 dia de cura	88
Figura 4.49 – Rompimento na montagem do ensaio de solo + RCD	89
Figura 4.50 – Rompimento quando retirado do papel filme da amostra de solo + RCD	89

Figura 4.51 – Grau de saturação em relação à resistência à compressão simples	90
Figura 4.52 – Relação do grau de saturação com a resistência à compressão simples aos 28 dias de cura	91
Figura 4.53 – Grau de saturação em relação à deformação permitida no ensaio de compressão simples	91
Figura 4.54 – Relação do grau de saturação e a deformação do ensaio de compressão simples aos 28 dias de cura	92
Figura 4.55 – Relação do índice de vazios com a resistência à compressão simples	93
Figura 4.56 – Índice de vazios x Cs aos 28 dias de cura	93
Figura 4.57 – Relação do índice de vazios global com a deformação do ensaio de compressão simples	94
Figura 4.58 – pF x Cs	95
Figura 4.59 – pF x Deformação do ensaio de compressão simples	95
Figura 4.60 – pF x Cs aos 28 dias de cura	96
Figura 4.61 – pF x deformação do ensaio de resistência à compressão simples aos 28 dias de cura	96
Figura 4.62 – pF/e x Cs	97
Figura 4.63 – pF/e x Cs aos 28 dias de cura	97
Figura 4.64 – pF/e x deformação do ensaio de compressão simples	98
Figura 4.65 – pF/e x deformação do ensaio de compressão simples aos 28 dias de cura	98
Figura 4.66 – Resistência à tração por compressão diametral das amostras	99
Figura 4.67 – Tração por compressão diametral em escala logarítmica	100
Figura 4.68 – Relação do grau de saturação com a RTCD	101
Figura 4.69 – Sr versus deformação da resistência à tração por compressão diametral	101
Figura 4.70 – Sr x RTCD aos 28 dias de cura	102

Figura 4.71 – Sr x Deformação RTCD aos 28 dias de cura	102
Figura 4.72 – Relação do índice de vazios com a resistência à tração por compressão diametral	103
Figura 4.73 – Relação do índice de vazios com a deformação do ensaio de tração	103
Figura 4.74 – Relação do índice de vazios com a resistência à tração aos 28 dias	104
Figura 4.75 – Índice de vazios versus deformação da tração aos 28 dias de cura	104
Figura 4.76 – Relação da sucção com a resistência à tração por compressão diametral	105
Figura 4.77 – Relação da sucção com a deformação do ensaio de resistência à tração por compressão diametral	105
Figura 4.78 – Relação da sucção e a resistência à tração aos 28 dias	106
Figura 4.79 – Sucção versus deformação à tração aos 28 dias	106
Figura 4.80 – pF/e x RTCD	107
Figura 4.81 – pF/e x Deformação do ensaio de RTCD	107
Figura 4.82 – Relação da sucção e inverso do índice de vazios versus RTCD aos 28 dias	108
Figura 4.83 – Relação pF/e versus deformação do ensaio de tração aos 28 dias	108
Figura 4.84 – Comparação de modelos de resiliência do solo	109
Figura 4.85 – Comparação de modelos de resiliência do solo + RCD	110
Figura 4.86 – Comparação de modelos de resiliência do solo + RCD + cal virgem	110
Figura 4.87 – Comparação de modelos de resiliência do solo + RCD + cal hidratada	111
Figura 4.88 – Comparação de modelos de resiliência das amostras	111
Figura 4.89 – Grau de saturação em relação ao módulo resiliente	112
Figura 4.90 – Grau de saturação em relação à resiliência aos 28 dias de cura	113
Figura 4.91 – Índice de vazios global em relação ao Módulo Resiliente	113

Figura 4.92 – Índice de vazios versus módulo resiliente aos 28 dias	114
Figura 4.93 – Relação da sucção com o Módulo Resiliente	114
Figura 4.94 – Relação pF versus Módulo Resiliente aos 28 dias de cura	115
Figura 4.95 – Relação pF/e x MR	115
Figura 4.96 - Relação pF/e versus Módulo Resiliente aos 28 dias de cura	116

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

% Al - Saturação por alumínio

% V – Saturação de base

Φ – ângulo de atrito

T_{oct} – tensão octaédrica

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BR – Brasil (rodovias federais)

CBR – California Bearing Ratio

CH – Cal hidratada

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CP – Corpo de prova

CTC – Capacidade de troca catiônica

DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagens

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura em Transportes
e – Índice de vazios

G_s – Massa Específica Real dos grãos

HRB – Highway Research Board

MCT – Miniatura, Compactado, Tropical

MCV – Moisture Condition Value

ME – Método de Ensaio

MO – Matéria Orgânica

MR – Módulo Resiliente

N - Newton

NBR – Norma Brasileira

Pa – Pascal

pF – logaritmo da altura da coluna de água

pH – Potencial Hidrogeniônico

RCD – Resíduo de construção e demolição

RTCD – Resistência à tração por compressão diametral

TRB - Transportation Research Board

1. INTRODUÇÃO

O crescimento urbano tem causado uma problemática notória, principalmente nas médias e grandes cidades: a geração de resíduos sólidos. A deposição irregular e ilegal e a acumulação dos mesmos causam vários transtornos no que tange a saúde pública.

Dentre os resíduos sólidos, estão os resíduos de construção e demolição (RCD). Eles são gerados em larga escala em todo o mundo, ocasionando preocupações ambiental e social.

Tendo em vista esse problema, a Resolução Conama 307 de 2002 objetiva não gerar os resíduos. Entretanto, caso ocorra, atribui aos agentes geradores a responsabilidade de darem uma destinação adequada a eles.

Por outro lado, a pavimentação é de grande importância para o desenvolvimento dos centros urbanos, possibilitando a redução de tempo e custos de transportes. Todavia, a quantidade de material granular disponível para as estruturas de pavimento é cada vez menor, onerosa e em empasses para liberação ambiental. Também, segundo Silva *et al* (2008), quase não se dispõe de jazidas com solo de qualidade apropriada nas proximidades da obra, havendo a necessidade de estabilização das camadas. Soma-se a estes aspectos o de se preservar os recursos naturais, e um dos meios é limitar o seu uso ao estritamente necessário.

Os fatores mencionados anteriormente, de uma destinação sustentável e adequada ao resíduo de construção e demolição, e o de se diminuir a utilização dos materiais granulares primários, podem ser mesclados. Pesquisas realizadas demonstram que os resíduos de construção e demolição pode ser reutilizado na construção civil.

Uma das alternativas vantajosas para o RCD é a sua utilização em camadas de pavimento de rodovias submetidas a baixo volume de tráfego. Destaca-se que, dependendo de suas características e grau de pureza, eles podem também ser usados em rodovias de médio e mesmo de alto volume de tráfego, melhorando as características mecânicas e estruturais das camadas.

Portanto, são necessários estudos comparativos do uso do material granular natural com a mistura desse material com RCD e até mesmo com outros aditivos, como a cal, para verificar o comportamento mecânico e hidráulico dos materiais, bem como o desempenho e vida útil da obra.

A utilização de cal tem o intuito de verificar o comportamento da mistura quanto à estabilização química e física. A escolha da cal hidratada calcítica deve-se a esta ser a mais utilizada em pavimentação, e a da cal virgem por conter apenas óxido de cálcio em sua formulação que, em contato com a água, se transforma em cal hidratada e liberando calor.

Neste estudo, foram utilizadas amostras contendo um solo tropical, resíduo de construção e demolição de concreto, cal virgem e cal hidratada, misturadas entre si e puras, dependendo do ensaio realizado.

Diante do exposto, a questão formulada foi a de se conhecer se o RCD melhoraria o comportamento de um solo laterítico fino para uso em obras rodoviárias e se com a adição de cal virgem ou cal hidratada esse comportamento seria melhorado.

Para responder a essa questão, ficou-se como objetivo geral: estudar o comportamento mecânico de uma mistura de solo laterítico fino com RCD com e sem adição de cal hidratada e virgem.

Para atender ao objetivo geral fixou-se como objetivos específicos: a) definir as curvas características de retenção de água do solo puro e das misturas quando compactados na energia Proctor intermediário; b) estudar a capacidade de suporte do solo puro e das misturas na condição de compactação e após imersão, com e sem período de cura; c) estudar a resistência a compressão simples do solo puro e da mistura quando compactados na energia Proctor intermediário antes e após a cura; d) estudar a resistência à tração do solo puro e das misturas na condição de compactação, com e sem período de cura; e) determinar o módulo resiliente do solo puro e das misturas na condição de compactação após a cura e em seguida estimar o ângulo de atrito dos materiais ensaiados.

A pesquisa está estruturada em:

- **INTRODUÇÃO:** Foi dada uma abordagem inicial da pesquisa realizada;

- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: Aborda quanto à utilização e propriedades geotécnicas do resíduo de construção e demolição, da cal e do solo laterítico;
- METODOLOGIA: Descreve os materiais e os métodos utilizados no estudo.
- RESULTADOS E ANÁLISE: São plotados os gráficos gerados, as relações das propriedades obtidas e as análises dos resultados;
- CONCLUSÃO E SUGESTÕES: São feitas as principais conclusões e sugestões para pesquisas futuras;

E, por fim, as Referências Bibliográficas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

A construção civil, além de causar impactos consumindo recursos naturais não renováveis (Ângulo *et al*, 2003), também é considerada a principal geradora de resíduos na economia brasileira (FREITAS, 2009).

Os impactos causados pelo setor da construção civil com a utilização de agregados naturais incluem a exploração descontrolada de recursos naturais não renováveis, a fabricação de cimento e suas emissões de gás carbônico na atmosfera, e a poluição do ar gerada pelo transporte até os grandes centros (SANTOS, 2007).

Os resíduos da construção e demolição são gerados pelas atividades de construção, reformas, reparos e demolições, conforme ilustra a Figura 2.1. Logo, na composição destes resíduos existem componentes inorgânicos e minerais, como concretos, argamassas e cerâmicas e componentes orgânicos como plásticos materiais betuminosos, etc.



Figura 2.1 – Resíduo de Construção e Demolição

Segundo Ângulo *et al* (2003), os RCD são um dos responsáveis pelo esgotamento de áreas de aterros em cidades de médio e grande porte, uma vez que eles correspondem a mais de 50% dos resíduos sólidos. Neto & Schalch (2010) comentam que atualmente no Brasil, a produção

e disposição final dos entulhos se tornaram um dos principais problemas para governos municipais.

As problemáticas causadas pela deposição irregular do RCD levaram o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) a estabelecer a Resolução n° 307, em 2002. Esta resolução responsabiliza os agentes causadores a uma destinação adequada aos resíduos. A Figura 2.2 ilustra um exemplo de disposição ilegal do RCD.



Figura 2.2 - Exemplo de deposição ilegal do RCD

Desta forma, a reciclagem do RCD (Figura 2.3) é uma forma de aproximar o setor da sustentabilidade por meio da redução dos impactos negativos dos seus resíduos nas cidades e da geração de matéria-prima que pode ser substituída pela natural, não renovável (Ângulo *et al*, 2003). Ainda segundo os mesmos autores, no Brasil, grande parte das instalações de reciclagem de RCD mineral é gerida pelo setor público, ainda de forma incipiente.



Figura 2.3 – Reciclagem do RCD

(Fonte: <http://estacoes-reciclagem.biurrarena.com/estacao-rcd.php>)

As vantagens da utilização desse material são, segundo (Ângulo *et al*, 2003; Nunes *et al*, 1996; Motta *et al*, 2004; Fagury & Grande, 2007):

- Baixo custo, já que grande parte dos custos é relativa ao transporte e que, como são produzidos nas cidades, pode existir uma grande vantagem competitiva em relação aos agregados naturais;
- Redução da demanda dos agregados primários e consequente preservação das paisagens urbanas e das jazidas;
- Diminuição das áreas de aterro;
- Diminuição da atração de transmissores de doenças, do entupimento de bueiros e do assoreamento dos cursos d'água e reservatório, implicando em aumento das enchentes e inundações nas estações chuvosas;
- Preservação ambiental, o que não é quantificado monetariamente.

As especificações da ABNT em relação aos RCD são:

- NBR 15112/2004: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15113/2004: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15114/2004: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Área de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15115/2004: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos;
- NBR 15116/2004: Agregados reciclados de resíduos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.

As aplicações mais indicadas para o agregado reciclado incluem os materiais destinados a base e subbase de pavimentos (Figura 2.4), aterros, agregados para concretos e argamassas e matéria-prima para a fabricação de tijolos e blocos de concreto ou solo-cimento (FAGURY & GRANDE, 2007).



Figura 2.4 – Utilização de RCD em camadas de pavimentação (Fonte: Leite, 2007)

O RCD utilizado nesta pesquisa é classificado:

- Segundo a Resolução 307 de 2002 do CONAMA, os RCD são classificados de acordo com as possibilidades de reciclagem. O material utilizado nesta dissertação, de acordo com a Resolução, é o da classe A – reutilizáveis ou recicláveis como agregados;
- De acordo com a ABNT NBR 15114/2004, o resíduo utilizado na dissertação corresponde à Classe A – resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados de construções, reforma e demolição de pavimentos, de obras de infraestrutura (inclusive solo), de edificações (tijolos, argamassa, concreto, etc.) e de fabricação e/ou demolição de pré-moldados de concreto produzidos em obras;
- Em Classe II B, inerte, de acordo com a NBR 10004/2004. De acordo com esta norma, são aqueles que, quando submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não têm nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

2.2. PROCESSO DE RECICLAGEM DO RCD

No Brasil, apenas uma pequena parcela desses RCD, potencialmente recicláveis como agregados, é de fato reciclado (Ângulo *et al*, 2002).

Trata-se de uma atividade que deve ser prioritariamente realizada no próprio canteiro, mas que pode também se executar fora do mesmo. O ideal seria se a reutilização e reciclagem dos resíduos na obra fossem práticas constantes e incorporadas ao dia-a-dia das construtoras como parte integrante do planejamento e execução das obras, assim como demonstrado na Figura 2.5 (Lima & Lima, 2011).

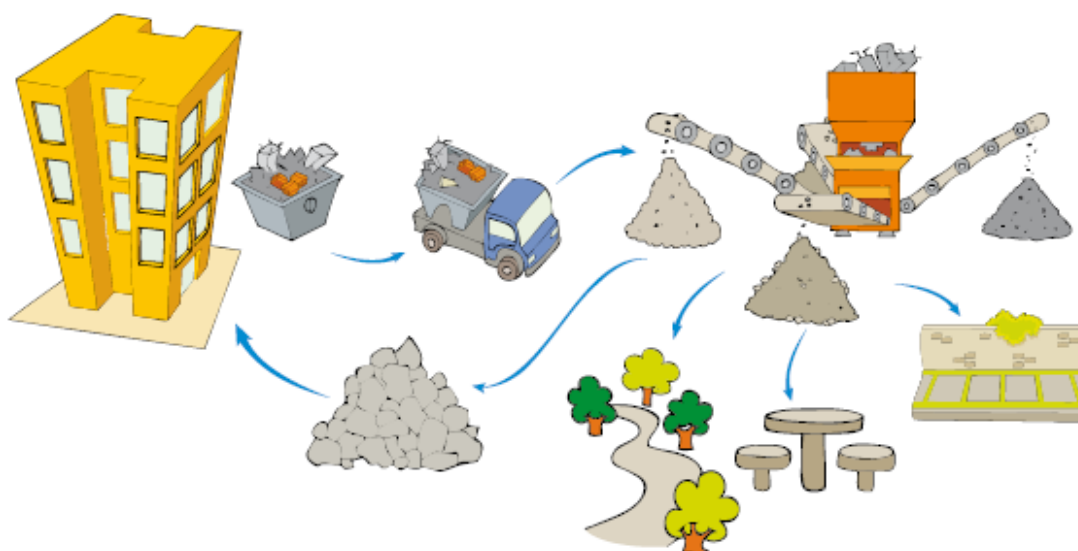


Figura 2.5 - Fluxograma de Reciclagem dos resíduos (Lima & Lima, 2011)

O processo de produção de agregados de RCD reciclados depende basicamente da viabilidade técnica e econômica, sendo que no Brasil, as plantas de reciclagem de RCD só possuem sistemas de britagem e peneiramento, voltadas para a parcela inorgânica não-metálica desses resíduos (Ângulo, 2000). A Figura 2.6 esquematiza um fluxograma de uma reciclagem sustentável para o RCD.

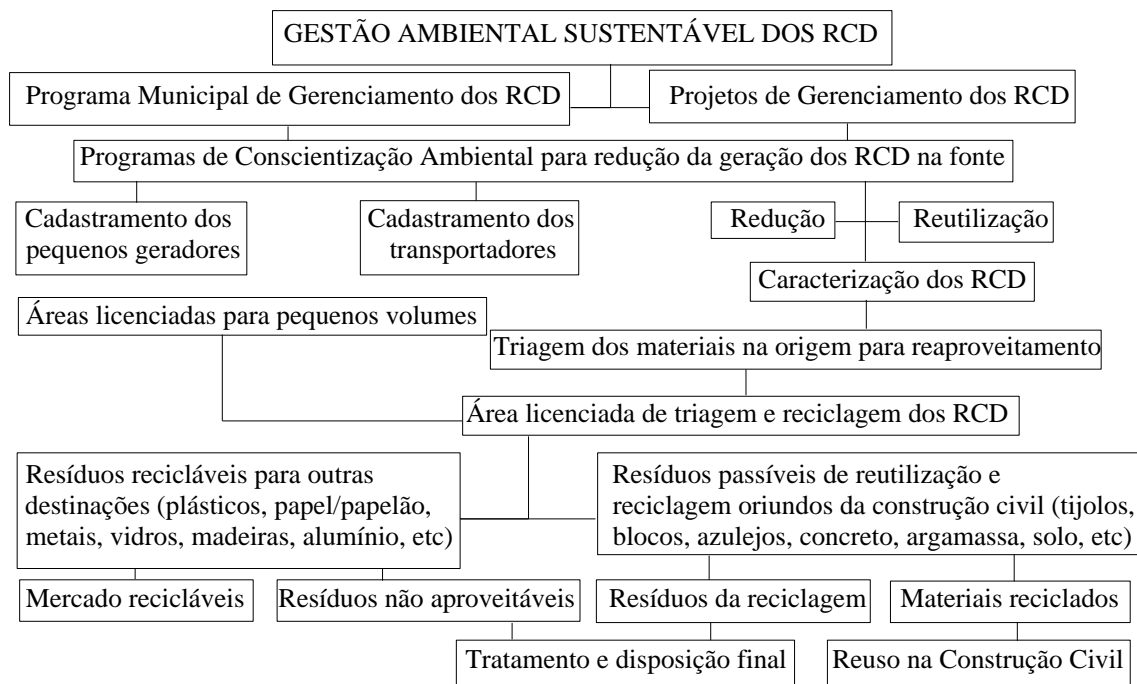


Figura 2.6 – Fluxograma de reciclagem sustentável para o RCD (Neto & Schalch, 2010).

Após a Resolução CONAMA 307, a quantidade de usinas de reciclagem instaladas cresceu, mas utilizando ainda um sistema simples de reciclagem, conforme Figura 2.7. Apesar do crescimento de usinas recicladoras, a capacidade brasileira de produção de agregados reciclados está muito abaixo da geração de RCD em todo o país (Miranda *et al*, 2009).

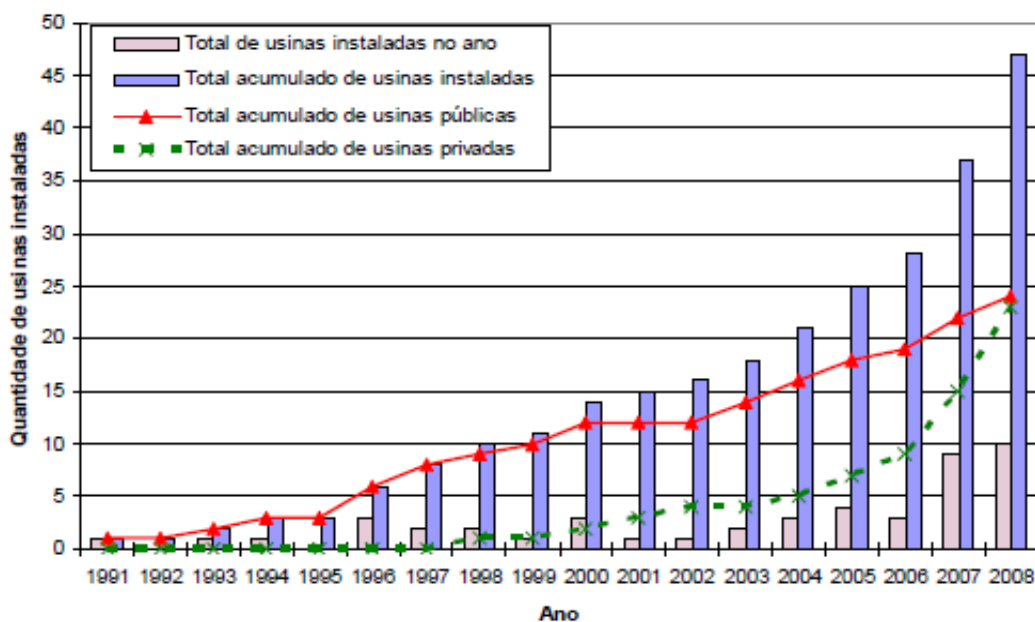


Figura 2.7 - Usinas de reciclagem de RCD classe A inaugurada ao longo dos anos no país (Miranda, 2009).

Os impactos ambientais, sociais e econômicos causados pela deposição irregular dos resíduos, demonstram, de forma clara, a necessidade da existência de políticas públicas que possam incentivar a redução da geração de resíduos, avaliar os impactos gerados e fornecer subsídios ao setor da construção civil, para que esse possa realizar um gerenciamento eficiente voltado para uma postura ambientalmente correta (SANTOS, 2007). O autor ainda comenta que, em vários países, a reciclagem é altamente rentável, pois há fortes incentivos do governo. A diferença da utilização do RCD entre os diversos países está na ação tomada pelos desenvolvidos com relação à disposição destes resíduos; há leis fortes para incentivar o uso de reciclados e mesmo, em certas condições, para proibir a geração de resíduos sem uma programada destinação (Motta *et al.*, 2004). Miranda *et al* (2009) relata que merece destaque a necessidade de articulação entre os diversos agentes envolvidos e a ação do poder público municipal para integrá-los, por meio de legislação específica, de ação coercitiva e socioeducativa.

No Brasil, iniciaram-se as implantações de planos de gerenciamento de RCD em canteiros, e normas técnicas foram elaboradas por Comitês Técnicos e publicadas pela ABNT em 2004 (Miranda *et al*, 2009). O custo do controle de qualidade é baixo. É necessário que seja implantado com o intuito de se reduzir a variabilidade do agregado reciclado.

Na cidade de São Paulo, de acordo com Santos (2007), o Decreto nº 4875/2006 tornou obrigatória a utilização de material proveniente da reciclagem de RCD nas obras e serviço de pavimentação de vias públicas da capital paulista.

O assunto da reciclagem de resíduos parece estar despertando maiores interesses na academia que na prática das obras, o que não deveria ocorrer, uma vez que o gerenciamento de RCD dentro do canteiro de obras, na verdade, apresenta inúmeras vantagens para as empresas, como, segundo Lima & Lima (2011):

- redução do volume de resíduos a descartar;
- redução do consumo de matérias extraídas diretamente da natureza;
- redução dos acidentes de trabalho, com obras mais limpas e organizadas;
- redução do número de caçambas retiradas da obra, melhoria na produtividade;
- não responsabilidade por passivos ambientais;
- atendimento aos requisitos ambientais em programas como PBQP-H, Quali-Hab e ISO 14.000;
- diferencial positivo na imagem da empresa junto ao público consumidor.

Abdou e Bernucci (2006) citam ainda que o preço do agregado reciclado é inferior ao de materiais convencionais e que, em São Paulo, é cerca de 30% mais barato que a brita graduada simples. Motta (2005), apud por Nóbrega & Melo (2009) acrescentam ainda que o uso do agregado reciclado reduziu em 18% os custos com a pavimentação na cidade de São Paulo.

Em geral, Muscalu & Andrei, 2011 citam como os fatores que prejudicam a gestão da reciclagem do RCD:

- falta de informação e interesse dos contratantes na proteção ambiental;
- falta de conhecimento ou ignorância dos contratantes em relação aos entulhos da indústria da construção;
- falta de interesse em prevenir o desperdício na construção;

- falta de um sistema centralizado de geração de resíduos da construção e atividades de demolição;
- número limitado e baixa capacidade de aterros.

Srouf *et al* (2010) listam algumas medidas que auxiliam a encorajar a reciclagem de materiais de construção:

- violações ambientais como jazidas sem licença ou depósitos irregulares devem ser fiscalizados e monitorados, sob pena de multa;
- os políticos devem trabalhar juntos para atender as especificações necessárias e estimular a reciclagem;
- aumentar os impostos relativos à deposição em aterros.

Atualmente, grande parte dos agregados de RCD reciclados, tanto no Brasil como no exterior, é utilizada em atividades de pavimentação em função do bom desempenho técnico e baixas exigências de qualidade (Ulsen, 2006), sendo, segundo Ângulo *et al* (2002), melhor aproveitado se comparado com o emprego desses agregados como componentes de concretos.

2.3. PROPRIEDADES DO RCD

O agregado do resíduo de construção e demolição é uma alternativa atrativa para materiais de base e sub-base devido à alta resistência e comportamento não expansivo (Leite *et al.*, 2010).

Segundo Motta (2005) o agregado reciclado absorve muita água, certamente devido à sua maior porosidade, implicando na necessidade de maior quantidade de água por ocasião da compactação, que promove significativa alteração na granulometria do agregado reciclado, alterando o material ao longo de todo o processo.

Uma característica física do RCD é por possuir maior cubicidade do que o agregado convencional, apresentando melhor intertravamento entre os grãos compactados (Ron *et al.*, 2008). Essa predominância de partículas cúbicas, representada por materiais cimentícios e

rochas quebradas, pode contribuir para a melhor densificação e aumento da resistência ao cisalhamento (LEITE *et al.*, 2010).

Ainda segundo Leite *et al.* (2010), a maioria das quebras durante a compactação ocorre no início, quando o material ainda não está totalmente compactado, facilitando a mobilidade das partículas. Portanto, no campo, esta quebra ocorre durante a construção e não ao longo da vida do pavimento.

A composição química dos RCD está intrinsicamente relacionada à fração granulométrica, em que abaixo de 4,8mm representa até 50% em massa de todo resíduo de construção e demolição (ULSEN *et al.*, 2010).

Ângulo & John (2004), apud Santos (2007), verificaram que a geração de agregado miúdo chegou a ser duas a três vezes maior que a geração de agregados graúdos, provavelmente relacionados com a natureza do resíduo e regulagem e tipo de equipamento de britagem.

A NBR 11804/91 recomenda uma distribuição granulométrica com maior parte em fração fina para base e subbase de pavimentos estabilizados.

2.3.1. PROPRIEDADES DO CONCRETO RECICLADO

A retração é um ponto crítico para o agregado de concreto. Os agregados reciclados com maior quantidade de pasta aderida aos grãos de minerais apresentam maior absorção de água e logo um volume maior de água possível de evaporar e provocar retração (QUEBAUD-BUYLE-BODIN, 1999, apud Ulsen, 2006).

As propriedades de menor densidade e maior absorção podem ter uma reação negativa na qualidade para fabricação de concreto reciclado, provavelmente afetam as propriedades relativas à deformação e durabilidade (Juan & Gutierrez, 2004). Na pesquisa realizada por Mendes *et al.* (2004), o agregado reciclado de concreto absorveu aproximadamente 98% de sua absorção máxima em 5 minutos.

2.4. USO DO RCD EM CAMADAS GRANULARES DE PAVIMENTAÇÃO

Várias pesquisas realizadas incentivam o uso do resíduo de construção e demolição como substituição de parte de material granular em pavimentos submetidos a baixo volume de tráfego.

Segundo Motta (2005), utilizando material proveniente da usina de reciclagem da Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP), de argamassa, concreto, telha vermelha e de amianto, tijolo e piso/azulejo, constatou que, em termos de granulometria, a fração areia estava presente de forma significativa, o que pode ter facilitado a compactação e ajudar no travamento dos agregados graúdos, por tornar a mistura mais coesa e diminuir o volume de vazios. Verificou-se ainda que o Índice de Suporte Califórnia aumentou significativamente com o tempo. Sem cura, apresentou CBR de 76 e 74%. Já com 180 dias apresentou CBR de 121 e 128%. Com auxílio do programa ELSYM5, observou-se que houve aumento do Módulo de Resiliência com o tempo dos corpos de prova contendo somente agregado. Assim, obtiveram-se indícios de que houve reação pozolânica por parte de partículas que ainda possuíam potencial reativo, principalmente nas primeiras idades, demonstrando que o agregado reciclado não era totalmente inerte. A autora comparou estes resultados ao de uma brita de graduação semelhante e observou que se mantiveram os mesmos ou até foram superiores. Ainda no ensaio de Resiliência, verifica-se que a incorporação de 4% de cal ao agregado reciclado tornou a mistura compactada mais rígida, refletindo em um considerável aumento do Módulo de Resiliência, comparando com o resultado obtido para o material *in natura*, sem cura. Ainda na pesquisa de Motta (2005), verificou-se que, com a incorporação de 4% de cal ou 4% de cimento Portland, a Resistência à Tração por Compressão Diametral se elevou expressivamente em relação ao RCD puro. Também se verificou pelos resultados que a Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) aumentou com o tempo, sendo que com 4% de cal apresentou ganho de resistência de aproximadamente 13, 18 e 10 vezes aos 28, 90 e 180 dias de cura, respectivamente, em relação ao material *in natura*. A melhora do comportamento mecânico na adição de cal ou cimento também ocorre no ensaio de Resistência à Compressão Simples em que, com a adição de 4% de cal, se ganha 3, 8 e 7 vezes aos 29, 90 e 180 dias de cura, respectivamente, comparando-se com o material *in natura*.

No estudo realizado por Leite *et al* (2010), com amostras de RCD de materiais cimentícios, cerâmicos e brita graduada provenientes da usina de reciclagem da Prefeitura Municipal de São Paulo, concluiu-se que a absorção variou com a porosidade e com a forma dos grãos. Também se verificou que a distribuição dos tamanhos dos grãos foi alterada no processo de compactação, aumentando a porcentagem dos grãos cúbicos. Quanto ao comportamento mecânico, constatou-se que na compactação utilizando energia modificada, há um aumento na capacidade de suporte do RCD, comparando-se com valores obtidos com a energia intermediária, o que também ocorre melhora em relação à deformação permanente. O módulo resiliente obtido para o RCD, comparando-se com da brita graduada, apresentou comportamento similar.

Segundo Bennert *et al* (2000), apud Leite *et al* (2010), a mistura utilizada de 25% de agregado de concreto reciclado com 75% de agregado natural teve comportamento semelhante quanto à deformação permanente, comparando com um agregado de base.

A pesquisa realizada por Silva *et al.* (2011) constatou que o solo natural coletado no Centro de Ciências Agrárias do Campus do Pici da UFC utilizado não apresentou resultados satisfatórios para uso em camadas de pavimentos. Já a mistura de 50% de RCD graúdo, 40% de RCD miúdo (ambos agregados coletados na Usina de Reciclagem de Fortaleza) e 10% de solo natural apresentou CBR de 118% na energia modificada. Ainda acrescenta que, com a adição do resíduo ao solo, percebeu-se uma melhoria no comportamento resiliente, visto que ficou menos susceptível às variações de tensão, além de se ter obtido valores maiores do módulo resiliente para níveis de tensão mais elevados.

No estudo realizado por Ron *et al.* (2008), utilizou-se um material proveniente de demolição e fornecido pela Usina de Reciclagem de Fortaleza, britado conforme tamanhos e formas similares aos de um agregado convencional. Constatou-se que o RCD apresentou melhor abrasão que a brita convencional e índice de forma superior (sendo o entulho mais cúbico que a brita). Quanto aos ensaios mecânicos, a brita apresentou Resistência à tração de 0,91 MPa, e o RCD de 0,96. Apresentou, ainda, Módulo de Resiliência de 3121 MPa e 2931 MPa, respectivamente.

Em Piracicaba, foi desenvolvida uma metodologia para fechamento de valas com uma parcela mineral do RCD, adicionando-se uma porcentagem de cimento, na reparação de ruas e avenidas executadas pelo Serviço Municipal de Água e Esgoto. O material passou por triagem

e foi separado dos demais resíduos, depois foi submetido à britagem. De acordo com Vedroni & Carvalho (2008), o desempenho do pavimento foi bom, já que em 3 anos não apresentou problemas que normalmente ocorrem, como afundamento de vala, deformação do revestimento em função do baixo suporte da estrutura do pavimento, ou qualquer outra patologia na reparação executada. O material foi classificado como não perigoso e não inerte segundo resultado dos ensaios de lixiviação e solubilização. O CBR chegou a 124% quando compactado no proctor modificado, após imersão em água por 4 dias. Adicionando-se 6% CP II Portland obteve-se resultado médio de compressão simples de 2,7 MPa, compactado na energia intermediária e umidade ótima.

Segundo Bodi *et al.* (1995), apud Oliveira (2007), a Superintendência das Usinas de Asfalto da Prefeitura Municipal de São Paulo iniciou a estudar as formas de aproveitamento dos resíduos sólidos da construção civil gerados na cidade aplicando em pavimentação. O estudo visava minimizar a ocorrência de lama nos períodos chuvosos ou poeiras nos períodos de estiagem. No estudo realizado pelos mesmos, foram coletados resíduos sólidos de vários pontos de despejo clandestino na cidade de São Paulo. Verificou-se que a mistura do RCD com solo apresentou valores de CBR melhores que com o agregado britado natural misturado ao solo. Os autores atribuíram essa diferença ao fato de que o agregado reciclado apresentava, ainda, uma carga aglomerante, tais como cimentos e cais ativos, e à ausência de finos do agregado natural britado.

Nóbrega & Melo (2009) realizaram um estudo com um material oriundo da usina de reciclagem de João Pessoa, contendo cerâmica, argamassa e concreto, brita, outros minerais e impurezas. O índice de forma para as amostras foi de 3,32, acima do máximo 3, estabelecido por norma. Após a compactação o resultado do ensaio caiu para 2,32. Quanto ao ensaio de abrasão, o mesmo também se encontrou acima do estabelecido por norma, com um resultado de 65%. O ISC apresentou um resultado médio de 40,8% e expansão de 0,23%.

O RCD do tipo concreto, utilizado no estudo de Santana *et al* (2007), teve valores de CBR que chegaram a 103%.

Na pesquisa realizada por Gómez (2011) foi utilizado resíduo da demolição do estádio de futebol Mané Garrincha, com 99,44% de materiais classe A pela resolução CONAMA 307/02. Obteve-se ganho de 20 e 34% quando da imersão na energia intermediária e modificada, respectivamente, para ensaios de CBR. O módulo de resiliência mostrou que o

agregado teve comportamento similar ao de agregados pétreos, variando entre 200 a 500 MPa. Aos sete dias de cura o ensaio indicou módulos de resiliência variando entre 300 e 600 MPa. Em relação ao módulo de resiliência dos corpos de prova compactados na energia modificada, os mesmos não tiveram o comportamento esperado, provavelmente relacionado à maior quebra de grãos com a energia modificada. Verificou-se um ganho de rigidez com o aumento do período de cura. Obteve-se ângulos de atrito acima de 50°.

É importante enfatizar que os ensaios e análises devem ser feitos de forma corriqueira, visto que os agregados reciclados são bastante heterogêneos, com características que podem variar em função do tipo de obra, materiais de construção ou do período do ano (Nóbrega & Melo, 2009).

2.5. SOLOS TROPICAIS

Segundo Nogami & Villibor (1995), os solos tropicais possuem comportamentos bem diversos daqueles previsíveis pelas metodologias tradicionais de classificação, devido à sua macro e microestrutura, conforme apresentado na Figura 2.8. Então, faz-se necessário avaliar se o material a ser utilizado tem características de solo tropical, para que, quando classificado, represente corretamente seu comportamento em campo e sejam evitados problemas de mau dimensionamento (Brandão *et al.*, 2009) e, segundo Moizinho *et al* (2006), pavimentos com custos elevados, tendo em vista as grandes distâncias de transporte de agregados de uso já consagrados na prática, principalmente em regiões que não se dispõem dos mesmos.



Figura 2.8 – Micro e macroestrutura de um solo laterítico típico

Fortes *et al* (1999) relata que a falta de uniformidade na exigência das especificações para agregados lateríticos, as quais estabelecem diferentes limites de aceitação para um mesmo serviço à medida que muda o órgão normalizador, dificulta sua utilização, o que pode provocar a rejeição de agregados lateríticos que poderiam ter desempenho satisfatório em serviço.

Ainda segundo Fortes *et al.* (1999), o uso de materiais naturais tropicais levou a uma drástica diminuição das distâncias de transportes dos materiais e/ou eliminação dos custos de aquisição de materiais estabilizantes, resultando em pavimentos significativamente mais econômicos que os tradicionais e viabilizando a implantação de uma extensa malha de rodovias vicinais.

2.5.1 EXPERIÊNCIAS DA MISTURA DE RCD E SOLOS TROPICAIS

Parente *et al.* em um estudo demonstraram que a mistura composta com o solo de comportamento laterítico estabilizado com cimento apresenta melhor desempenho que a mistura composta com o solo de comportamento não laterítico, independente do tempo de cura e teor de cimento. De acordo com Bernucci (1995), apud Parente *et al.*, o fato de os solos lateríticos apresentarem, na compactação, uma massa específica aparente seca maior que as dos solos não lateríticos seria uma das razões que explicariam o seu desempenho superior. Segundo Moura (1987), apud Parente *et al* o solo-cimento difere do concreto e da argamassa de cimento pela presença de quantidade considerável de partículas finas do agregado (solo) e pela proporção bastante reduzida de cimento na mistura.

A mistura de cerâmica com solos lateríticos foi avaliada após a compactação, apresentando ganhos expressivos no valor do módulo de resiliência, chegando a atingir 288% acima do módulo do agregado natural, o que diminui a probabilidade de ruptura por fadiga (Dias & Agopyan, 2005).

A partir de composições efetuadas em solo tropical, tipicamente laterítico, arenoso, nas proporções de 67% e 37% de resíduo e outra mistura de 50% de solo mais 50% de resíduo,

em peso, indicaram um aumento expressivo no valor do CBR, comparando com amostras de solo puro (Cavalcante *et al.*, 2006).

Guimarães (2009) relata que o Módulo de Resiliência não leva em consideração a distribuição granulométrica e sim a porosidade do agregado, possibilitando então que o agregado reciclado possa ser melhorado com solo laterítico, haja vista sua maior porosidade quando comparado a um solo de característica temperada.

2.6. ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS COM A UTILIZAÇÃO DA CAL

É comum que o solo de uma localidade não preencha parcial ou totalmente as exigências do engenheiro construtor. Assim, torna-se necessário escolher entre aceitar, remover ou alterar as propriedades do solo. As propriedades de um solo podem ser alteradas por métodos mecânicos, físicos e químicos (Pinheiro, 2011).

Nos pavimentos rodoviários, os solos granulares são os mais utilizados para construção, por apresentarem um índice de resistência maior, podendo suportar grandes solicitações de carga. Atualmente, o uso de solos finos estabilizados com aditivos tem substituído esses materiais, seja pela carência de jazidas de solo grosso mais apropriado para pavimentação, ou pelas restrições ambientais (Brandão *et al.*, 2009).

Segundo Lima *et al.* (1993), apud Oliveira (2000), a estabilização química de um solo refere-se às alterações produzidas na sua massa pela introdução de uma quantidade de aditivo, processando-se por diversos mecanismos, como a substituição das moléculas de água e cátions adsorvidos por cátions hidrorrepelentes, estabelecimento de ligações reforçadas entre agregados de partículas pela adição de ligantes, floculação e dispersão.

Quando se mistura cal a um solo, processam-se simultaneamente vários tipos de reação que modificam as suas características. Admite-se, geralmente, que as mais importantes são a troca catiônica e floculação, ação de cimentação por reações pozolânicas e de carbonatação (Oliveira, 2000).

A cal virgem é o aglomerante resultante da calcinação de rochas calcárias (CaCO_2). O fenômeno é dado por:

Ca CO_3 (calcário) + calor = CaO (cal virgem) + CO_2 (gás carbônico)

Cal hidratada é um produto manufaturado que sofreu em usina o processo de hidratação. É apresentada como um produto seco, na forma de um pó branco de elevada finura. A cal hidratada oferece sobre a cal virgem algumas vantagens, entre elas maior facilidade de manuseio, por ser um produto pronto, eliminando do canteiro de obras a operação de extinção e maior facilidade de transporte e armazenamento. Este tipo de cal é um aglomerante hidráulico, ou seja endurece pela ação da água, e foi muito utilizado nas construções mais antigas, sendo posteriormente, substituído pelo cimento Portland (ARAUJO, RODRIGUES E FREITAS, 2000).

A qualidade da cal hidratada depende da qualidade da cal virgem utilizada para sua produção. Uma de suas principais características é a reatividade, que é a capacidade de reagir com as impurezas suspensas na água através de condicionamento químico. A reatividade, nesse caso, depende das características físicas como granulometria e superfície específica, da pureza da cal virgem e o tipo de calcinação sofrida, dependente da temperatura utilizada.

A cal pode ser utilizada na estabilização de solos, dando a ele condições para resistir a carregamentos e intempéries, tornando-o impermeável e aplicável na construção de bases de pavimentos urbanos e rodoviários (Minascal, 2012), conforme retrata a Figura 2.9.



Figura 2.9 - Utilização de cal em camadas de pavimentos (Fonte: Minascal)

2.6.1. DO PROCESSO DA ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA

A cal atua na estabilização química interagindo com o solo através da hidratação. Suas propriedades físicas não tem ação relevante no processo (Pinheiro, 2011). Devido à adição da cal nos solos, esta promove um significativo aumento do pH dos mesmos, aumentando a solubilidade e a reatividade da sílica e da alumina presente nas partículas de argila. Os íons de cálcio se combinam com a sílica e a alumina presentes na argila, dando origem a compostos cimentícios adicionais, que são os silicatos de cálcio e os aluminatos, tendendo a cimentar as partículas do solo de maneira similar àquela produzida devido a hidratação do cimento Portland (Bento, 2006). A Figura 2.10 ilustra a reação da cal com argila.

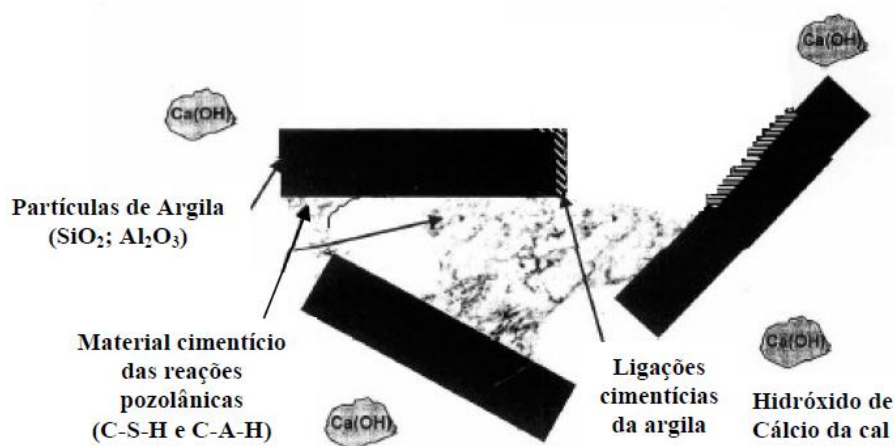


Figura 2.10 – Reação da cal com a argila (Fonte: Bento, 2006)

A estabilização alcalina é aplicável em todo solo com, pelo menos, 10 a 15% de argila, baixos teores de matéria orgânica, mica e sulfatos. Na presença dos três últimos componentes, o estabilizante não reage formando cimentantes, apenas os neutraliza (Pinheiro, 2011).

A cal reage com solos médios, moderadamente finos e solos finos (Pinheiro, 2011). Os solos mais reativos à cal incluem os cascalhos argilosos, as argilas siltsas e as argilas. Todos os solos classificados pelo HB como A-5, A-6 e A-7 e alguns classificados como A-2-6 e A-2-7 são os mais propícios à estabilização com cal (LEANDRO & FABBRI, 2009).

A dosagem da cal, de acordo com o Método de Eades & Grim (1966), apud Pinheiro (2011), baseia-se no pH da mistura, adicionando a cal até que a mistura tenha um pH de 12,4. Na pesquisa realizada por Brandão *et al* (2009), observou-se que o pH dos solos teve forte elevação com a adição da cal ao solo, aproximando estes do próprio pH da cal pura.

