

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA**

**MELHORIA DE SOLOS COM FIBRAS PROVENIENTES DA**  
**INDÚSTRIA AVÍCOLA**

**ROSEMARY JANNETH LLANQUE AYALA**

**ORIENTADOR: JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, Dr.**

**CO-ORIENTADORA: ANA LAURA MARTÍNEZ HERNÁNDEZ, Dra.**

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.TD-159/2020**

**BRASÍLIA / DF: 17 DE FEVEREIRO/2020**

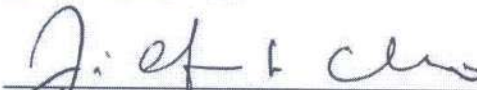
**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

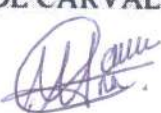
**MELHORIA DE SOLOS COM FIBRAS PROVENIENTES DA  
INDÚSTRIA AVÍCOLA**


**ROSEMARY JANNETH LLANQUE AYALA**

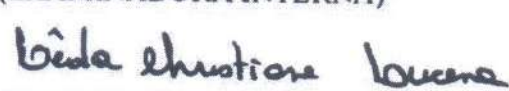
TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

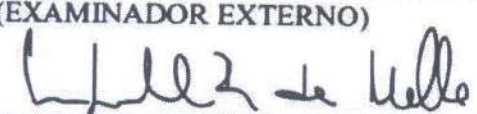
APROVADA POR:

  
\_\_\_\_\_  
JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, Dr. (UnB)  
(ORIENTADOR)

  
\_\_\_\_\_  
ANA LAURA MARTÍNEZ HERNÁNDEZ, Dra. (TNM-MX)  
(COORDINADORA)

  
\_\_\_\_\_  
MICHÈLE DAL TOÉ CASAGRANDE, DSc. (UnB)  
(EXAMINADORA INTERNA)

  
\_\_\_\_\_  
LÊDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, DSc. (UFMG)  
(EXAMINADOR EXTERNO)

  
\_\_\_\_\_  
LUIZ GUILHERME RODRIGUES DE MELLO, DSc. (DNIT)  
(EXAMINADOR EXTERNO)

BRASÍLIA/DF, 17 de fevereiro de 2020.

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

LLANQUE AYALA, ROSEMARY JANNETH

Melhoria de Solos com Fibras Provenientes da Indústria Avícola

vi, 300 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutora, Geotecnia, 2020)

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Pavimentação

2. Melhoria de solos

3. Fibras naturais

4. Penas de frango

I. ENC/FT/UnB

II. G.DT 159/2020

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

LLANQUE AYALA, R.J. (2020) Melhoria de Solos com Fibras Provenientes da Indústria Avícola. Tese de Doutorado, Publicação G.DT 159/2020, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 300 p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Rosemary Janneth Llanque Ayala

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Melhoria de Solos com Fibras Provenientes da Indústria Avícola.

GRAU / ANO: Doutora em Geotecnia / 2020

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

---

Rosemary Janneth Llanque Ayala  
SQN 416 Bloco “B” apto. 224  
70773-070 – Brasília/DF – Brasil

Buscai a opinião de vosso coração, mesmo  
se os juízes derem opinião contrária.

ابحث عن رأي قلبك حتى لو أصدر القضاة رأيا مخالفا

Profeta Mohammed (S.A.A.S.)

## ***DEDICATÓRIA***

*Aos meus pais por serem muito mais do que  
eu mereço e pelo exemplo que são para mim e  
Warita, fonte da minha energia.*

## ***AGRADECIMENTOS***

Primeiro a Deus fiel que é o maior responsável por essa vitória.

Aos meus pais pelo apoio total, físico e emocional em cada momento durante a realização da tese e na minha vida;

Ao professor José Camapum de Carvalho pelo seu apoio antes, durante e depois da realização da tese. Antes, durante e no final do doutorado além de professor é considerado um amigo;

A professora Ana Laura Martínez Hernández pelo apoio como coorientadora da tese, o conhecimento das penas que ela possui permitiu desvendar muitas dúvidas que se apresentaram no desenvolvimento da tese;

Genilson Xavier, Genival Xavier, Hanael Xavier, Jairo Messias, Renato Duarte, Pedro Malheiros, João Paulo Oliveira, Igor Marques, Mirele, Roberto Carlos, minha equipe, chave do sucesso na realização dos ensaios dos corpos de prova em campo, sem eles seria difícil ter obtido resultados homogêneos “em massa”, me acompanharam até altas horas da noite em pró dos resultados;

Aos colegas Andrea, Jair, Ronaldo Vilela, Karina, Halley, Vitor Amadeu, Marco Rogério, Beatriz, Zileia, Philippe, pelo auxílio em diferentes etapas da tese;

Ao Conselho Nacional de Pesquisa – CNPq – pelo apoio financeiro;

À Universidade de Brasília pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa e aos professores do programa, por serem modelo de compromisso e amor à geotecnia;

E a todas as pessoas que me auxiliaram com motivação, ideias e apoio muito obrigada.