A quantidade de estabilizante necessária para provocar esse tipo de reação no solo é função do tipo de solo e dos seus minerais constituintes, assim como o tipo de estabilizante que será utilizado, sendo que as reações desenvolvidas entre eles dependem fundamentalmente da interação entre esses dois elementos, o solo e o estabilizante. Os fatores que determinam a quantidade de estabilizante a ser adicionado no solo, é a quantidade de cálcio suficiente para que se desenvolvam as trocas catiônicas, floculação e aglomeração, assim como o desenvolvimento da resistência (Bento, 2006).

2.7. EXPERIÊNCIAS DA UTILIZAÇÃO DA CAL NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

A cal diminui a plasticidade, melhora a plasticidade, reduz a expansão e aumenta a resistência e, por ser um material fino e conseqüente aumento da superfície específica do material, aumenta-se a capacidade de saturação e diminui-se o peso específico seco máximo (Araujo, Rodrigues & Freitas, 2000).

Na pesquisa realizada por Araújo *et al* (2008) com um solo fino situado na região do Agropólo do Baixo Jaguaribe e cal do tipo CH-I, verificou-se que houve um aumento crescente do valor do CBR (%) com o aumento do teor de cal na mistura. A amostra contendo somente solo teve um CBR de 4%. Após adição de 5% de cal em pasta o CBR chegou a 75% aproximadamente. Para ensaio de Compressão Simples, a amostra de solo natural apresentou RCS de 226,5 kN/m² e a de solo-cal em pasta (7%) apresentou, aos 90 dias de cura, 1373 kN/m². A adição de cal também melhorou o comportamento resiliente do solo.

Na pesquisa de Rufo *et al* (2009) foi verificado que um solo de Catalão – GO e outro de Goiânia – GO, em relação ao CBR, apresentaram melhorias à medida que aumentou-se o teor de cal, sendo maior no de Catalão, coincidindo com a constatação realizada por meio dos ensaios de caracterização, nos quais as misturas de cal com o solo de Catalão ocorreu maior

agregação. A adição da cal também aumentou a capacidade de troca catiônica (CTC), responsável pela redução na plasticidade dos solos e no aumento da fração areia devido à floculação e aglomeração das partículas.

Angelim (2005) utilizou um solo proveniente da BR-153 saída para Anápolis e relata em sua pesquisa que o valor de CBR igual a 7% do solo natural aumentou para 26% com adição de 6% de cal CH-I diluída na energia normal. Na energia intermediária passou de 16% do solo natural para 92% com adição de 6% de cal CH-I diluída.

Na pesquisa realizada por Filho *et al* (2005) com solo coletado em uma jazida de cascalho quartzo areno-argiloso na região de Anápolis, a adição de 4% de cal CH-I proporcionou um aumento de CBR de 42% (solo natural) para 121%, comparando com amostra sem adição do estabilizante, além de proporcionar redução dos limites de consistência à valores bem abaixo dos que foram encontrados no solo *in natura*.

Na pesquisa realizada por Rezende (2003), verificou-se que para dois trechos distintos, a incorporação da cal gerou para um trecho desagregação, por estar próximo do ponto isoelétrico do solo; e para outro, provocou maiores aumentos nos valores de pH, sendo que este se afastou do ponto isoelétrico e gerou floculação ou agregação. Pelos ensaios de viga Benkelman, observou-se bom comportamento da mistura solo-cal (2%) em relação ao solo fino envelopado, solo fino com geotêxtil entre base e revestimento, solo fino e expurgo. Verificou-se, quando do ensaio com pressiômetro Pencil, que para as misturas solo-cal, o módulo E_p aumentou com o aumento da sucção.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este Capítulo aborda os Materiais e Métodos de ensaio e preparação de amostras utilizadas nos ensaios realizados.

3.1. MATERIAIS

Para realização dessa pesquisa, foram utilizados solo argiloso intemperizado, resíduo de construção e demolição de concreto, cal hidratada calcítica tipo CH-III e cal virgem.

3.1.1. SOLO

O solo usado nessa pesquisa foi coletado em Maio de 2011 no campus experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB), conforme Figura 3.1. Esse solo é representativo dos solos típicos da região do Distrito Federal.



Figura 3.1 – Coleta do material

Imediatamente após a coleta foram retiradas amostras para determinação da umidade natural, que resultou em 23%. Em seguida, as amostras foram conservadas na câmara úmida do laboratório de Geotecnia da UnB no estado em que foram coletadas.

3.1.2. RCD

Para o RCD, optou-se utilizar um material que fosse abundante em demolições e que pudesse ser submetido a processos simples de reciclagem. Escolheu-se a obra de demolição realizada pela empresa Brasília Demolições, situada na rodovia Estrada Parque Indústria e Abastecimento Norte (Epiá Norte), onde atualmente está localizada a Leroy Merlin, conforme marcador na Figura 3.2.

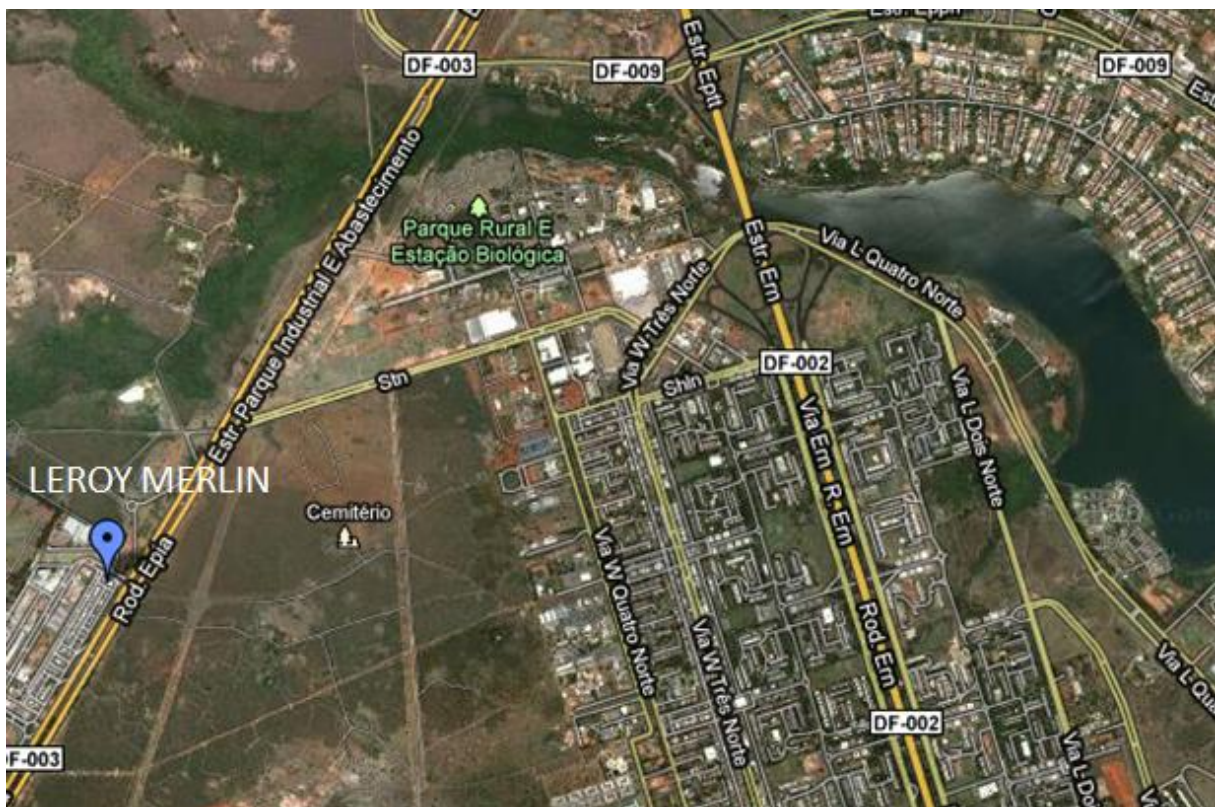


Figura 3.2 – Localização da coleta do RCD

Na coleta do RCD in loco, notou-se que o mesmo já havia se degradado pelo processo de demolição, como ilustrado na Figura 3.3. Preocupou-se em não coletar resíduos indesejáveis para a pesquisa, tais como arames, gesso, tinta, etc.



Figura 3.3 – RCD no momento da coleta

Após a coleta, o RCD foi submetido ao processo de britagem com britador de mandíbulas, realizada no Departamento de Geociências da UnB. Observou-se que apenas pela utilização do britador grande parte do RCD foi quebrado em grãos finos, conforme ilustra a Figura 3.4.



Figura 3.4 – Britagem do RCD

3.1.3. CAL VIRGEM E HIDRATADA CALCÍTICA CH-III

A cal virgem (Figura 3.5) e a cal hidratada calcítica do tipo CH-III (Figura 3.6) foi cedida pela empresa Belocal, representada pela Reforsolo Engenharia.



Figura 3.5 – Cal virgem



Figura 3.6 – Cal hidratada

No preparo da mistura contendo cal virgem, parte dessa reagirá com a água presente no solo ou incorporada à mistura, resultando em cal hidratada e liberará calor. Ressalta-se que dessa reação, haverá diminuição da umidade e, conseqüentemente, aumento da sucção. Segundo a

Qualical, para hidratar completamente a cal virgem rica em cálcio, são necessários estequimetricamente 32,1% de água e que o volume de água dependerá das características físicas, químicas e mineralógicas. Assim, a mistura com cal virgem conterá cal virgem e cal hidratada (pela hidratação da cal virgem), com menor umidade que uma mistura com cal hidratada contendo as mesmas proporções iniciais.

3.2. MÉTODOS

3.2.1 PREPARO

As amostras foram preparadas segundo a norma DNER-ME 041/94: Solos – preparação de amostras para ensaios de caracterização, porém não foram submetidas à secagem prévia, a fim de que se tivesse melhor caracterização comparada com a situação de campo. A figura 3.7 ilustra a preparação de uma amostra contendo somente solo.



Figura 3.7 – Preparo do solo

O RCD sofreu um processo de separação de maneira que foi utilizado apenas o material passante na peneira #4, já que a presença de grãos maiores podem diminuir a representatividade dos ensaios mini compactados. A presença predominante de finos é positiva devido à sua ação cimentante. A Figura 3.8 ilustra grãos retidos e passantes na peneira #4. Ao priorizar a matriz fina se buscou averiguar melhor a sua contribuição como agente cimentante.



Figura 3.8 – À esquerda, grãos retidos na peneira #4; à direita os grãos passantes nesta peneira

A pesquisa objetivou comparar o comportamento do solo com as misturas de 2/3 de solo + 1/3 de RCD, 2/3 de solo + 1/3 de RCD + 4% do peso total de cal virgem e mistura de 2/3 de solo + 1/3 de RCD + 4% do peso total de cal hidratada.

A pesquisa consistiu na realização de ensaios e constante análise e reflexão acerca dos resultados obtidos. Foram realizados os seguintes ensaios:

- Classificação TRB;
- Classificação Expedita MCT;
- Mini MCV e perda de massa por imersão;
- Ensaio químicos;
- Difração de raios-x;
- Massa específica real dos grãos;
- Porosimetria;
- Superfície específica;
- Microscopia;
- Absorção do RCD;
- Sucção;
- Mini compactação;
- CBR e expansão;
- Compressão simples;
- Resistência à tração por compressão diametral;
- Resiliência;
- Cisalhamento rápido.

Para os ensaios mecânicos e de determinação da sucção, foram preparadas as seguintes amostras com períodos de cura variáveis (1, 7, 14, 28 e 56 dias):

- Contendo somente solo;
- Contendo solo + RCD;
- Contendo solo + RCD + cal virgem;
- Contendo solo + RCD + cal hidratada.

Para os ensaios de caracterização, foram preparadas as amostras, conforme a Tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Amostras ensaiadas

Ensaio de Caracterização	Solo	Solo+RCD	Solo+RCD+Cal virgem	Solo+RCD+Cal hidratada	RCD	Cal hidratada	Cal virgem
Granulometria	x	x	x	x	x		
Limites de Atterberg	x	x	x	x			
Classificação MCT	x	x	x	x			
Mini MCV e perda de massa por imersão	x	x	x	x	x		
Massa específica dos grãos	x	x	x	x	x		
Porosidade e Superfície específica	x	x	x	x	x	x	x
Microscopia	x	x	x	x	x	x	x
Ensaio químicos	x	x	x	x	x	x	x
Difração de Raio x	x	x	x	x	x	x	x

Foi necessária cautela quando do preparo de amostras contendo cal virgem, pois, como explicado anteriormente, ao contato com a água, esta se transforma em cal hidratada e libera calor, tendo, portanto, uma reação exotérmica. A temperatura atingiu 45,2° em poucos segundos após a mistura, como ilustra a Figura 3.9.



Figura 3.9 – Aumento da temperatura na preparação de amostra com cal virgem

Segundo a Quallical, pode haver geração de calor excessivo quando o volume de água não é adequado, podendo atingir 280°C, ocasionando periculosidade no manuseio do material e por esta razão tem sido evitado seu uso em obras de construção civil.

3.2.2 ENSAIOS REALIZADOS

A seguir estão descritos os procedimentos adotados para realização de cada ensaio.

3.2.2.1 CLASSIFICAÇÃO TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (TRB)

A classificação TRB, antiga HRB, divide os solos em grupos e subgrupos, conforme sua granulometria e limites de Atterberg.

Na pesquisa, foram realizadas análises granulométricas por sedimentação com e sem o uso de defloculante tanto no solo como no solo + RCD. Pela utilização de mini corpos de prova, não houve necessidade de realizar granulometria grossa. Fez-se apenas granulometria dos finos por ser um material de espessura também fina. A granulometria por sedimentação seguiu o procedimento da DNER-ME 051/94: Solos – análise granulométrica, exceto no que diz respeito à secagem prévia do solo. As Figuras 3.10 e 3.11 ilustram o procedimento do ensaio.



Figura 3.10 – Sedimentação

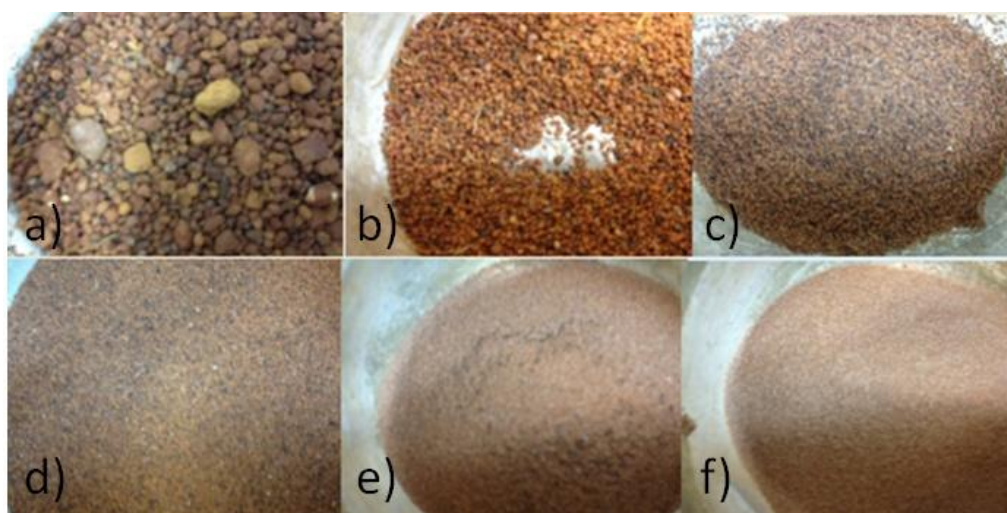


Figura 3.11 – Peneiramento fino do solo retido nas peneiras: a) #16; b) #30; c) #40; d) #50; e) #100; #200.

Os ensaios de limites de Atterberg – Limite de Liquidez e Plasticidade - seguiram as normas DNER-ME 122/94: Solos – determinação do limite de liquidez e DNER-ME: 082/94: Solos – determinação do limite de plasticidade, respectivamente, exceto no que diz respeito à secagem prévia do solo na fase de preparação de amostras. Foram determinados os limites para amostras de solo, solo + RCD, solo + RCD + cal virgem e de solo + RCD + cal hidratada, a fim de avaliar a provável diminuição da plasticidade quando da adição do RCD e dos cais. A Figura 3.12 ilustra a realização do ensaio.



Figura 3.12 – Limite de Liquidez e Plasticidade

3.2.2.2 CLASSIFICAÇÃO EXPEDITA MCT

Esta classificação foi desenvolvida tendo em vista que as classificações tradicionais baseadas nas propriedades índices, quando aplicadas para os solos típicos dos climas tropicais úmidos, resultavam em incongruências relativamente às suas propriedades mecânicas e hídricas. Solos considerados por aquelas classificações como inservíveis para bases de pavimentos, frequentemente, possuíam elevada capacidade de suporte (Villibor & Nogami, 2009).

A classificação expedita dos solos no grupo MCT é realizada com base no comportamento de contração, consistência e expansão de CPs moldados em anéis de 20mm de diâmetro. As Figuras 3.13 e 3.14 ilustram a realização do ensaio.



Figura 3.13 – Classificação Expedita MCT do Solo

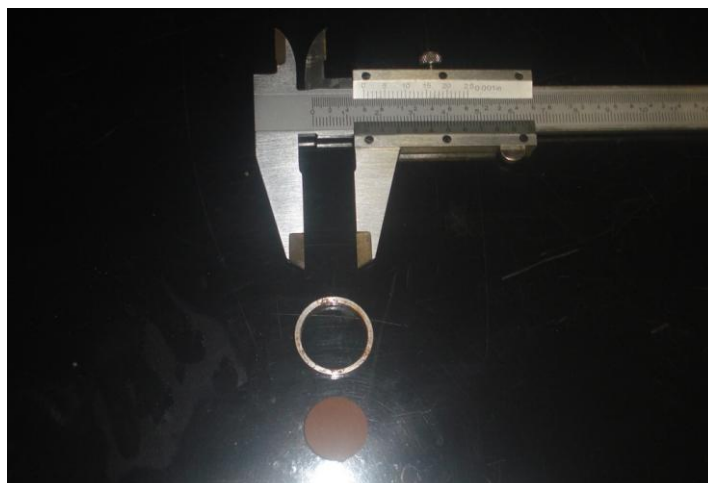


Figura 3.14 - Classificação Expedita MCT do Solo (2)

3.2.2.3 MINI MCV E PERDA DE MASSA POR IMERSÃO

O ensaio de Mini MCV foi realizado seguindo orientações do DNER-ME 258/94: Solos compactados em equipamento miniatura – Mini MCV para as amostras no teor de umidade ótima, uma vez que o objetivo do ensaio foi de comparar a atuação da energia de compactação entre as diferentes amostras. Em seguida, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de perda de massa por imersão, conforme DNER-ME 256/94: Solos compactados em equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão. A Figura 3.15 ilustra o ensaio de perda de massa por imersão.



Figura 3.15 – Perda de massa por imersão

3.2.2.4 ENSAIOS QUÍMICOS

Os ensaios químicos foram realizados no Laboratório da Soloquímica – Análise de Solos Ltda. Os ensaios realizados foram de determinação do pH em água e em KCl, determinação de teores de cálcio, sódio, potássio, magnésio, acidez total (H+Al), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação de alumínio (%Al), saturação de base (%V) e teor de matéria orgânica (MO). Utilizou-se na pesquisa materiais puros e em mistura: solo, RCD, cal virgem, cal hidratada, solo + RCD, solo + RCD + cal virgem, solo + RCD + cal hidratada, para verificar a interação dos mesmos e comparar com seu comportamento quando material isolado.

O potencial hidrogeniônico (pH) do solo refere-se a seu grau de acidez ou básico. Segundo Furtado (2005), a importância do estudo do pH se deve à sua influência na agregação de partículas e, conseqüentemente, a distribuição estrutural entre os vazios e a fase sólida do solo. O pH foi determinado através da utilização de um potenciômetro imerso em água destilada e KCl, na proporção de 10ml de amostra e 25 ml do líquido. A partir dos resultados, calcula-se o $\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} - \text{pH}_{\text{KCl}}$. Se a subtração for negativa, significa que ocorre predomínio de argilas silicatadas, com quantidade de alumínio trocável elevada, uma vez que o $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ são responsáveis pela acidez do solo (Furtado, 2005).

O ponto de carga foi determinado a partir dos resultados obtidos para o pH em água e em KCl conforme a Equação 3.1.

$$2\text{pHKCl} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} \quad (3.1)$$

A capacidade de troca catiônica (CTC) é a soma total dos cátions que o solo pode reter na superfície coloidal, ou seja, está relacionada ao tipo e porcentagem de argila do solo, uma vez que os principais constituintes da fração argila do solo são os colóides inorgânicos responsáveis pela absorção de cátions.

$\text{CTC (cmol}_e/\text{dm}^3) = (\text{S} + \text{acidez})$, em que:

$$\text{S (cmol}_e/\text{dm}^3) = (\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} + \text{Na}^+ + \text{K}^+);$$

$$\text{Acidez (cmol}_e/\text{dm}^3) = (\text{H}^+ + \text{Al}^{+++}).$$

A saturação da base é a capacidade de permuta de cátions ocupada por cátions básicos, que neutralizam a acidez do solo. Pela saturação da base pode-se encontrar explicações com respeito às condições de acidez do solo, alcalinidade, friabilidade, dispersividade e flocculação das argilas, além da disponibilidade de cálcio, magnésio e potássio para as plantas (Kiehl, 1979 apud Furtado, 2005).

3.2.2.5 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

Os ensaios foram realizados no laboratório de Raio-X do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. Utilizou-se na pesquisa materiais puros e em mistura: solo, RCD, cal virgem, cal hidratada, solo + RCD, solo + RCD + cal virgem, solo + RCD + cal hidratada, para verificar a interação dos mesmos e comparar com seu comportamento quando material isolado. Os ensaios ocorreram após, aproximadamente, 28 dias de cura. As análises das amostras estão no Anexo. A Figura 3.16 ilustra o equipamento utilizado.



Figura 3.16 – Difração de Raio X

3.2.2.6 MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS

A massa específica real dos grãos (G_s) foi realizada no equipamento pentapicnômetro, conforme Figura 3.17. O ensaio foi realizado em amostras em que foram ensaiadas mecanicamente e na amostra de RCD puro, a fim de verificar a influência do RCD nas misturas.



Figura 3.17 – Massa Específica real dos grãos

3.2.2.7 POROSIMETRIA E SUPERFÍCIE ESPECÍFICA

A porosimetria foi determinada pela utilização do analisador de área superficial específica e de poros da marca Quantachrome Instruments, modelo Nova 2200e e programa NovaWin. As amostras foram conectadas em uma unidade de adsorção imersas em nitrogênio líquido por um isolante térmico. O software determina a porosidade e a superfície específica por modelos escolhidos, no caso o BET (Brunauer, Emmett, Teller), gerando isotermas de adsorção e dessorção em função da variação relativa P/P_0 , em que P é a pressão e P_0 significa pressão do vapor de saturação do N_2 . As amostras secas foram acondicionadas previamente em um porta amostra a uma temperatura de $105^{\circ}C$ por um período de 24 horas para degaseificação e secagem, para que se verificasse a influência da água na porosimetria e superfície específica. A Figura 3.18 ilustra o equipamento utilizado.



Figura 3.18 – Porosimetria e Superfície Específica

3.2.2.8 SUCCÃO

A sucção de um solo é a energia correspondente a sua capacidade de reter água. Quando a água livre migra para dentro de um solo, ela será retida por capilaridade ou adsorvida por ele podendo ainda, a depender do solo e dos vazios existentes permanecer ocupando-os de modo livre ou quase livre, ou seja, sem um elo de energia que ligue a água à estrutura dos minerais. Para desprender a água adsorvida ou retida por capilaridade é necessária a aplicação de uma energia externa superior às forças de retenção do solo (Bento, 2006). Para essa pesquisa foi utilizada a técnica de medição de sucção por meio do Método do Papel Filtro. A técnica, de acordo com Marinho (1994), consiste na medição da sucção de equilíbrio entre amostra e papel filtro, que pode ocorrer de duas maneiras: por fluxo de vapor ou por fluxo capilar (Figura 3.19). Para o fluxo de vapor, as moléculas de água têm que escapar da água de poro vencendo as forças capilares no solo e eventualmente as forças osmóticas que agem devido à presença de sais. O espaço de ar deixado entre o papel filtro e o solo oferece uma barreira para os sais, permitindo apenas o fluxo de água. Já o fluxo capilar, ocorre através das partículas do solo e as fibras do papel filtro, sem que a água perca continuidade, implicando numa interação maior entre o papel filtro e a água de poro (isto é, que contém sais). No primeiro caso mede-se a sucção total e no segundo, a sucção matricial.

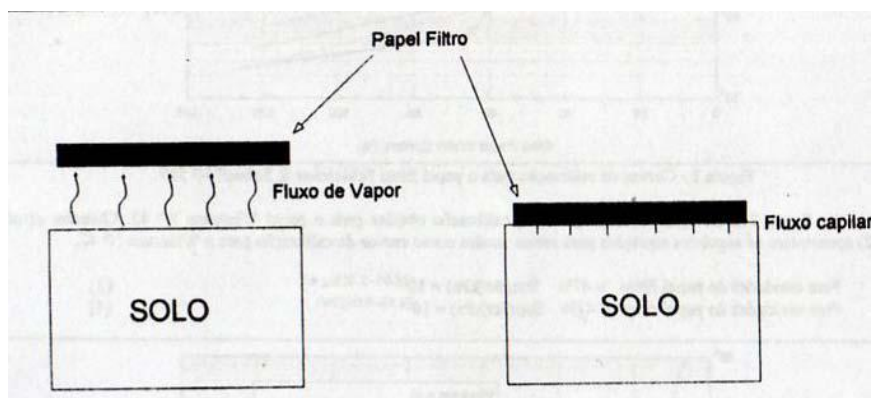


Figura 3.19 - Tipos de fluxo do solo para o papel filtro (Marinho 1995).

Utilizou-se o seguinte procedimento:

- Compactou-se os corpos de prova na umidade ótima com altura de aproximadamente 2 cm;
- Secou-se na direção de um ventilador (Figura 3.20) ou molhou-se os corpos de prova, de acordo com a umidade que se queria atingir;

- colocou-se 2 discos de papel filtro Whatman n° 42, sendo um para evitar o contato amostra-papel filtro e o outro para a medida da sucção;
- envolveu-se o conteúdo com papel laminado e em seguida por filme plástico;
- as amostras foram depositadas dentro de isopores e levadas para câmara úmida por um período de 14 dias;
- após a cura, retirou-se o papel filtro com uma pinça e pesou-se cada um em uma balança de 0,0001g de precisão, desprezando o papel filtro em contato com a amostra;
- os papéis filtros foram levados para estufa a 105° aproximadamente, por um período de 3 horas;
- em seguida, pesou-se os papéis filtros secos;
- com os dados de umidade do papel filtro, foi possível calcular a sucção correspondente.



Figura 3.20 – Sucção – corpos submetidos à secagem

A sucção foi calculada pelas Equações 3.1 e 3.2 (Chandler, 1992):

$$> 47\%: \text{Sucção (kPa)} = 10^{(6,05 - 2,48 \cdot \log w)} \quad (3.2)$$

$$\leq 47\%: \text{Sucção (kPa)} = 10^{(4,84 - 0,0622 \cdot \log w)} \quad (3.3)$$

O resultado de cada sucção é relacionado com a umidade do corpo de prova. Comumente se usa a umidade gravimétrica no estabelecimento dessas relações, mas pode ainda ser usada a umidade volumétrica ou ainda o grau de saturação do solo. Quanto à escala, o mais comum é representar a sucção em kPa na escala a logarítmica, mas ela pode ainda ser representada em outra unidade e escala. Nessa dissertação fez-se uso também da sucção em pF que é o logaritmo da sucção em centímetros de coluna de água.

A curva característica de sucção ou retenção de água pode ser utilizada para fornecer estimativa de parâmetros importantes para a descrição do comportamento do solo não saturado, tais como a permeabilidade, resistência ao cisalhamento e variação de volume (Fredlund *et al*, 1997 apudVillar, 2002).

Em solos argilosos, tanto as forças capilares como as de adsorção são significativas. A saturação e a sucção matricial estão relacionadas com a distribuição granulométrica. O valor de entrada de ar em termos de sucção é definido como sendo o valor da sucção mátrica que tem que ser excedida para o ar poder entrar para os vazios do solo (Brooks & Corey, 1966 apudVillar, 2002).

Análises convencionais, nesta pesquisa, foi utilizado também o modelo proposto por Camapum de Carvalho e Leroueil (2004), representando a curva característica em função do produto do índice de vazios pela sucção ($e \times pF$) *versus* o grau de saturação. Este modelo de curva adotada neste trabalho é denominado curva característica transformada, pois expressa o grau de saturação em função de pF multiplicada por “e” (Bento, 2006). Para Camapum de Carvalho e Leroueil (2004) as curvas características podem ser afetadas por vários fatores tais como as propriedades químicas e mineralógicas, o índice de vazios e a distribuição de poros. Para a curva característica transformada, diferenças nas propriedades químicas e mineralógicas podem ou não diferenciar as curvas características de dois solos distintos, não interferindo, no entanto, nas curvas características de sucção de um mesmo solo, a menos que estas propriedades sejam alteradas naturalmente ou artificialmente (Bento, 2006). Com isso a transformação da curva característica ao tornar o resultados independentes do índice de vazios tende a apresentar uma curva única para o mesmo solo apresentando diferentes porosidades. No entanto, Camapum de Carvalho et al. 2002 mostraram que para solos possuindo distribuição de poros bimodal faz-se necessário fazer a transformação considerando-se a distribuição de poros.

3.2.2.9 MICROSCOPIA

Com auxílio de um microscópio e o programa ProScope HR, foi possível obter fotografias com aumento de 100, 200 e 400x. O procedimento para utilização do programa é simples. Escolhe-se a lente com o aumento desejado e foca-se para obter melhor visualização. A Figura 3.21 demonstra a interface do programa.

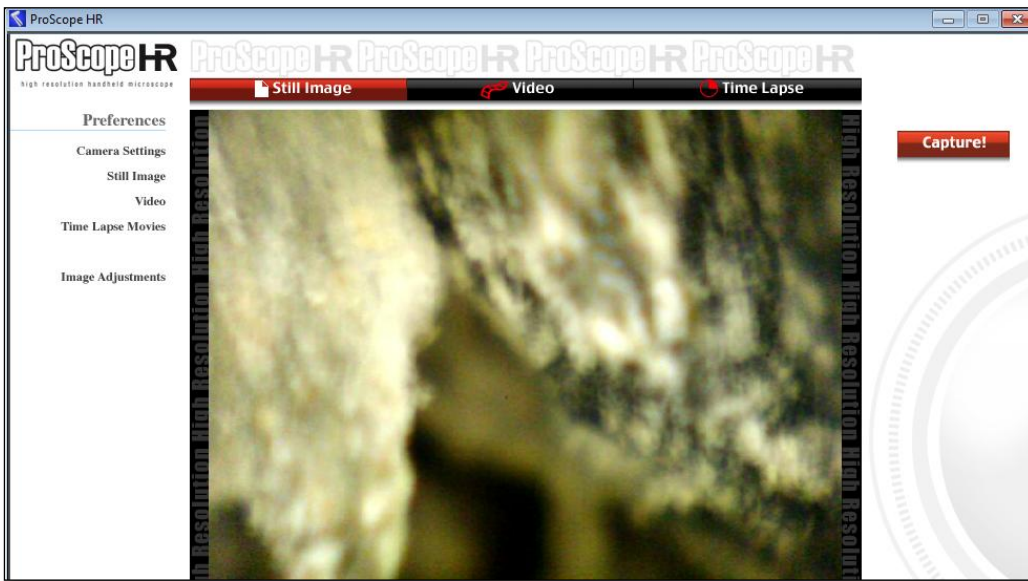


Figura 3.21 – Interface do programa ProScope HR

3.2.2.10. ABSORÇÃO

A fim de medir a quantidade de água que o RCD gráudo absorve, e conseqüentemente os vazios interagregados, seguiu-se o procedimento descrito:

- lavou-se o material passante na peneira #4 e retido na peneira #10, a fim de retirar os finos do RCD;
- imergiu-se o RCD em água por 24 horas em um balão volumétrico;
- submeteu-se o béquer à bomba de vácuo por 1 hora;
- retirou-se o excesso de água do RCD com um papel molhado;
- obteve-se as umidades.

A Figura 3.22 demonstra a retirada do excesso de umidade dos grãos.



Figura 3.22 – Absorção de água do RCD

3.2.2.10 MINI COMPACTAÇÃO

O ensaio de mini compactação fornece, para uma determinada energia, a massa específica aparente seca para as umidades correspondentes. Segundo Villibor & Nogami (2009), as vantagens do procedimento Mini-Proctor são:

- diminuição drástica da quantidade de amostra e do esforço na aplicação dos golpes;
- possibilidade de medir, com exatidão, a altura do corpo de prova após a aplicação dos golpes do soquete;
- maior uniformidade nos corpos de prova compactados;
- possibilidade de utilizar o procedimento Mini-Proctor na obtenção de corpos de prova para uso na determinação de várias propriedades mecânicas e hídricas dos solos, na dosagem de solos com diversos aditivos estabilizantes e, ainda, na classificação dos solos.

Ainda segundo os autores, a maior limitação do procedimento é a inaplicabilidade para solos que possuem elevada porcentagem da fração retida na peneira de 2,00mm, que não é o caso desta pesquisa.

Para este estudo, o ensaio foi realizado conforme especificações do DNER-ME 228/94: Solos – compactação em equipamento miniatura. Entretanto, para preparação das amostras, as mesmas não foram submetidas à secagem prévia.

3.2.2.11 CBR E EXPANSÃO

Os corpos de prova foram submetidos a ensaio de Mini CBR de acordo com as especificações do DNER-ME 254/97: Solos compactados em equipamento miniatura – Mini CBR e expansão (Figura 3.23). A penetração ocorreu dos dois lados: um lado sem imersão; o outro lado com imersão após realizadas as leituras de expansão.

Destaca-se que em um estudo, notou-se que os valores do ensaio mini CBR apresentaram dispersão consideravelmente menor do que os do CBR tradicional (Villibor & Nogami, 2009).

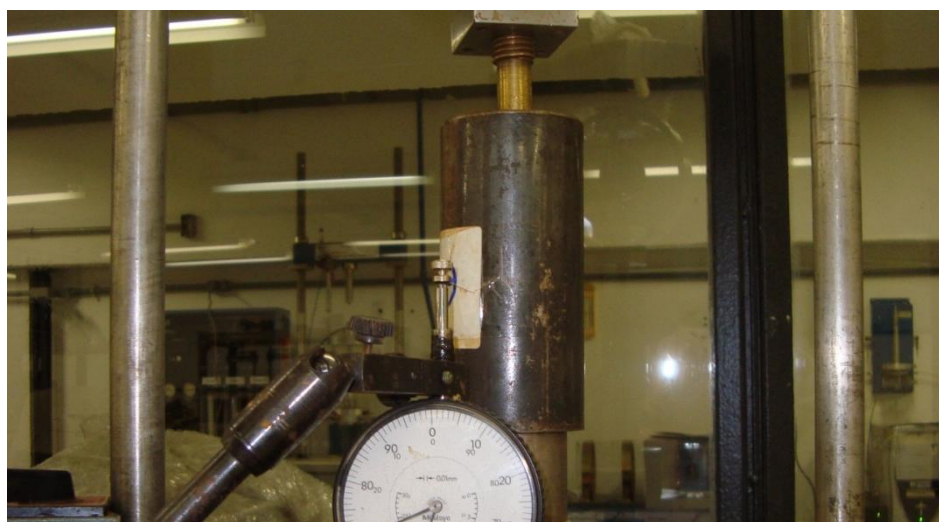


Figura 3.23 – Mini CBR

3.2.2.12 COMPRESSÃO SIMPLES

O ensaio de Compressão simples seguiu a norma DNER-ME 180/94: Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à compressão simples, conforme Figura 3.24.



Figura 3.24 – Compressão Simples

As amostras foram preparadas compactando-se inicialmente 5 cm de solo, com 2 compactações em uma extremidade e 2 na outra. Em seguida, foram feitas ranhuras no corpo de prova nas duas extremidades, para se colocar mais 2,5 cm de solo de cada lado, com mais 2 compactações em cada extremidade, conforme Figura 3.25.

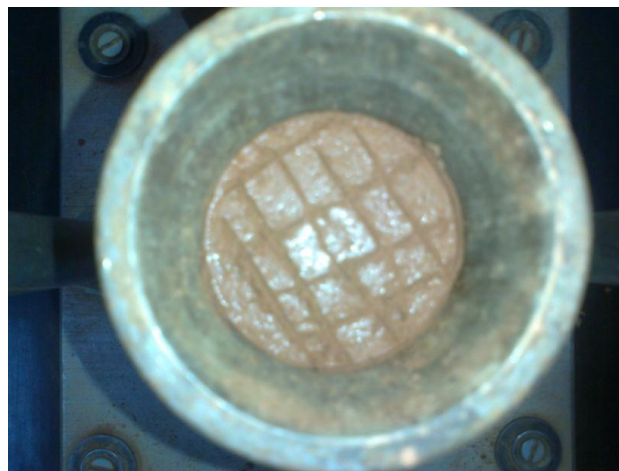


Figura 3.25 – Preparo do corpo de prova para Compressão Simples

3.2.2.13 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio de Resistência à tração por compressão diametral seguiu o DNER-ME 181/94: Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à tração por compressão diametral, conforme Figura 3.26.

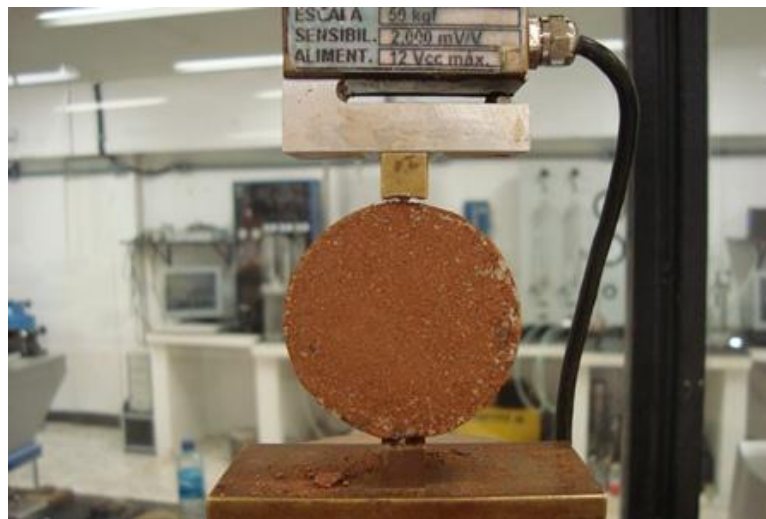


Figura 3.26 – Resistência à tração por compressão diametral

Ensaio de tração são comumente utilizados em concretos, rochas e revestimentos asfálticos podendo determinar a resistência à tração de uma forma direta ou indireta. Na forma indireta adotada nesse estudo, o ensaio consiste na aplicação de uma carga de compressão uniformemente distribuída ao longo da geratriz da amostra com a geração de um estado de tensões formado por tensões de tração e tensão de compressão, na região do plano que contém a carga aplicada (Bento, 2006).

3.2.2.14 TRIAXIAL CÍCLICO

Os ensaios de módulo de resiliência e cisalhamento rápido foram realizados no Laboratório de Engenharia Rodoviária (LER) na prensa triaxial cíclica ELE/IPC Global. Os ensaios foram baseados na AASHTO T 307/99. A Figura 3.27 ilustra a montagem do ensaio e a Figura 3.28 a ruptura do corpo de prova de solo puro.



Figura 3.27 – Ensaio Triaxial Cíclico



Figura 3.28 – Rompimento da amostra de solo puro do ensaio triaxial cíclico

Com a realização dos ensaios, gerou-se dados necessários para cálculo do Módulo Resiliente. Utilizou-se o Modelo Universal (Equação 3.3) para comparar com os resultados obtidos do ensaio triaxial cíclico.

$$MR = k_1 \times p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_2} \quad (3.4)$$

Após a realização do ensaio de resiliência, se deu início ao ensaio de cisalhamento rápido. Obteve-se dados de resistência e deformabilidade. A partir dos dados de tensão desvio, e tensão confinante, plotou-se as trajetórias de tensões totais, utilizando as equações de s e t do Instituto Tecnológico de Massachusetts, considerando coesão = 0.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios, obtidos em laboratório, bem como a análise dos mesmos.

4.1. CLASSIFICAÇÃO TRB

4.1.1. GRANULOMETRIA

Para o ensaio de granulometria com sedimentação foi utilizado material que passa na peneira #4, uma vez que foi este o material utilizado nos ensaios mecânicos, conforme apresentado anteriormente. O ensaio foi realizado em amostras do solo puro e solo + RCD, RCD, solo + RCD + cal virgem, solo + RCD + cal hidratada.

Inicialmente, realizou-se a granulometria com sedimentação do solo puro com e sem defloculante. O resultado é apresentado na Figura 4.1.

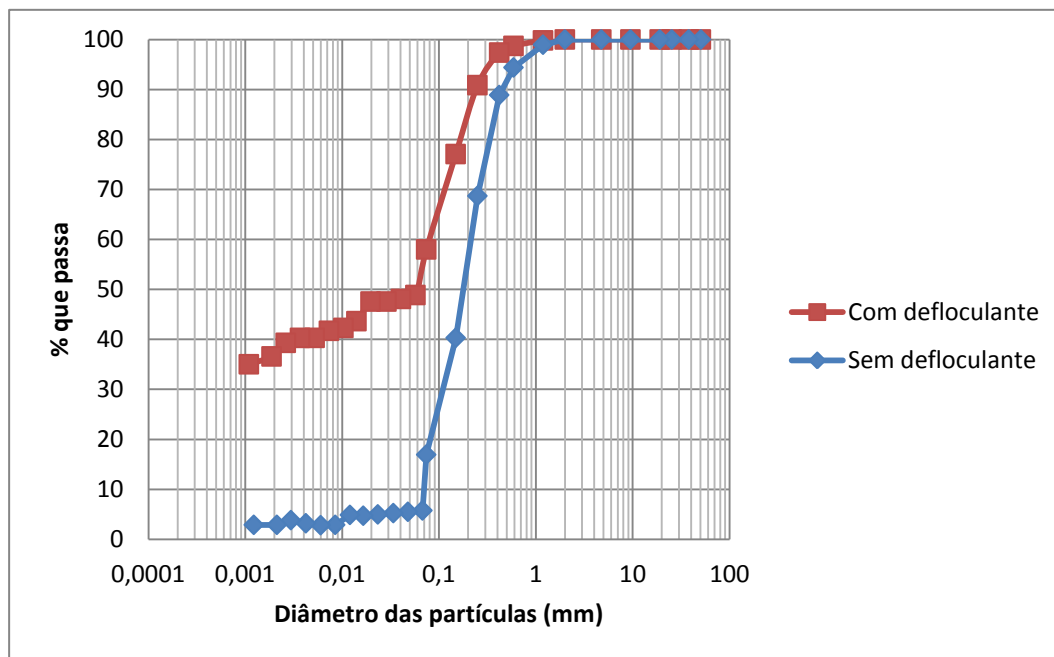


Figura 4.1 – Granulometria do solo puro com e sem o uso de defloculante

Usualmente, o ensaio de granulometria é realizado sem defloculante. Entretanto, essa prática deve ser observada com cautela, uma vez que, como neste caso, com defloculante o material que passa na peneira #200 é de 58,0%, e sem defloculante é de 16,9%. Observa-se que a presença do defloculante fez com que grande parte dos grãos se desagregassem deixando de refletir a textura do solo no campo. Esse comportamento é típico de materiais lateríticos.

Em seguida, foi realizada a análise granulométrica com sedimentação da mistura solo + RCD, conforme Figura 4.2. Observa-se nesses resultados que a redução do teor de finos defloculados em relação ao mostrado na figura anterior manteve-se aproximadamente proporcional ao acréscimo do RCD ao solo.

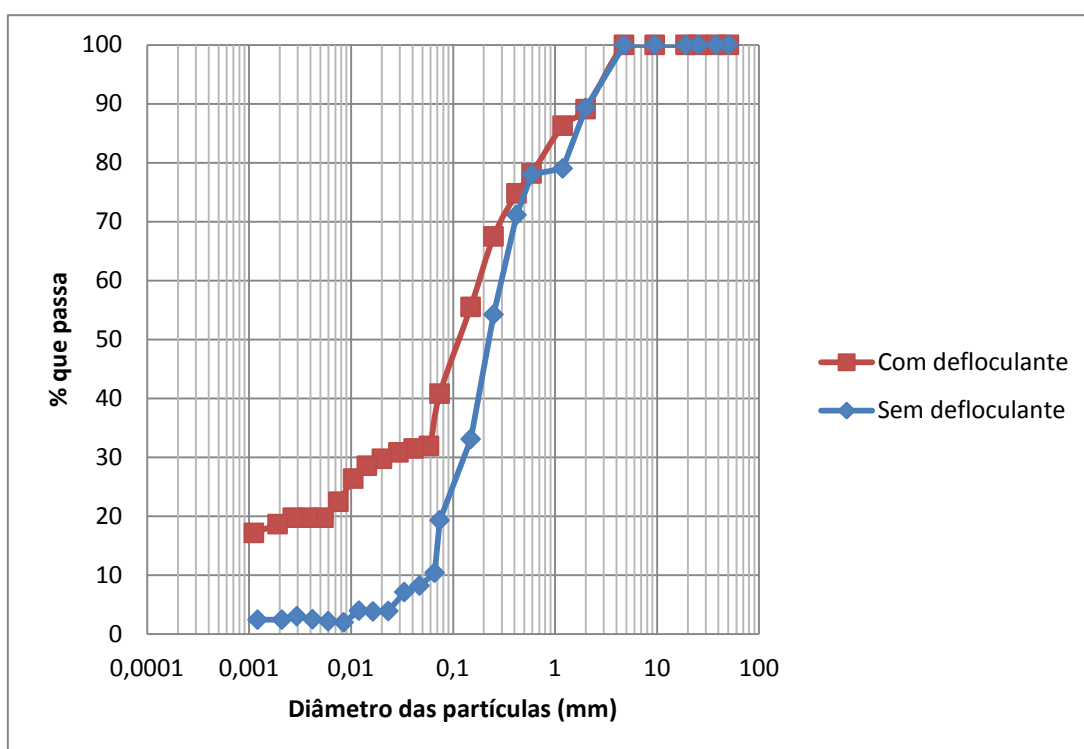


Figura 4.2 – Granulometria da mistura solo + RCD com e sem o uso de defloculante.

A Figura 4.3 apresenta as curvas granulométricas obtidas para o RCD com e sem o uso de defloculante. Observa-se nessa figura que a desagregação do RCD em consequência da adição do defloculante é muito pequena, no entanto, o ressalto presente na curva na altura da peneira 200 aponta para a instabilização de parte dos agregados na fase de lavagem.

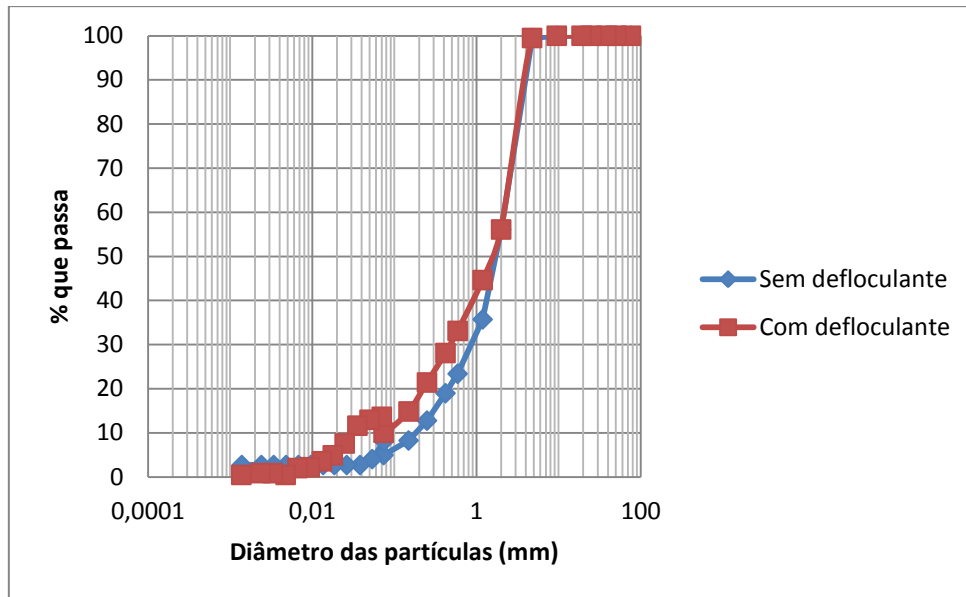


Figura 4.3 – Granulometria do RCD com e sem defloculante

A Figura 4.4 apresenta o conjunto de resultados obtidos em uma só figura. Observa-se aqui a textura mais granular do RCD e essa característica termina também tornando a mistura com o solo um pouco mais granular que o próprio solo.

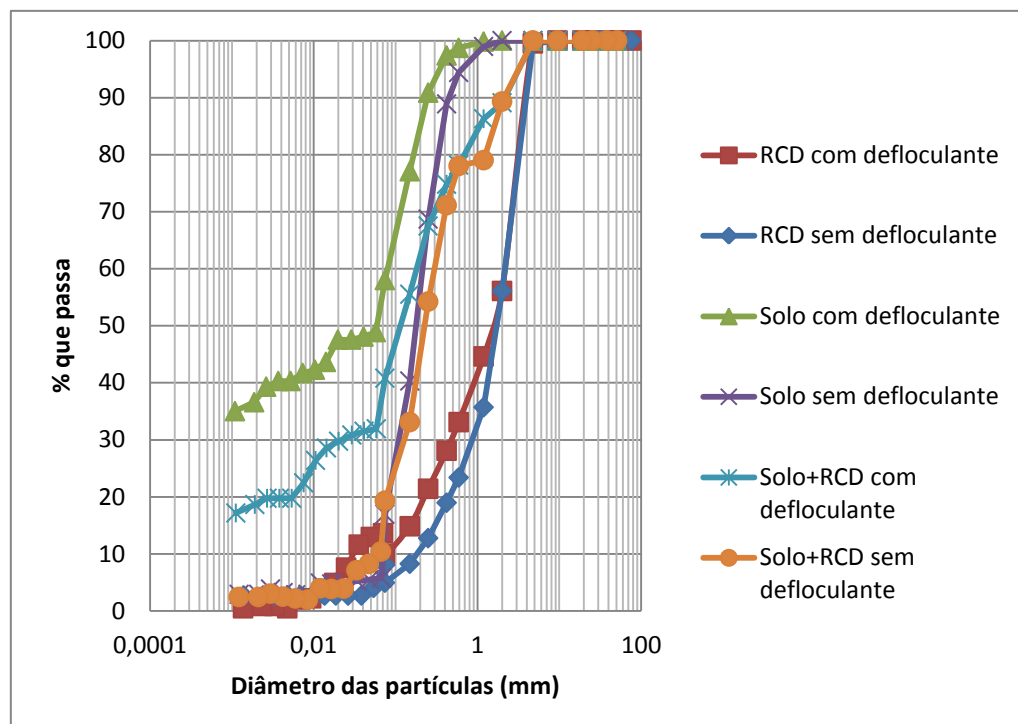


Figura 4.4 – Granulometria do solo puro; mistura solo + RCD; RCD puro

Para maior clareza sobre a influência do RCD na estabilidade estrutural do solo apresenta-se na Figura 4.4 as curvas experimentais obtidas para a mistura solo + RCD e as curvas obtidas ponderando-se os teores dos materiais utilizados a partir das curvas granulométricas obtidas para o solo e para o RCD puros.

Em relação à adição da cal virgem e cal hidratada na mistura (Figura 4.5), nota-se que as mesmas possuíram curvas granulométricas semelhantes, ou seja, com igual agregação de partículas. Comparando-se com a mistura de solo + RCD, nota-se maior agregação com a presença dos cais.

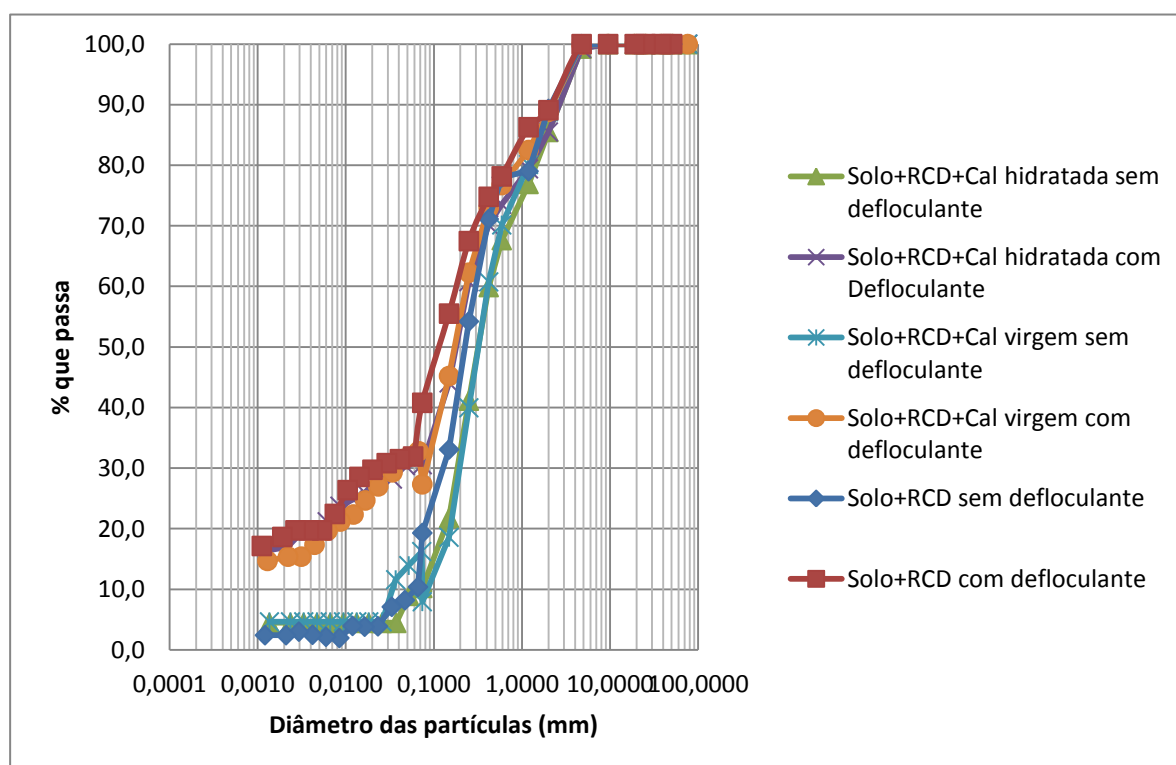


Figura 4.5 – Granulometrias das misturas

4.1.2 LIMITES DE ATTERBERG

Além das amostras contendo solo puro e solo + RCD, também foram realizados ensaios de Limites de Atterberg em amostras contendo solo + RCD + cal virgem e solo + RCD + cal hidratada, conforme Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Limites de Atterberg e Índice de Plasticidade

Amostra	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)
Solo	32	23	9
Solo + RCD	31	24	8
Solo + RCD + Cal virgem	27	21	6
Solo + RCD + Cal hidratada	26	22	4

Pela Tabela 4.1, observa-se que a presença das cais diminuiu a plasticidade e liquidez do solo. Embora os valores obtidos para as misturas com as duas cais sejam muito semelhantes observa-se que o índice de plasticidade sofreu maior redução em relação à mistura solo + RCD quando da adição da cal hidratada, apesar das influências das duas cais nos limites de liquidez e de plasticidade serem invertidas. Com isso, a maior redução no índice de plasticidade obtido com a cal hidratada pode ser inerente à simples repetibilidade dos ensaios sendo, no entanto, mais provável uma real maior influência da cal hidratada uma vez que parte de sua massa se deve à hidratação o que torna proporcionalmente menor o teor dos compostos químicos que compõem esta a cal.

A influência das cais na plasticidade da mistura solo + RCD pode ser devida tanto a fenômenos químicos como físicos. Os químicos estariam atrelados a trocas catiônicas e os físicos à agregação.

Em relação ao Limite de Liquidez (Figura 4.6), observa-se três aspectos, o primeiro é que a presença do RCD desloca a curva de fluidez e diminui sua inclinação em relação ao solo puro; o segundo é que a adição de cais gera um maior deslocamento dessa curva de fluidez e o terceiro é que a inclinação da curva de fluidez fortemente reduzida pela adição do RCD foi praticamente restabelecida quando da adição das cais. Apesar dessa proximidade de inclinação das curvas de fluidez entre o solo puro e solo com adição das cais verifica-se nessa figura que inclinação dessas curvas suaviza na seguinte ordem: solo puro, solo + RCD + cal virgem, solo + RCD + cal hidratada e solo + RCD.

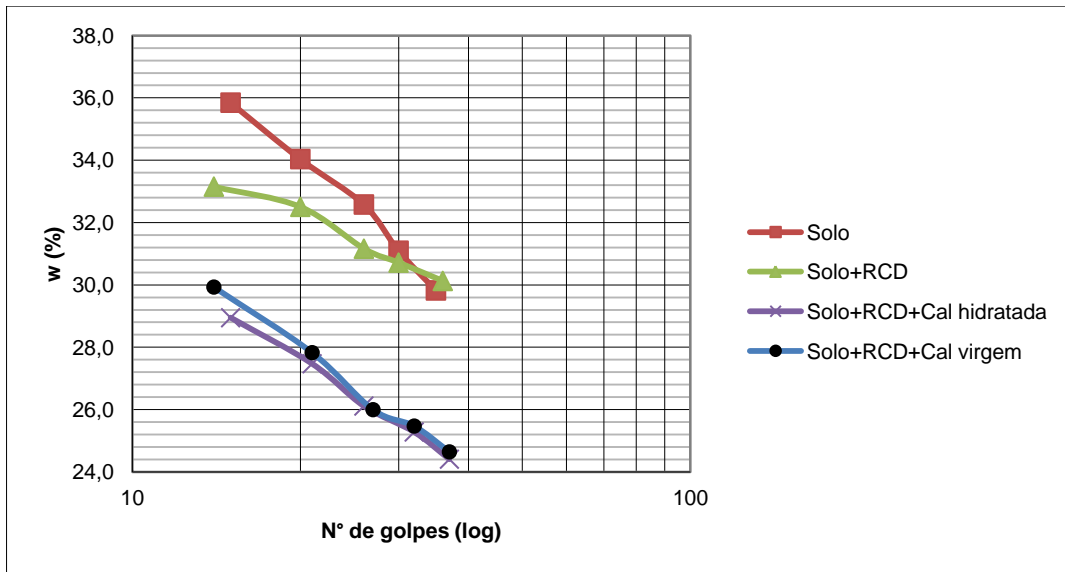


Figura 4.6 – Ensaio de Limite de Liquidez

Segundo Castro & Luis (1972), apudOliveira (2003), em solos altamente plásticos, a redução da plasticidade com adição da cal é mais substancial, conforme verificado nos ensaios realizados neste estudo. É importante destacar no entanto, que a influência da cal na plasticidade do solo depende da composição químico-mineralógica do solo e da composição química da cal podendo inclusive gerar o aumento da plasticidade do solo em lugar de sua redução conforme mostrado em Grim (1962).

A partir dos resultados dos ensaios de granulometria e limites de Atterberg, foi possível classificar as amostras de solo e solo + RCD de acordo com a Classificação TRB, conforme a Figura 4.7. Com a utilização do defloculante e conseqüente desagregação do solo argiloso, tanto o solo puro, quanto o solo + RCD tiveram classificação A-4, o que os classifica para fins rodoviários como materiais de comportamento do subleito regular a mau. Sem a utilização do defloculante, as duas amostras foram classificadas em A-2-4, conduzindo-os à classificação quanto ao comportamento variando entre excelente e bom como material de subleito. Assim, conclui-se que é muito importante realizar ensaios de sedimentação com e sem defloculante.

Quando da incorporação das cais à mistura solo + RCD, as misturas se classificaram como A-2-4, com e sem defloculante. Nota-se que a diferença das porcentagens de grãos que passam na peneira #200 das misturas com a adição das cais é pequena. Entretanto, para a mistura contendo cal virgem, verificou-se maior agregação da mistura, uma vez que a porcentagem de grãos que passa na peneira #200, tanto com, quanto sem adição de defloculante, é menor, comparando-se com a mistura contendo cal hidratada.

Classificação Geral	Materiais Granulares (35% ou menos passando pela peneira nº200)							Materiais Siltosos e Argilosos (mais de 35% passando pela peneira nº200)				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7					
Porcentagem que passa nas peneiras de abertura nominal 2,00 mm 0,42 mm 0,074 mm	50 máx 30 máx 15 máx	50 máx 25 máx	51 mín 10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín	
Características da fração que passa na peneira 0,42 mm												
Limite de Liquidez (%)	-	-	-	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	
Índice de Plasticidade (%)	6 máx	6 máx	NP	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	
Índice de Grupo (IG)	0	0	0	0	0	< 4	< 4	< 8	< 12	< 16	< 20	
Materiais predominantes	Pedra britada, pedregulho e areia		Areia fina	Areia e areia siltosa ou argilosa				Solos siltosos		Solos argilosos		
Comportamento geral como subleito	Excelente a bom							Regular a mau				

Figura 4.7 – Classificação dos materiais segundo a TRB

Cabe destacar que segundo Cardoso (2002), os oxi-hidróxidos de ferro presentes nos solos tropicais fazem, geralmente, com que estes apresentem valores mais elevados de limites de Atterberg, classificando-os como solos de qualidade pior do que aquela que efetivamente apresenta, sendo que, no entanto, ao propiciarem a agregação e cimentação das partículas, provocam a melhoria do comportamento mecânico e o aumento da permeabilidade do solo.

4.2.CLASSIFICAÇÃO EXPEDITA MCT

O ensaio de Classificação Expedita MCT foi realizado em amostras contendo solo puro e amostras de solo + RCD.

Os dados obtidos no ensaio estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Classificação Expedita MCT

ENSAIO DE CONTRAÇÃO		
Material	Contração média	c'
Solo	0,96	1,36
Solo + RCD	0,57	0,91

Pelo ensaio de contração, nota-se que a natureza da brita e material cimentante do RCD fez com que diminuísse a contração do solo, comparada com a do solo puro. Para confirmar a rigidez apresentada pelo ensaio de penetração, buscou-se realizar o esmagamento das esferas de solo e solo +RCD secas. Em ambos os casos não se conseguiu esmagá-las com a pressão imposta pelo operador (Figura 4.8) o que aponta para a necessidade de ajustes metodológicos no que tange ao método usado na ruptura das esferas. Destaca-se ainda que, apesar da menor contração, a mistura solo + RCD apresentou menor tempo de ascensão de água, apontando para a presença de maior capilaridade.



Figura 4.8 – Resistência ao esmagamento da bola seca do solo puro

Obteve-se, como classificação Expedita MCT:

Tabela 4.3 – Classificação Expedita MCT

Determinação do grupo MCT		
C'	Penetração (mm)	Grupo MCT
< 0,5	< 3,0	LA
	3,1 a 3,9	NA
	>= 4,0	NA/NS'
0,6 a 0,9	<2,0	LA-LA'
	2,1 a 3,9	NA'-NS'
	>= 4,0	NS'-NA'
0,1 a 1,3	< 2,0	LA' - SOLO + RCD
	2,1 a 3,9	NA'
	>= 4,0	NS'
1,4 a 1,7	< 2,0	LA'-LG' - SOLO

	2,1 a 3,9	NA'/NG'-NS'
	$\geq 4,0$	NS' - NG'
$\geq 1,8$	$< 2,0$	LG'
	2,1 a 3,9	NG'
	$\geq 4,0$	NG'

Pela Tabela 4.3, observa-se que a presença do RCD fez com que o solo puro, de característica argilosa-arenosa laterítica, tenha característica arenosa laterítica, diminuindo a coesão advinda da fração argila.

4.3. MINI MCV E PERDA DE MASSA POR IMERSÃO

O ensaio de Mini MCV e perda de massa por imersão foi realizada nos materiais utilizados nos ensaios mecânicos: solo puro; solo + RCD; solo + RCD + cal virgem; solo + RCD + cal hidratada, a fim de que se observasse o comportamento dos mesmos quando imerso e a variação da massa específica com o aumento da compactação.

Os resultados do ensaio de Mini MCV são apresentados na Figura 4.9. Para as quatro amostras, o ensaio parou aos 16 golpes, uma vez que a leitura obtida após 4n golpes e a obtida após n golpes foi menor que 2mm. As amostras foram compactadas aproximadamente na umidade ótima obtida para cada material. O solo foi compactado com umidade de 19,3%, o solo + RCD com umidade igual a 17,2%, o solo + RCD + cal virgem com umidade igual a 16,4% e o solo + RCD + cal hidratada com umidade igual a 16,5%.

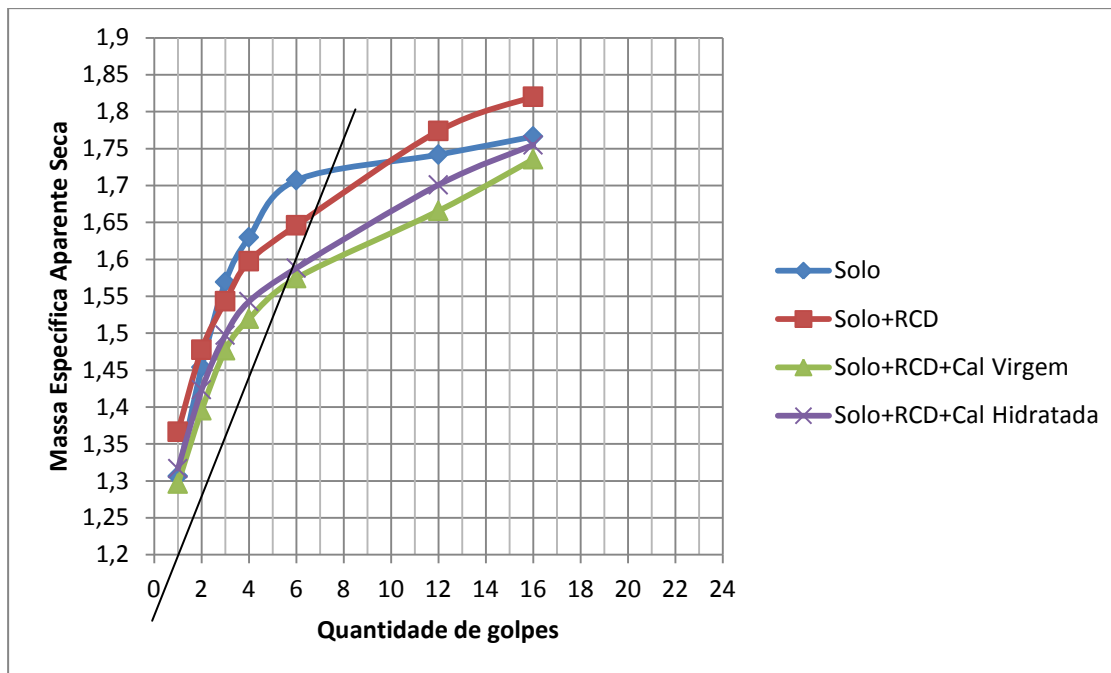


Figura 4.9 – Ensaio de Mini MCV

Observa-se que a forma como se dá o aumento da massa específica aparente seca é semelhante para as amostras de solo + RCD, solo + RCD + cal virgem e solo + RCD + cal hidratada sendo estas distintas da obtida para o solo puro, sobressai ainda aparentemente a influência da brita presente no resíduo nesse comportamento. A presença da brita aumentou a massa específica aparente seca do solo devido à sua maior densidade. Pela Figura 4.9, nota-se que o ponto de inflexão para as amostras contendo cal é próximo um do outro, posicionando-se, porém, a cal virgem em posição abaixo da registrada para a cal hidratada, o que significa que, para a mesma energia, tanto a cal virgem como a cal hidratada possuem sucção da matriz próximos conforme será observado na Figura 4.19, em que são apresentadas as curvas características de retenção de água. A cal virgem absorve mais água que a cal hidratada para se transformar em cal hidratada e liberar calor, diminuindo a umidade da mistura e, por isso, e por sua natureza, teve a menor massa específica aparente seca.

Cabe destacar que os pontos de inflexão das curvas da Figura 4.9 dos diferentes materiais se alinharam segundo uma mesma tendência, porém com número de golpes (energia) e massa específica aparente seca distintos.

A maior inclinação do segundo trecho das curvas obtidas para as misturas do solo com + RCD com e sem a presença de cal apontam para maior perda de sucção com o aumento do grau de saturação fazendo com que diminua a resistência das misturas e a compactação se torne mais efetiva.

Realizado o ensaio de Mini MCV, as amostras foram imersas em água para verificar o comportamento relativo à perda de massa quando em imersão (Figura 4.10).



(a)

(b)

Figura 4.10 – Perda de massa por imersão do solo (a) e do solo + RCD (b)

Poucos segundos após a imersão, a amostra contendo somente solo começou a “desmanchar”. Poucos minutos depois, toda amostra estava “desmanchada” e as demais amostras se mantiveram intactas, conforme demonstra a Figura 4.10. A presença do RCD e do RCD mais as cascas proporcionaram estabilidade estrutural às misturas. Na prática, a presença de água em uma camada do solo puro, poderia gerar graves defeitos no pavimento, como afundamento e valores altos de trilhos de roda. O RCD sobressai-se assim com um material estabilizante do solo estudado.

4.4. ENSAIOS QUÍMICOS

Os resultados dos ensaios químicos estão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios químicos das amostras

Amostra	pH em H ₂ O	pH em KCl	Δ pH	CTC (cmolc/dm ³)	Saturação por bases (%)	Matéria Orgânica (g/kg)	pH carga zero = 2 pH KCl - pH H ₂ O
Solo	5,2	5,6	-0,4	4	64	9,8	6
RCD	12,6	13,1	-0,5	6	92	2,6	-

Cal virgem	12,6	13,2	-0,6	8	93	2,2	-
Cal hidratada	12,6	13,2	-0,6	11	95	0,3	-
Solo + RCD	11,5	12	-0,5	9	94	9,8	-
Solo + RCD + Cal virgem	12,3	13,1	-0,8	10	95	13,1	-
Solo + RCD + Cal hidratada	11,6	13	-1,4	10	95	12,2	-

Quimicamente, é comum classificarem-se os solos quanto ao pH, sendo particularmente importante na estabilização química (Camapum de Carvalho, 2007). Ainda segundo o autor, a estabilização química de um solo contendo determinado mineral depende do composto químico usado e dos cátions e ânions nele presentes. Observa-se que a amostra de solo puro é a mais ácida e dos materiais puros o RCD, a cal virgem e a cal hidratada são os mais básicos. Em relação à mistura de solo + RCD, apesar da quantidade de solo ser superior à de RCD, predominou o pH básico.

Em relação à mistura de solo + RCD, assim como o predomínio do pH básico, o Δ pH também se manteve próximo ao valor da mistura contendo somente RCD, o que comprova a forte influência do RCD no valor do pH das misturas.

A capacidade de troca catiônica foi menor para a amostra contendo somente solo; mediana para o RCD puro e maior para as demais amostras. Assim, o solo é mais inerte que os demais materiais, conforme esperado, já que o RCD e os cais são materiais cimentantes e, portanto, aglutinantes. Nota-se que, quando se mistura o solo aos demais materiais, a sua capacidade de troca catiônica aumenta consideravelmente.

A saturação por bases foi baixa para o solo e superior para os demais materiais, significando que o solo tem menor capacidade de permuta de cátions ocupada por cátions básicos do que os demais materiais, que são cimentantes.

4.5.DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Os resultados do ensaio de Difração de Raios X são os que se seguem na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Difração de Raios X

Material	Cimento Portland Ca(OH) ₂	Calcário CaCO ₃	Quartzo SiO ₂	Caolinita Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Gibsite Al(OH) ₃	Dolomita CaMg(CO ₃) ₂	Microcline KAlSi ₃ O ₈
Solo			x	x	x		

RCD	x	x	x				
Cal virgem	x	x					
Cal hidratada	x	x					
Solo + RCD	x	x	x	x	x	x	
Solo + RCD + Cal virgem	x	x	x	x	x	x	
Solo + RCD + Cal hidratada		x	x	x	x	x	x

Verifica-se que o solo possui quartzo, caulinita e gibsita em sua composição o que indica tratar de solo profundamente intemperizado e que o RCD possui tanto partículas calcáreas, como cimentantes e quartzo em sua composição sendo desprovido de minerais de argila. A mistura do solo e do RCD resultou na composição de ambos os materiais, assim como da cal virgem. A incorporação da cal hidratada resultou em Microcline, sem a presença de cimento portland.

4.6.MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS

Os resultados de massa específica real dos grãos são apresentados na Tabela 4.6 e foram obtidos no ensaio de pentapicnômetro. Nota-se que a presença do RCD diminuiu a massa específica real dos grãos, quando misturado ao solo, de maior valor do Gs. A presença de cal virgem e hidratada também diminuiu a massa específica dos grãos da mistura solo + RCD.

Tabela 4.6 – Massa Específica Real das amostras

Amostra	Massa Específica dos grãos (Gs) (g/cm ³)
Solo	2,6996
Solo + RCD	2,678
Solo + RCD + Cal virgem	2,6386
Solo + RCD + Cal hidratada	2,6346
RCD	2,6151

4.7.POROSIMETRIA

Os resultados de porosimetria e diâmetro dos grãos são mostrados na Tabela 4.7, a seguir.

Tabela 4.7 – Resultados do ensaio de porosimetria e diâmetro dos grãos

Amostra	diâmetro do poro (Å)	Volume Total de poros ($\mu\text{m}^3/\text{kg}$)
Solo	<376	13
Solo seco	<417	46
RCD	<427	22
RCD seco	<392	33
Solo + RCD	<397	13
Solo + RCD seco	<405	28
Cal virgem	<372	22
Cal virgem seca	<412	27
Cal hidratada	<398	82
Cal hidratada seca	<397	86
Solo + RCD + Cal virgem	<300	13
Solo + RCD + Cal virgem seca	<390	28
Solo + RCD + Cal hidratada	<400	14
Solo + RCD + Cal hidratada seca	<370	29

Pelos resultados, tem-se que a porosidade é maior para as amostras secas em estufa a 105°C e submetidas a vácuo, comparando-se aos obtidos com as amostras secas ao ar, como esperado, uma vez que a água ocupa espaços vazios entre os grãos. Considerando que o solo e o RCD foram misturados na proporção de duas partes em peso de solo para uma de RCD verifica-se que tanto o RCD como as cais podem proporcionar algum efeito aglutinador elevando ligeiramente o volume de microporos esperado. Nota-se que a adição de RCD e cais diminuíram o volume de vazios em relação ao solo puro, pelo poder aglutinante.

4.8.SUPERFÍCIE ESPECÍFICA

Os resultados de Superfície Específica estão apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de Superfície Específica

Amostra	Área superficial específica (m^2/g)
Solo	9,606
Solo seco	31,634

RCD	0,876
RCD seco	2,833
Solo + RCD	8,337
Solo + RCD seco	18,745
Cal virgem	1,694
Cal virgem seca	1,8682
Cal hidratada	6,493
Cal hidratada seca	6,976
Solo + RCD + Cal virgem	7,952
Solo + RCD + Cal virgem seca	20,123
Solo + RCD + Cal hidratada	8,549
Solo + RCD + Cal hidratada seca	20,85

Assim como a porosimetria, a superfície específica foi superior para as amostras secas quando comparada aos resultados obtidos para os materiais na umidade natural, quando da coleta . O solo puro seco teve a maior superfície específica, devido à sua maior porcentagem de finos. A mistura de solo com RCD teve aumentada a superfície específica quando da adição tanto da cal virgem como da cal hidratada sendo o aumento maior no caso da cal hidratada. Esses resultados apontam para a ação desagregadora da cal sobre o solo. Ressalta-se que quanto maior a superfície específica, maior a ação de forças elétricas.

Os resultados de superfície específica do solo apontam para a influência da presença de gibsita que tem superfície específica variando de 1 a 100 m²/g.

Verifica-se ainda (Figura 4.11) que o grau de saturação das misturas na umidade ótima da energia Proctor intermediário foi maior quanto maior a superfície específica, conforme esperado, uma vez que, quanto maior a superfície específica, maior a superfície de contato nas interações com a água.

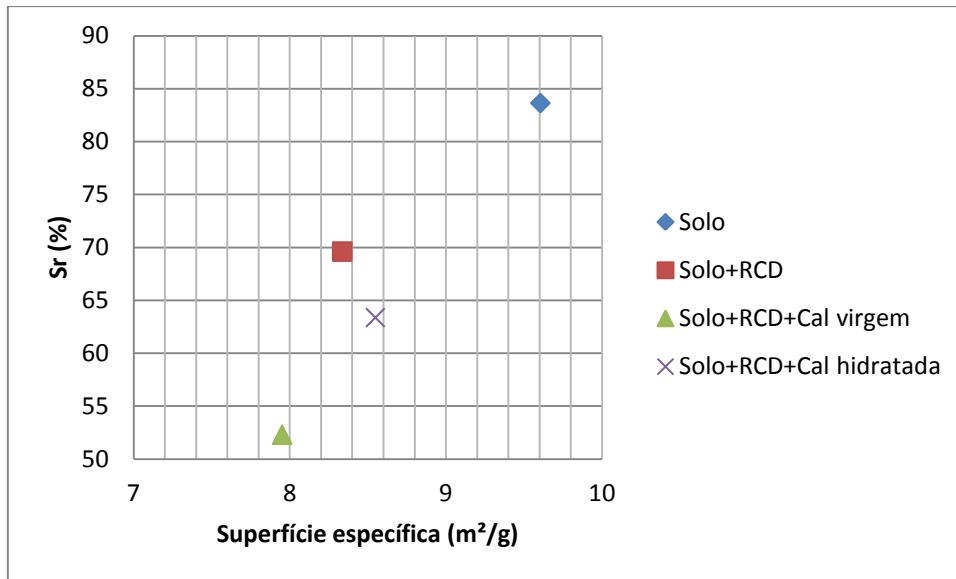


Figura 4.11 – Relação da Superfície específica com o grau de saturação

4.9.MICROSCOPIA

A seguir são apresentadas as fotografias microscópicas feitas com lupa e aumento de 100x, 200x e 400x.

Verifica-se, pela Figura 4.12, obtida para o solo puro, a presença de concreções lateríticas contendo microporos e grande número de vazios entre os agregados constituindo os macroporos. Verifica-se também o encaixe dos grãos quando da compactação.

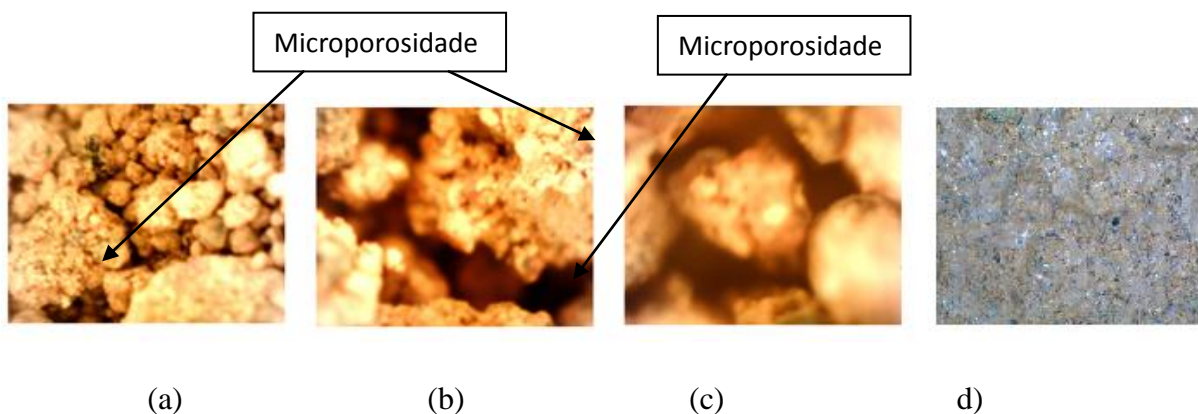


Figura 4.12 – Microscopia do solo puro: a) 100x; b) 200x; c) 400x; d) 200x compactado

Verifica-se, pela Figura 4.13, obtida para o RCD puro, a presença de estruturas porosas.

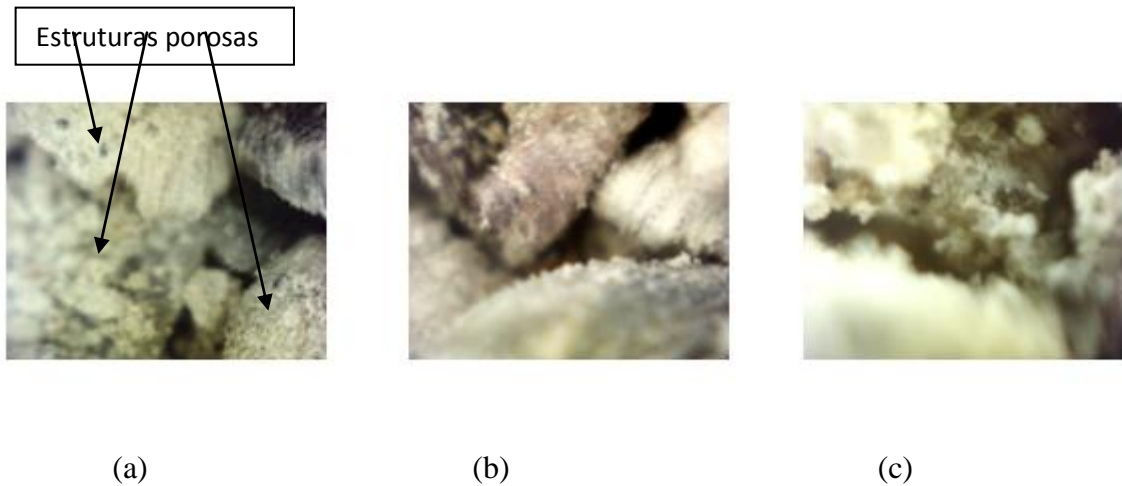


Figura 4.13 – Microscopia do RCD puro: a) 100x; b) 200x; c) 400x.

Pela Figura 4.13, verifica-se que o RCD possui forma variável devido à quebra dos grãos do processo de britagem. Pelo aumento de 200 e 400x, nota-se a presença significativa de partículas cimentantes envolvendo os grãos de brita.

As Figuras 4.14 e 4.15 apresentam ambas as cais usadas nesta pesquisa, evidenciando que estas apresentam-se formadas por agregações.

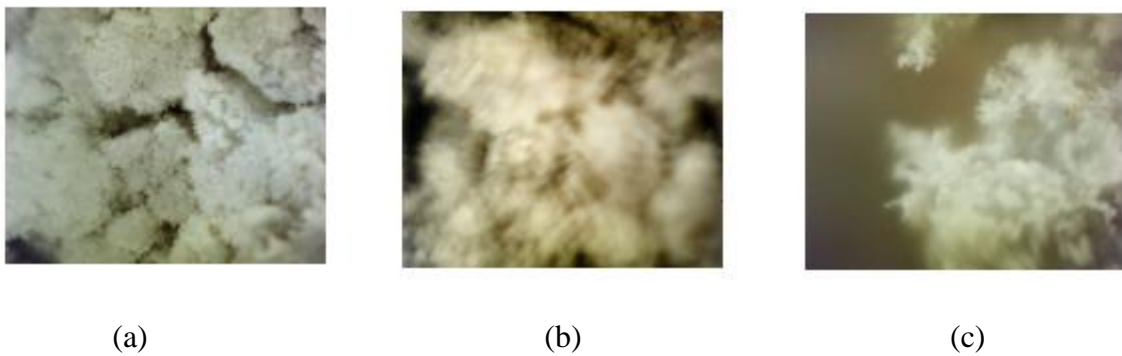


Figura 4.14 – Microscopia da cal virgem pura: a) 100x; b) 200x; c) 400x.



(a)

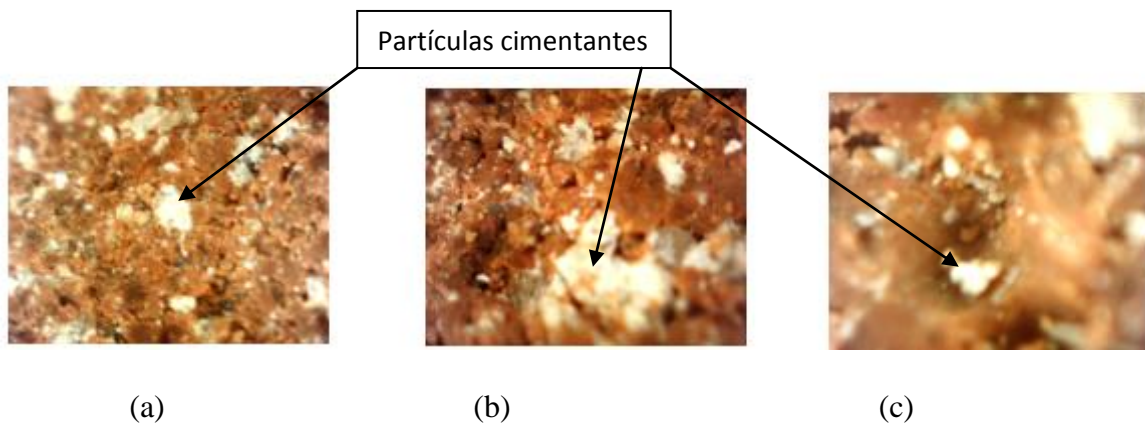
(b)

(c)

Figura 4.15 – Microscopia da cal hidratada: a) 100x; b) 200x; c) 400x.

A Figuras 4.14 e 4.15 demonstram o pequeno diâmetro e semelhança das partículas de cal virgem e cal hidratada.

Na mistura solo + RCD observa-se uma aparente redução no teor de macroporos que caracterizava o solo puro, conforme Figura 4.16.



(a)

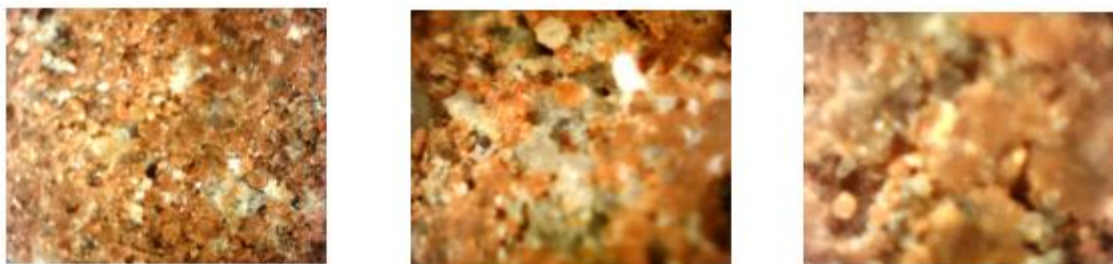
(b)

(c)

Figura 4.16 – Microscopia da mistura do solo + RCD: a) 100x; b) 200x; c) 400x.

A Figura 4.16 demonstra que o RCD possuía quantidade significativa de materiais cimentantes.

As Figuras 4.17 e 4.18 demonstram a atuação da cal virgem, hidratada e das partículas cimentantes do RCD diminuindo a macroporosidade presente na mistura por meio da desaglutinação de partículas.



(a)

(b)

(c)

Figura 4.17 – Microscopia do Solo + RCD + cal virgem: a) 100x; b) 200x; c) 400x.



(a)

(b)

(c)

Figura 4.18 – Microscopia do Solo + RCD + hidratada: a) 100x; b) 200x; c) 400x.

4.10. ABSORÇÃO DO RCD GRANULAR

A média das umidades obtidas, após molhagem e retirada do excesso de água do RCD foi de 13,5%, o que confirma a característica porosa do agregado verificada no ensaio de porosimetria.

4.11. CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA

As curvas características de retenção de água obtidas para o solo e para as misturas são marcadas pela forma bimodal refletindo a porosidade dos agregados. Verifica-se também a maior sucção do solo, comprovando a importância da fração argilosa, seguida da mistura solo+RCD, solo+RCD+Cal virgem e solo + RCD + Cal hidratada, conforme Figura 4.19. Assim, verifica-se que a cal hidratada teve um pouco maior poder desaglutinante em relação à

cal virgem, pois enquanto a umidade de saturação dos microporos foi de 11,1% para a cal virgem, para a hidratada ela foi de 10,9 (Figura 4.19). Esses resultados corroboram com aqueles obtidos para a superfície específica das diferentes misturas.