## RESUMO

Ante uma era de industrialização e consumo, o homem foi gerando grandes mudanças no ecossistema, parte dessas mudanças ambientais se devem ao mau tratamento dos resíduos que vem da indústria alimentaria. Esses resíduos geram proliferação de doenças, insetos e roedores, quando tratados sem normativas de controle de qualidade. O Brasil líder mundial em exportação de carne de frango obriga a cuidar do processo de tratamento dos resíduos que vem da indústria de abates de frango. As penas, maior componente destes resíduos, podem ser avaliadas para uma reutilização que não demande elevados custos de processos de tratamento, abrindo a probabilidade da sua utilização como fibra de reforço na construção de estruturas de pavimento de rodovias não pavimentadas e de difícil acessibilidade. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar as potencialidades das penas de frango, utilizadas como fibra de reforço, mediante a verificação do comportamento mecânico do solo quando de sua incorporação. No estudo foram realizados ensaios de caracterização, compactação, mini CBR, compressão simples, tração por compressão diametral e módulo de resiliência. No intuito de verificar a variação da resistência mecânica das misturas em diferentes intervalos de tempo, enterraram-se em campo vários corpos de prova para analisar o grau de influência da pena sobre os resultados obtidos. Dois tipos de cal (CH-I e CH-III) foram utilizados como aditivo para verificar a degradabilidade da fibra ante meios alcalinos, dessa forma foram testadas além do solo puro as combinações solo – cal, solo - fibra, e solo - fibra - cal . Os resultados indicaram a pena como elemento influente principalmente na resistência à tração do solo. A adição da cal também incrementa, inicialmente, a resistência à tração do composto. Quanto ao mini CBR do solo a influência da pena está condicionada ao teor incorporado, aceitando-se como situação favorável compostos com 0,25% e 0,50% de fibra, sendo que valores superiores geralmente levam a decrementos nos valores de mini CBR. A fibra não influencia de forma significativa na resistência à compressão simples. O módulo resiliência das misturas com adição de fibras apresentou resultados favoráveis, no entanto, analisando as deformações permanentes, as fibras tendem a incrementar essa deformação conforme se incrementa o teor de fibra. Os métodos de cura também influenciam consideravelmente conforme se incrementa o teor de fibra na mistura. Verifica-se a degradação da fibra em meios alcalinos, não envolvendo grandes variações de resistência diretamente ligados ao teor de fibras e sim ao método de cura.

## ABSTRACT

Before an era of industrialization and consumption, man was generating major changes in the ecosystem, part of these environmental changes is due to the poor treatment of waste that comes from the food industry. These residues generate proliferation of diseases, insects and rodents, when treated without quality control regulations. Brazil's world leader in chicken meat exportation obliges to take care of the waste treatment process that comes from the chicken slaughtering industry. Feathers, the largest component of this waste, can be evaluated for reuse that does not require high costs of treatment processes, making it likely to be used as a reinforcement fiber in the construction of unpaved and easily accessible road pavement structures. Thus, the objective of this work was to evaluate the potentialities of chicken feathers, used as reinforcement fiber, by verifying the mechanical behavior of the soil upon its incorporation, characterization, compaction, mini CBR, simple compression tests were performed. diametral compression traction and resilience module. In order to verify the mechanical resistance variation of the mixtures in time intervals, several specimens were buried in the field to analyze the degree of influence of the feather on the obtained results. Two types of lime (CH-I and CH-III) were used as an additive to check the degradability of the fiber against alkaline media. Thus, combinations of soil - lime, soil - fiber, and soil - fiber - were tested in addition to pure soil. The results indicated the feather as an influential element mainly in the strength resistance of the soil. The addition of lime also initially increases the tensile strength of the compound. As for the mini CBR of the soil, the influence of the feather is conditioned to the incorporated content, accepting as favorable situation compounds with 0.25% and 0.50% of fiber, with higher values generally leading to decreases in the values of mini CBR. Fiber does not significantly influence resistance to simple compression. The resilience module of mixtures with added fibers showed favorable results, however, analyzing the permanent deformations, the fibers tend to increase this deformation with fiber content increases. Curing methods also influence considerably as the fiber content in the mixture. There is fiber degradation in alkaline media, not involving large variations in strength directly linked to the fiber content, but to the curing method.