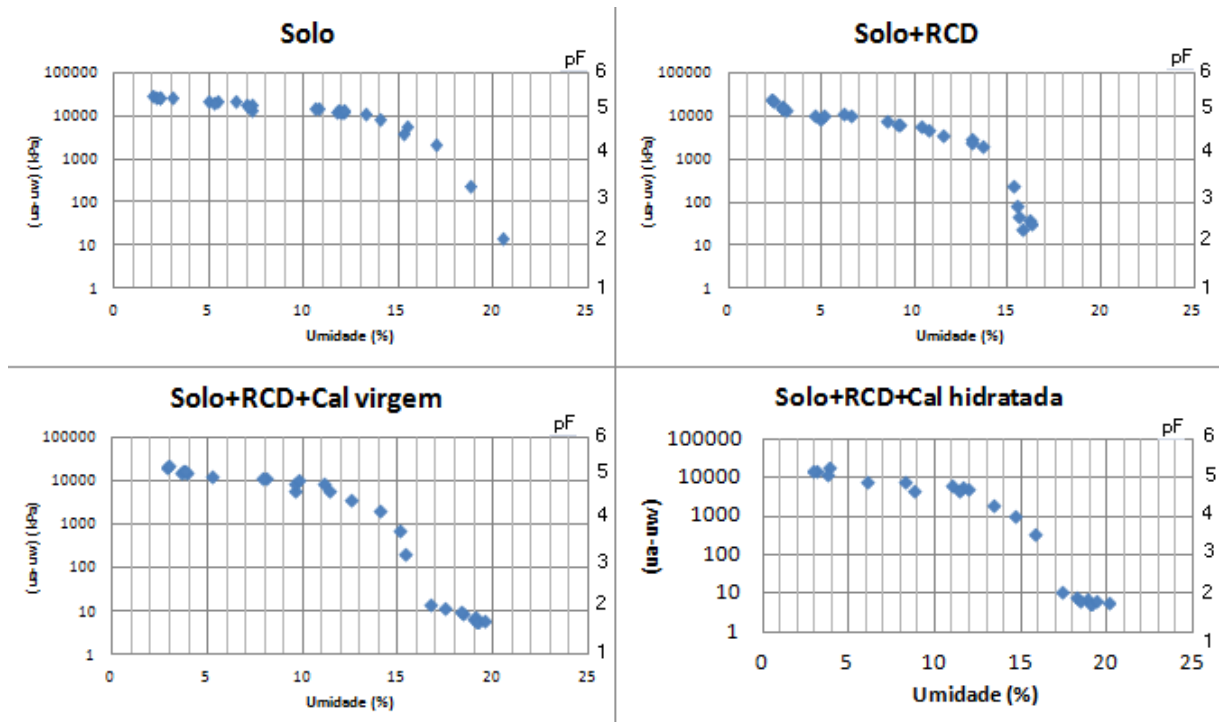


Figura 4.19 – Umidade versus sucção das amostras

A Tabela 4.9 apresenta os valores das umidades de saturação dos microporos do solo e das diferentes misturas obtidos a partir das curvas características de retenção de água sobrepostas (Figura 4.20).

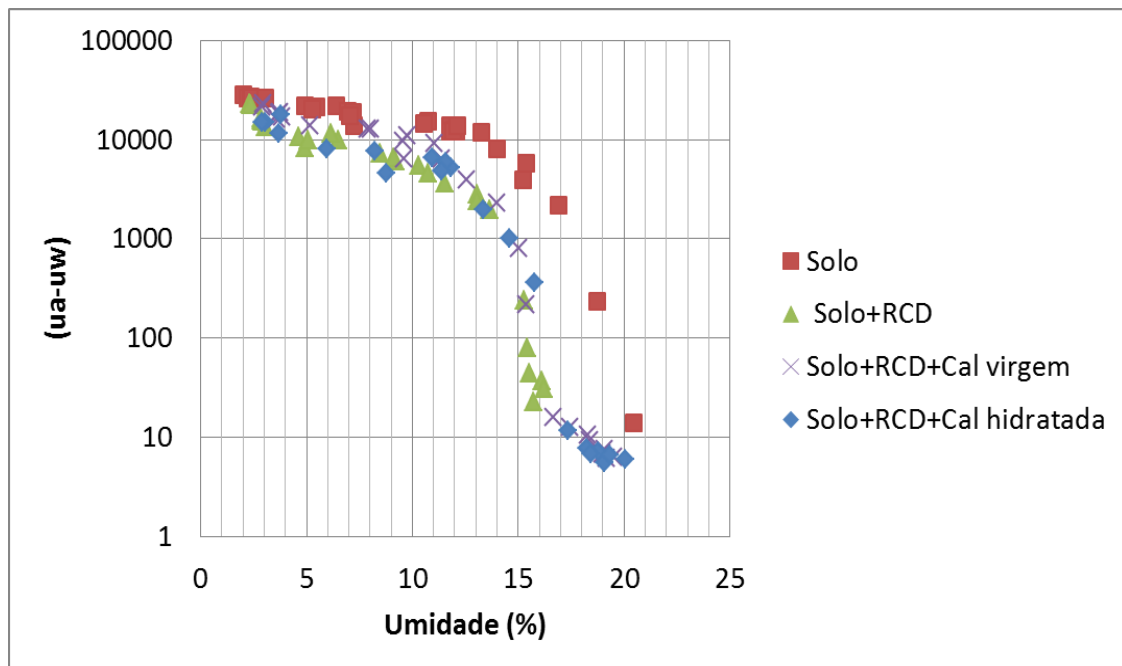


Figura 4.20 – Curvas características de retenção de água sobrepostas

Tabela 4.9– Umidades de saturação dos microporos das amostras

Amostra	Umidade de saturação dos microporos (%)
Solo	13,3
Solo+RCD	11,5
Solo+RCD+Cal virgem	11,1
Solo+RCD+Cal hidratada	10,9

Foi possível verificar a relação da umidade dos macroporos com o grau de saturação das amostras, demonstrado na Figura 4.21. Observa-se nessa figura que os pontos relativos ao solo puro encontram-se acima dos demais, as misturas solo + RCD e solo + RCD + cal virgem encontram-se na mesma tendência e em posição inferior está a mistura solo + RCD + cal virgem. Esse gráfico na realidade reflete as variações eventualmente ocorridas na macroposidade, pois o grau de saturação diminui com o aumento da porosidade.

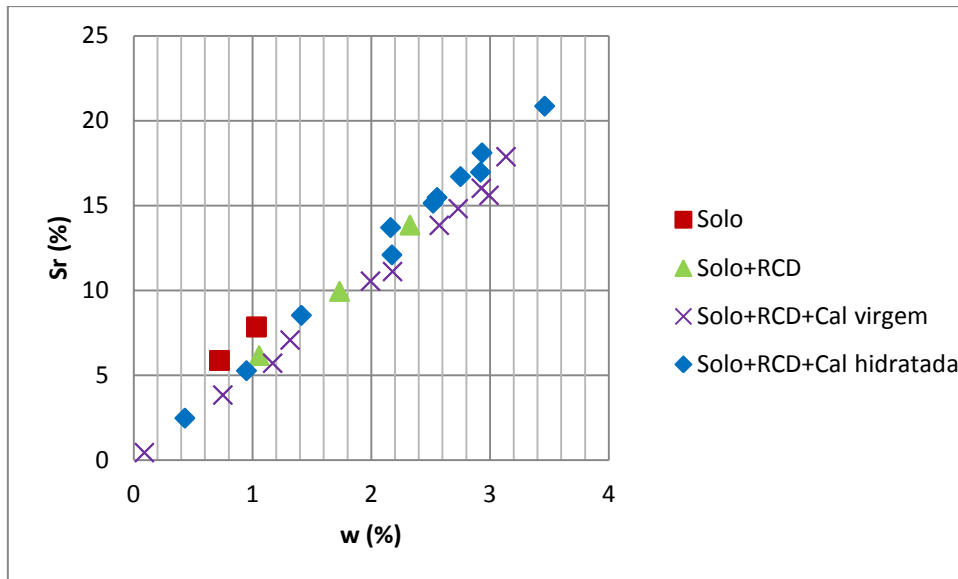


Figura 4.21 – Relação da umidade dos macroporos com o grau de saturação dos macroporos

No gráfico que relaciona o grau de saturação global com a umidade dos macroporos, Figura 4.22, verifica-se que a relação entre os dois parâmetros depende do material sendo que nessa figura é possível observar que a mistura contendo cal hidratada se distingue da composta apenas por solo + RCD. Assim, infere-se que o grau de saturação global está diretamente relacionado com a umidade dos macroporos e o RCD e as cals interferem na relação sendo distinta a influência do tipo de cal.

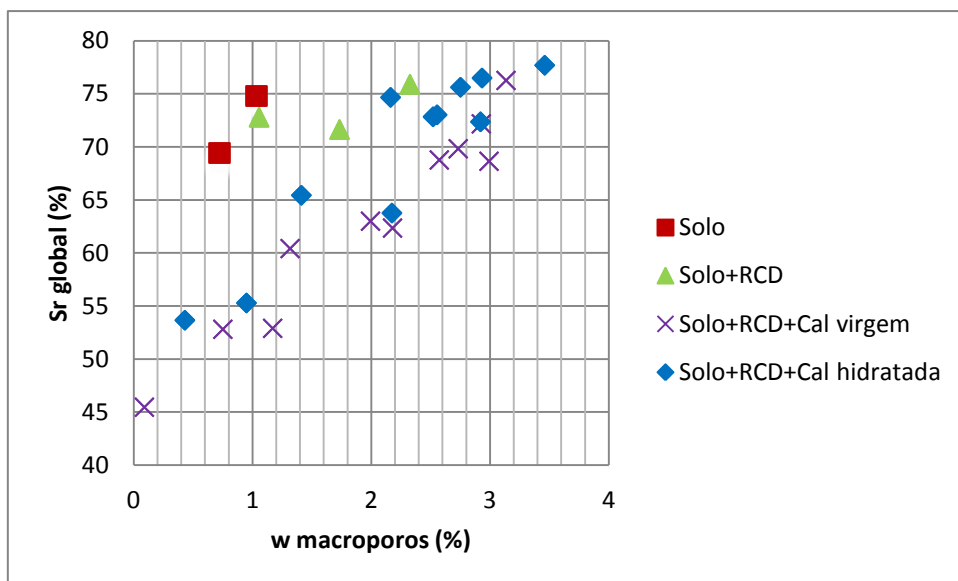


Figura 4.22 – Relação da umidade dos macroporos e o grau de saturação global

Verificando-se o grau de saturação das amostras com a sucção correspondente, tem-se a Figura 4.23.

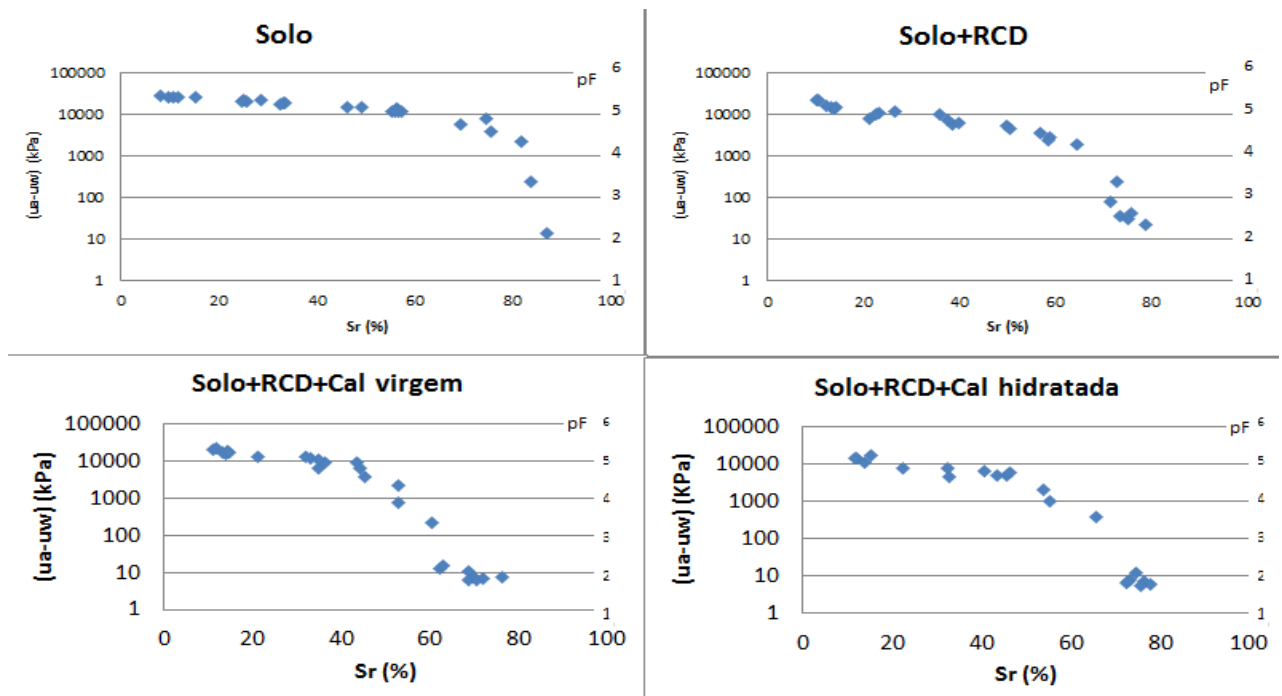


Figura 4.23 – Grau de saturação versus sucção

Plotando-se o grau de saturação em relação à sucção em pF transformada pelo índice de vazios, tem-se a Figura 4.24. Alguns valores de índice de vazios foram ajustados em função do grau de saturação, devido a dificuldade em se determinar com precisão o volume dos corpos de prova.

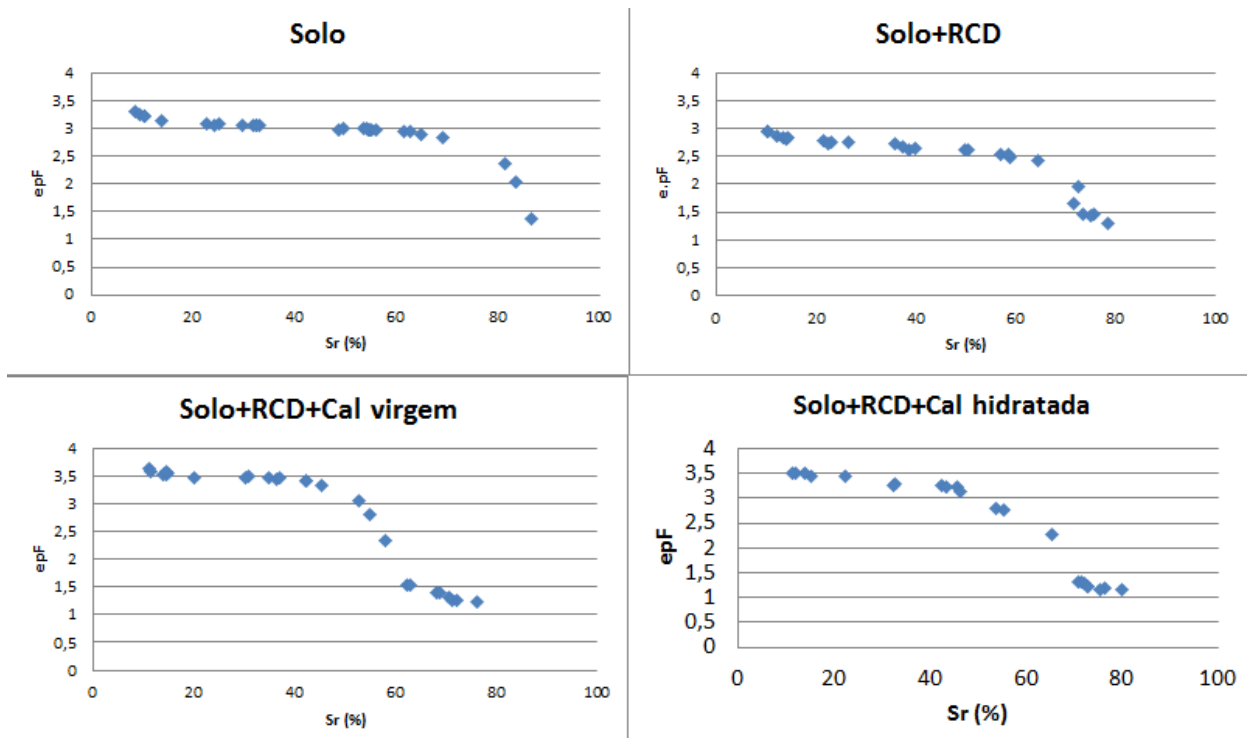


Figura 4.24 – Relação da saturação com o índice de vazios e a sucção

Plotando-se o comportamento considerando macro e microporos do grau de saturação em relação ao índice de vazios x sucção normalizada, tem-se a Figura 4.25.

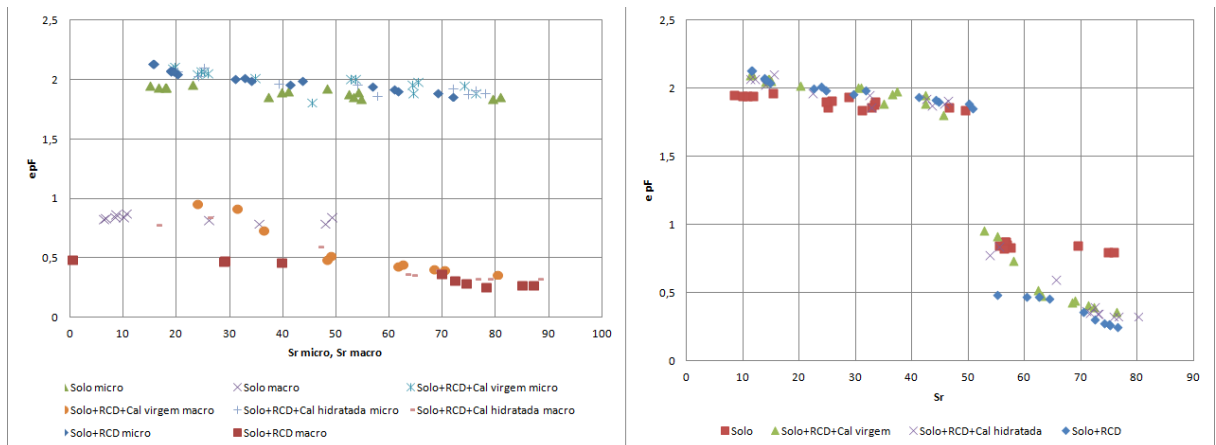


Figura 4.25 – Grau de saturação x e_{pF} a) S_r x e_{pF} separando o einter e o eintra; b) S_r global x e_{pF} separando einter e o eintra

Pela Figura 4.25, tem-se um comportamento semelhante dos microporos para todas as amostras, o que significa que, no caso, independente do tipo de material, o grau de saturação aumentou em proporção semelhante quanto menor a relação do índice de vazios x sucção

normalizada. Em relação ao comportamento dos macroporos, verifica-se comportamento semelhante das amostras contendo cal virgem e cal hidratada. Verifica-se também que a mistura solo + RCD possui os menores valores de e e pF macroporos.

4.12. MINI COMPACTAÇÃO

Do ensaio de Mini Compactação, ilustrado na Figura 4.26, tem-se uma curva de compactação semelhante para o solo e solo + RCD, com umidade ótima da amostra contendo somente solo ligeiramente superior à do solo + RCD. As curvas obtidas para as misturas contendo cal se deslocam para baixo e para a esquerda provavelmente devido a fenômenos de agregação. Os resultados foram o contrário do usual em que a presença da cal aumenta a umidade ótima, conforme Lowato (2004). Entretanto, verifica-se que a presença de cal nesta pesquisa diminuiu o limite de liquidez da mistura solo + RCD.

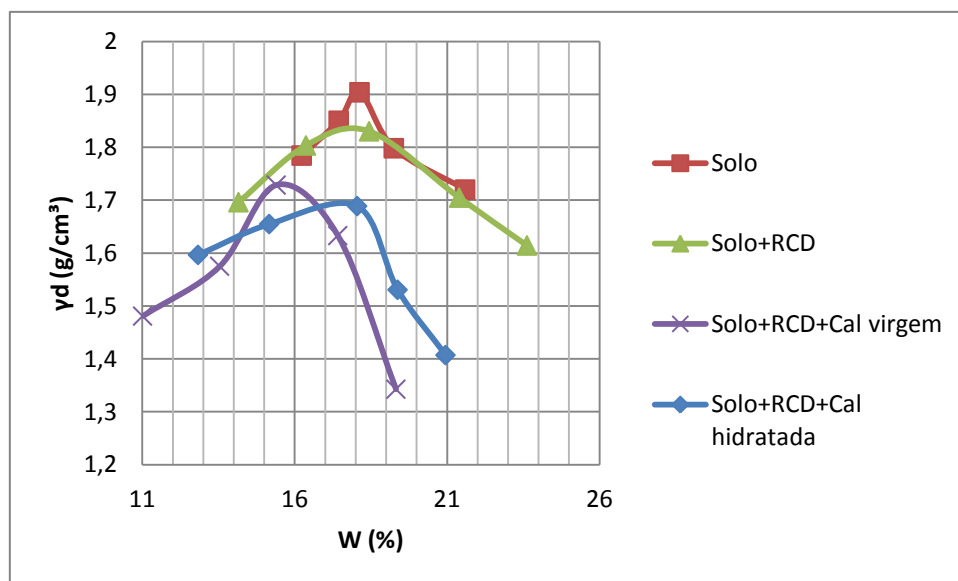


Figura 4.26 – Mini Compactação das amostras

Ao se analisar os pesos específicos aparentes secos máximos em função dos graus de saturação a eles correspondentes (Figura 4.27) e considerando-se que a umidade ótima corresponde ao ponto de oclusão da fase ar, verifica-se que a incorporação do RCD reduz o grau de saturação de oclusão, redução essa que é ampliada com a incorporação da cal. Essa redução foi máxima quando da incorporação da cal virgem. Para todos os materiais, esse grau de saturação foi tanto maior quanto maior a superfície específica conforme mostrado na

Figura 4.11, o que leva à conclusão de que no caso dessa pesquisa existe uma íntima relação entre os materiais utilizados e o grau de saturação de oclusão na curva de compactação.

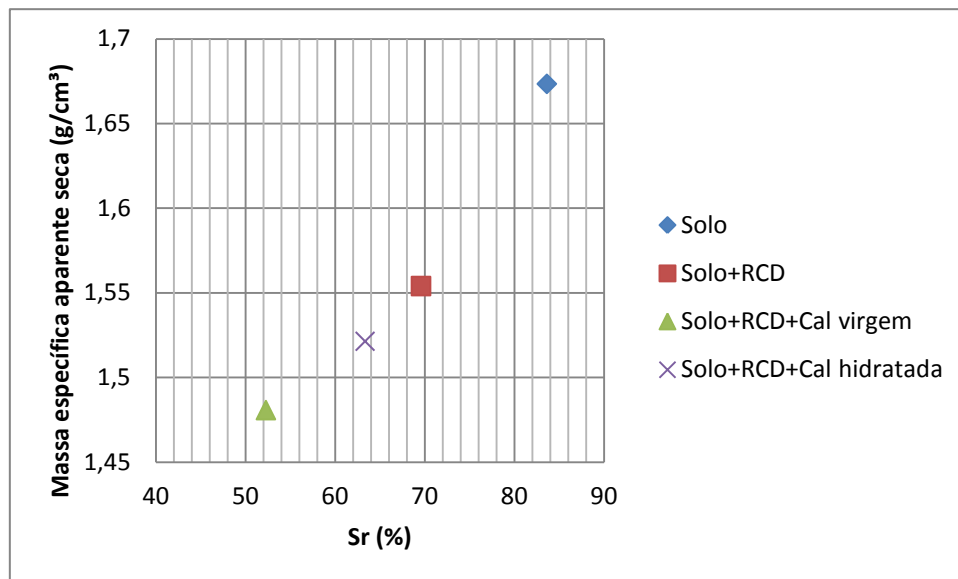


Figura 4.27 – Massa específica aparente seca em função do grau de saturação

4.1.CBR E EXPANSÃO

Em geral, tem-se observado nos solos lateríticos que os valores máximos do mini CBR com imersão situam-se nas proximidades da umidade ótima e que os valores do mini CBR sem imersão são crescentes com a diminuição do teor de umidade de compactação, e ainda que as retas interpoladas para os ramos seco e úmido têm inclinações diferentes (Villibor & Nogami, 2009).

A Figura 4.28 apresenta as curvas de Mini CBR do solo. Os ensaios foram realizados com 1, 14, 28 e 56 dias de cura. Verifica-se um comportamento similar aos 28 e 56 dias tanto imerso como não imerso. As formas das curvas obtidas para a condição sem imersão são distintas daquelas obtidas com imersão, enquanto na primeira não aparece pico na segunda ele é claro. Cabe destacar que no caso sem imersão interferem no comportamento a sucção e a porosidade enquanto nos ensaios com imersão apenas o aspecto porosidade se faz presente. Algo importante a ser observado ainda é o aparente efeito da tixotropia no comportamento do solo puro, uma vez que mesmo na condição imersa o comportamento melhorou com o tempo de cura. Destaca-se que os ensaios sem imersão foram realizados de um lado dos corpos de prova e os com imersão no lado oposto dos mesmos corpos de prova. Os valores de CBR imerso superiores aos não imersos estão provavelmente atrelados a gradientes de densidade existente

entre os dois extremos dos corpos de prova em consequência da metodologia de compactação adotada.

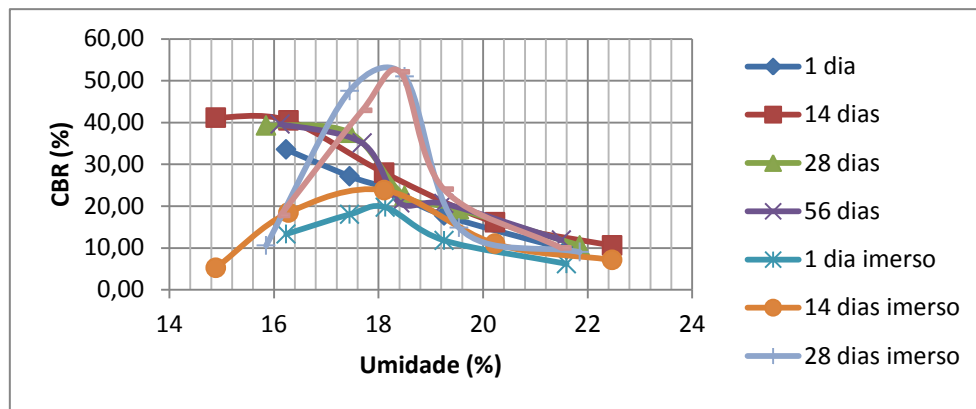


Figura 4.28 – Mini CBR do solo puro

Para o ensaio de Mini CBR da mistura solo + RCD, verificou-se também que a reação foi praticamente estabilizada aos 28 dias, uma vez que o comportamento aos 56 dias foi semelhante. Para amostras com 14 dias não imerso, obteve-se resultado semelhante comparado aos 28 dias. A Figura 4.29 mostra os resultados obtidos para o ensaio da mistura de Solo + RCD. Quanto a influência da saturação na forma das curvas registra-se aqui a mesma observação feita para o caso do solo puro. Ao se comparar os resultados obtidos para o solo + RCD com aqueles obtidos para o solo puro verifica-se que a incorporação do RCD melhorou o comportamento do solo nas duas condições, com e sem imersão.

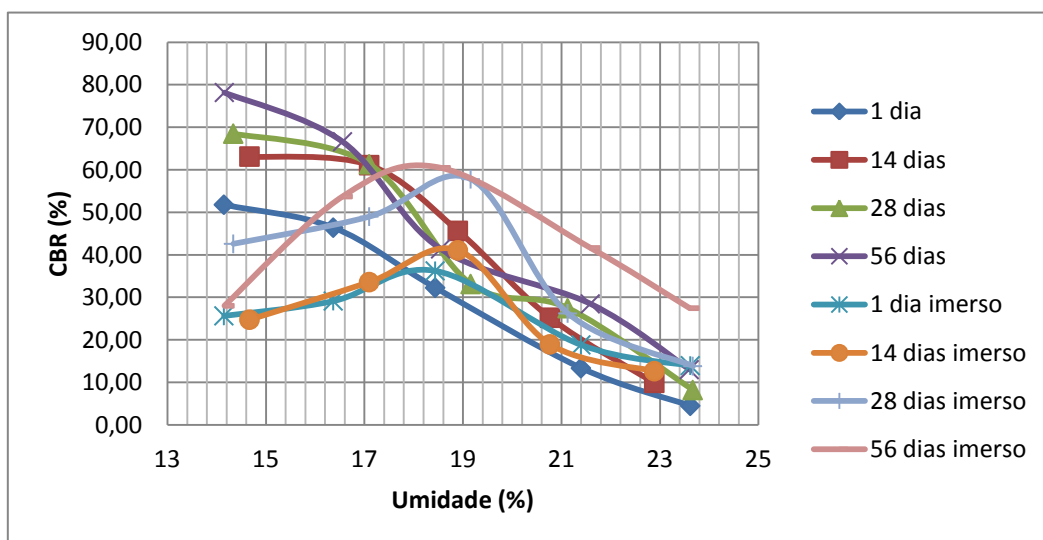


Figura 4.29 – Mini CBR do solo + RCD

Como foi verificado a estabilização da reação do RCD com o solo aos 28 dias, para amostras com adição de cal virgem e hidratada, realizou-se ensaio de CBR apenas aos 1, 7, 14 e 28 dias de cura. Para amostras não imersas, verifica-se na Figura 4.30 comportamento semelhante aos 7, 14 e 28 dias de cura, o que demonstra que a reação da cal virgem com a mistura foi rápida. Já para amostras imersas, verifica-se que ao 1 dia de cura, o comportamento foi semelhante aos demais dias de cura, o que reforça a ideia de rapidez da ação de carbonatação da cal. Observa-se ainda que a incorporação da cal apresentou tendência a melhorar o comportamento da mistura solo com RCD.

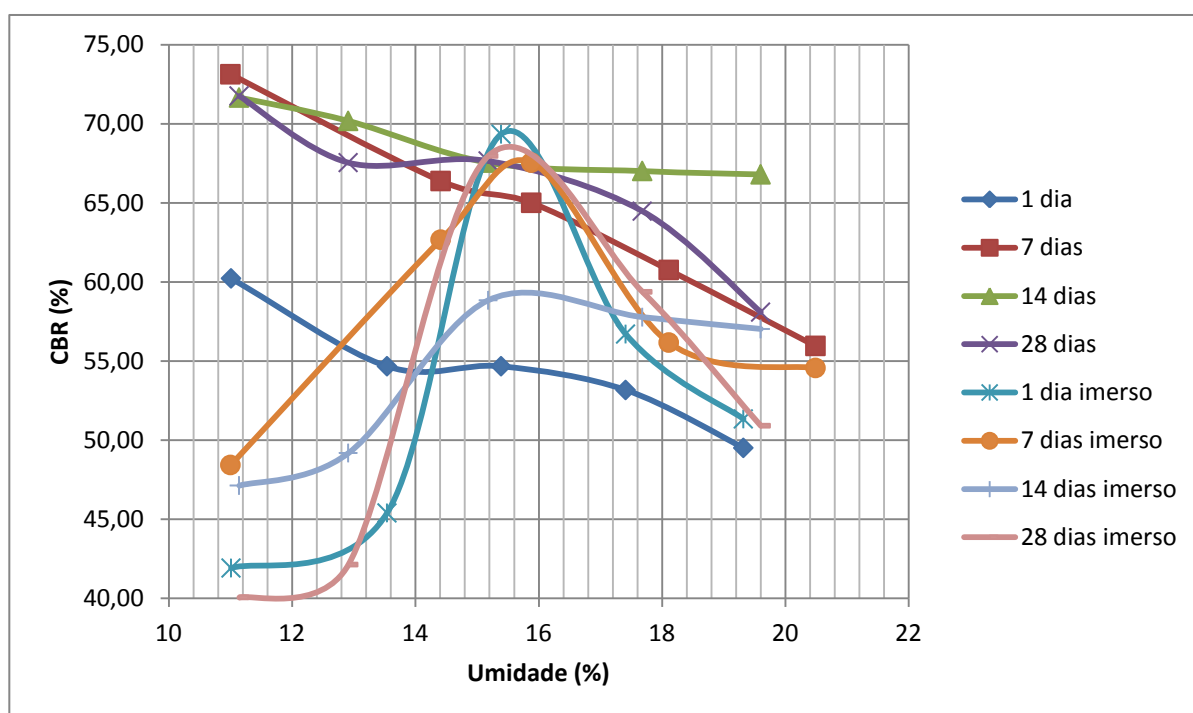


Figura 4.30 – Mini CBR do solo + RCD + cal virgem

Para amostras contendo cal hidratada, verifica-se melhora aos 14 dias de cura e comportamento semelhante aos 7 e 28 dias de cura para amostras não imersas. Já para imersão, o comportamento foi semelhante aos 7, 14 e 28 dias, conforme Figura 4.31. É importante observar que tanto na condição saturada como na condição não saturada além da melhoria do comportamento em consequência da presença da cal hidratada ele se tornou menos sensível à variação da umidade de compactação e à própria imersão.

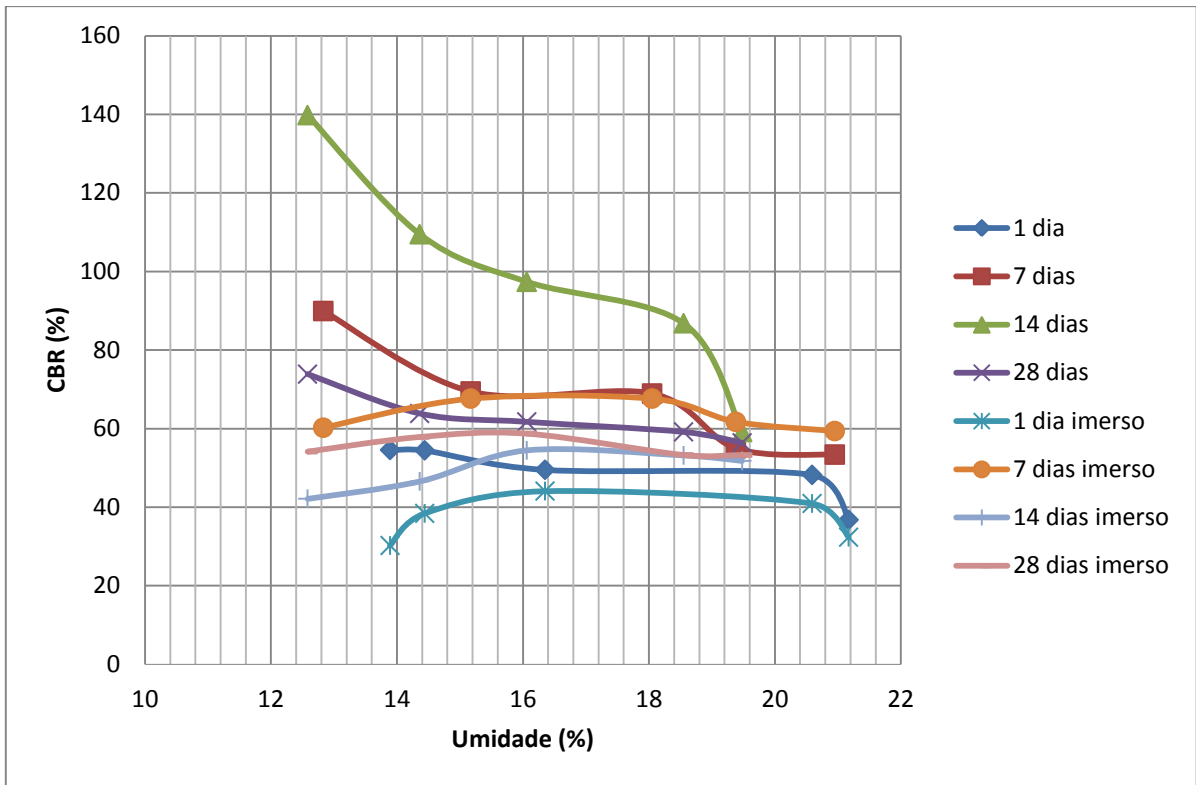


Figura 4.31 – Mini CBR do solo + RCD + cal hidratada

Para verificar a ação da cimentação e da carbonatação, plotou-se gráficos do tempo de cura x CBR imerso do ponto de umidade ótima e não imerso do ponto mais seco, conforme apresentado nas Figuras 4.32 e 4.33.

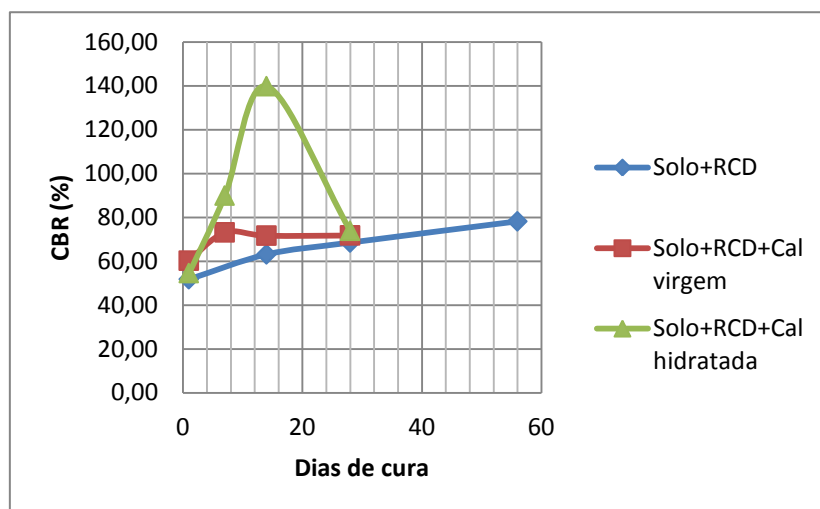


Figura 4.32 – Curas x CBR não imerso

Da Figura 4.32, tem-se que a mistura solo + RCD teve constante aumento do CBR com o tempo. As misturas contendo cal virgem e cal hidratada tiveram melhora com o tempo. O mesmo ocorre com amostras em imersão, conforme a Figura 4.33.

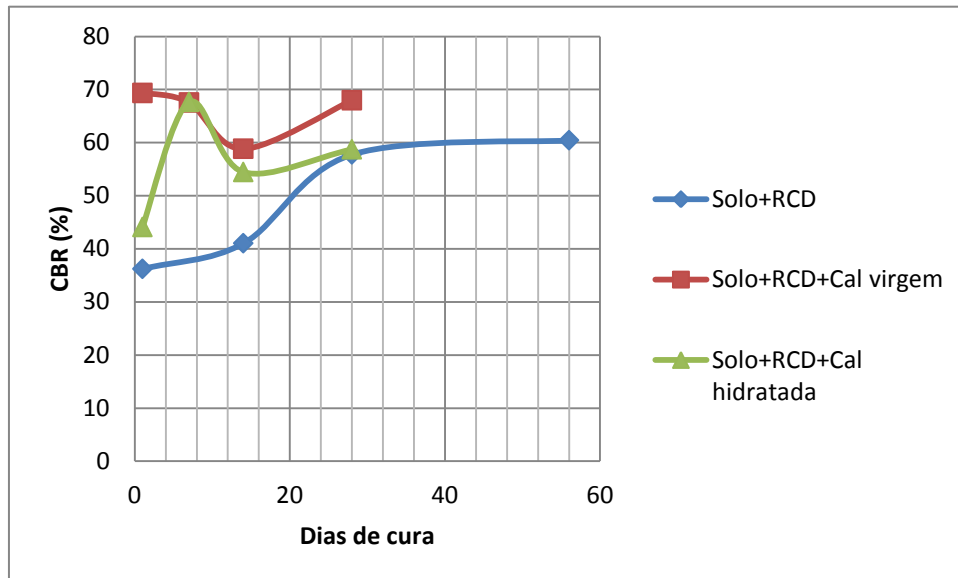


Figura 4.33 – Curas x CBR imerso

Para o solo puro, obteve-se os resultados plotados no gráfico da Figura 4.34.

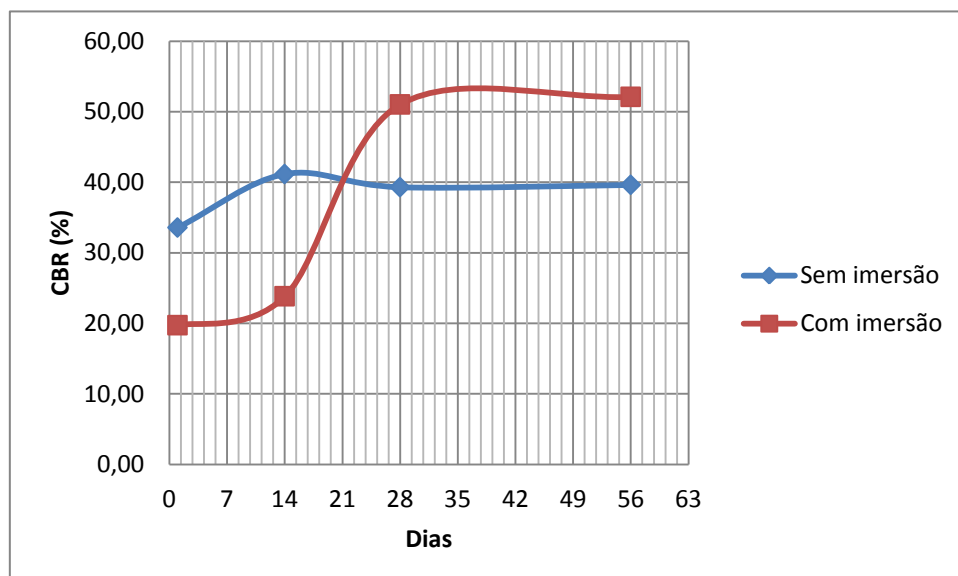


Figura 4.34 – Dias de cura x CBR do solo

Na Figura 4.34 observa-se que os resultados do ensaio sem imersão não teve alterações significativas com o tempo de cura. Já para as amostras imersas, os valores de CBR aumentaram com o tempo, sendo mais significativo com 28 dias de repouso, na qual mantém-se estável, se comparado aos 56 dias. Possivelmente, um efeito que pode ter ocorrido é que quando da imersão a sucção absorveu a água e submete o solo a um aumento de tensão efetiva, aumentando a capacidade portante.

Em geral, verifica-se melhor comportamento da mistura com cal hidratada, seguida da mistura com cal virgem, conforme esperado devido à atuação cimentante da cal e da maior sucção que a mesma proporciona à mistura para ensaio não imerso. Para amostras imersas, apesar da carbonatação da cal virgem ter sido rápida, ao longo do tempo a mistura com cal hidratada teve comportamento similar.

Para todas as amostras estudadas, a expansão foi nula.

Considerando-se que a resistência depende da porosidade e da umidade e que o grau de saturação reúne esses dois elementos plotou-se gráficos da relação do grau de saturação com o CBR não imerso (Figura 4.35).

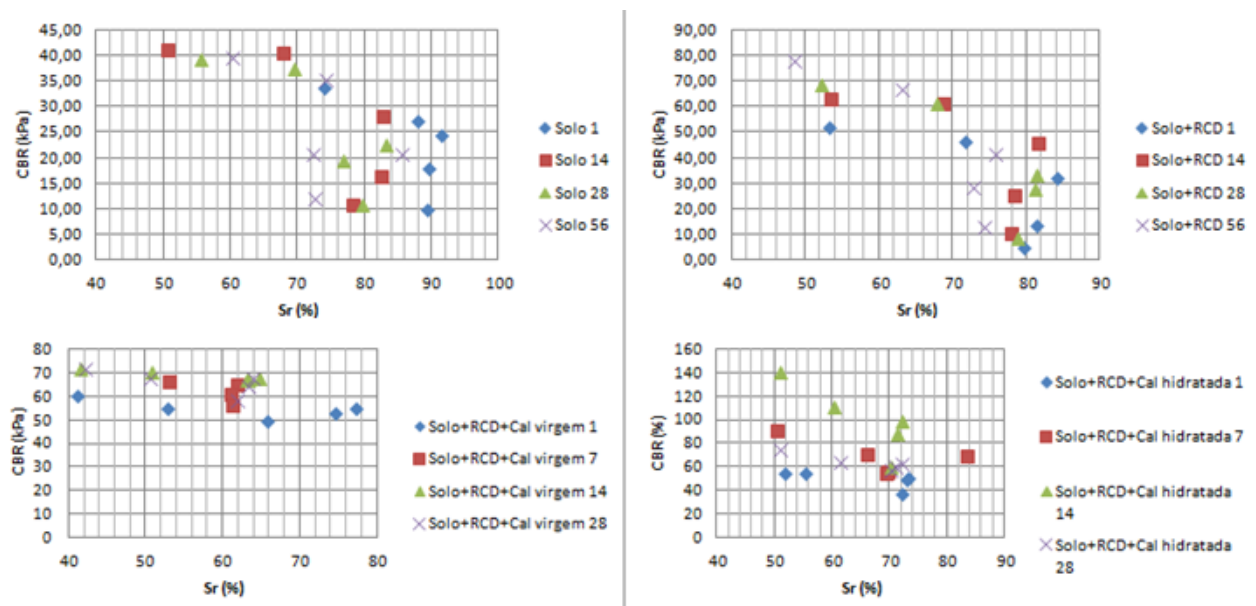


Figura 4.35 – Sr x CBR não imerso

Para o caso em estudo, verificou-se que há relação do grau de saturação com o CBR, com exceção dos quatro primeiros pontos da amostra solo + RCD + cal hidratada aos 14 dias de cura, devido ao alto valor de CBR apresentado. Para as demais amostras, quanto maior o valor

do grau de saturação, menor foi o valor do CBR, o que aponta para a importância da sucção, independente do tipo de material. Para melhor visualização, plotou-se o gráfico do grau de saturação versus o CBR não imerso das amostras aos 28 dias (Figura 4.36). Escolheu-se esse tempo de cura devido à maior possibilidade de estabilização das reações químicas. Nesse caso específico, observa-se que o conjunto de resultados tende a se encaixar em um modelo geral de comportamento em que o CBR diminui com o aumento do Grau de Saturação. No entanto, percebe-se ainda que a cal principalmente a hidratada apresentou ligeira tendência a melhoria de comportamento sendo porém o maior ganho oriundo da incorporação do RCD.