## RESUMEN

Con la tendencia de consumo, el hombre fue generando cambios en el ecosistema, la variación de los cambios en el ecosistema se debe al mal manejo de los residuos provenientes de la industria de comercio de carne. Los residuos generan proliferación de enfermedades, bacterias, insectos y roedores cuando no son debidamente tratados conforme a las exigencias de calidad. Brasil es líder mundial en la exportación de carne de pollo y está obligada a tratar los residuos de esta industria. Estos residuos están compuestos en mayor parte por plumas, fue estudiado la posibilidad de análisis para reutilización como material de refuerzo en la construcción de carreteras no pavimentadas y de acceso precario. De esta manera, el objetivo del trabajo fue evaluar las características de las plumas de pollo como material de refuerzo de pavimentos, verificándose el comportamiento mecánico del suelo puro y con adición de la fibra, fueron realizados ensayos de caracterización, mini compactación, mini CBR y resistencia mecánica de tracción por compresión diametral, compresión simple y módulo de resiliencia. Con el propósito de analizar variaciones temporales de la resistencia mecánica en las misturas, los cuerpos de prueba fueron enterrados en campo para evaluar el grado de influencia de la pluma sobre los resultados de campo. Dos tipos de cal (CH-I y CH-III) fueron utilizados como aditivo en la verificación de degradación de la fibra en medios alcalinos, así, además del suelo puro, fueron estudiadas las combinaciones de material, suelo – fibra, suelo – cal y suelo – cal – fibra. Los resultados indicaron a la fibra como elemento influyente, principalmente en la resistencia a la tracción del suelo. La adición de la cal también aumenta, inicialmente, la resistencia a la tracción del compuesto. Respecto al mini CBR del suelo, la influencia de la pluma se condiciona a la cantidad adicionada, siendo favorables cantidades de 0,25% y 0,50% de fibra, mayores cantidades generalmente llevan a reducción del mini CBR. La fibra no influye de forma relevante en la resistencia a la compresión simple. El módulo de resiliencia de las mezclas con adición de fibras presentó resultados favorables, sin embargo, observando las deformaciones permanentes, las fibras tienden a incrementar esa deformación conforme se incrementa la cantidad de fibra. Los métodos de cura también influyen considerablemente conforme se incrementa la cantidad de fibra en la mezcla. Se verifica la degradación de la fibra en medios alcalinos, sin embargo, las grandes variaciones de resistencia no se atribuyen a la cantidad de fibras y si al método de cura.

<b>CAPÍTULO.....</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA .....	2
1.3 HIPÓTESE PROPOSTA.....	4
1.4 OBJETIVOS.....	4
1.4.1 OBJETIVO GERAL .....	4
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
1.5 JUSTIFICATIVA.....	5
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	9
<b>2 SOLOS TROPICAIS NA PAVIMENTAÇÃO .....</b>	<b>10</b>
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	10
2.2 OS SOLOS LATERÍTIOS COMO MATERIAL DE PAVIMENTAÇÃO.....	11
2.2.1 A METODOLOGIA MINIATURA, COMPACTADO, TROPICAL - MCT .....	12
2.3 CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS DE COMPORTAMENTO LATERÍTICO.....	15
2.3.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS E MINERALÓGICAS DOS SOLOS LATERÍTIOS	16
2.3.2 A SUÇÃO EM SOLOS LATERÍTIOS .....	17
2.4 MÓDULO DE RESILIÊNCIA DOS SOLOS LATERÍTIOS .....	22
2.5 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL .....	25
2.5.1 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CAL ADOTADO .....	26
2.5.2 DESEMPENHO DA TÉCNICA DE ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS .....	26
2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	30
<b>3 REFORÇO DE SOLOS COM FIBRAS NATURAIS.....</b>	<b>32</b>
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	32
3.2 CONTAMINAÇÕES GERADAS PELA INDÚSTRIA DE ABATE DE FRANGO.....	32
3.3 FIBRAS NATURAIS.....	36
3.3.1 AS FIBRAS ANIMAIS .....	37
3.3.2 A QUERATINA .....	38

3.3.3	A BIODEGRADAÇÃO DAS PENAS .....	39
3.3.4	CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DA FIBRAS .....	41
3.4	SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS.....	43
3.4.1	COMPORTAMENTO DOS SOLOS COM INCLUSÃO DE FIBRAS ARTIFICIAIS .....	43
3.4.2	COMPORTAMENTO DOS SOLOS COM INCLUSÃO DE FIBRAS NATURAIS .....	46
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	50
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>52</b>
4.1	OS MATERIAIS .....	52
4.1.1	O SOLO.....	52
4.1.2	A CAL .....	53
4.1.3	AS FIBRAS .....	55
4.2	MÉTODOS DE CURA .....	58
4.3	MÉTODO DE ENSAIOS.....	60
4.3.1	PERIODO DE COLETA.....	61
4.4	ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	62
4.4.1	GRANULOMETRIA .....	63
4.4.2	DENSIDADE REAL DOS GRÃOS.....	63
4.4.3	LIMITES DE CONSISTÊNCIA.....	64
4.4.4	CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS .....	64
4.4.5	CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA .....	66
4.4.6	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA FIBRA.....	67
4.4.7	PROPRIEDADES MINERALÓGICAS DO SOLO.....	71
4.4.8	PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO.....	72
4.4.9	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA - MEV .....	73
4.4.10	ENSAIOS PRELIMINARES – MINI COMPACTAÇÃO.....	73
4.5	ETAPA 2: ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS MATERIAIS .....	74
4.5.1	MINI CBR .....	76
4.5.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES - RCS .....	79
4.5.3	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL - RTCD .....	81
4.5.4	MÓDULO DE RESILIÊNCIA .....	82

4.6	ETAPA 3: ANÁLISE TEMPORAL DAS COMBINAÇÕES DA ETAPA 2.....	84
4.6.1	ETAPA 4: ANÁLISE INDIVIDUAL E COMPARATIVA DOS RESULTADOS .....	84
<b>5</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....</b>	<b>86</b>
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	86
5.2	GRANULOMETRIA .....	86
5.3	DENSIDADE REAL DOS GRÃOS (GS) .....	89
5.4	LIMITES DE CONSISTÊNCIA.....	90
5.5	CLASSIFICAÇÃO DO SOLO .....	92
5.6	POTENCIAL DE RETENÇÃO DE ÁGUA .....	93
5.6.1	CURVAS CARACTERÍSTICAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DA UMIDADE GRAVIMÉTRICA.....	93
5.6.2	CURVAS CARACTERÍSTICAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DO GRAU DE SATURAÇÃO .....	95
5.6.3	VARIAÇÃO DA SUCCÃO EM FUNÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS .....	96
5.6.4	INFLUÊNCIA TEMPORAL DAS FIBRAS NA VARIAÇÃO DE ÍNDICE DE VAZIOS .....	97
5.7	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS FIBRAS.....	102
5.7.1	MORFOLOGIA EXTERNA E INTERNA .....	102
5.7.2	CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DA FIBRA PENA .....	104
5.8	CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS DOS MATERIAIS .....	106
5.9	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS, ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X POR DISPERSÃO.....	112
5.9.1	POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (PH).....	114
5.10	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	114
5.11	ENSAIOS DE MINI – COMPACTAÇÃO .....	118
5.11.1	COMPACTAÇÃO DO SOLO PURO.....	118
5.11.2	CURVAS DE COMPACTAÇÃO SOLO – CAL.....	119
5.11.3	INFLUÊNCIA DO TEOR DE FIBRAS NAS CURVAS DE COMPACTAÇÃO SOLO - FIBRA..	122
5.11.4	CURVAS DE COMPACTAÇÃO DAS MISTURAS SOLO – CAL – 0,25% DE FIBRA.....	124
5.11.5	RESULTADOS DE COMPACTAÇÃO DAS MISTURAS SOLO – 0,50% DE FIBRA – CAL.....	130
5.11.6	RESULTADOS DE COMPACTAÇÃO DAS MISTURA SOLO – 0,75% DE FIBRA – CAL .....	132

5.12	MINI CBR.....	135
5.12.1	SUCÇÕES E PROPRIEDADES FÍSICAS DOS CORPOS DE PROVA APÓS UM ANO DE CURVA EM RELAÇÃO ÀS CURVAS CARACTERÍSTICAS INICIAIS.....	136
5.12.2	ANÁLISE DO MINI CBR DO SOLO PURO.....	141
5.12.3	MINI CBR DAS MISTURAS SOLO - FIBRA, SOLO - CAL E SOLO - CAL - FIBRA .....	143
5.13	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS) .....	160
5.13.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DO SOLO PURO .....	161
5.13.2	VARIAÇÃO TEMPORAL DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES RCS DAS MISTURAS .....	161
5.13.3	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS FIBRAS E DA CAL NO MÓDULO TANGENTE DETERMINADO A PARTIR DOS GRÁFICOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES – RCS DAS MISTURAS .....	172
5.14	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RTCD).....	175
5.14.1	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DO SOLO PURO: .....	175
5.14.2	VARIAÇÃO TEMPORAL DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DAS MISTURAS SOLO - FIBRA .....	175
5.14.3	ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL RESIDUAL-5% RTCD DE MISTURAS .....	187
5.14.4	ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL COM CONSIDERAÇÃO MULTIPARAMÉTRICA .....	192
5.15	ANÁLISE DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA DAS MISTURAS ESTUDADAS.....	199
5.15.1	AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA FRENTE A ALGUNS MODELOS DE ANÁLISE	199
5.15.2	INFLUÊNCIA DA TENSÃO DESVIO E CONFINANTE NO MÓDULO DE RESILIÊNCIA DO SOLO	206
5.15.3	ANÁLISE DA RELAÇÃO TENSÃO DESVIO/PRESSÃO ATMOSFÉRICA COM O MÓDULO DE RESILIÊNCIA APLICADO ÀS MISTURAS SELECIONADAS – ESTADO INICIAL .....	208
5.15.4	ANÁLISE DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA PARA O SOLO PURO E MAIS OITO MISTURAS CONTENDO FIBRAS, CAL E CAL E FIBRAS .....	210
5.15.5	INFLUÊNCIA DO ÍNDICE DE VAZIOS, DA UMIDADE E DA SUCCÃO SOBRE O MÓDULO DE RESILIÊNCIA .....	215
5.15.6	ANÁLISE DE DEFORMABILIDADE ACUMULADA NOS ENSAIOS DE MÓDULO RESILIENTE DAS MISTURAS ANALISADAS .....	220

5.16	TÓPICOS CONCLUSIVOS .....	222
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>224</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>229</b>
	<b>APÊNDICE A Curvas de compactação da mistura solo – 0,50% de fibra – cal.....</b>	<b>243</b>
	<b>APÊNDICE B Curvas de compactação da mistura solo – 0,75% de fibra – cal .....</b>	<b>246</b>
	<b>APÊNDICE C – Análise temporal do mini CBR .....</b>	<b>249</b>
	<b>APÊNDICE D – Análise temporal da resistência à compressão simples RCS.....</b>	<b>251</b>
	<b>APÊNDICE D1 – ANÁLISE TEMPORAL DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES RCS – FIBRA RAQUE .....</b>	<b>252</b>
	<b>APÊNDICE D2 – ANÁLISE TEMPORAL DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES RCS – FIBRA BARBA .....</b>	<b>253</b>
	<b>APÊNDICE E – Análise temporal da resistência à compressão simples – RCS .....</b>	<b>254</b>
	<b>APÊNDICE F – Análise temporal da Resistência a tracção por compressão diametral - RTCD.....</b>	<b>262</b>
	<b>APÊNDICE G – Análise temporal da Resistência a tracção por compressão diametral – RTCD misturas solo fibra cal.....</b>	<b>265</b>