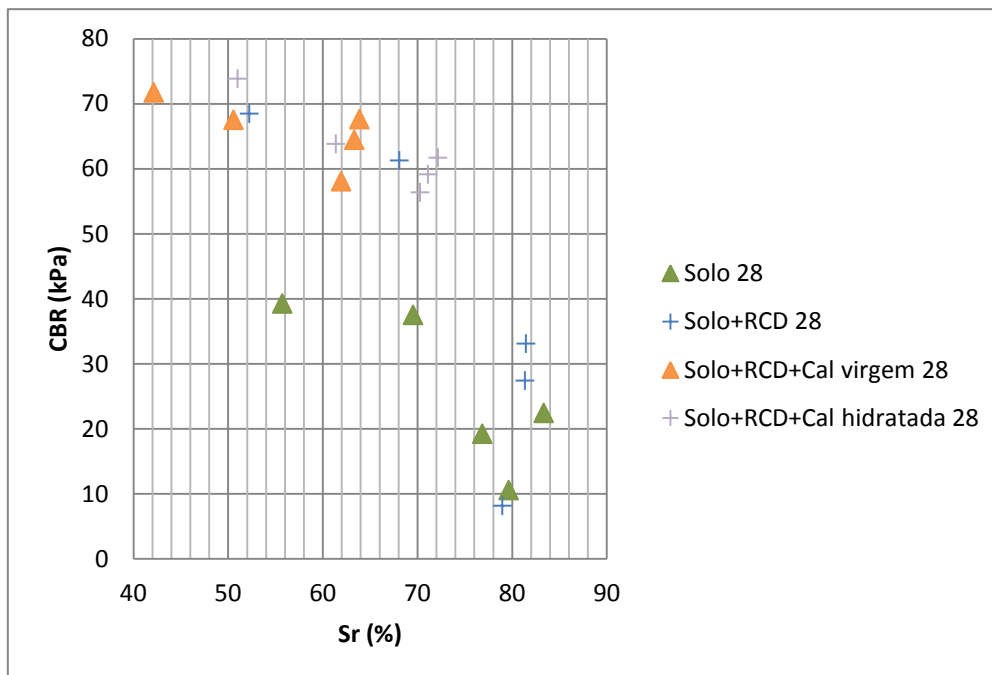


Figura 4.36 – Grau de saturação x CBR não imerso aos 28 dias

Em seguida, comparou-se os valores de CBR imersos com os valores de grau de saturação oriundos da compactação, conforme Figura 4.37. Tal comparação foi feita tendo em vista que a condição de compactação pode interferir na estrutura do solo e esta no seu comportamento mesmo após saturação. Nesse caso específico é possível perceber que a melhoria do comportamento do solo é mais clara quando da utilização de cal. Destaca-se, porém, que nesse caso o grau de saturação reflete tão somente a condição de compactação e sua influência no comportamento do solo enquanto interveniente na condição física e nas reações que se desenvolveram no caso das estabilização em função de tais condições. Na óptica do estado físico resultante da compactação verifica-se que em todos os materiais, inclusive no solo puro ocorre uma tendência a melhoria do comportamento com o tempo de cura quando o material foi compactado no ramo seco. Para as misturas estabilizadas com cal a melhoria se deu mesmo quando da compactação no ramo úmido.

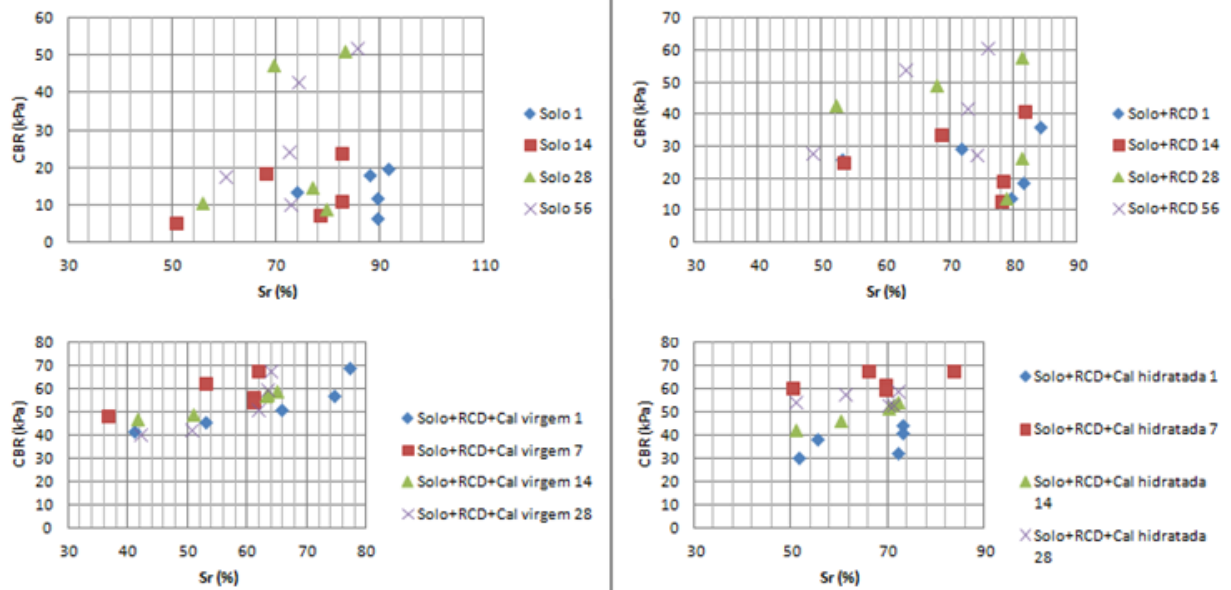


Figura 4.37 – Sr x CBR imerso

Da Figura 4.37, infere-se de modo complementar que para as amostras do ramo seco, quanto maior o grau de saturação, maior o valor de CBR, sendo que o mesmo tende a diminuir após a umidade ótima para os casos do solo puro e do solo + RCD. Para as misturas estabilizadas com cal não sobressai a queda de resistência com o aumento do grau de saturação no ramo úmido. Assim, se entende que estas variações refletem para o solo e solo + RCD as variações de porosidade ao longo da curva de compactação uma vez que no ramo seco esta diminui com o aumento da umidade e no ramo úmido ocorre o contrário. Já nas misturas com cal esta aparentemente impede a queda de resistência no ramo úmido. Como as observações foram para todas as amostras, conclui-se que elas são válidas independente do tipo de material, para o caso desse estudo. A Figura 4.38 demonstra a explicação para as amostras com cura de 28 dias.

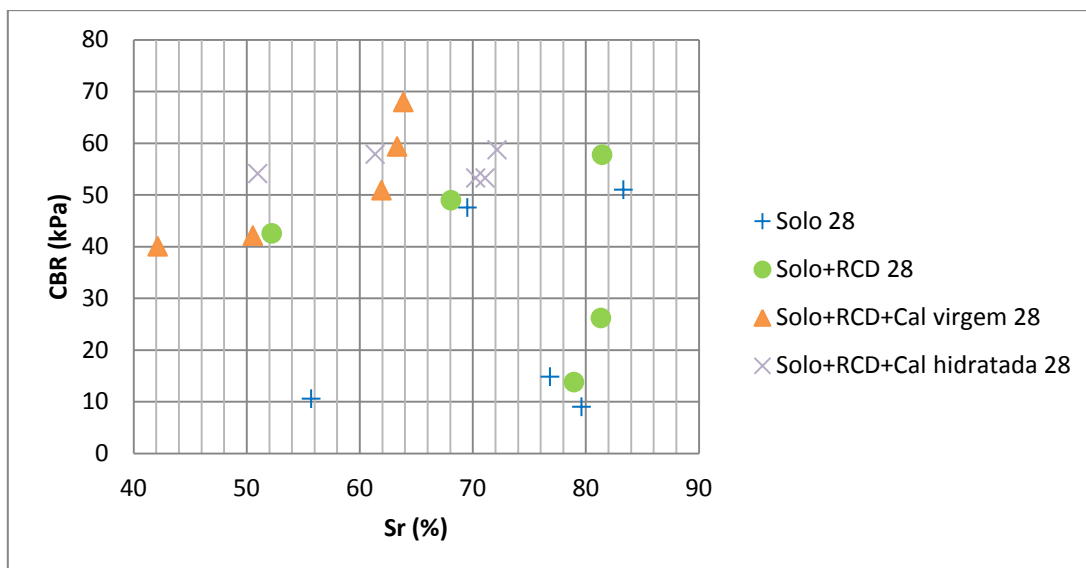


Figura 4.38 – Sr x CBR imerso aos 28 dias

A fim de se verificar a influência da condição de compactação no CBR não imerso plotou-se na Figura 4.39 os valores de CBR em função do índice de vazios global. Verifica-se nesses gráficos que para o solo e para o solo + RCD o índice de vazios e a umidade afetam o CBR sendo clara a distinção entre os comportamentos dos materiais compactado nos ramos seco e úmido, mas sempre apresentando para ambos os materiais melhoria do comportamento mecânico com o aumento do tempo de cura. Com a presença da cal o comportamento das misturas torna-se menos sensível à condição de compactação.

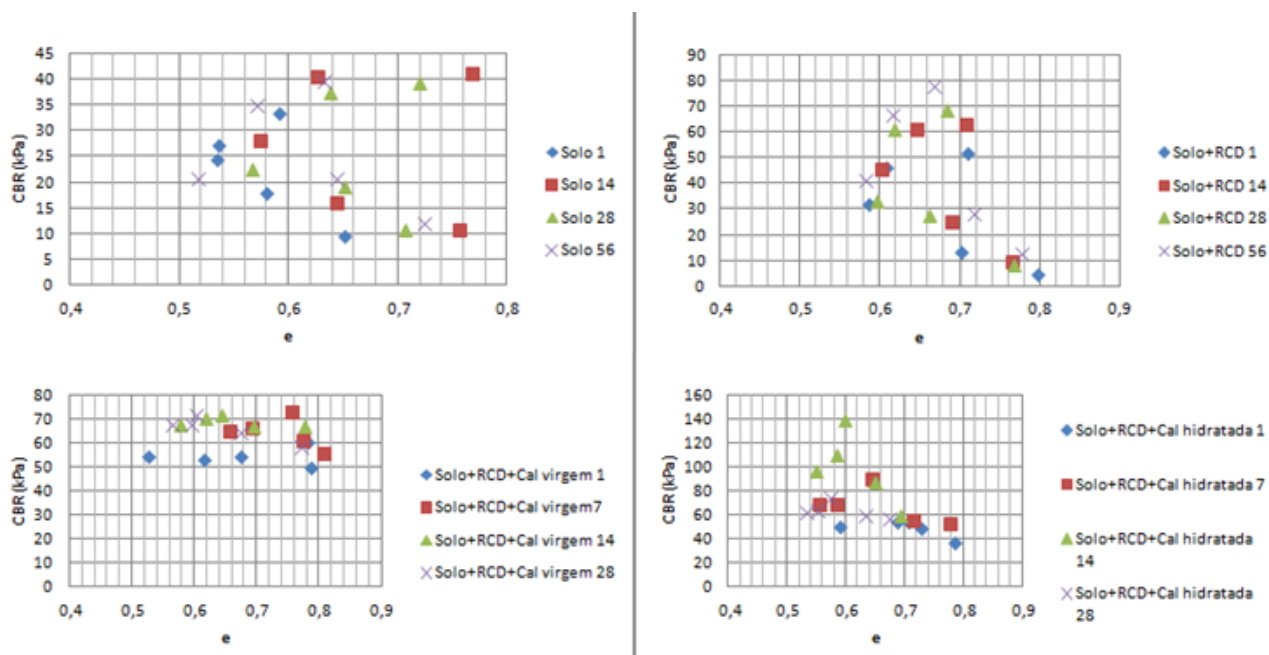


Figura 4.39 – Relação do índice de vazios com o CBR não imerso

Aos 28 dias de cura, plotando-se o gráfico do CBR não imerso versus o índice de vazios, pode-se verificar a mesma tendência, conforme Figura 4.40, ficando clara a influência das cais na melhoria do comportamento das misturas.

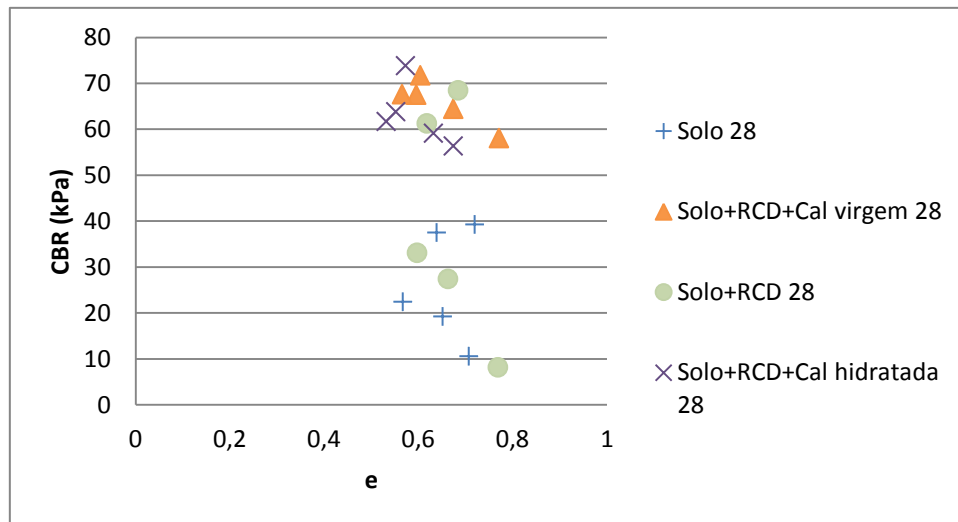


Figura 4.40 – Relação do índice de vazios com o CBR não imerso aos 28 dias

Relacionando-se o índice de vazios global com os valores de CBR obtidos após imersão, têm-se os resultados da Figura 4.41.

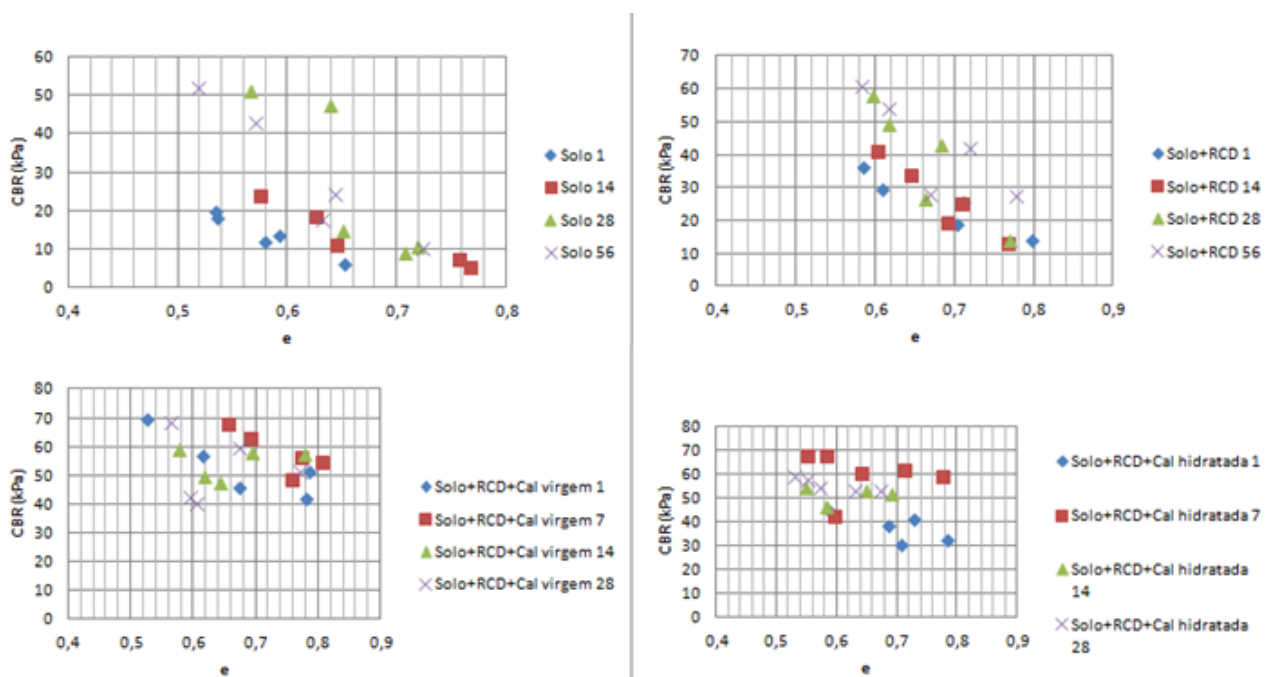


Figura 4.41 – Relação do índice de vazios global com os valores de CBR imerso

Da Figura 4.41, infere-se que o aumento do índice de vazios atua, como esperado, de forma negativa na capacidade de suporte. A constatação mais relevante sobre essas figuras parece ser, no entanto, o fato das quedas de resistência com o aumento do índice de vazios serem mais relevantes para o solo e para a mistura solo + RCD sendo que quando da adição das cal o comportamento se torna mais estável registrando-se menores perdas com o aumento da porosidade.

A Figura 4.42 apresenta os resultados para os corpos de prova submetidos a cura de 28 dias.

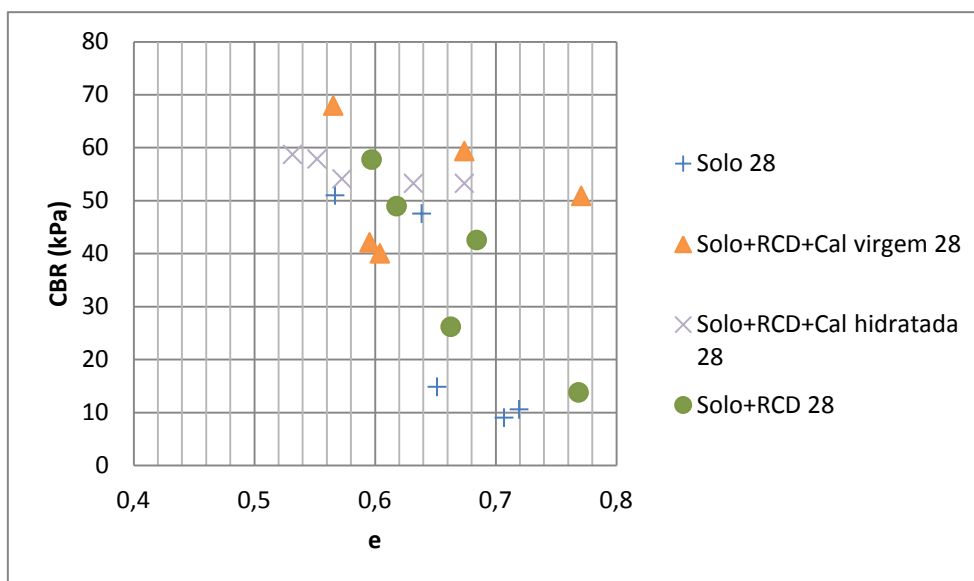


Figura 4.42 – Relação do índice de vazios e o CBR imerso aos 28 dias

Para verificar a influência da sucção nos resultados dos valores de CBR, foram traçados gráficos considerando-se as sucções medidas em cada corpo de prova (Figura 4.43). Verifica-se nos gráficos constantes dessa figura, que, conforme esperado, quanto maior a sucção, maiores os valores de CBR suportados pelos corpos de prova. Cabe destacar os valores elevados de sucção medidos para o solo puro. Como os valores de sucção medidos para o solo encontram-se no domínio dos microporos, o CBR varia com certa independência desse parâmetro. Destaca-se ainda que nas misturas estabilizadas com cal os valores de CBR se tornam aparentemente menos dependentes da sucção o que aponta para misturas mais estáveis quando de eventuais variações de umidade.

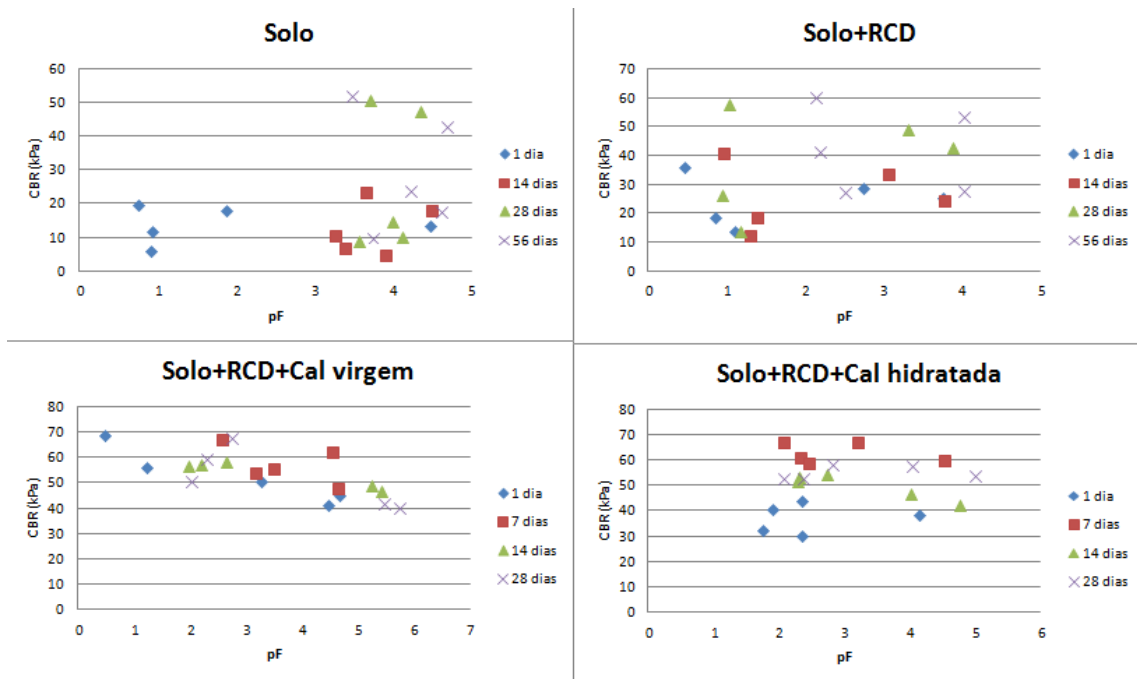


Figura 4.43 – Relação da sucção com o CBR não imerso

Verificando-se a relação da sucção com o CBR não imerso aos 28 dias (Figura 4.44), tem-se uma tendência mais clara. Para amostra de solo, verifica-se um comportamento mecânico pior e maiores sucções em relação às demais amostras, devido à sua natureza e composição.

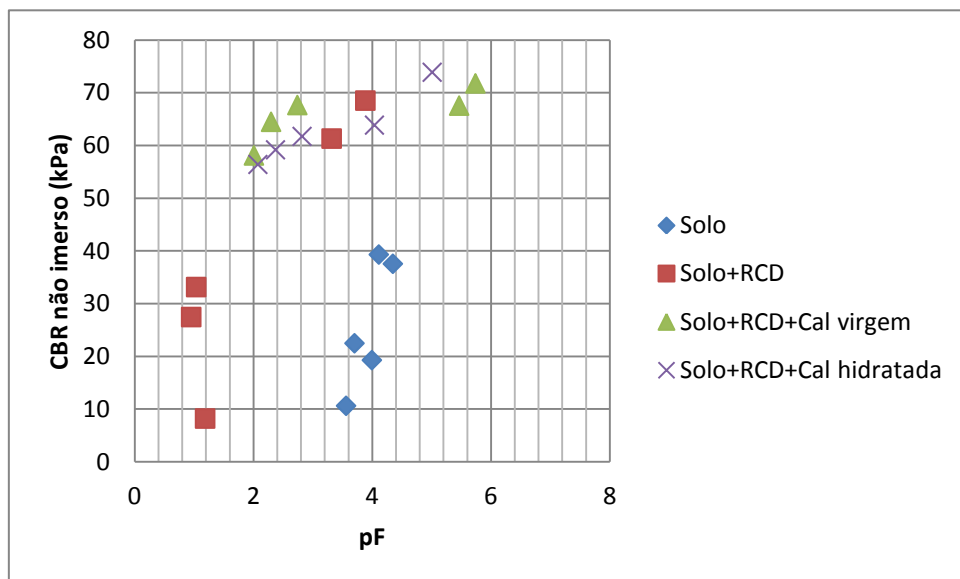


Figura 4.44 – Relação da sucção com o CBR não imerso aos 28 dias

Sendo geralmente o comportamento função da sucção e da porosidade presente no material, plotou-se os resultados de CBR em função da sucção em pF normalizada em relação índice devazios. Nesse caso, verifica-se que, em geral, quanto maior a relação pF/e, também maior o valor do CBR, conforme esperado, uma vez que tanto o aumento da sucção, quanto a diminuição do índice de vazios contribuem para melhoria do comportamento mecânico. Igualmente nesse caso o comportamento das misturas contendo cal são menos sensíveis às variações de pF/e. A explanação é demonstrada na Figura 4.45.

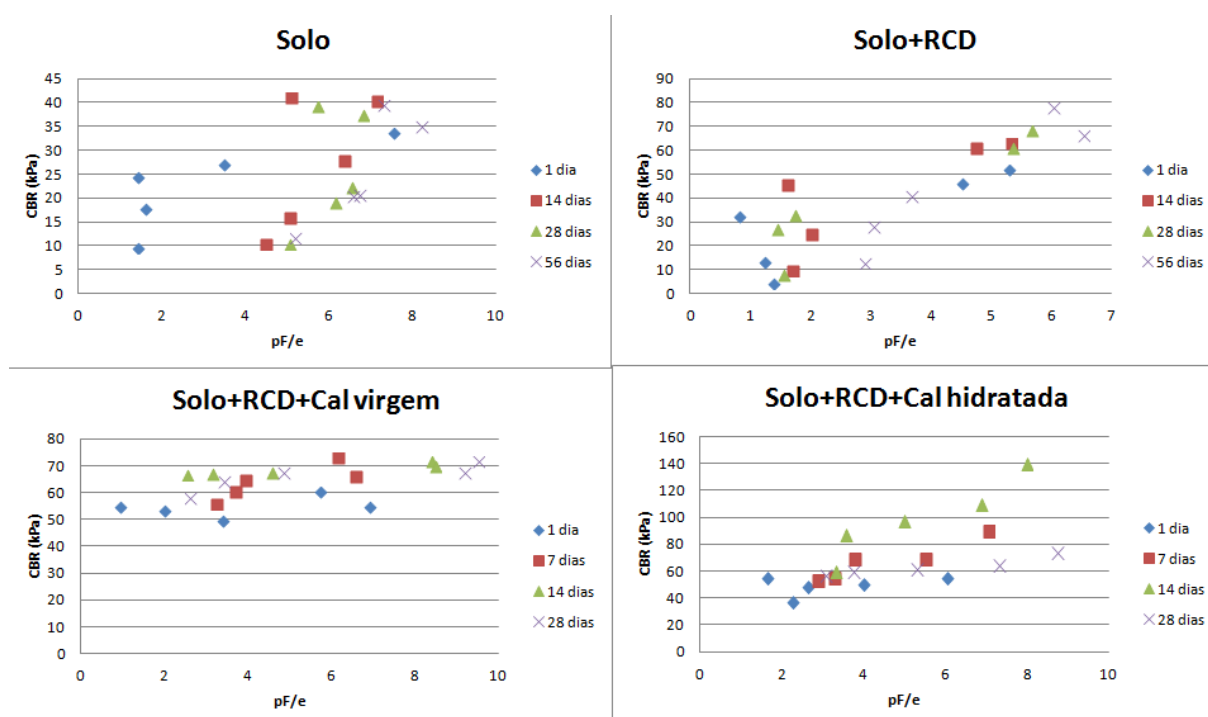


Figura 4.45 – Relação da sucção e inverso do índice de vazios com o CBR não imerso

Aos 28 dias, verifica-se também que, quanto maior a relação pF/e, também melhores os resultados do comportamento mecânico, conforme Figura 4.46.

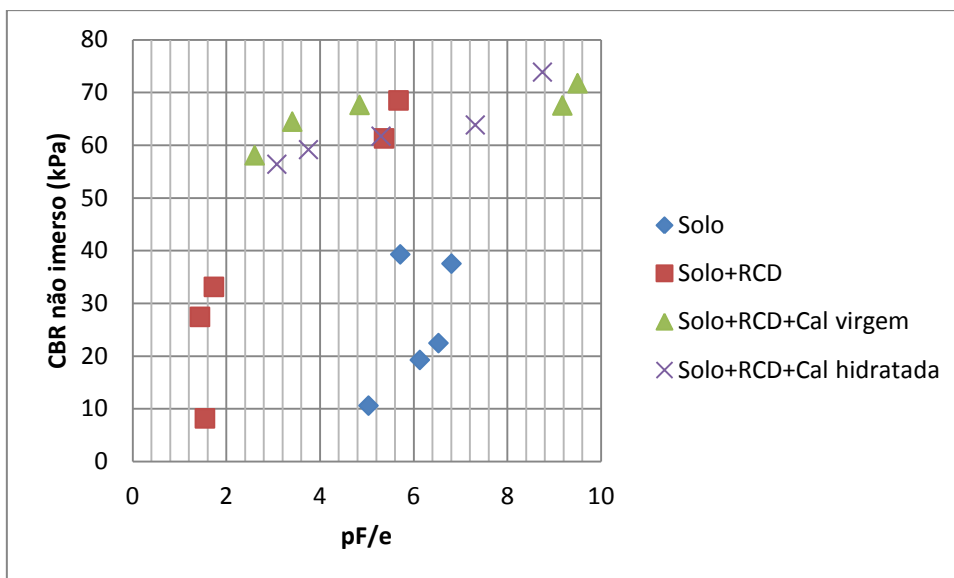


Figura 4.46 – Relação pF/e x CBR não imerso aos 28 dias

4.2. COMPRESSÃO SIMPLES

A Figura 4.47 apresenta os resultados de compressão simples das amostras ensaiadas.

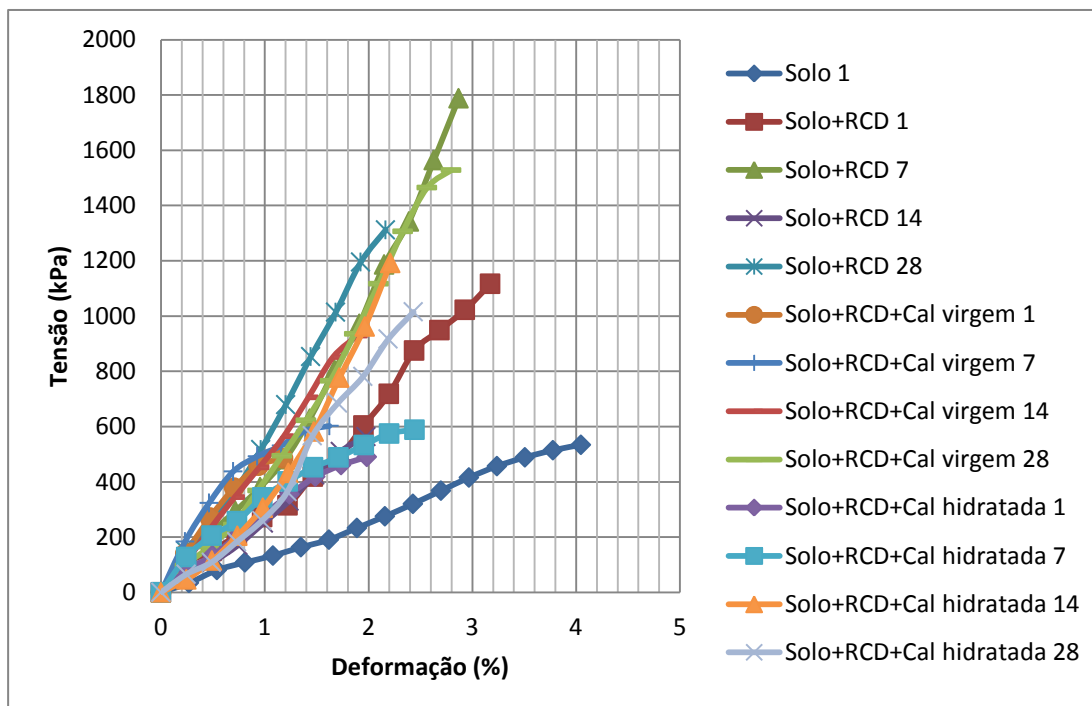


Figura 4.47 – Compressão Simples

Verifica-se que as amostras de solo permitem maior deformação, devido à maior quantidade de argila responsável pela coesão, apesar da forma agregada em que se apresenta grande parte dela. As amostras de solo + RCD e solo + RCD + cal virgem suportaram as maiores tensões, o que aponta para a maior influência da sucção e/ou da fração argila. No caso da cal virgem, a sucção ocasionada pela diminuição da água em consequência de sua hidratação e a presença da fração argila, teve influência positiva nos resultados desse ensaio.

Aos 28 dias de cura, verifica-se que a mistura contendo cal hidratada permitiu maior deformação, e que a mistura contendo cal virgem permitiu maiores tensões, conforme Figura 4.48.

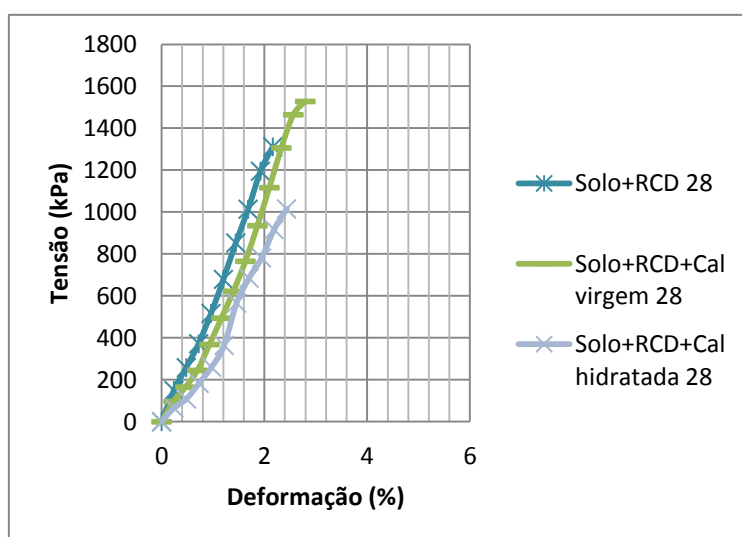


Figura 4.48 – Deformação x Tensão aos 28 dia de cura

Tentou-se realizar o ensaio de compressão simples para misturas abaixo da umidade ótima. Os corpos de prova romperam quando retirados do papel filme que os envolvia no processo de cura (Figura 4.49) ou quando colocados na prensa, ao ajustá-los para o ensaio (Figura 4.50). Possivelmente, isso se deu, pelo menos em parte, por que na cura houve absorção da água pelo resíduo e em eventuais reações químicas fazendo com que sua ausência limitasse a junção entre partículas e em especial entre os agregados. A redução significativa da umidade que teria ocorrido entre os agregados e entre as partículas individuais, apesar de ocasionar o aumento da sucção nas misturas como um todo, estaria contribuindo para a maior desagregabilidade dos corpos de prova. Para exemplificar o ocorrido se for misturada água a uma areia constituída de quartzo ela apresentará uma coesão aparente que permitirá moldar um montículo bastante vertical, no entanto, apesar da sucção aumentar com a desidratação, vai chegar um momento em que apesar da sucção tender para infinito, a ausência significativa

de água em grande parte dos contatos entre os grãos fará com que montículo se desmorone. Outra hipótese seria que nesse processo de migração da água para o interior dos poros dos agregados o aumento da sucção no volume do corpo de prova como um todo tenha gerado retrações diferenciais entre o solo e os agregados proporcionando o surgimento de microfissuras e, portanto, fragilizando os corpos de prova e ampliando a tendência à ruptura.

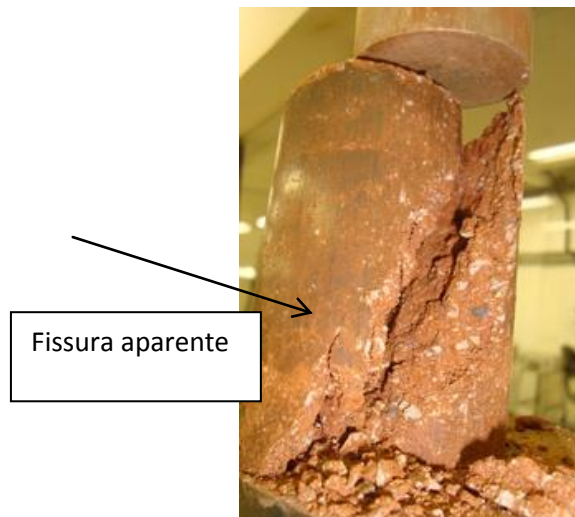


Figura 4.49 – Ruptura na montagem do ensaio de solo + RCD



Figura 4.50 – Ruptura quando retirado do papel filme da amostra de solo + RCD

Buscando verificar o efeito do grau de saturação na resistência à compressão simples, plotou-se o gráfico apresentado na Figura 4.51 considerando-se os diferentes tempos de cura analisados. Observa-se, no entanto, que nesse caso a influência não mostrou-se clara apontando para a necessidade de se separar os elementos que poderiam eventualmente

interferir no comportamento como a umidade, o índice de vazios e por consequência a própria sucção.

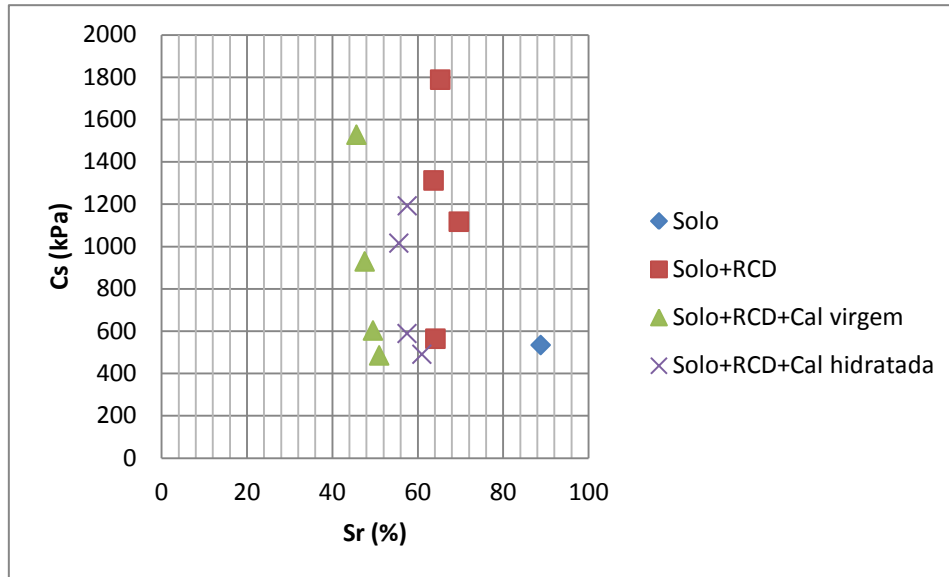


Figura 4.51 – Grau de saturação em relação à resistência à compressão simples

Verifica-se nessa figura que apenas a mistura solo + RCD + CV apresentou tendência clara de perda da resistência à compressão simples com o aumento do grau de saturação. Isso se deve provavelmente ao fato de outros elementos como cimentações terem se desenvolvido ao longo do tempo. Para maior clareza desse entendimento a Figura 4.52 obtida considerando apenas a idade de 28 dias para as misturas e o solo puro após um dia da compactação mostra que efetivamente a diminuição do grau de saturação revela a influência positiva da sucção na resistência.

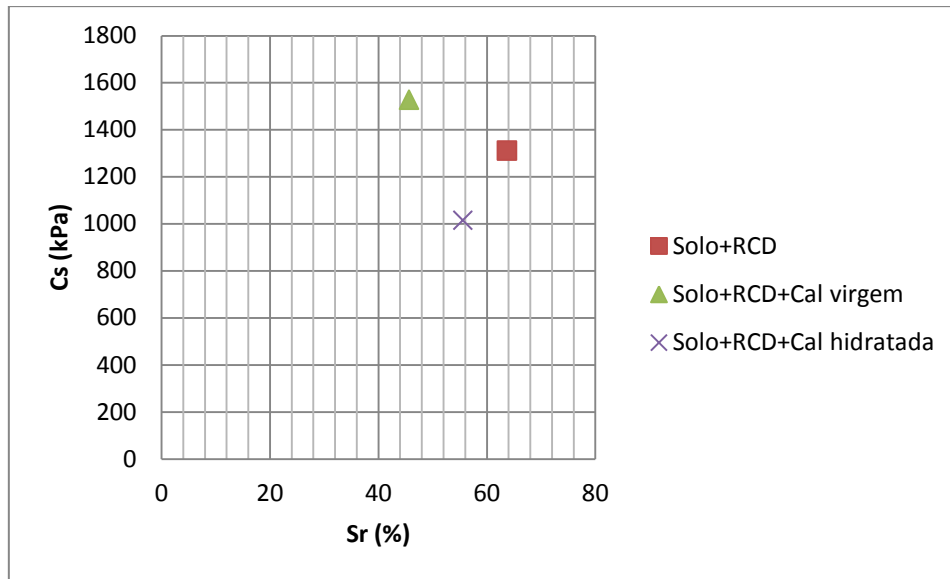


Figura 4.52 – Relação do grau de saturação com a resistência à compressão simples aos 28 dias de cura

Para entender melhor o comportamento, plotou-se o gráfico do grau de saturação em relação à deformação do ensaio de compressão simples na ruptura (Figura 4.53). Cabe lembrar que essa deformação tem relação direta com o módulo de elasticidade secante na ruptura, daí utilizá-la na avaliação.

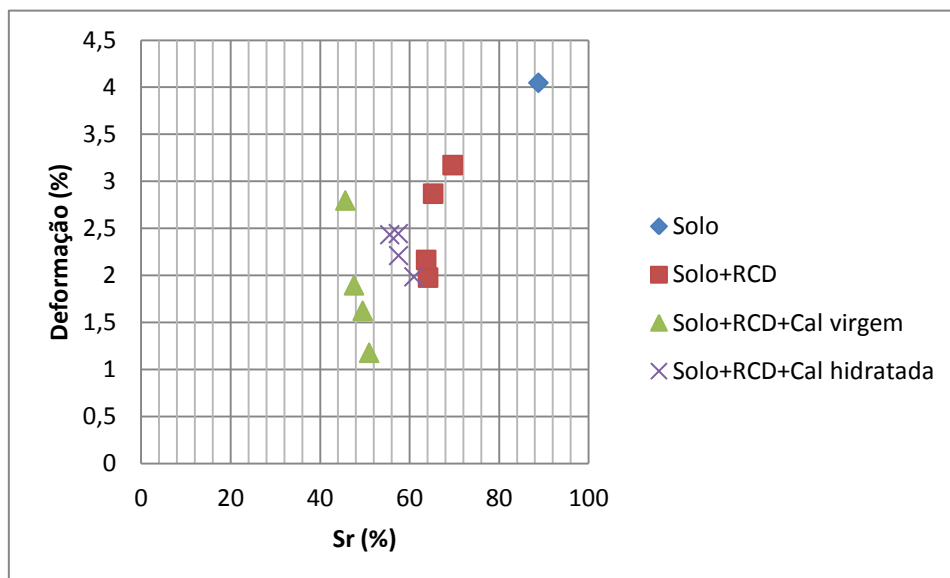


Figura 4.53 – Grau de saturação em relação à deformação permitida no ensaio de compressão simples

Ao contrário da resistência que tende a diminuir com o aumento do grau de saturação, quanto maior o grau de saturação, maior a deformação de ruptura no ensaio. Logo, a sucção atua desfavoravelmente na capacidade do corpo de prova em deformar-se. A diminuição do grau de saturação do solo + RCD pode explicar a ruptura prematura dos corpos de prova no ramo seco, conforme ilustrado por meio de fotografias anteriormente apresentadas neste mesmo item (Figuras 4.49 e 4.50).