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1 – Modelos de determinação do MR. Fonte: (Ribeiro, 2013) .....	23
Tabela 2-2 – Valores de módulo resiliente em para amostras com e sem cura. Fonte: Silva, <i>et al.</i> , (2016) .....	24
Tabela 2-3 – Resultados do CBR e MR dos solos estabilizados. Fonte: Elsharief <i>et al.</i> , (2013) .....	24
Tabela 3-1 - Matriz de impactos ambientais em abatedouros. Fonte: Ferreira <i>et al.</i> (2002) ...	36
Tabela 3-2 – Resultados das Características Mecânicas da Pena.....	41
Tabela 3-3 – Propriedades mecânicas de algumas fibras de origem vegetal. Fonte: modificado Gowthaman <i>et al.</i> , (2018).....	42
Tabela 4-1 - Resumo das combinações de solo, solo – cal, solo – pena e solo – cal – pena ...	58
Tabela 4-2 – Programação de tempos e métodos de cura por tipo de ensaio.....	59
Tabela 4-3 - Resumo classificação do solo .....	65
Tabela 4-4 – Propriedades físicas da pena segundo a literatura.....	68
Tabela 4-5 – Quantificação dos aminoácidos da queratina e sua relação com as características. Modificado: Tesfaye <i>et al.</i> , (2017).....	69
Tabela 4-6 – Resultados das Características Mecânicas da Pena. Fonte: Alonso, (2013) modificado.....	71
Tabela 4-7 – Quantificação dos corpos de prova preparados para os ensaios de resistência... 75	
Tabela 4-8 – Detalhe de tempos e métodos de cura por tipo de ensaio .....	84
Tabela 5-1 – Influência do tempo de cura na classificação do solo .....	92
Tabela 5-2 – Composição química dos principais minerais identificados nas amostras.....	107
Tabela 5-3 – Principais minerais presentes nas amostras analisadas - fracção total e fracção argila.....	108
Tabela 5-4 – Principais elementos químicos identificados nas amostras.....	112
Tabela 5-5 – Resultados dos ensaios de compactação do solo puro e das misturas solo – cal CH-I e CH-III para 4%, 6% e 10% de cal .....	119
Tabela 5-6 – Resultados oriundos do ensaio de compactação de misturas solo - fibra .....	124
Tabela 5-7 - Parâmetros característicos das amostras selecionadas para análise de módulo de resiliência – condição inicial .....	200
Tabela 5-8 – Constantes experimentais das amostras calculadas para análise dos modelos clássicos de Módulo de Resiliência, tensão confinante e tensão desvio .....	201

Tabela 5-9 – Constantes experimentais das amostras calculadas para análise dos modelos clássicos composto e universal de Módulo de Resiliência das misturas .....	201
Tabela 5-10 – Constantes experimentais das amostras calculadas para os modelos mais representativos das misturas .....	203
Tabela 5-11 – Discrepância calculada a partir dos corpos de prova dos modelos de Módulo de Resiliência das misturas .....	208



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 - Matriz causa e efeito para análise do problema .....	3
Figura 1-2 - Regiões com má qualidade do pavimento. Fonte (CNT, 2019).....	5
Figura 1-3 - <i>Ranking</i> mundial, primeiros 10 países produtores de carne de frango. Fonte: ABPA (2018).....	7
Figura 1-4 - <i>Ranking</i> local, primeiros 10 estados produtores de carne de frango. Fonte: ABPA (2018) .....	7
Figura 2-1 – Designação genética das camadas dos solos nos solos tropicais. Fonte: Villibor <i>et al.</i> , (2009).....	11
Figura 3-1 – Estrutura geral da cisteína .....	38
Figura 3-2 – Curvas de penetração de carga, solo reforçado com diferentes fibras. Fonte: Modificado Mathew e Ramesan, (2016).....	44
Figura 3-3 – Relação de variação de valores de CBR. Fonte: modificado Shukla <i>et al.</i> (2015) .....	47
Figura 3-4 – Resultados RCS. Fonte: modificado Pillai e Ramanathan (2012).....	48
Figura 4-1 – Localização da coleta de amostras de solo. Fonte: Google .....	53
Figura 4-2 – Influência do teor de cal no pH do solo.....	55
Figura 4-3 - Processo de preparação das fibras.....	56
Figura 4-4 – Estrutura da pena, <b>a</b> ) estrutura “A” pena completa, “B” barbas e “C” bárbulas. Fonte: adaptado Gallardo <i>et al.</i> , (2015); <b>b</b> ) Distribuição da pena para ensaios .....	57
Figura 4-5 - Condições de cura: <b>(a)</b> câmara climatizada; <b>(b)</b> campo.....	58
Figura 4-6 - Localização das valas de cura. Fonte: Google .....	59
Figura 4-7 – Relação dos ensaios e as combinações avaliadas .....	60
Figura 4-8 – Etapas dos ensaios propostos.....	60
Figura 4-9 – Precipitações e temperaturas máximas e médias no cenário de estudo, ensaio mini CBR. Fonte: INMET, (2018) .....	61
Figura 4-10 – Precipitações e temperaturas máximas e médias no cenário de estudo, ensaios RCS e RTCD. Fonte: INMET, (2019) .....	62
Figura 4-11 - Etapa 1: Ensaios de caracterização do solo, cal e penas .....	62
Figura 4-12 - Relação de ensaios de granulometria .....	63
Figura 4-13 - Preparação dos corpos de prova, curva de retenção de água .....	67
Figura 4-14 – Teor de umidade e umidade recuperada da pena. Fonte: modificado Tesfaye <i>et al.</i> , (2017b).....	70