Entretanto, plotando-se o grau de saturação x deformação do ensaio de compressão simples, verifica-se conforme Figura 4.54 que, quanto maior o grau de saturação, menor a deformação permitida do ensaio, o que nesse caso estaria refletindo a influência da estabilização química na deformabilidade das misturas tornando-se no caso de estruturas de pavimento relevante avaliar-se a eventual influência dessa estabilização na umidade de equilíbrio o que terá por consequência afetar a resistência e deformabilidade das misturas.

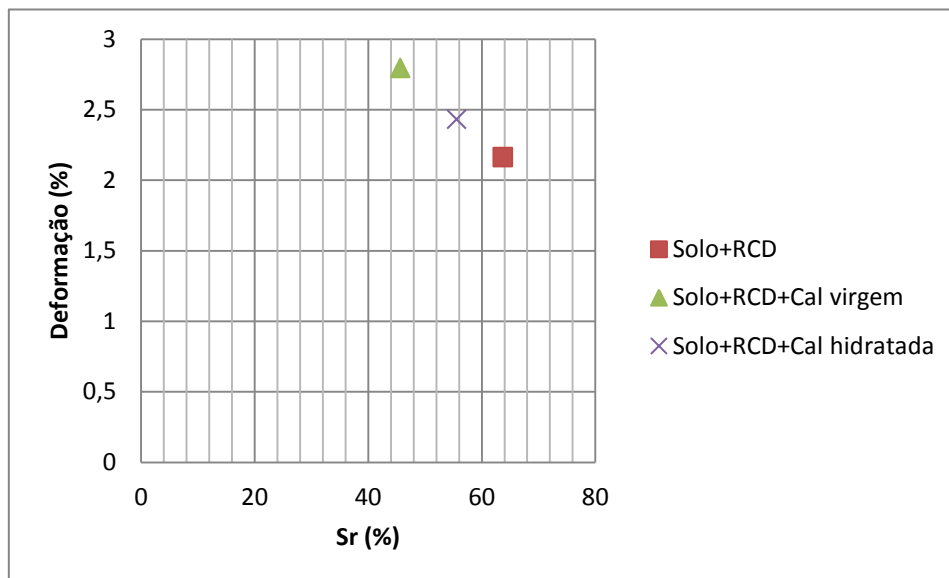


Figura 4.54 – Relação do grau de saturação e a deformação do ensaio de compressão simples aos 28 dias de cura

A Figura 4.55 mostra que para os materiais estudados se verifica apenas pequena tendência de aumento da resistência à compressão simples com a diminuição do índice de vazios global devendo-se lembrar que nesse estudo variou-se o tempo de cura e isso pode mitigar a influência da porosidade no comportamento do solo devido a atuação de cimentações eventualmente geradas ao longo do tempo.

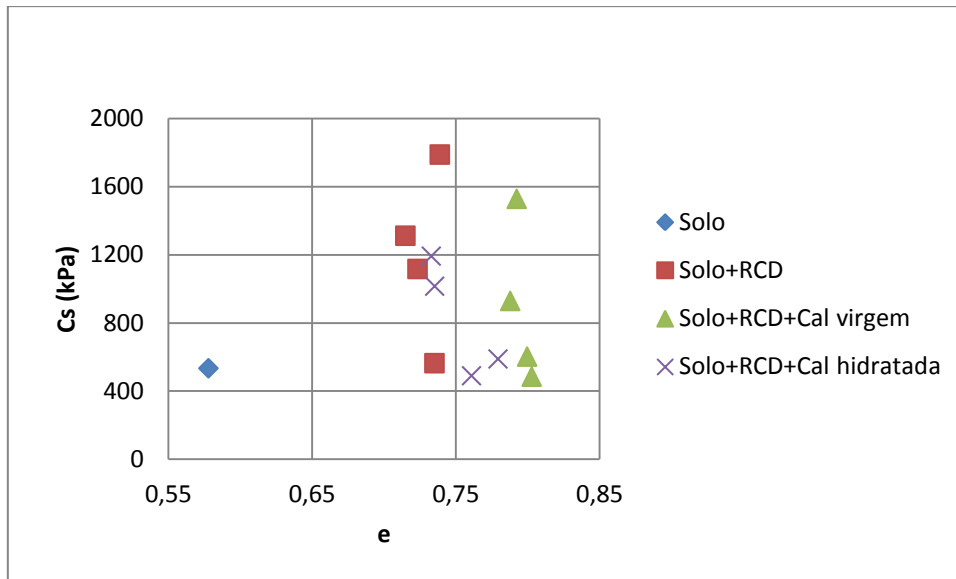


Figura 4.55 – Relação do índice de vazios com a resistência à compressão simples

Verificando-se a relação do índice de vazios global com a resistência à compressão simples das amostras aos 28 dias de cura na Figura 4.56, observa-se a validade do exposto anteriormente, ou seja, aos 14 dias de cura a resistência tende a diminuir com o aumento do índice de vazios global e aos 28 dias tal tendência deixa de ser clara apontando para a possível atuação de cimentações.

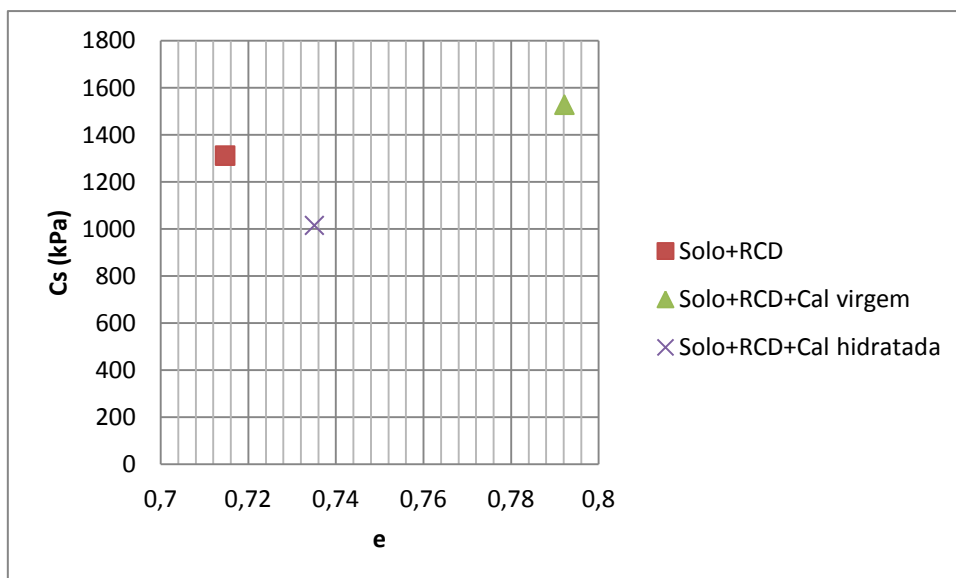


Figura 4.56 – Índice de vazios x Cs aos 28 dias de cura

Conforme mostrado na Figura 4.57, não é possível observar relação entre a deformação na ruptura e o índice de vazios global para cada mistura isoladamente, provavelmente devido a influência do tempo de cura. No entanto, se levado em conta o conjunto de resultados se observa o seu aumento com a redução do índice de vazios, mas pode ter aí outras influências como a da própria estabilização segundo o material.

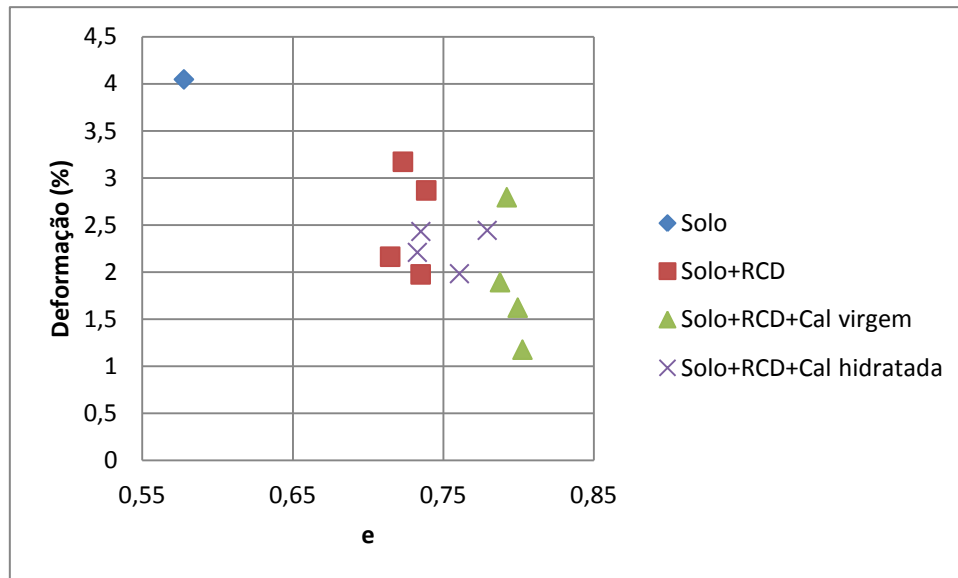


Figura 4.57 – Relação do índice de vazios global com a deformação do ensaio de compressão simples

Verifica-se da Figura 4.58, se considerada isoladamente cada mistura, que, quanto maior a sucção, maiores os valores de resistência à compressão simples encontrados, bem como os de deformação, exceto da mistura solo + RCD (Figura 4.59)

Com relação à deformação na ruptura apenas a mistura solo + RCD corresponde ao comportamento esperado, pois geralmente o aumento da sucção tende a aumentar a rigidez do material particulado reduzindo a deformação de ruptura. Globalmente aparece de modo coerente que maior a sucção menor a deformação de ruptura.

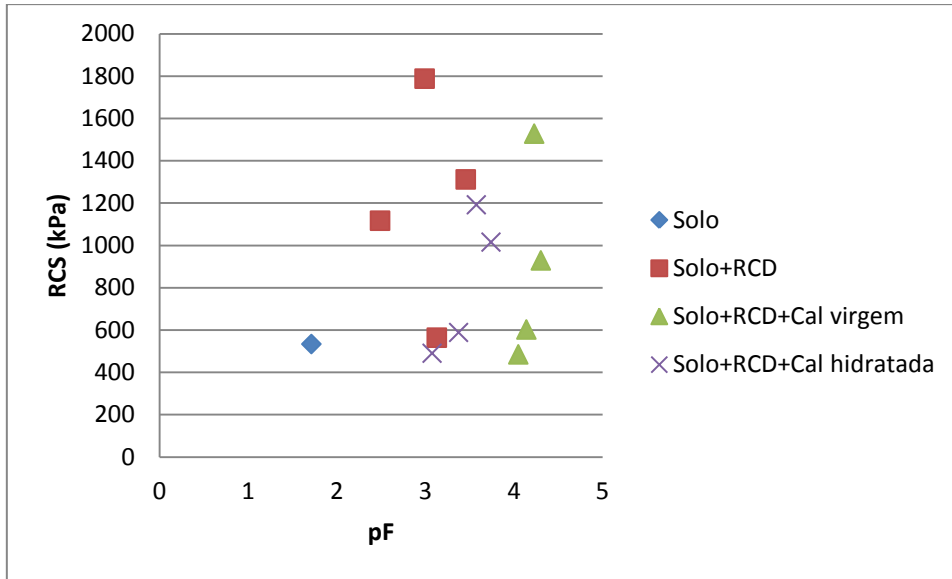


Figura 4.58 – pF x Cs

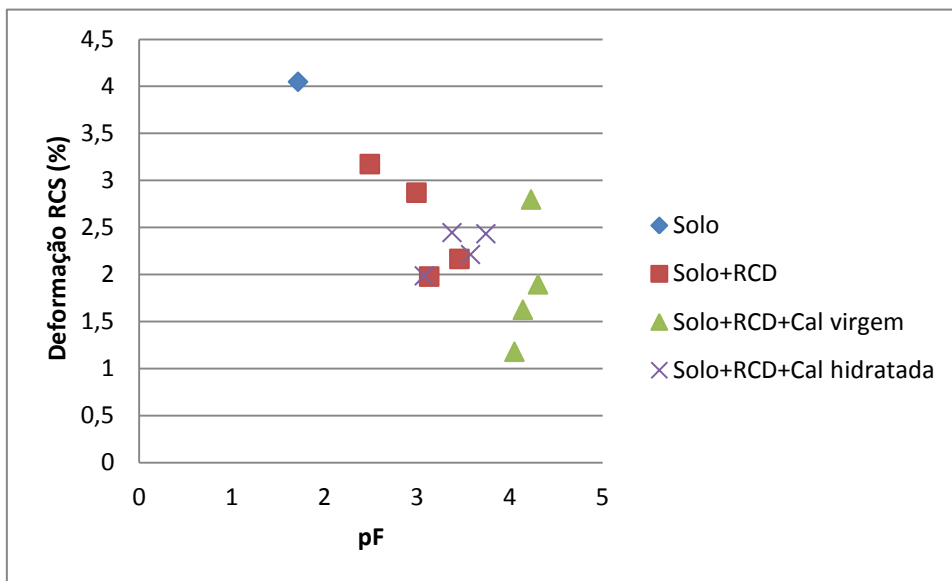


Figura 4.59 – pF x Deformação do ensaio de compressão simples

As Figuras 4.60 e 4.61, relacionando respectivamente a sucção com a resistência à compressão simples e com a deformação na ruptura aos 28 dias de cura mostram que quanto maior a sucção, também maior a resistência à compressão simples e a deformação do corpo de prova no ensaio para que atinja a ruptura.

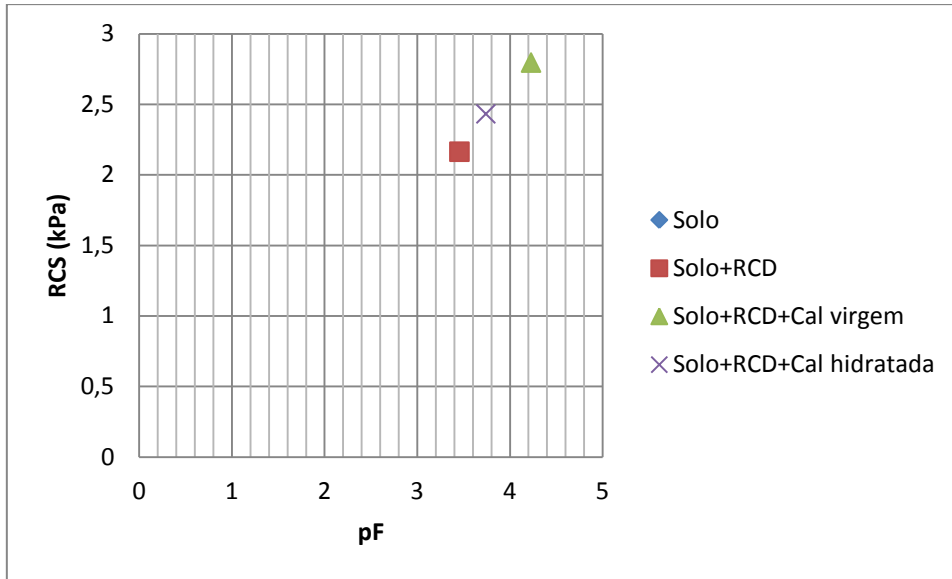


Figura 4.60 – pF x Cs aos 28 dias de cura

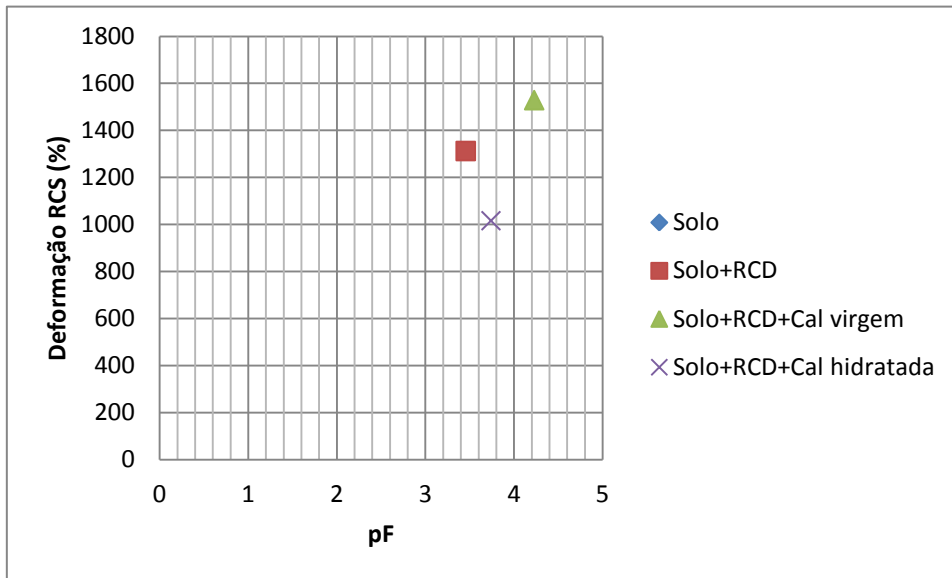


Figura 4.61 – pF x deformação do ensaio de resistência à compressão simples aos 28 dias de cura

Para verificar o comportamento em relação à sucção normalizada em relação ao índice de vazios, plotou-se o gráfico mostrado na Figura 4.62. Nesta figura mais uma vez não é constatada uma relação direta para a mistura solo + RCD de modo isolado, no entanto, para as misturas com cal verifica-se tênue tendência ao aumento da resistência à compressão simples com o crescimento de pF/e.

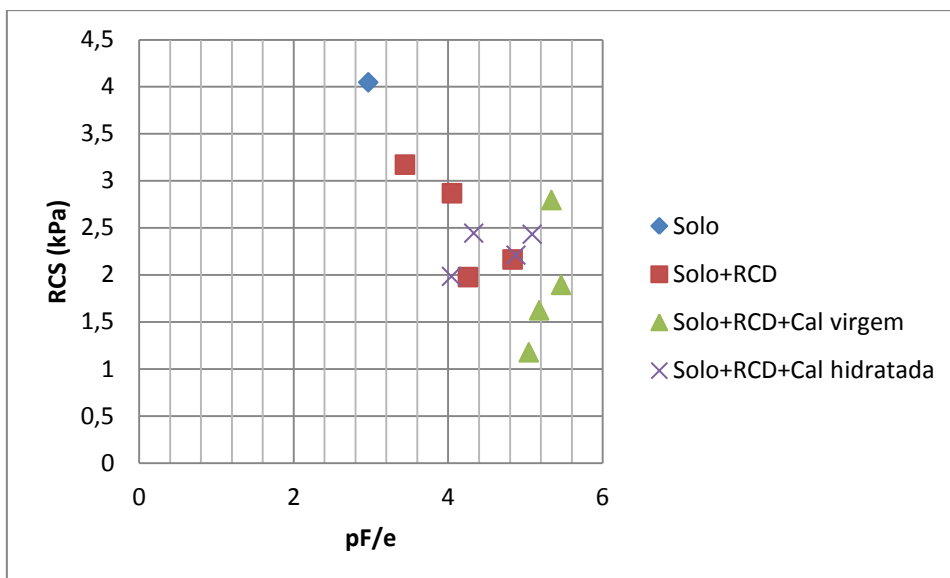


Figura 4.62 – pF/e x Cs

Para os corpos de prova rompidos aos 28 dias de cura não se verifica relação entre a resistência e pF/e para o conjunto de misturas estudadas, porém, levando-se em conta apenas as misturas estabilizadas com cal o comportamento corresponde ao esperado, maior pF/e, maior a resistência dos corpos de prova (Figura 4.63).

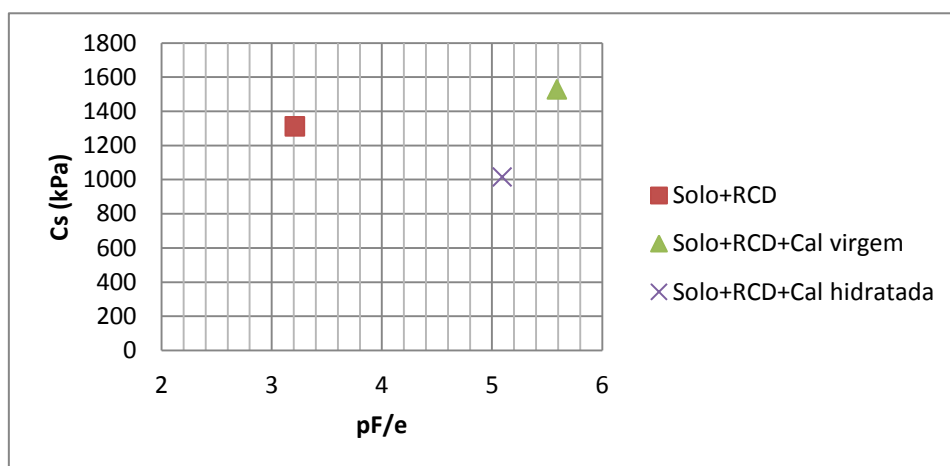


Figura 4.63 – pF/e x Cs aos 28 dias de cura

Para as deformações na ruptura verifica-se que quanto maior a relação pF/e, também maior tende a ser a deformação RCS (Figura 4.64).

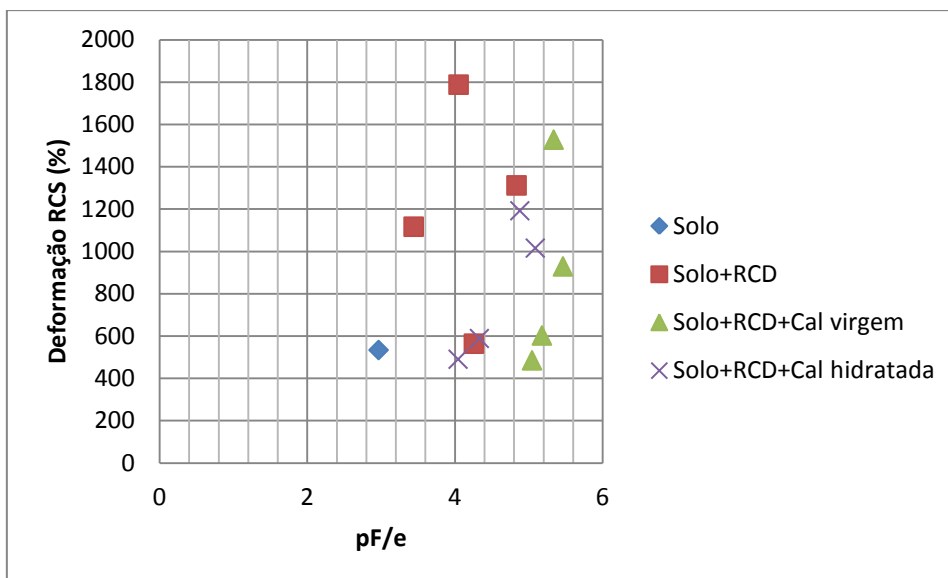


Figura 4.64 – pF/e x deformação do ensaio de compressão simples

O mesmo é verificado aos 28 dias de cura (Figura 4.65).

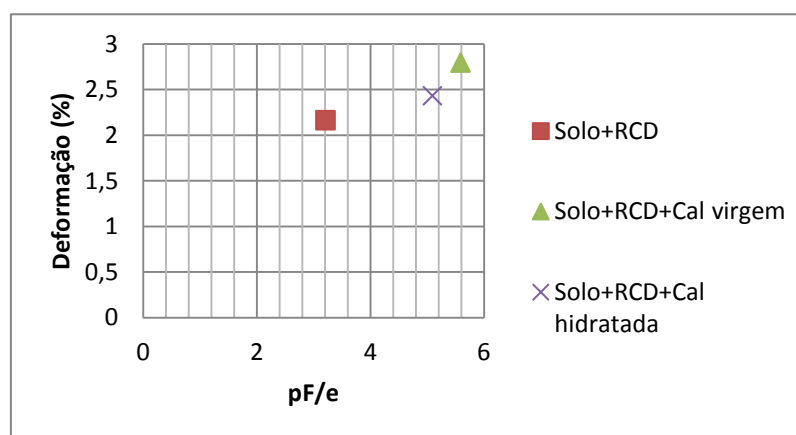


Figura 4.65 – pF/e x deformação do ensaio de compressão simples aos 28 dias de cura

4.3.RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A Figura 4.66 -apresenta os resultados dos ensaios de tração por compressão diametral das amostras estudadas.

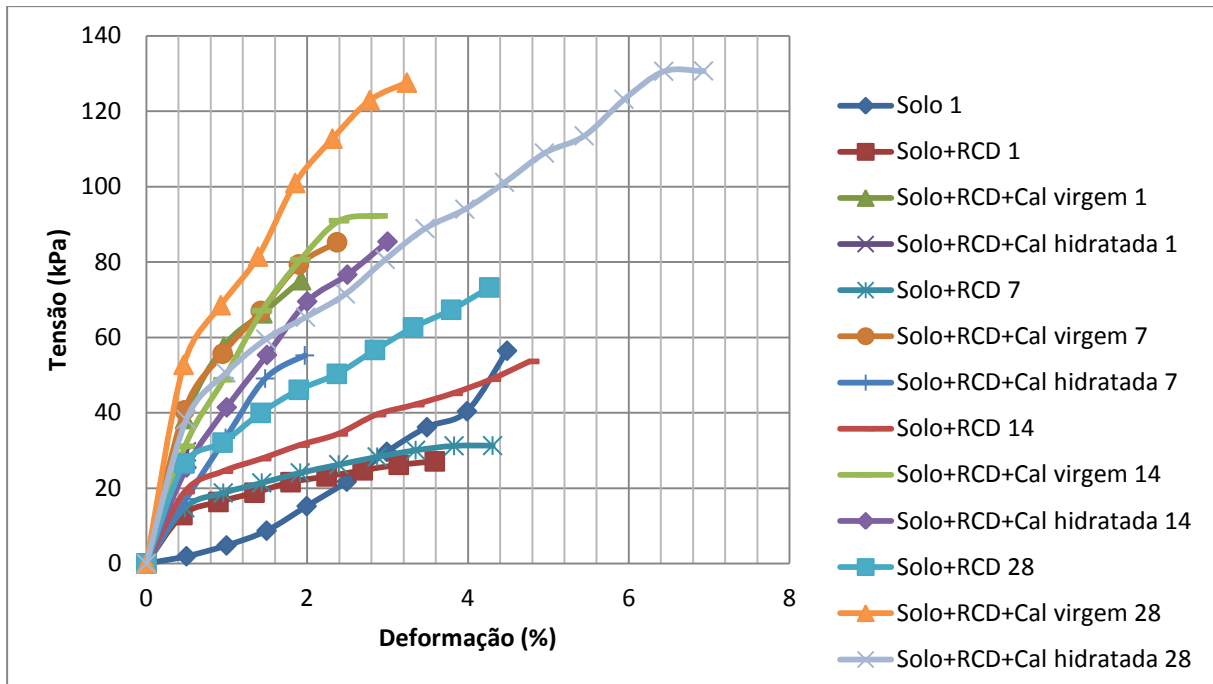


Figura 4.66 – Resistência à tração por compressão diametral das amostras

Observa-se na Figura 4.67 onde os resultados de resistência à tração foram colocados em escala logarítmica, que no trecho inicial elástico a inclinação varia entre os ensaios, no entanto, após o ponto de curvatura, momento correspondente ao início das deformações plásticas ocorre importante paralelismo entre as curvas, exceção feita ao solo puro em relação às misturas. Isso aponta para o fato de que fatores como cimentação e sucção vão exercer influência marcante apenas até a fase elástica. Na fase de plastificação, poderá eventualmente continuar a exercer influência, mas não preponderante.

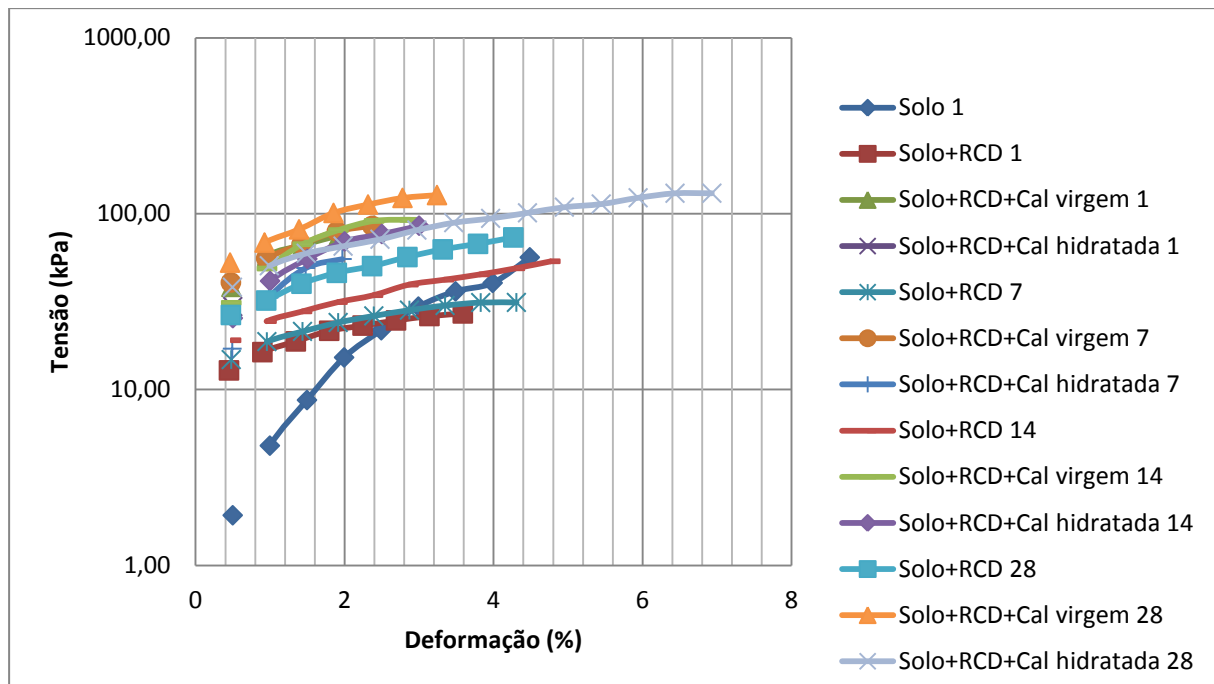


Figura 4.67 – Tração por compressão diametral em escala logarítmica

A mistura com cal hidratada aos 28 dias de cura permitiu maior deformação e tensão de tração. A mistura com cal virgem resistiu à elevada tensão de tração aos 28 dias, e a mistura de solo + RCD permitiu deformações maiores.

Bento (2006) constatou que a mistura solo-cal não apresentou ganhos significativos de resistência à tração em relação ao solo-natural. Diferentemente nessa pesquisa, a presença do RCD e da cal hidratada e virgem melhoraram a resistência à tração do solo natural, no entanto devido à influência de outros fatores como porosidade, grau de saturação e sucção outras análises se fazem necessárias antes de ser conclusivo.

Para verificar a influência do grau de saturação na resistência à tração por compressão diametral, plotou-se os gráficos mostrados nas Figuras 4.68 e 4.69. Verifica-se para cada mistura isoladamente que maior o grau de saturação menor a resistência a tração o que corresponde ao comportamento esperado. Já com relação à deformação na ruptura o fato dela diminuir com o aumento do grau de saturação significa que não estaria ocorrendo um aumento da rigidez com o aumento da resistência à tração, no entanto, a análise realizada com base na Figura 4.82 mostrou que no domínio elástico tem-se um ganho de rigidez a medida que aumenta a resistência à tração e por consequência a constatação aqui realizada estaria atrelada ao comportamento no domínio de plastificação. Considerando-se esse aspecto não é possível ainda afirmar que o comportamento do solo puro foi o pior, pois para resistências semelhantes ele é o que apresenta maior grau de saturação e que, portanto, deveria apresentar pior comportamento.

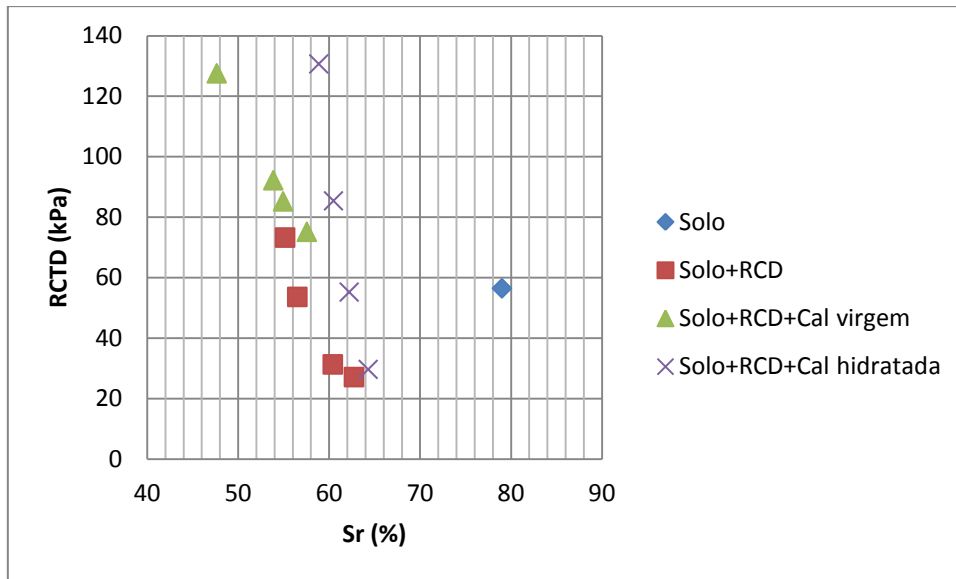


Figura 4.68 – Relação do grau de saturação com a RTCD

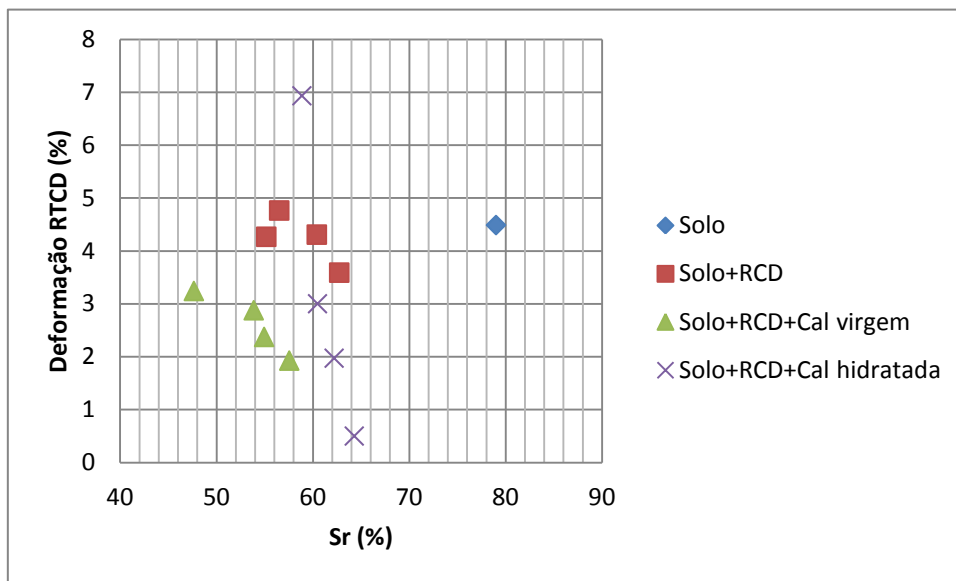


Figura 4.69 – Sr versus deformação da resistência à tração por compressão diametral

Das Figuras 4.68 e 4.69, infere-se que, conforme explicado anteriormente, a sucção exerce influência marcante apenas até o início da plastificação. Aos 28 dias de cura (Figuras 4.70 e 4.71), não é revelada tendência de comportamento da resistência à tração entre as diferentes misturas, porém quanto maior o grau de saturação, maiores as deformações permitidas.

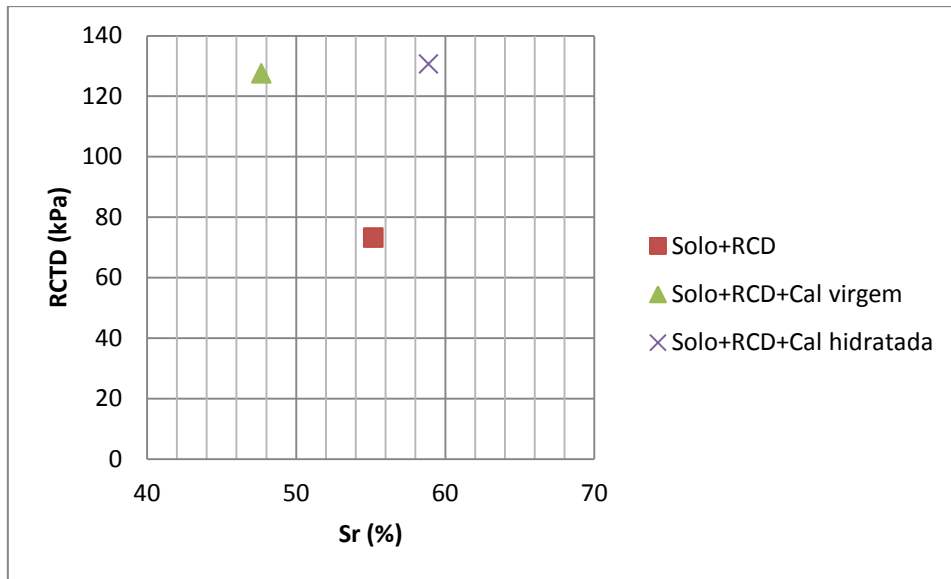


Figura 4.70 – Sr x RTCD aos 28 dias de cura

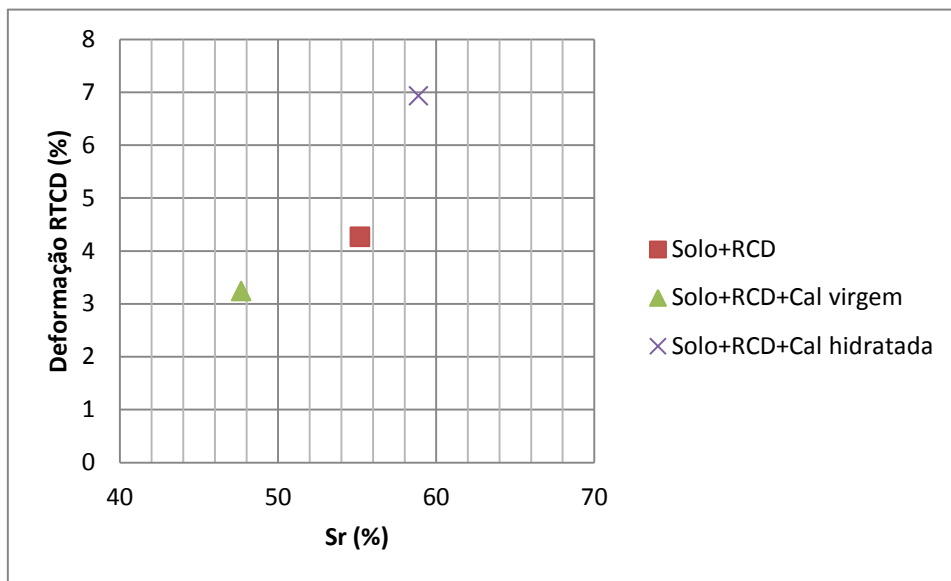


Figura 4.71 – Sr x Deformação RTCD aos 28 dias de cura

Em relação à influência do índice de vazios global na resistência à tração por compressão diametral e na deformação para a qual se dá a ruptura, não se verifica tendência clara e repetitiva para o conjunto de misturas estudadas (Figuras 4.72 e 4.73).

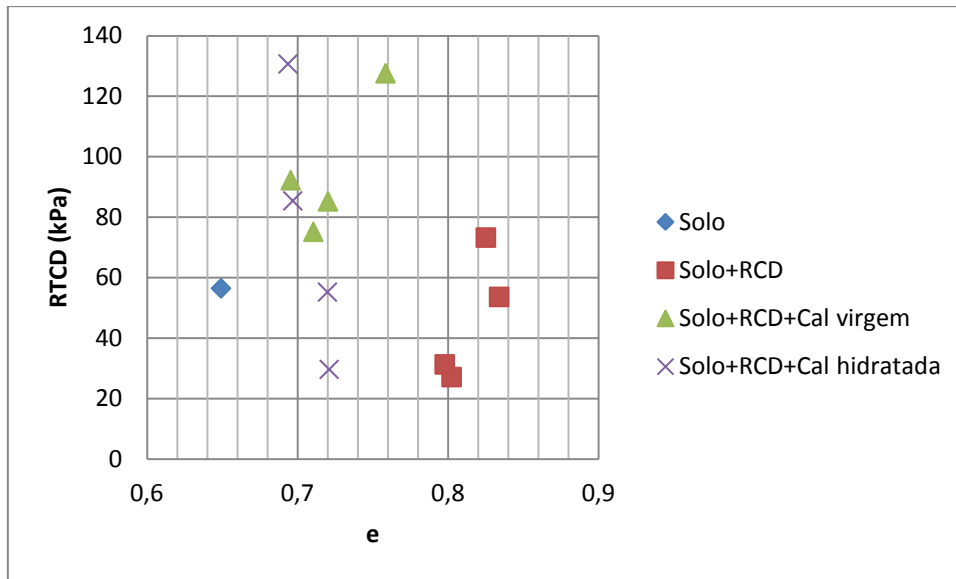


Figura 4.72 – Relação do índice de vazios com a resistência à tração por compressão diametral

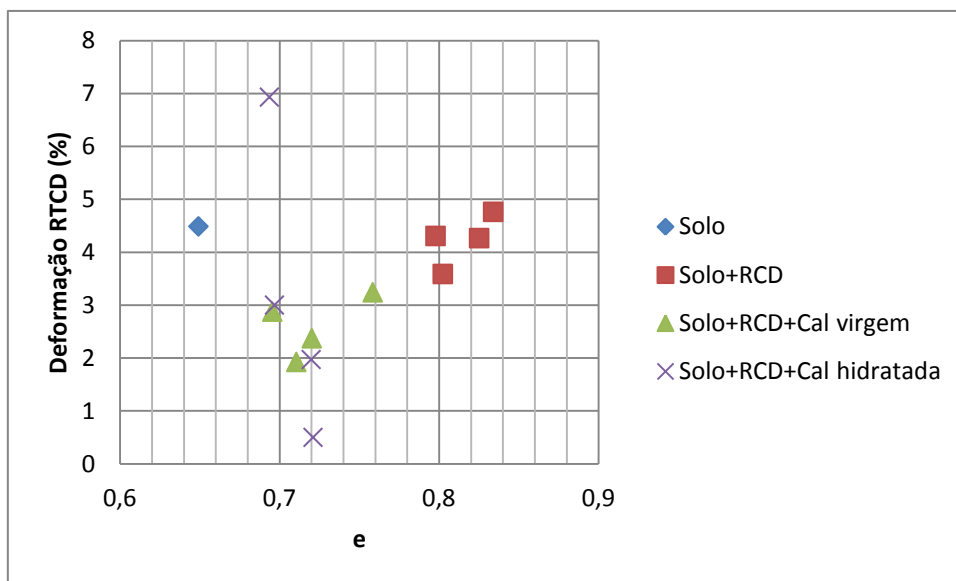


Figura 4.73 – Relação do índice de vazios com a deformação do ensaio de tração

Já aos 28 dias, comparando-se os diferentes materiais, verifica-se que, quanto maior o índice de vazios, menor a resistência à tração por compressão diametral, verificando-se, portanto, a influência positiva da sucção, conforme Figura 4.74.