Figura 4-15 – Relação da pressão dos poros e adsorção da barba e raque. Fonte: modificado Tesfaye <i>et al.</i> , (2017b).....	70
Figura 4-16 – Programa de ensaios .....	75
Figura 4-17 – Disposição dos CPs enterrados em campo .....	77
Figura 4-18 – Recuperação dos corpos de prova. (a) desenterrado; (b) ruptura devido à estrutura fragilizada.....	77
Figura 4-19 – Determinação da sucção: (a) preparação; (b) condição de armazenamento.....	78
Figura 4-20 – Corpos de prova RCS – planejamento de ensaios, tempo e métodos de cura...	80
Figura 4-21 – Resistência à compressão simples: montagem do ensaio durante (a) e após (b) ruptura .....	80
Figura 4-22 – Montagem do ensaio de resistência à tração por compressão diametral: (a) antes da ruptura; (b) após ruptura.....	81
Figura 4-23 – Esquema de montagem do equipamento de cargas repetidas. Fonte: modificado DNIT – 134/2018 (DNIT, 2018b).....	83
Figura 4-24 - Etapa 4: Desenvolvimento das análises individuais e comparativas .....	85
Figura 5-1 – Influência do tempo de cura na granulometria do solo - cal CH-I (a) imediato; (b) um ano de cura .....	87
Figura 5-2: Influência do tempo de cura na granulometria das misturas solo-cal CH-III: (a) imediato; (b) um ano de cura.....	88
Figura 5-3 – Influência do tempo e método de cura na densidade real dos grãos: (a) cal CH-I; (b) cal CH-III.....	90
Figura 5-4 – Influência da cal na consistência do solo ao longo do tempo: (a) cal tipo CH-I; (b) cal tipo CH-III .....	91
Figura 5-5 – Curva característica em função da umidade. (a) cal tipo CH- I (b) fibras pena completa .....	94
Figura 5-6 – Influência da fibra nas curvas cracterísticas de retenção de água (a) solo e misturas solo-cal-fibra (b) solo e misturas solo-cal, solo-fibra e solo-cal-fibra.....	94
Figura 5-7 – Influência da cal (a) e da fibra pena completa (b) na curva característica de retenção de água.....	95
Figura 5-8 – Influência da cal-fibra (a) e cal, fibra, cal-fibra (b) na curva característica de retenção de água do solo (Sr%).....	96
Figura 5-9 – Influência da sucção em pF no índice de vazios: (a) misturas com adição de cal (b) misturas com adição de fibra e fibra e cal .....	97

Figura 5-10 – Variação temporal do índice de vazios solo - puro .....	98
Figura 5-11 – Influência da cal nos índice de vazios: (a) cal 4% (b) cal 6% .....	100
Figura 5-12 - Variação do índice de vazios em função da umidade e repouso: (a) cal 10% (b) fibra em misturas solo - cal 4% - fibra 0,25% .....	101
Figura 5-13 – Influência da fibra no índice de vazios nos estágios: (a) solo-fibra 0,25% (b) solo fibra 0,50% .....	102
Figura 5-14 – Detalhe da estrutura: (a) detalhe externo, aumento 67x; (b) detalhe interno, aumento 81x .....	103
Figura 5-15 – Detalhe das fibras: (a) fibras terciárias, aumento 885x; (b) corte das fibras secundárias, aumento 365x .....	103
Figura 5-16 – Comprimento médio da pena, raque de um frango. Fonte: modificado Tesfaye <i>et al.</i> , (2017b) .....	104
Figura 5-17 – Curva característica de retenção de água da pena .....	105
Figura 5-18 – Influência da fibra pena na sucção do solo .....	106
Figura 5-19 – DRX solo puro (a) estado inicial e (b) estado final .....	109
Figura 5-20 – Picos de minerais identificados nas amostras de solo-cal 6% (a) estado inicial e (b) estado final .....	110
Figura 5-21 – Picos de minerais identificados nas amostras de solo-fibra (a) estado inicial e (b) estado final .....	110
Figura 5-22 – Picos de minerais identificados nas amostras de solo-cal-fibra (a) estado inicial e (b) estado final .....	111
Figura 5-23 – Fenômeno de solvatação da molécula da gipsita .....	113
Figura 5-24 – Influência temporal da cal no pH do solo: (a) cal CH-I; (b) cal CH-III .....	114
Figura 5-25 – Microscopia eletrônica de varredura do solo puro: (a) estado inicial (5000x); (b) estado final (5000x) .....	115
Figura 5-26 – Solo - cal 4%: (a) estado inicial 3000x; (b) estado final 3000x .....	115
Figura 5-27 – Mistura solo 0,25% de fibra: (a) estado inicial, 200x; (b) estado final, 200x .	116
Figura 5-28 – Detalhe da degradação da pena (0,25%) no solo: (a) estado inicial, 3000x; (b) estado final, 3000x .....	116
Figura 5-29 – Estado de degradação pena-solo-cal (a) estado inicial 3000x, (b) estado final 3000x .....	117
Figura 5-30 – Estado de degradação da pena em meios alcalinos: (a) estado inicial 5000x; (b) estado final 5000x .....	117

Figura 5-31 – Curva de compactação do solo puro: (a) em função do peso específico aparente seco; (b) em função do índice de vazios .....	118
Figura 5-32 – Influência da cal nas curvas de compactação do solo: (a) cal tipo CH-I; (b) cal tipo CH-III.....	121
Figura 5-33 – Influência da cal no índice de vazios do solo. (a) cal tipo CH-I; (b) cal tipo CH-III.....	121
Figura 5-34 – Influência do teor de 0,25% de pena na curva de compactação do solo: (a) peso específico aparente seco; (b) índice de vazios .....	122
Figura 5-35 – Influência do teor de 0,50% de pena na curva de compactação do solo: (a) peso específico aparente seco; (b) índice de vazios .....	123
Figura 5-36 – Influência do teor de 0,75% de pena na curva de compactação do solo: (a) peso específico aparente seco; (b) índice de vazios .....	123
Figura 5-37 – Influência de 0,25% de fibra em misturas solo-cal 4% <b>(a)</b> cal tipo CH-I; <b>(b)</b> cal tipo CH-III.....	125
Figura 5-38 – Influência de 0,25% de fibra no índice de vazios de misturas solo-cal 4%: <b>(a)</b> cal tipo CH-I; <b>(b)</b> cal tipo CH-III.....	125
Figura 5-39 – Influência de 0,25% de fibra na compactação de misturas solo-cal 6%: <b>(a)</b> cal tipo CH-I; <b>(b)</b> cal tipo CH-III.....	126
Figura 5-40 – Influência de 0,25% de fibra no índice de vazios de compactação de misturas solo-cal 6%: <b>(a)</b> cal tipo CH-I; <b>(b)</b> cal tipo CH-III .....	126
Figura 5-41 – Influência de 0,25% de fibras na compactação de misturas solo-cal 10%: <b>(a)</b> cal tipo CH-I; <b>(b)</b> cal tipo CH-III.....	128
Figura 5-42 – Influência de 0,25% de fibra no índice de vazios de compactação de misturas solo-cal 10%: <b>(a)</b> cal tipo CH-I; <b>(b)</b> cal tipo CH-III .....	128
Figura 5-43 – Resultados dos ensaios de compactação ds misturas solo – cal – 0,25% fibra .....	129
Figura 5-44 – Índices de vazios e grau de saturação dos pontos ótimos das curvas de compactação das misturas solo – cal – 0,25% fibra.....	129
Figura 5-45 – Resultados dos ensaios de compactação das misturas solo - cal e solo – cal – 0,50% fibra.....	130
Figura 5-46 – Índices de vazios e grau de saturação dos pontos ótimos das misturas solo – cal e solo – cal – 0,50% fibra.....	131

Figura 5-47 – Resultados dos ensaio de compactação para as misturas solo – cal e solo – cal – 0,75% fibra .....	132
Figura 5-48 – Índices de vazios e grau de saturação pontos ótimos das curvas de compactação das misturas solo – cal e solo – cal – 0,75% fibra.....	133
Figura 5-49 – Sucção após cura por um ano em campo em relação às curvas características: (a) solo – fibra; (b) solo – cal; (c) solo cal – fibra; solo – fibra, solo – cal e solo - cal – fibra ...	137
Figura 5-50 - Figura 5 51 - Relações entre os índices de vazios de compactação e após um ano de cura: (a) solo – fibras; (b) solo – cal; (c) solo – cal CH-I – fibras; (d) solo – cal CH-III – fibras.....	138
Figura 5-51 - Relação entre os índices de vazios de compactação e após um ano de cura para as misturas solo – fibras, solo – cal, solo – cal CH-I – fibras e solo – cal CH-III - fibras .....	139
Figura 5-52 – Influência do peso específico aparente seco no mini CBR solo puro .....	142
Figura 5-53 - Influência da umidade no mini CBR do solo .....	142
Figura 5-54 - Variação do mini CBR inicial e final de misturas solo - fibra.....	143
Figura 5-55 – Mini CBR das misturas solo-fibra em função: (a) do índice de vazios; (b) da umidade; (c) da sucção; (d) de pF/e .....	145
Figura 5-56 – Mini CBR das misturas solo-fibra em função: (a) do índice de vazios; (b) da umidade; (c) da sucção; (d) de pF/e .....	146
Figura 5-57 - Variação do mini CBR inicial e final nas misturas solo - cal .....	147
Figura 5-58 – Mini CBR em função: (a) do índice de vazios; (b) da umidade; (c) da sucção; (d) de pF/e.....	148
Figura 5-59 – Mini CBR inicial (in) e final (fin) de misturas solo – cal 4% – fibras raque (R), barba (B) e pena completa (PC) .....	149
Figura 5-60 - Mini CBR inicial (in) e final (fin) de misturas solo – cal 6% – fibras raque (R), barba (B) e pena completa (PC) .....	150
Figura 5-61 - Mini CBR inicial (in) e final (fin) de misturas solo – cal 10% – fibras raque (R), barba (B) e pena completa (PC) .....	150
Figura 5-62 – Influência da fibra barba no peso específico aparente seco e mini CBR de misturas solo - cal CH-I – fibra barba.....	152
Figura 5-63 – Influência da fibra barba no peso específico aparente seco e no mini CBR de misturas solo -cal CH-III fibra barba .....	152
Figura 5-64 – Influência da raque no peso específico aparente seco e no valores de mini CBR de misturas solo - cal CH-I – fibra raque .....	153