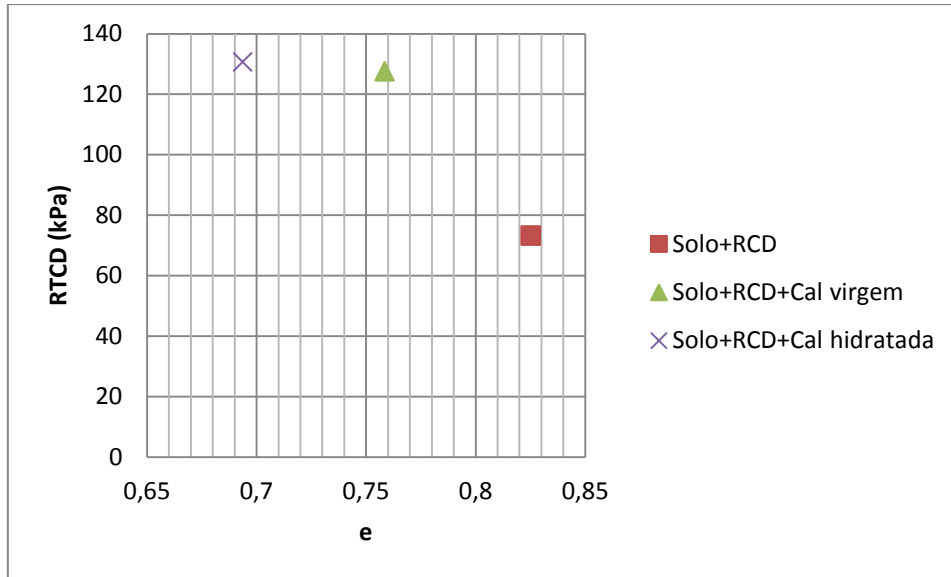


Figura 4.74 – Relação do índice de vazios com a resistência à tração aos 28 dias

Plotando-se a deformação do ensaio de tração para cura de 28 dias em função do índice de vazios (Figura 4.75), verifica-se que a sucção não é fator isolado para análise dos fatores que influenciam a deformação no ensaio, ou, conforme explicado anteriormente, a cimentação e sucção têm influência marcante apenas até o ponto de início da plastificação.

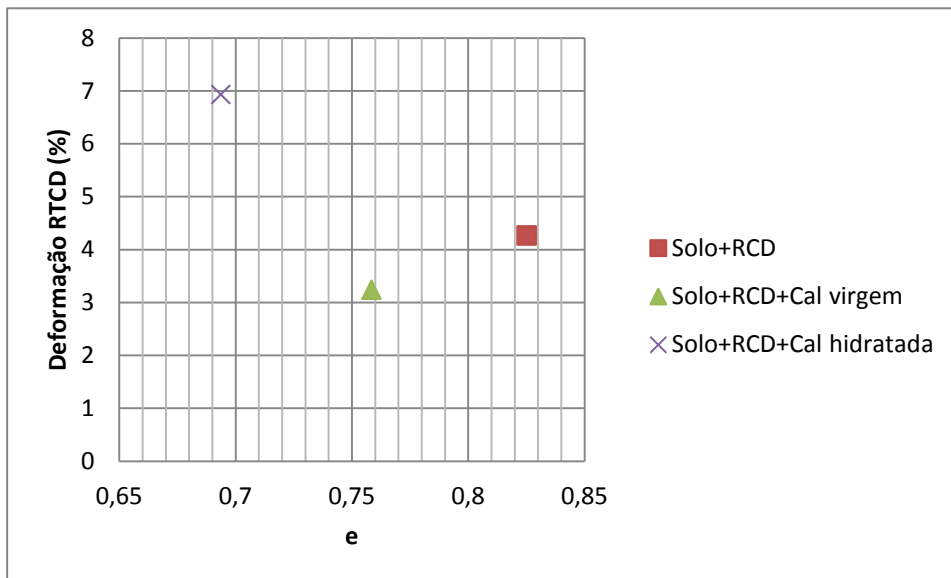


Figura 4.75 – Índice de vazios versus deformação da tração aos 28 dias de cura

Analisando-se o comportamento obtido nos ensaios de tração por compressão diametral em função da sucção, constata-se que esta influencia de maneira positiva a resistência à tração por compressão diametral (Figura 4.76). Já o gráfico obtido para as deformações na ruptura em função da sucção apontam para a pequena sensibilidade da rigidez ao aumento da sucção em níveis de deformação maiores (Figura 4.77)

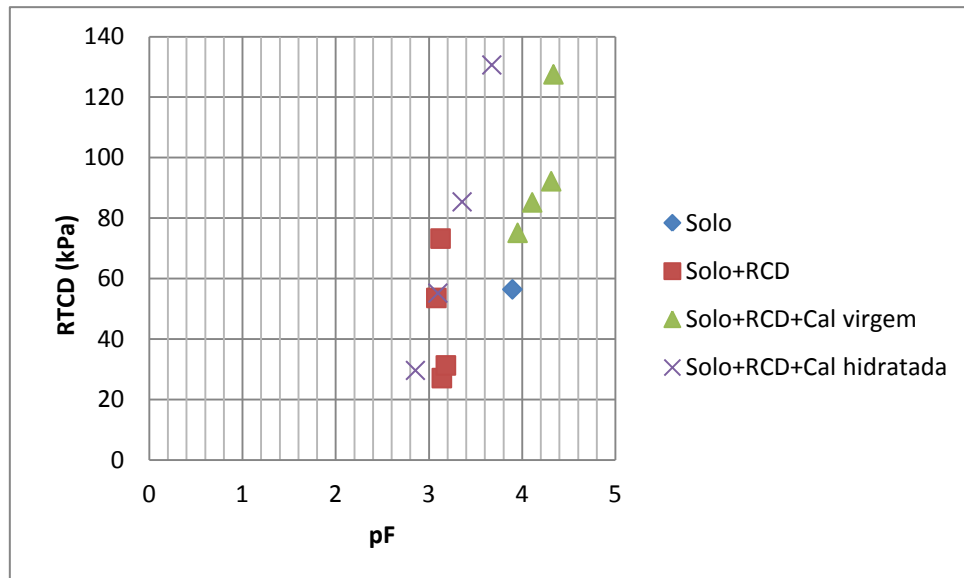


Figura 4.76 – Relação da sucção com a resistência à tração por compressão diametral

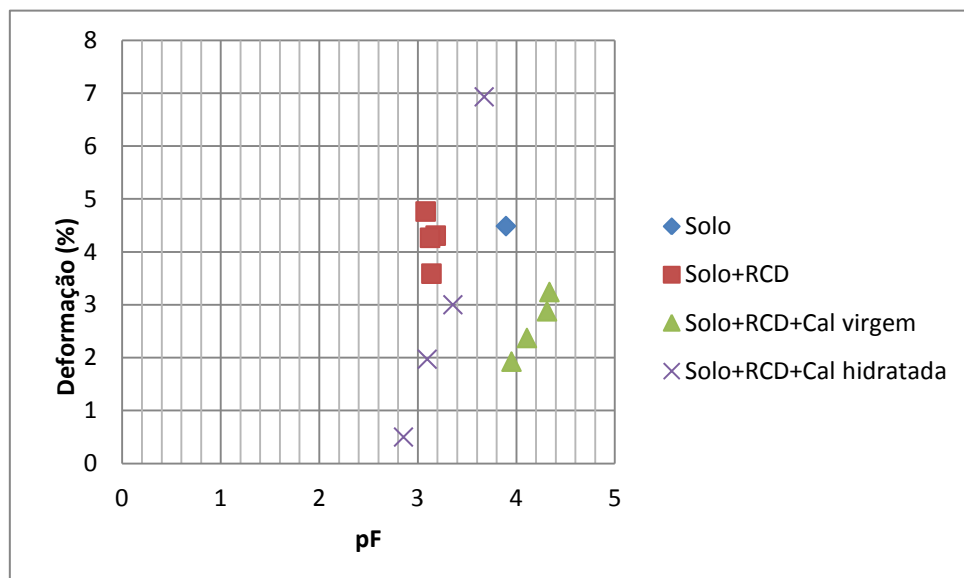


Figura 4.77 – Relação da sucção com a deformação do ensaio de resistência à tração por compressão diametral

O mesmo pode ser concluído na Figura 4.78, que relaciona a sucção com a resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de cura, maior a sucção, maior a resistência à tração.

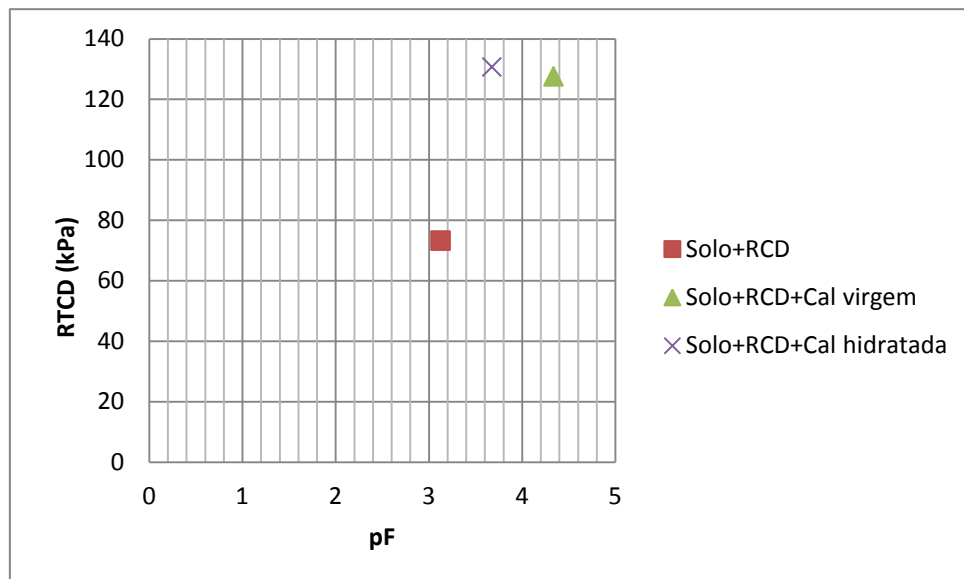


Figura 4.78 – Relação da sucção e a resistência à tração aos 28 dias

Para a deformação, no caso do estudo, verifica-se que a sucção não foi fator isolado que influencia no comportamento, pois conforme verificado aos 28 dias na Figura 4.79, não se registra uma tendência única de comportamento.

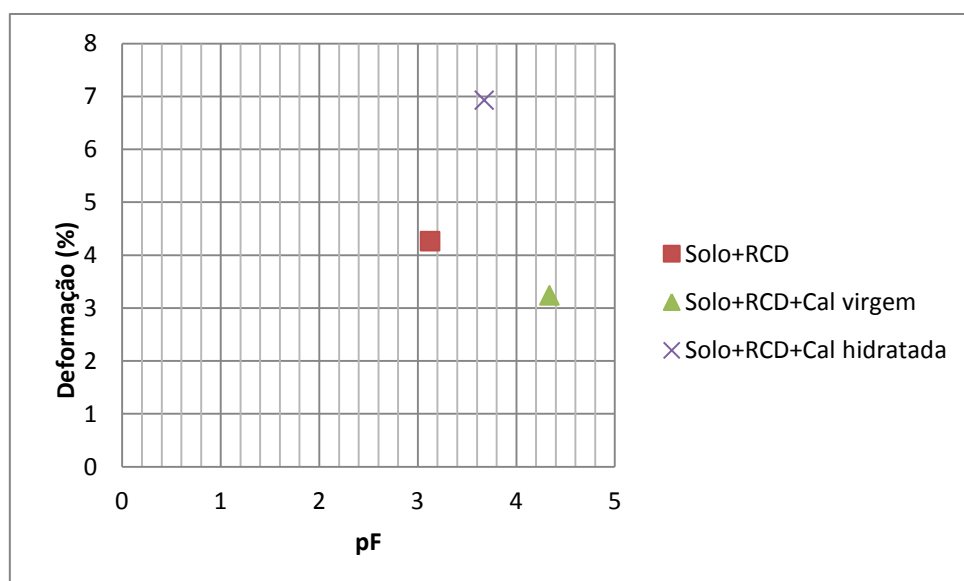


Figura 4.79 – Sucção versus deformação à tração aos 28 dias

Conforme esperado, a sucção normalizada em relação ao índice de vazios, influencia de maneira positiva na resistência à tração por compressão diametral e na deformação permitida no ensaio até que se atinja a ruptura, conforme as Figuras 4.80 e 4.81.

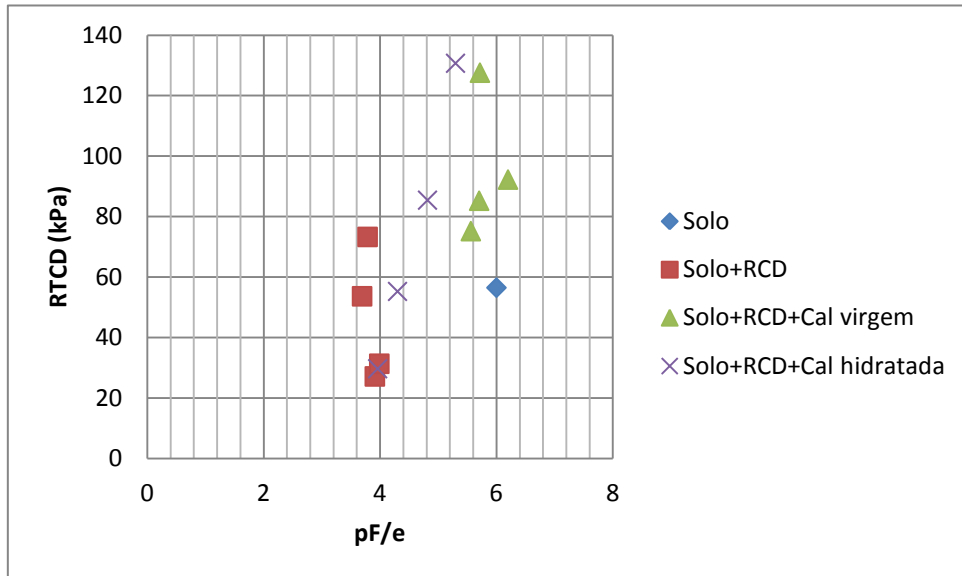


Figura 4.80 – pF/e x RTCD

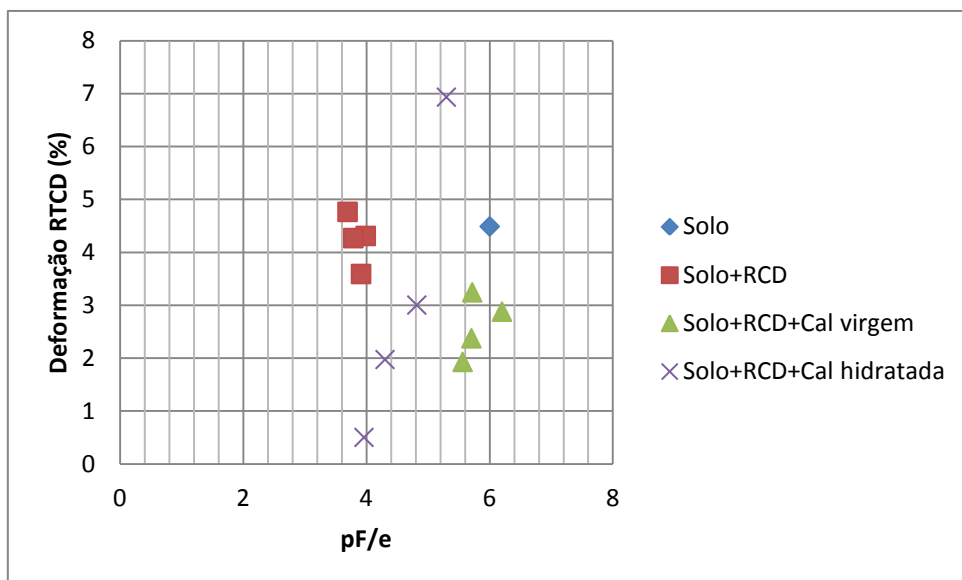


Figura 4.81 – pF/e x Deformação do ensaio de RTCD

Para o período de cura de 28 dias a resistência à tração entre os diferentes materiais tende igualmente a aumentar com o aumento da relação pF/e. Já para a deformação não se verifica uma tendência (Figuras 4.82 e 4.83).

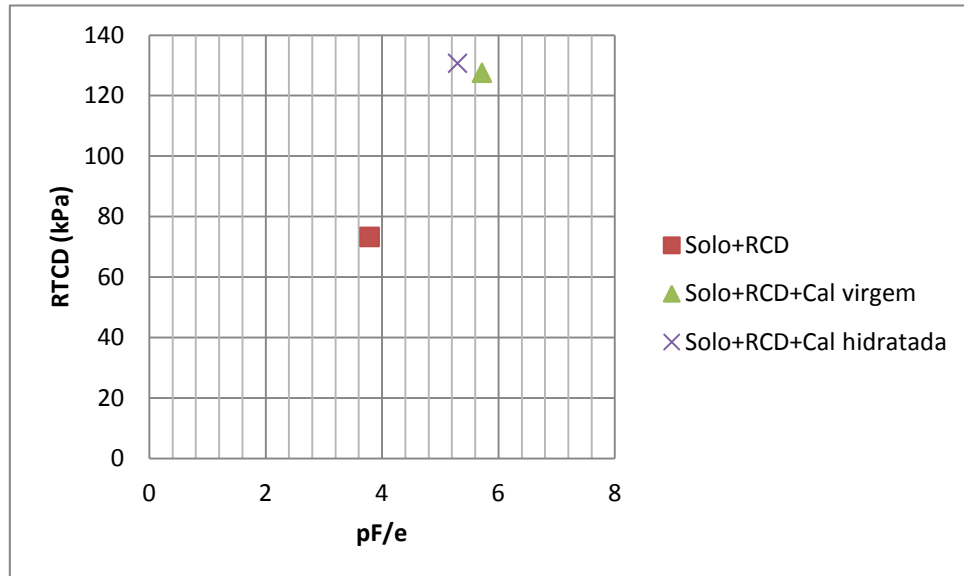


Figura 4.82 – Relação da sucção e inverso do índice de vazios versus RTCD aos 28 dias

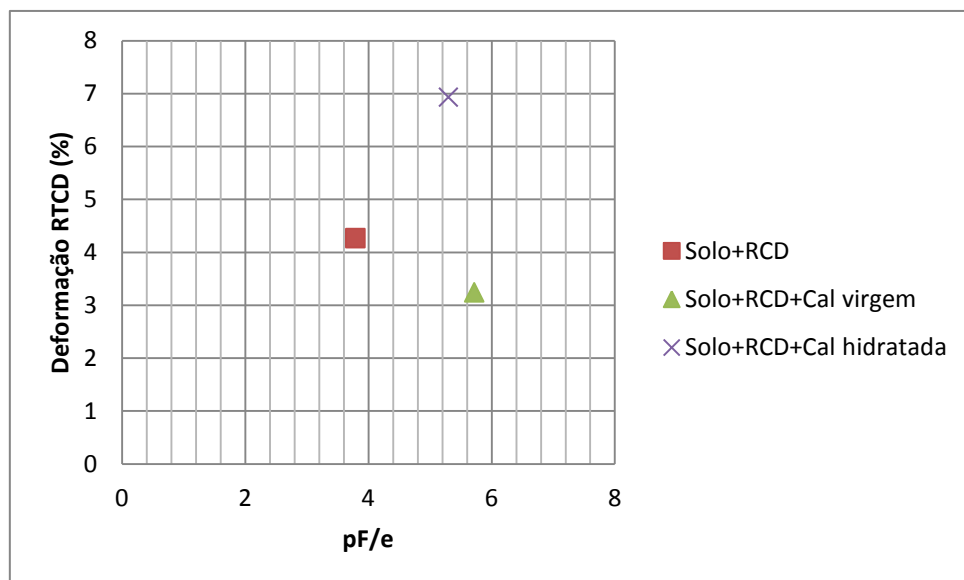


Figura 4.83 – Relação pF/e versus deformação do ensaio de tração aos 28 dias

4.4.RESILIÊNCIA

Do ensaio de resiliência, verificou-se estreita relação entre o Módulo resiliente obtido no ensaio triaxial cíclico e o Modelo Universal para todas as amostras analisadas, conforme mostra as Figuras 4.84 e 4.87. Verifica-se que para as misturas, obteve-se valores equivalentes de resiliência ao 1 dia de cura, comparado com as demais curas, o que demonstra que a ação cimentante do RCD e dos cais foi rápida ou pouco significativa caso em que as alterações de comportamento verificadas nos demais ensaios teria sido função predominantemente de trocas catiônicas. A presença do material granular (RCD) também contribuiu para o aumento do módulo resiliente.

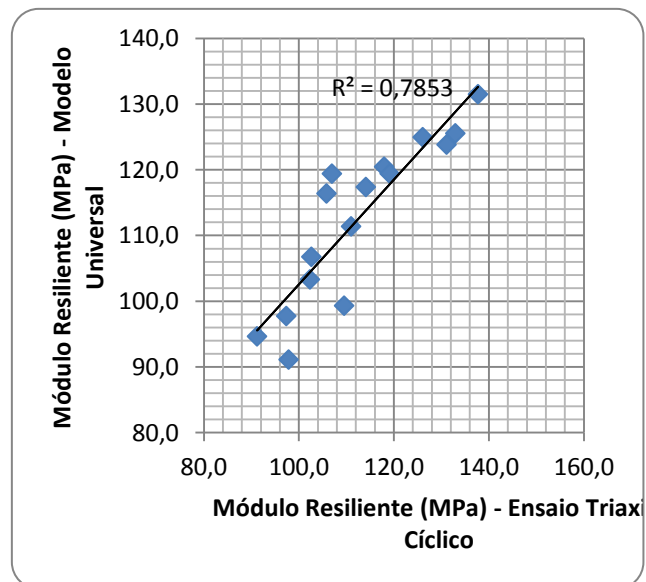


Figura 4.84 – Comparação de modelos de resiliência do solo

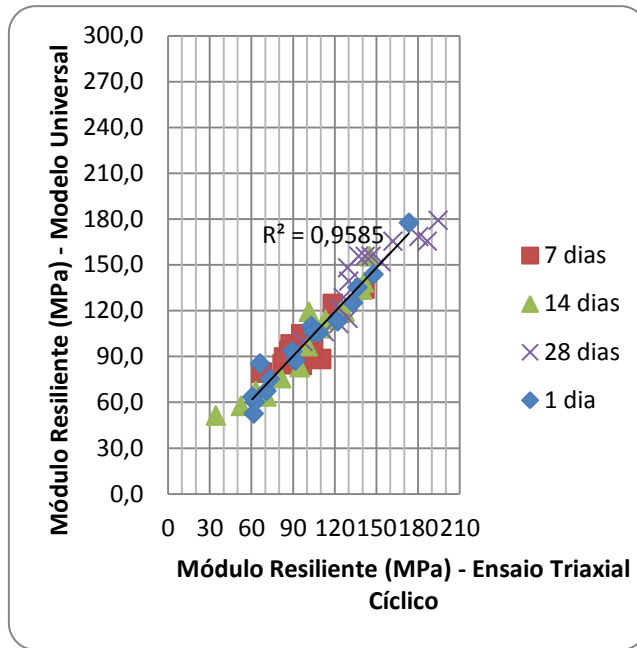


Figura 4.85 – Comparação de modelos de resiliência do solo + RCD

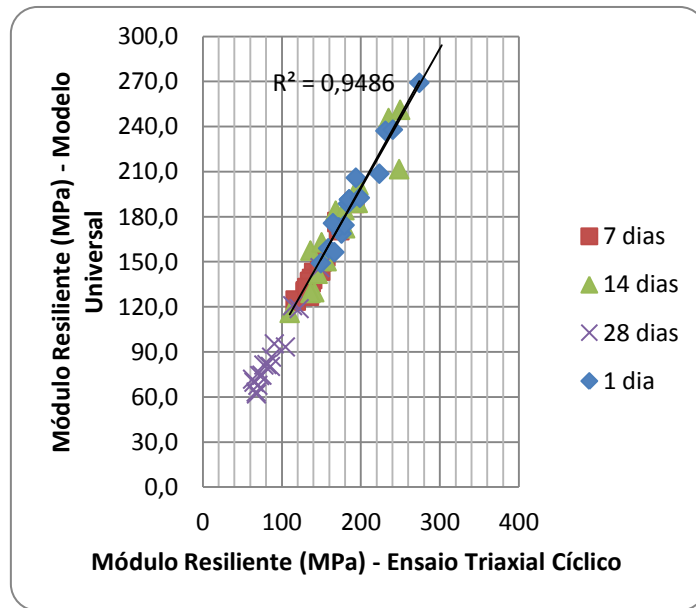


Figura 4.86 – Comparação de modelos de resiliência do solo + RCD + cal virgem

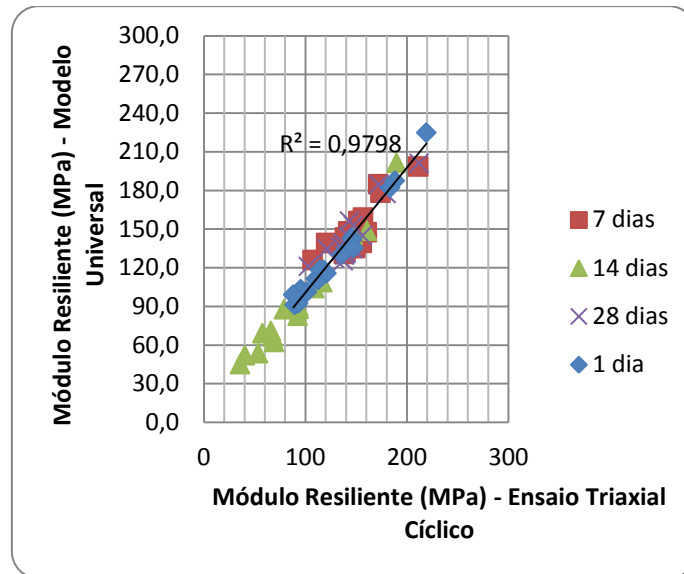


Figura 4.87 – Comparação de modelos de resiliência do solo + RCD + cal hidratada

Sobrepondo-se todos os valores de resiliência, para comparações entre os comportamentos das amostras, tem-se a Figura 4.88.

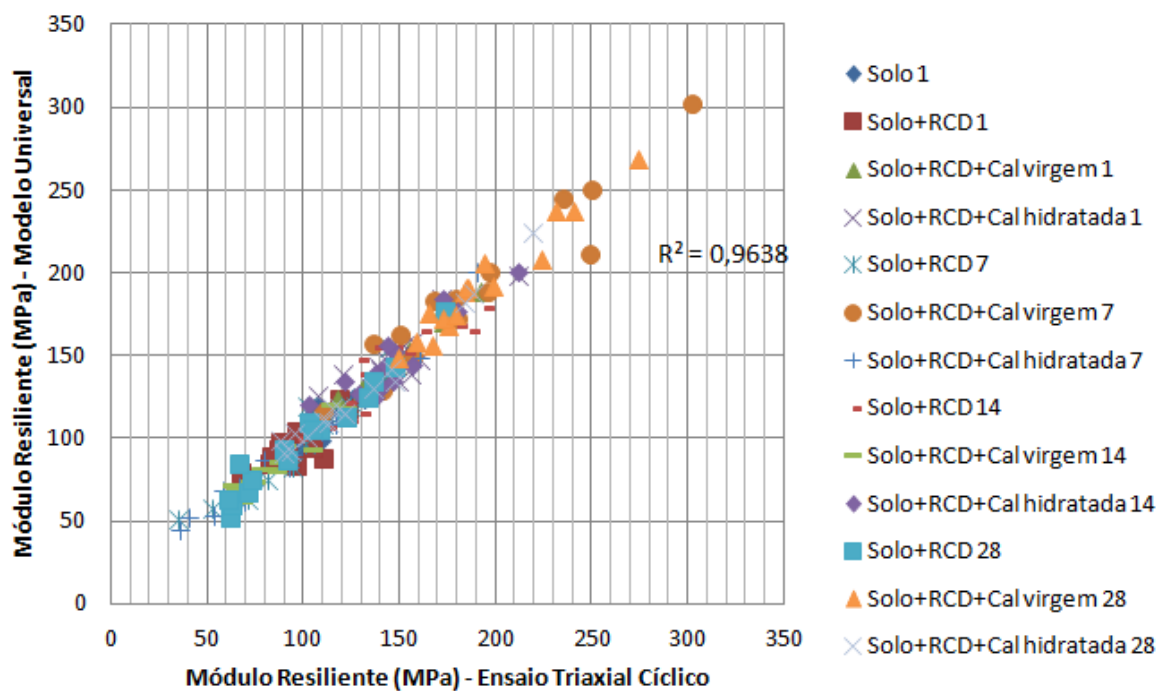


Figura 4.88 – Comparação de modelos de resiliência das amostras

Na Figura 4.88 verifica-se para todas as amostras a equivalência do módulo resiliente obtido pelo ensaio triaxial cíclico com o oriundo do modelo universal, demonstrando a validade dos mesmos. Tem-se também que o melhor comportamento resiliente foi o da mistura com cal virgem, provavelmente devido à sua maior sucção, uma vez que a cal virgem no contato com a água sofre hidratação consumindo água do sistema.

Na pesquisa realizada por Caicedo *et al.* (2007), verificou-se que o módulo resiliente é tanto maior quanto menor a umidade, por causa do aumento das forças capilares no menisco entre os grãos, considerando igual tensão isotrópica, como ocorreu nos ensaios realizados nesta pesquisa.

A fim de verificar a influência do grau de saturação nos valores de módulo resiliente, plotou-se o gráfico mostrado na Figura 4.89. Tratando conjuntamente os resultados observa-se, conforme esperado, que o módulo diminui com o aumento do grau de saturação.

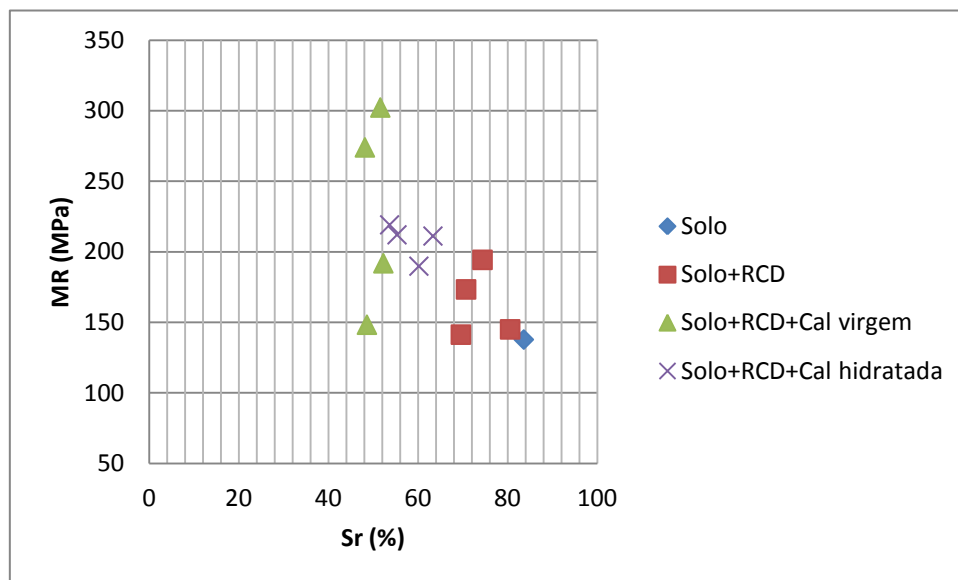


Figura 4.89 – Grau de saturação em relação ao módulo resiliente

Verifica-se, do gráfico, que independente do tipo de material, o módulo resiliente diminuiu com o aumento do grau de saturação, apontando para a importância da sucção no resultado do ensaio. Esse entendimento se confirma ao se analisar os resultados obtidos aos 28 dias de cura (Figura 4.90).

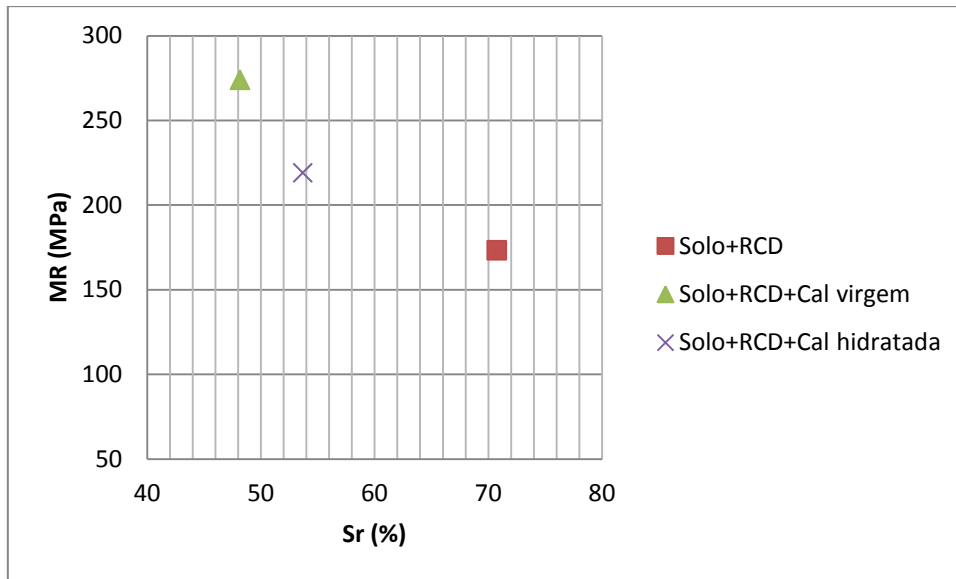


Figura 4.90 – Grau de saturação em relação à resiliência aos 28 dias de cura

Já em relação ao índice de vazios global, não se verificou tendência clara de sua influência no módulo resiliente (Figura 4.91).

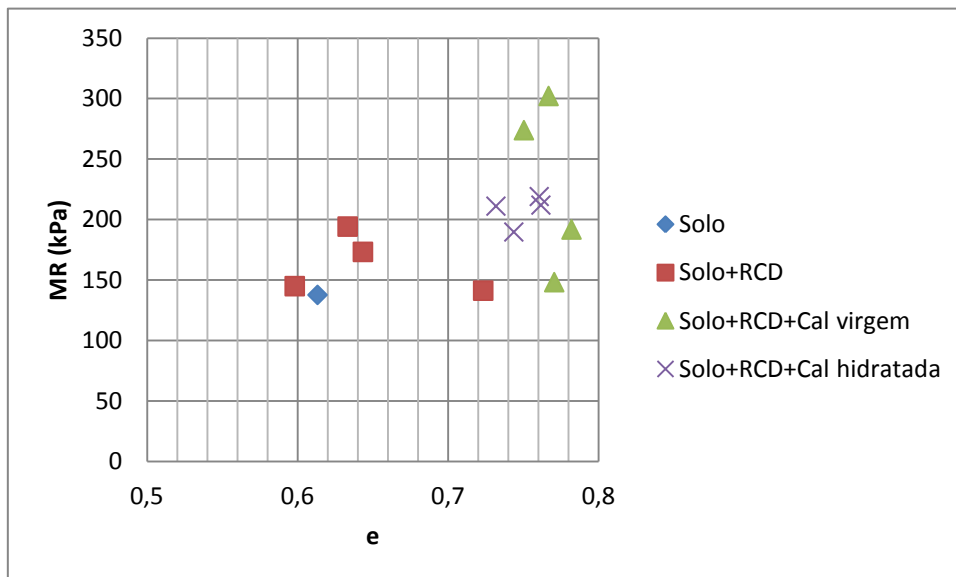


Figura 4.91 – Índice de vazios global em relação ao Módulo Resiliente

A mesma observação é verificada aos 28 dias de cura, conforme Figura 4.92.

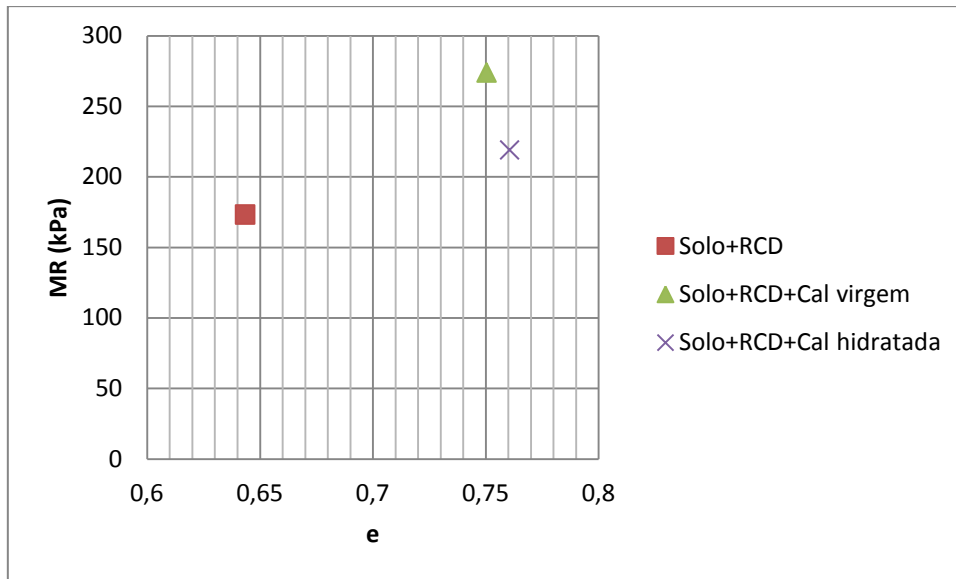


Figura 4.92 – Índice de vazios versus módulo resiliente aos 28 dias

Da Figura 4.93, tem-se que e a sucção tende a atuar de maneira positiva no Módulo Resiliente, ao se considerar conjuntamente os diferentes tipos de material.

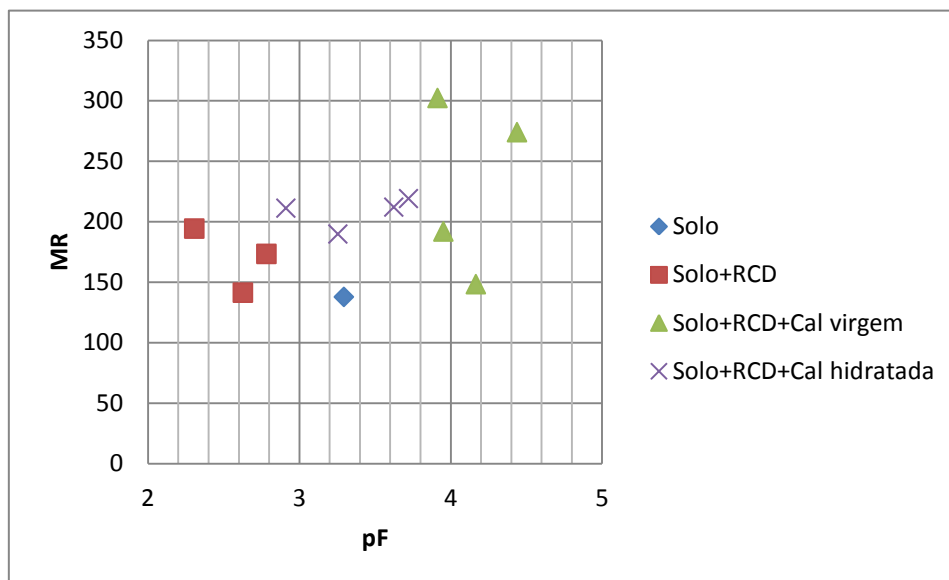


Figura 4.93 – Relação da sucção com o Módulo Resiliente

Tem-se a uma tendência mais clara ao se analisar apenas os resultados obtidos após 28 dias de cura (Figura 4.94).

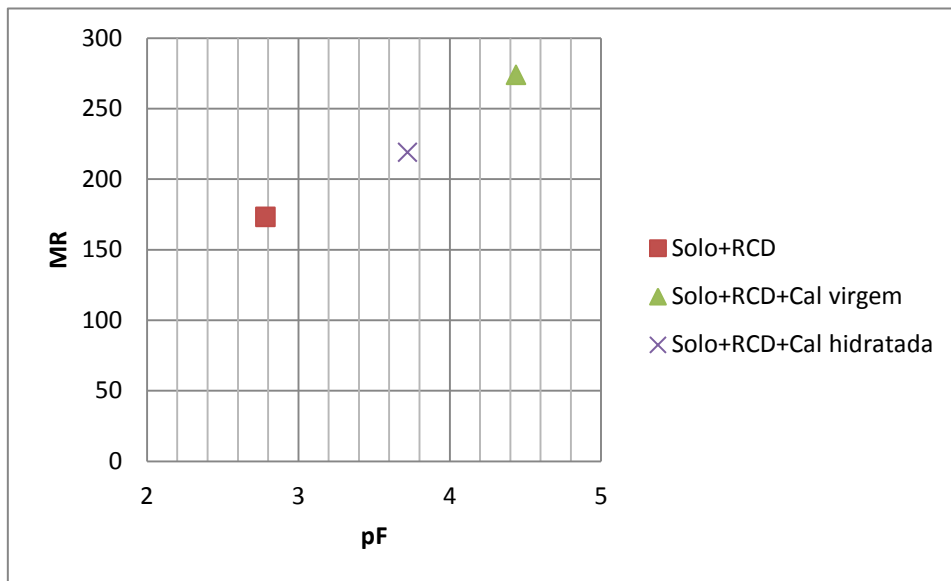


Figura 4.94 – Relação pF versus Módulo Resiliente aos 28 dias de cura

Conforme esperado, a relação pF/e também apresentou tendência positiva de melhoria dos resultados de módulo de resiliência (Figura 4.95).

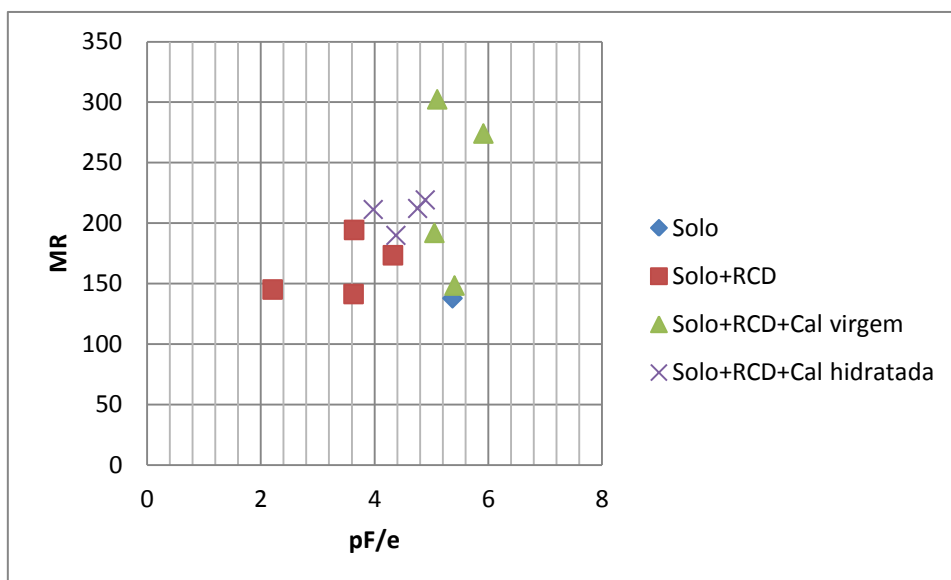


Figura 4.95 – Relação pF/e x MR

A Figura 4.96, cujos resultados foram obtidos após 28 dias de cura dos corpos de prova, confirmam de modo mais claro a tendência de melhoria do módulo resiliente com a sucção normalizada em relação ao índice de vazios global.

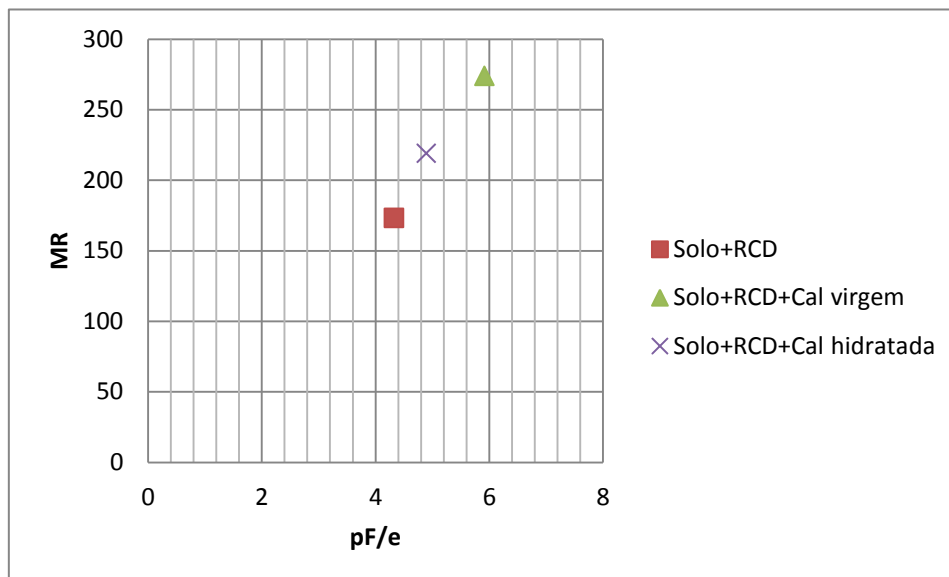


Figura 4.96 – Relação pF/e versus Módulo Resiliente aos 28 dias de cura

4.5. ENSAIO DE CISALHAMENTO RÁPIDO

Os valores dos ângulos de atrito encontrados após a realização dos ensaios de resiliência são apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Ângulo de atrito dos materiais

Material	Dias de cura	Φ (°)
Solo	1	47
Solo + RCD	1	47
Solo + RCD + Cal virgem	1	45
Solo + RCD + Cal hidratada	1	43
Solo + RCD	7	39
Solo + RCD + Cal virgem	7	39
Solo + RCD + Cal hidratada	7	37
Solo + RCD	14	32
Solo + RCD + Cal virgem	14	30

Solo + RCD + Cal hidratada	14	30
Solo + RCD	28	30
Solo + RCD + Cal virgem	28	30
Solo + RCD + Cal hidratada	28	30

Para todas as misturas, o ângulo de atrito diminuiu com os maiores tempos de cura. Verifica-se que a presença de cal, no geral, diminuiu o ângulo de atrito, devido ao seu potencial aglutinante. Aos 28 dias os ângulos de atrito foram os mesmos para todas as misturas, possivelmente devido à estabilização das reações químicas. Aos 14 dias, verifica-se que o ângulo de atrito das misturas contendo cal foi semelhante aos 28 dias, talvez devido à sua estabilização ter ocorrido aos 14 dias, conforme esperado.

5. CONCLUSÕES

Após a realização dos ensaios e constantes análises foram obtidas conclusões gerais a respeito da utilização do RCD e da cal virgem e cal hidratada, assim como conclusões específicas dos resultados obtidos dos ensaios.

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

Como conclusões gerais os estudos realizados com resíduos de construção e demolição apontam para a possibilidade de reuso do RCD visando substituir recursos naturais, escassos, diminuir a deposição ilegal de resíduos sólidos, e até mesmo melhorar propriedades geotécnicas dos materiais usados nas obras.

A presente pesquisa também poderá influenciar na reutilização de resíduos de construção e demolição, uma vez que, pelos resultados dos ensaios, percebe-se a melhora do comportamento mecânico e estrutural do solo quando da incorporação do RCD.

Verificou-se também a importância da estabilização de solos através da adição de cal virgem e cal hidratada, uma vez que a adição de cal também melhorou as propriedades mecânicas e estruturais da mistura solo + RCD.

5.2 CONCLUSÕES ESPECÍFICAS

5.2.1 DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Em relação a granulometria, verifica-se a importância da utilização do defloculante, uma vez que para as amostras contendo solo, fez com que os grãos se desagregassem. As amostras contendo cal virgem e cal hidratada tiveram curvas granulométricas semelhantes, portanto, mantendo o mesmo nível de agregação e desagregação de partículas.

Os limites de liquidez e plasticidade diminuíram com a incorporação de cal virgem e cal hidratada devido a fenômenos físicos e químicos, sendo o índice de plasticidade menor para a amostra contendo cal hidratada.

A partir dos resultados de granulometria e dos limites de Atterberg, as amostras de solo e solo + RCD tiveram classificação A-4 quando utilizado defloculante, e A-2-4 quando não utilizado. Em relação às misturas contendo cal virgem e cal hidratada, com e sem

defloculante foram classificadas em A-2-4, com maior desagregação da mistura contendo cal virgem.

Pela classificação expedita MCT, a presença do RCD diminuiu a contração do solo e fez com que aumentasse a capilaridade. O solo puro foi classificado como argila arenosa laterítica e a mistura solo + RCD como areia laterítica.

Observou-se que, após a imersão dos corpos de prova submetidos a ensaio de Mini MCV, a amostra contendo apenas solo começou a desmanchar, o que não ocorreu com as misturas, portanto, o RCD sobressaiu-se como um material estabilizante.

Os ensaios de pH comprovam a influência do RCD no pH das misturas. Além disso, a capacidade de troca catiônica foi maior para as misturas. A saturação por bases apontou para maior capacidade de permuta de cátions ocupada por cátions básicos para os materiais cimentantes.

A difração de raio x apontou para a intemperização do solo, por ser composto por caulinita e gibsitita e que o RCD possui partículas calcáreas, cimentantes e quartzo.

A presença do RCD e da cal virgem e hidratada diminuíram a massa específica real dos grãos quando misturado ao solo.

O ensaio de porosidade apontou para maior volume de poros em amostras secas a 105°C submetidas a vácuo, que para amostras secas ao ar, já que a água ocupou espaços vazios entre os grãos.

A porosidade foi maior para amostras secas no equipamento do que para amostras secas ao ar. O solo apresentou maior superfície específica que as misturas devido à maior porcentagem de finos. Os resultados apontaram para ação agregadora da cal sobre o solo. O grau de saturação das misturas na umidade ótima foi tanto maior quanto maior a superfície específica, devido às maiores interações com a água.

O ensaio de microscopia mostrou a presença de concreções lateríticas do solo, de estruturas porosas e de partículas cimentantes para o RCD e agregações na cal virgem e hidratada.

O ensaio de absorção do RCD granular confirmou a característica porosa do agregado, verificado no ensaio de porosimetria.

A sucção superior do solo comprova a importância da fração argilosa. A cal hidratada teve um pouco maior de poder desaglutinante em relação à cal virgem.

5.2.2 DOS ENSAIOS MECÂNICOS

Do ensaio de mini compactação, verifica-se que tem-se uma curva de compactação semelhante para o solo e o solo + RCD e que a presença de cal deslocou a curva para a esquerda e para baixo, provavelmente devido às maiores interações químicas.

O ensaio de mini CBR apontou a presença de pico na curva mini CBR x umidade de compactação nos ensaios com imersão, não os apresentando nas curvas oriundas dos ensaios sem imersão. Atribui-se esse comportamento distinto ao fato de que na condição pós imersão apenas a porosidade interfere no resultado enquanto nos ensaios sem imersão interferem a porosidade e a sucção. O solo apresentou propriedade tixotrópica. A adição de RCD melhorou o comportamento tanto imerso, quanto não imerso do material. A reação da cal virgem e hidratada foi rápida, já que a poucos dias de cura o comportamento foi similar aos demais, além de se tornarem menos sensíveis às variações de umidade. Em geral, verificou-se melhor comportamento da mistura com cal hidratada, seguida da mistura contendo cal virgem. A relação do grau de saturação com os valores de CBR apontaram para a importância da sucção em amostras não imersas. Para o caso da saturação é refletida a condição de compactação, ocorrendo melhoria do comportamento nos tempos de cura para os ramos secos em todos os materiais e também no ramo úmido para amostras contendo cal. O aumento do índice de vazios atuou de forma negativa na capacidade de suporte, entretanto as amostras contendo cal tornou o comportamento mais estável com o aumento da porosidade. A influência da compactação também diminuiu com a adição de cal.

Em relação ao ensaio de resistência à compressão simples, as amostras de solo permitiram maiores deformações, devido à maior coesão conferida pelas partículas argilosas. As amostras de solo + RCD e solo + RCD + cal virgem suportaram maiores tensões, indicando a importância da sucção e aglutinação ocasionada pela cal virgem. Não foi possível realizar o ensaio em amostras abaixo da umidade ótima, uma vez que os corpos de prova romperam prematuramente, ou pela diminuição da coesão, ou pela geração de retrações diferenciais. Em geral, a sucção atuou diminuindo a capacidade dos corpos de prova em se deformarem, assim como o índice de vazios, ou seja, permitiram menores deformações na ruptura. Em misturas estabilizadas com a cal, a sucção atuou favoravelmente na resistência à compressão simples.

Os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral apontam para a cimentação e sucção influenciando fortemente na fase elástica. Na fase plástica, verifica-se que continuam exercendo influência, mas não preponderante. A mistura contendo cal hidratada permitiu maior deformação e tensão de resistência à tração. Para resistências semelhantes, o solo apresentou maior grau de saturação.

Do ensaio de resiliência obteve-se estreita relação do módulo resiliente obtido do ensaio triaxial cíclico e o modelo universal para todas as amostras analisadas. Para as misturas,

obteve-se valores equivalentes com relação às suas respectivas curas, o que demonstra que a ação cimentante do RCD e das cais foi rápida. A presença do RCD contribuiu na melhoria do comportamento resiliente. A mistura contendo cal virgem apresentou melhores comportamentos. A sucção atuou favoravelmente no comportamento resiliente, bem como o inverso do índice de vazios.

Do ensaio de cisalhamento triaxial rápido, verificou-se que a presença de cal diminuiu o ângulo de atrito. Aos 28 dias os ângulos de atritos foram os mesmos para as misturas, possivelmente por que as reações químicas se estabilizaram. As amostras contendo cal tiveram mesmo valor de ângulo de atrito aos 14 e aos 28 dias.

6. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Após a realização da pesquisa, têm-se as seguintes sugestões para pesquisas futuras:

- utilizar outros tipos e fontes de resíduo de construção e demolição com e sem a incorporação de cal;
- realizar estudos com diferentes granulometrias dos agregados de resíduo de construção e demolição;
- realizar estudos com diferentes frações das composições das misturas;
- execução de trechos experimentais em campo a fim de serem comparados os desempenhos aos resultados obtidos em laboratório, além de viabilizar observar outras dificuldades operacionais;
- realizar modelos reduzidos e instrumentados para maior acompanhamento do comportamento das misturas e do solo puro;
- criar um modelo a partir dos parâmetros obtidos para realizar diferentes simulações;
- utilizar o RCD retido na peneira #4, predominantemente composto de brita, em pesquisas de misturas asfálticas ou como misturas em camadas granulares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDOU, M. R., BERNUCCI, L. L. B. -Pavimento ecológico: uma opção para a pavimentação de vias das grandes cidades, 1º Prêmio AEP - POLI de Iniciação Científica. Associação dos Engenheiros Politécnicos. 2006.

ANGELIM, R. R., Influência do procedimento de mistura da cal hidratada ao solo no comportamento do solo estabilizado para fins de pavimentação rodoviária. II Simpósio Sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste. Goiânia, 2005.

ANGULO, S.C (2000). Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana

ANGULO, S. C., KAHN, H., JOHN, V. M., ULSEN, C. (2003). Metodologia de caracterização de resíduos de construção e demolição. VI Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil – Materiais Reciclados e suas Aplicações, São Paulo.

ÂNGULO, S.C., ULSEN, C., KAHN, H., JOHN, V.M (2002). Desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem massiva de RCD. Reciclar para Construir. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/apres1.htm>

ARAÚJO, A. F., BARROSO, S. H. A., RABÊLO, A. N., VASCONCELOS, M. A. G. O uso da técnica de solo-cal para melhoramento das propriedades tecnológicas de um solo da região do baixo Jaguaribe no Estado do Ceará. Cobramseg, Buzios. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6508/1984: Solo – Determinação da Massa Específica dos Grãos

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 10004/2004 – Resíduos Sólidos – Classificação.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 11804/1991 - Materiais para sub-base ou base de pavimentos estabilizados granulometricamente – Especificação

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 15112/2004: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 15113/2004: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 15114/2004: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Área de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 15115/2004: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos

BENTO, P. F. Uso de cal e fibras na melhoria de materiais para utilização em estruturas de pavimentos. Dissertação de Mestrado. Universidade d Brasília. 2006.

BICALHO, K. V., CORREIA, A. G., FERREIRA, S., FLEUREAU, J. M., MARINHO, F. A. M. Filter paper method of soil suction measurement. Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Isla Margarita, Venezuela. 2007.

BRANDÃO, D. M., LEITE, A. F., JACINTHO, E. C., GUIMARÃES, R. C. Análise da mistura solo-cal-emulsão para fins de pavimentação rodoviária. I Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica na Região do Centro-Oeste. 2009

CAICEDO, B., CORONADO, O., FLEUREAU, J. M., CORREIA, A. G. Cyclic behavior of Bogotá unbound aggregates. Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Isla Margarita, Venezuela. 2007.

CAMAPUM DE CARVALHO, J., LEROUEIL, S. (2004). Curva Característica de Sucção Transformada. Revista Solos e Rochas, São Paulo, SP, 27 (3), p. 231-242.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. Solo como material de Construção. Instituto Brasileiro do Concreto. Capítulo 17, 2007

CAVALCANTE, E.H., GONÇALVES JÚNIOR, L.A., CARDOSO, G (2006). Estudos para aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha de Sergipe na pavimentação rodoviária. 37ª Reunião Anual de Pavimentação. Goiânia – GO.

CHANDLER, R.J.; CRILLY, M. S. & Montgomery-Smith, G. A low-cost method of assessing Clay desiccation for low-rise buildings. Proceedings of the Institute of Civil Engineering, v. 92, n. 2, p. 82-89, 1992.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA 307 (2002) Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.

CORREIA, B. M., ONOFRE, F. C., CASTELO BRANCO, V. T. F., SOARES, J. B., MATEOS, A. Estudo sobre ensaios de deformação permanente em misturas asfálticas por métodos adotados no Brasil e na Espanha. Revista Pavimentação. Ano V, Outubro 2010 a Fevereiro 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS DNER-ME 051/94: Solos – análise granulométrica

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS DNER-ME: 082/94:
Solos – determinação do limite de plasticidade

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS DNER-ME: 122/94:
Solos – determinação do limite de liquidez

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS DNER-ME 180/94: Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à compressão simples

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS DNER-ME 181/94: Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à tração por compressão diametral

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS DNER-ME 228/94: Solos – compactação em equipamento miniatura.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS DNER-ME 254/97: Solos compactados em equipamento miniatura – Mini Cbr e expansão

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS DNER-ME 258/94: Solos compactados em equipamento miniatura – Mini Mcv

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS DNER-ME 256/94: Solos compactados em equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão

DIAS, J.F., AGOPYAN, V (2005). Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo. Boletim técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

FAGURY, S. C., GRANDE, F. M. (2007). Gestão de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) – aspectos gerais da gestão pública de São Carlos/SP. *Exacta*, São Paulo, v. 5, n. 1, p. 35-45, jan./jun. 2007.

FILHO, J. R. M., CARDOSO, R. A., OLIVEIRA, J. C., VIEIRA, H. D. O uso da cal na estabilização de solos para fins rodoviários. II Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste. Goiânia- GO. 2005.

FORTES, F.Q., VILLIBOR, D.F., BLASSIOLI, P.R.F (1999). Aspectos técnicos de um plano gerencial de recuperação de pavimentos de baixo custo com Solos Tropicais.

FREITAS, I. M. (2009). Os resíduos de construção civil no município de Araraquara/SP. Dissertação de Mestrado. Centro Universitário de Araraquara – UNIARA. Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente.

FUJII, L. M. T., CAMAPUM CARVALHO, J. (2011). Estudo de propriedades de resíduos de construção e demolição misturado a um solo tropical. V Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste, Brasília.

GÓMEZ, A.M. J. (2011). Estudo Experimental de um Resíduo de Construção e Demolição (RCD) Para Utilização Em Pavimentação. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-196/11, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 123 p.

GUIMARÃES, A.C.R (2009). Um método Mecanístico-Empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos. Tese de Doutorado. COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

GUIMARÃES, J.E.P. (1998). A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil. Associação Brasileira dos Produtores de Cal. Editora Pini, São Paulo, SP, 285p.

GUTIERREZ, N. H. M., KRUEGER, C. A., NOBREGA, M. T. (1998). Efeitos da Adição de Cal nas Propriedades Físicas e Mecânicas de um Solo Argiloso Laterítico. XI COBRAMSEG, Brasília-DF, v:2, p.1191-1197.

GRIM, R. E. Applied clay mineralogy, 1962

JUAN, M. S., GUTIERREZ, P. A. Influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. Conference on the Use of recycled materials in building and structures. Barcelona, Espanha 2004.

LEANDRO, R. P., FABBRI, G. T. P., Avaliação do comportamento mecânico das misturas de solo não-lateríticos e lateríticos com cinza pesada e cal. IV Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos do Centro-Oeste e de Minas Gerais. Uberlândia, 2009.

LEITE, F.C., MOTTA, R.S., VASCONCELOS, K.L., BERNUCCI, L (2010). Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. Construction and Building Materials.

LIMA, R. S., LIMA, R. R. R (2011). Guia para elaboração de projeto de gerenciamento de resíduos da construção civil.

MENDES, T. M., MORALES, G., CARBONARI, G. Study on arc's aggregate utilization recycled of concrete. Conference on the Use of recycled materials in building and structures. Barcelona, Espanha 2004.

MIRANDA, L. F. R., ÂNGULO, S. C., CARELI, E.D (2009). A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986 – 2008. Revista Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 9, nº1, p. 57-71, jan/mar 2009.

MOIZINHO, J. C., CAMAPUM DE CARVALHO, J., FARIAS, M. M. Uso de Agregados Graúdos Lateríticos em Obras Geotécnicas. COBRAMSEG, 2006.

MOTTA, R.S., BERNUCCI, L.L.B., MOURA, E (2004). Aplicação de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de pavimentos. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

- MOTTA, R.S (2005). Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo de sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.
- MUSCALU, M. T., ANDREI, R. Use of recycled aggregates in rigid pavement construction. Bulletin of the Polytechnic Institute of Jasy. LVII (LXI). Fascicle: 2/2011
- NETO, J. C. M., SCHALCH, V. (2010). Gestão dos Resíduos de Construção e Demolição: Estudo da Situação no Município de São Carlos – SP, Brasil. Engenharia Civil Um, n° 36, São Carlos
- NÓBREGA, R.D., MELO, R.A (2009). Uso de agregados de resíduos da construção civil na pavimentação urbana em João Pessoa. Encontro Nacional sobre aproveitamento de Resíduos da Construção. ENARC 2009. Feira de Santana.
- NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. (1995). Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. São Paulo.
- NUNES, M.C.M., BRIDGES, M.G., Dawson, A.R (1996). Assessment of secondary materials for pavement construction: technical and environmental aspects. Universidade de Nottingham. Lisboa, Portugal.
- OLIVEIRA, J.C (2000). Caracterização geotécnica de materiais inconsolidados arenosos do distrito federal utilizados como material de construção. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília.
- PARENTE, E.B., PARREIRA, A.B., SOARES, J.B. Avaliação do comportamento mecânico de um solo laterítico e de outro não laterítico estabilizados com cimento.
- REZENDE, L.R. (2003). Estudo do Comportamento de Materiais Alternativos Utilizados em Estruturas de Pavimentos Flexíveis. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-014A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 372p.
- RIBEIRO JUNIOR, I., ALVES, E. B., CONCIANI, W. Estudo do comportamento da curva de compactação e dos índices físicos do solo saprolítico de filito com adição de cal hidratada calcítica.
- RON, M., CASAGRANDE., M.D.T., VALE. A.C., LOPES, M.M., SOARES, J.B (2008). Aplicabilidade de resíduos reciclados da construção civil e demolição como agregados em misturas asfálticas. 15ª Reunião de Pavimentação Urbana.
- RUFO, R.C., REZENDE, L. R., VARGAS, C. A. L., GOMIDE E BRITO, J. P. Estabilização química de solos tropicais com cal para fins de pavimentação. IV Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos do Centro-Oeste de Minas Gerais. Uberlândia, 2009.

SANTANA, E. P., LEITE, H. E. A. S., MONTEIRO, V. E. D., MACÊDO, J. A. G. Uso de resíduos da construção e demolição para fins de pavimentação. 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte – MG, 2007.

SANTOS, E. C. G. (2007). Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – Geotecnia.

SILVA, M.G.B., SILVA, B.T.A., BARROSO, S.H.A (2008). Um primeiro estudo dos resíduos de construção e demolição da construção civil para aplicação em camadas de pavimentos na cidade de Fortaleza. 15ª Reunião de Pavimentação Urbana. Salvador, Bahia.

SOUSA, H., SOUSA COUTINHO, J., FARIA, J., FIGUEIREDO, F., SOURA, R. Construction and demolition waste in the region of Porto – Portugal: management and survey. Conference on the Use of recycled materials in building and structures. Barcelona, Espanha 2004.

SROUR, I., CHEHAB, G., GHARIB, N. Recycling construction materials in a developing country: four case studies. Second Internacional Conference on Engineering Systems Management and its applications, 2010.

ULSEN, C. (2006). Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.

ULSEN, C., KAHN, H., ÂNGULO, S. C., JOHN, V. M. (2010). Composição química de agregados mistos de resíduos de construção e demolição do Estado de São Paulo. Revista Escola de Minas, vol. 63, nº 2, Ouro Preto.

VEDRONI, W. J., CARVALHO, D. Estudo de caso da utilização do RCD na reparação de ruas e avenidas de Piracicaba – SP. Holos Environment, Vol. 8, nº 2 (2008)

VILLAR, L. F. S. Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita. Tese de Doutorado. PUC-Rio. Departamento de Engenharia Civil – Geotecnia. 2002

VILLIBOR, D. F., NOGAMI, J. S. (2009). Pavimentos Econômicos – Tecnologia do uso dos solos finos lateríticos. Editora Arte & Ciência

LINKS ACESSADOS:

Biurrarrena – Disponível em Abril de 2012: <http://estacoes-reciclagem.biurrarrena.com/estacao-rcd.php>

Ecolnews – Disponível em Fevereiro de 2012: http://www.ecolnews.com.br/residuos_construcao_civil.htm

Minascal - Disponível em 20 de Agosto de 2012: www.minascal.com.br

Quallical - Disponível em 20 de Agosto de 2012:
<http://www.quallical.com.br/Apostila%20cv.pdf>

Disponível em 20 de Agosto de 2012:
<http://www.ufrjr.br/institutos/it/dau/profs/edmundo/Aglomerantes.pdf>

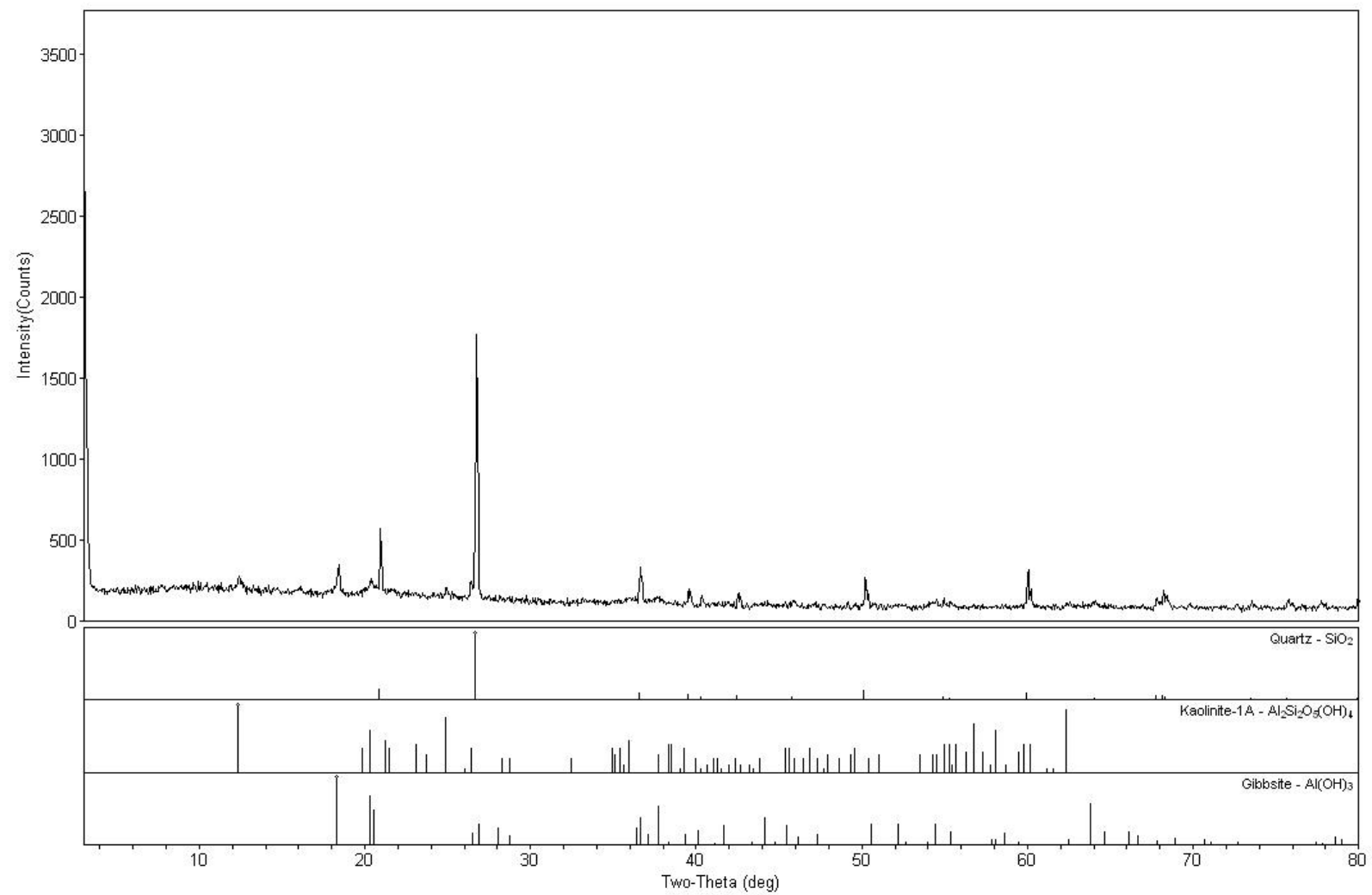
PINHEIRO, R. -. Disponível no dia 25 de Julho de 2011 em:
http://www.ufsm.br/engcivil/Material_Didatico/TRP1002_Mat_para_infraestrutura_de_trasnsp/notas_de_aula/Estabilizacao_dos_solos.pdf

SILVA, M. G. B., BARROSO, S. H. A., SILVA, B. T. A., BENEVIDES, S. A. S. -
Disponível em:

http://www.redeasfalto.org.br/index.php?option=com_docman&task=doc_details&gid=234&Itemid=27 em Outubro de 2011.

ANEXO – DIFRAÇÃO DE RAIO X

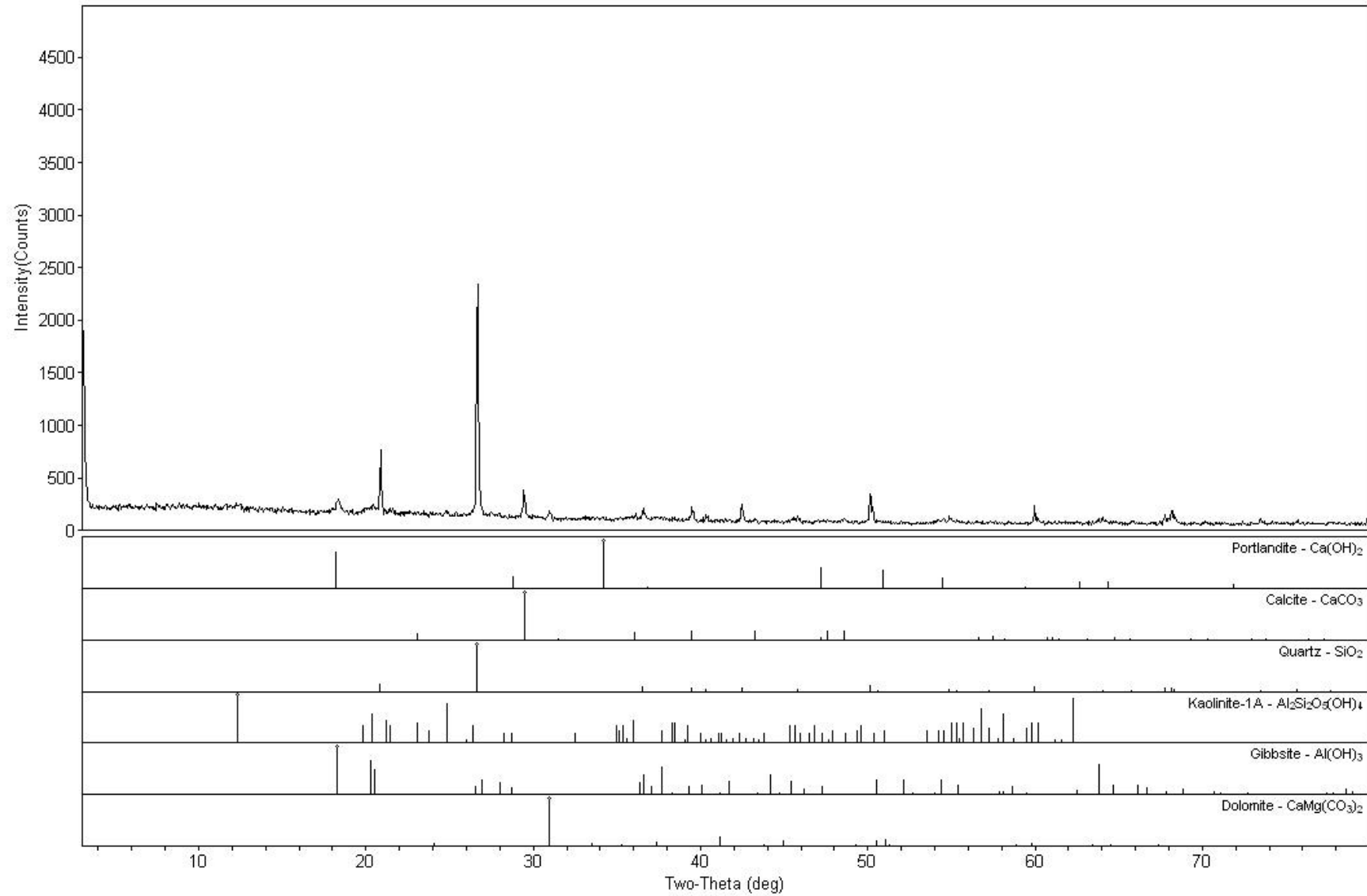
Solo



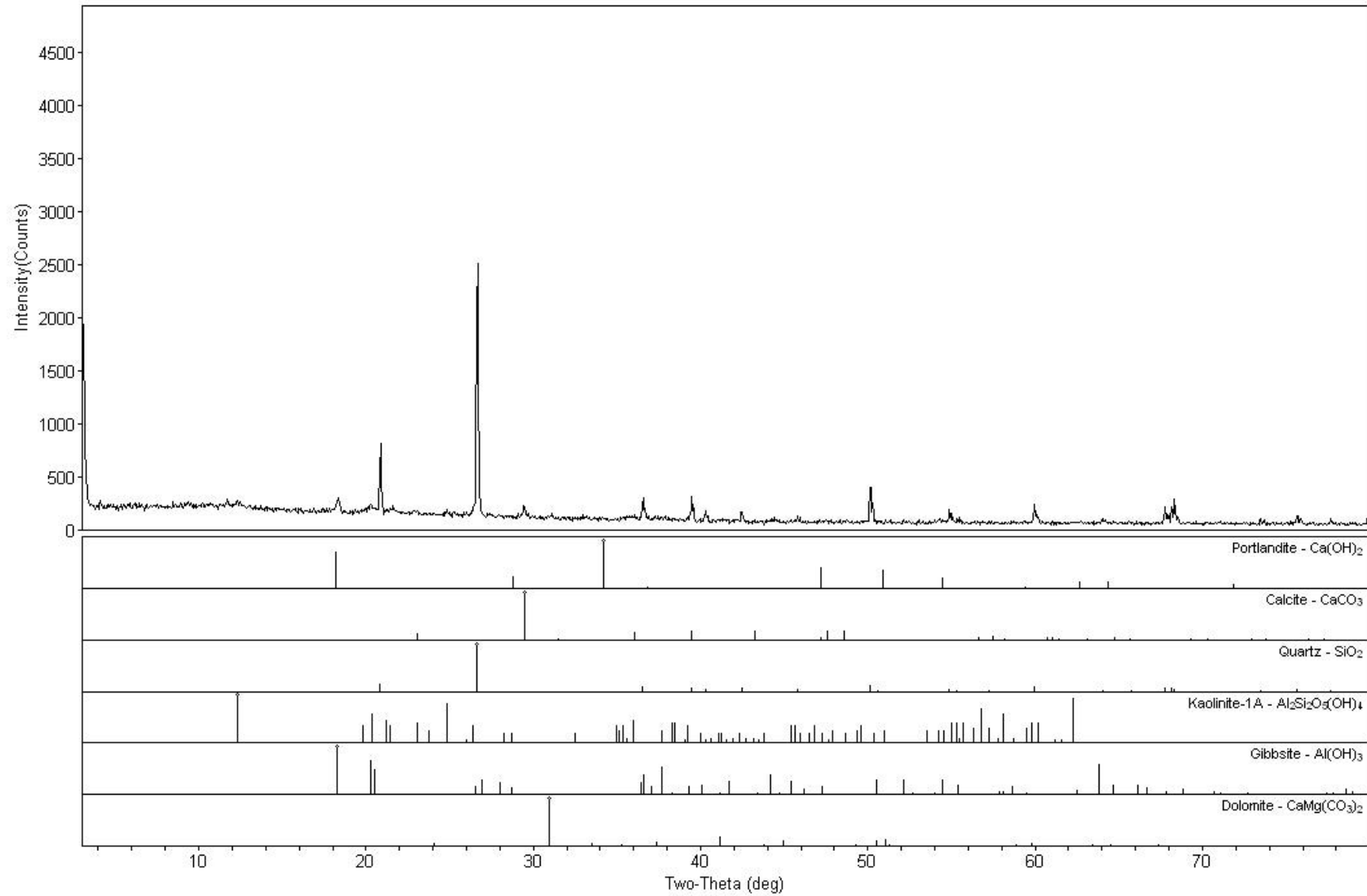
Camera: USA; Detector: Dikoria

Sample: Solo

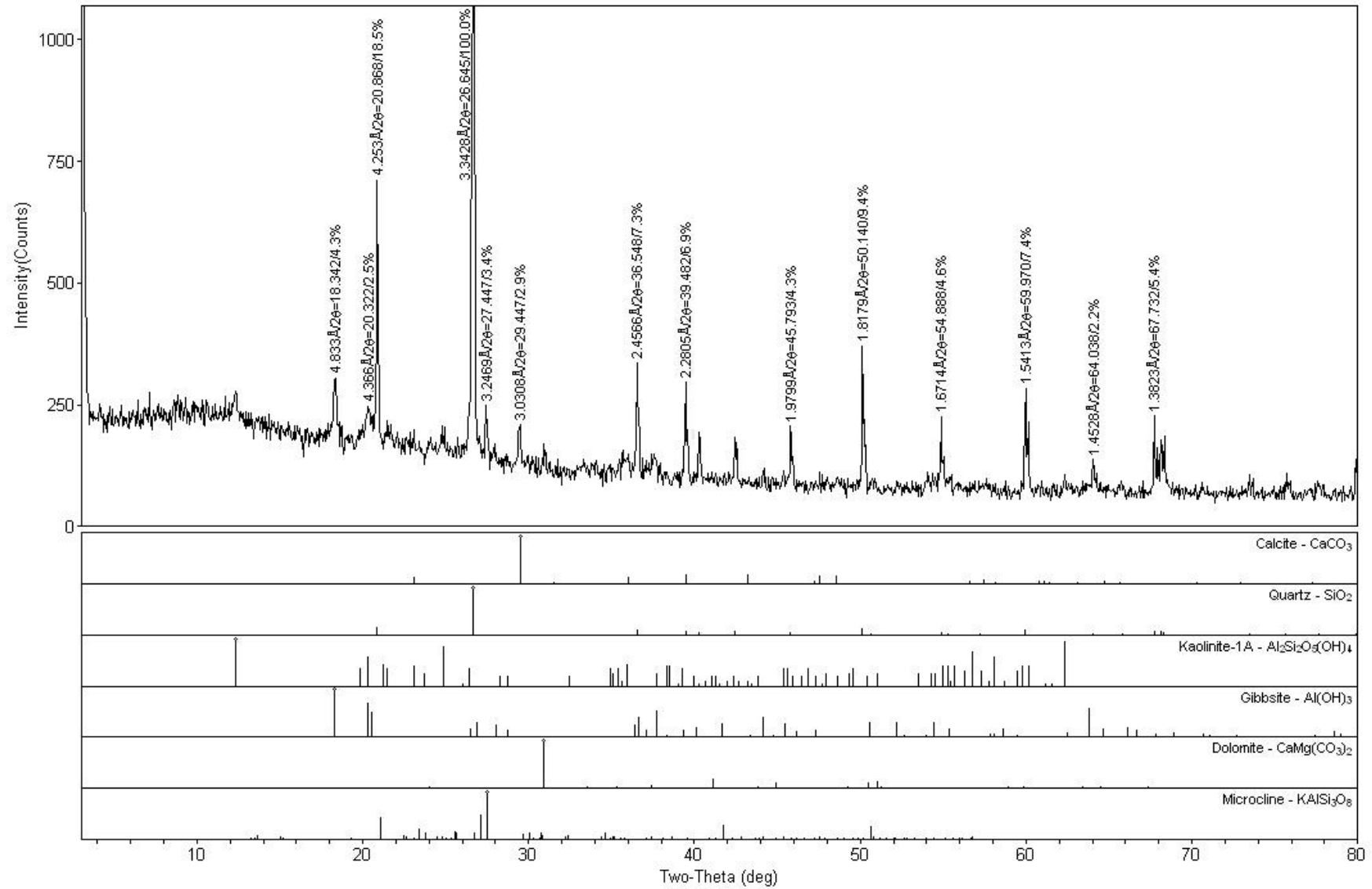
Solo + RCP



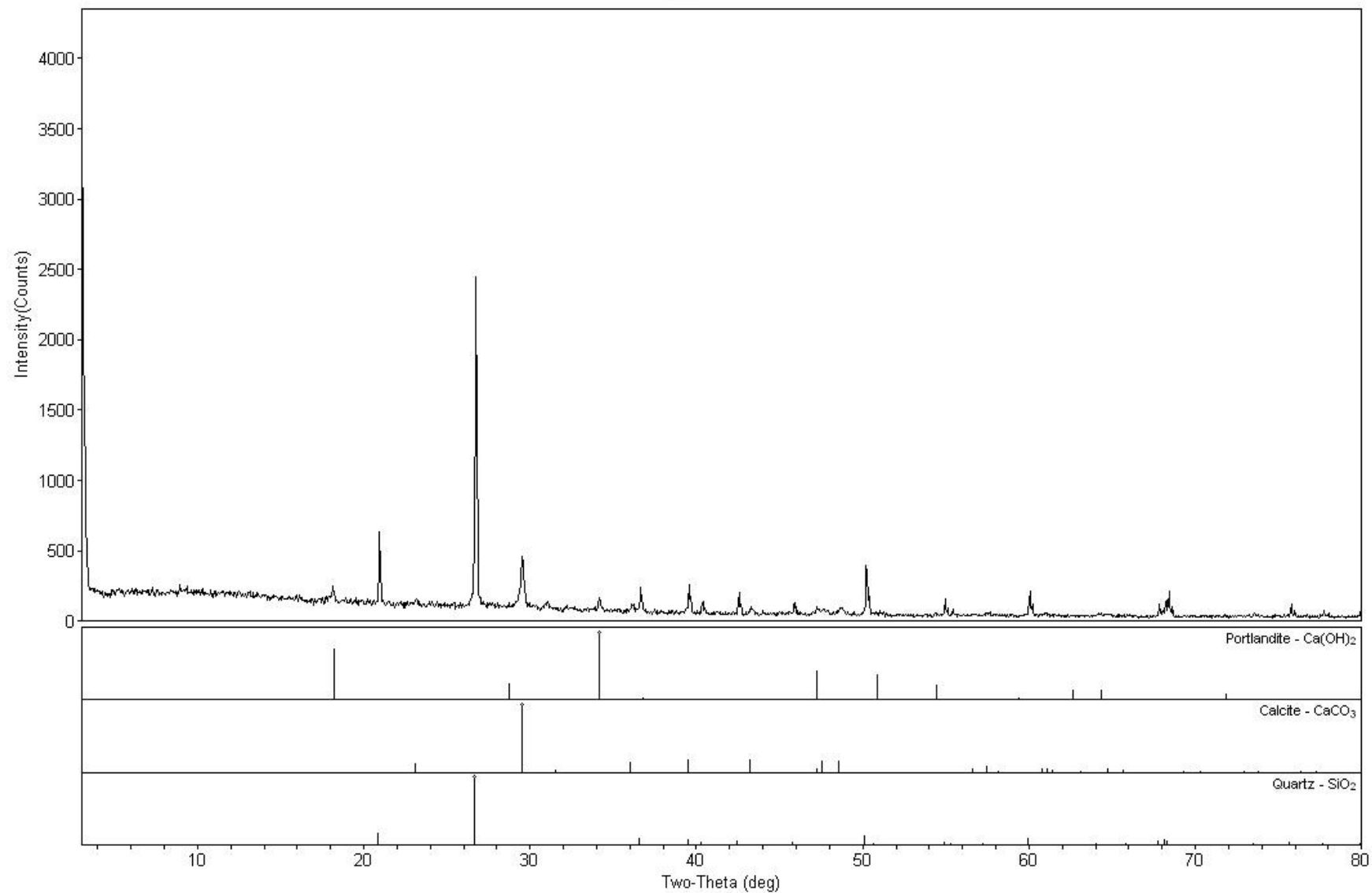
Solo + RCP + Virgem



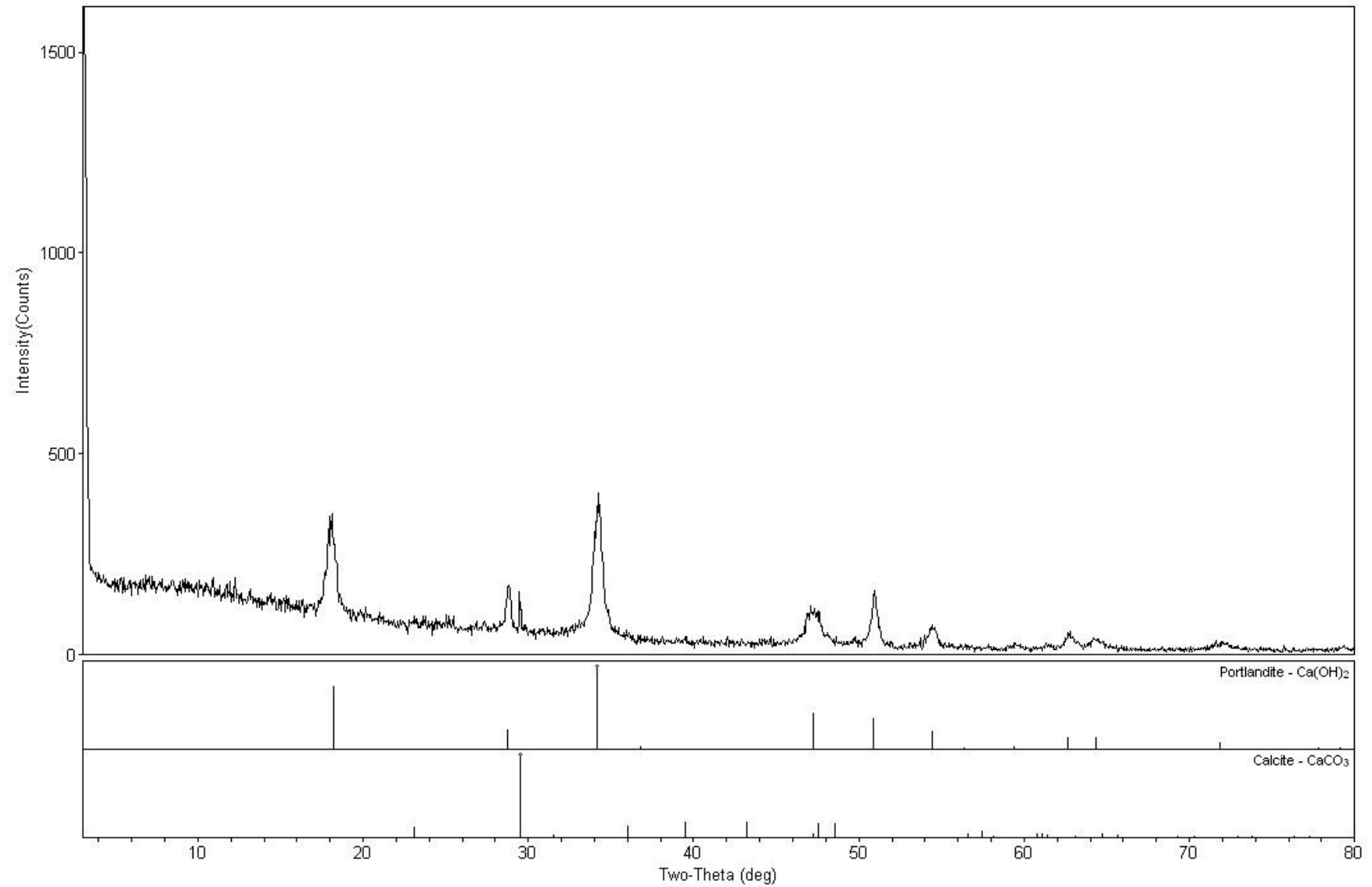
Solo + RCP + Hidratado



RCP



Cal Virgem



Cal Hidratado