Figura 5-65 – Influência da raque no peso específico aparente seco e no valores de mini CBR de misturas solo - cal CH-III – fibra raque.....	153
Figura 5-66 – Influência da pena completa no peso específico aparente seco e nos valores de mini CBR de misturas solo - cal CH-I – fibra pena completa.....	154
Figura 5-67 – Influência da pena completa no peso específico aparente seco e nos valores de mini CBR de misturas solo - cal CH-III – fibra pena completa.....	154
Figura 5-68 – Influência barba na umidade ótima de compactação, na umidade após um ano de cura e nos valores de mini CBR de misturas solo- cal CH-I - fibra barba.....	155
Figura 5-69 – Influência barba na umidade ótima de compactação, na umidade após um ano de cura e nos valores de mini CBR de misturas solo- cal CH-III - fibra barba .....	155
Figura 5-70 – Influência da raque na umidade ótima de compactação, na umidade após um ano de cura e nos valores de mini CBR de misturas solo- cal CH-I - fibra raque .....	156
Figura 5-71 – Influência da raque na umidade ótima de compactação, na umidade após um ano de cura e nos valores de mini CBR de misturas solo- cal CH-III - fibra raque.....	156
Figura 5-72 – Influência da penas completa na umidade ótima de compactação, na umidade após um ano de cura e nos valores de mini CBR de misturas solo- cal CH-I - fibra pena completa .....	157
Figura 5-73 – Influência da penas completa na umidade ótima de compactação, na umidade após um ano de cura e nos valores de mini CBR de misturas solo - cal CH-III - fibra pena completa .....	157
Figura 5-74 – Resultados de mini CBR em função de pF/e obtidos para a fibra pena completa em misturas contendo 4% (a), 6% (b) e 10% (c) de cal CH-I e CH-III.....	158
Figura 5-75 – Resultados de mini CBR em função de pF/e obtidos para as fibras barba (a), raque (b) e pena completa (c) em misturas contendo 10% de cal CH-I e CH-III.....	159
Figura 5-76 – Resultados de mini CBR em função de pF/e obtidos para as fibras barba, raque e pena completa nas misturas com as cales CH-I (a) e CH-III (b).....	160
Figura 5-77 - Curvas de resistência à compressão simples do solo puro.....	161
Figura 5-78 - Índice da variação de RCS por tempo e método de cura em misturas de solo fibra .....	162
Figura 5-79 - Influência do tempo e tipo de cura na RCS da pena completa.....	164
Figura 5-80 - Influência do tipo de fibra na RCS.....	165
Figura 5-81 - Índice da variação de RCS por tempo e método de cura em misturas de solo cal .....	165

Figura 5-82 - Influência da Cal CH-I na RCS.....	167
Figura 5-83 - Variação de RCS por tempo e método de cura em misturas de solo cal 4% fibra .....	168
Figura 5-84 - Variação de RCS por tempo e método de cura em misturas de solo cal 6% fibra .....	168
Figura 5-85 - Variação de RCS por tempo e método de cura em misturas de solo cal 10% fibra .....	169
Figura 5-86 - RCS das misturas solo – pena completa – 4 % de cal CH-I .....	170
Figura 5-87 - RCS em função da umidade e de pF/e para as misturas solo-fibra-cal .....	171
Figura 5-88 – Módulo tangente em função do teor de umidade (a) e de pF/e (b).....	173
Figura 5-89 – Módulo tangente em função de pF/e considerando-se a adição de 4% (a), 6% (b) e 10% de cal (c) às misturas solo- fibras .....	174
Figura 5-90 – Curvas de resistência à tração por compressão diametral do solo puro .....	175
Figura 5-91 – Variação da RTCD misturas de solo – fibra.....	176
Figura 5-92 - RTCD das misturas solo – fibra pena completa.....	177
Figura 5-93 - RTCD em função do teor de umidade e de pF/e para as misturas solo-fibra...	178
Figura 5-94 - Influência do teor de fibras na RTCD .....	179
Figura 5-95 - RTCD em função do teor de umidade e de pF/e para as misturas solo-fibra...	179
Figura 5-96 - Variação da RTCD misturas de solo – cal .....	180
Figura 5-97 - RTCD para misturas solo – cal .....	181
Figura 5-98 - Variação da RTCD de misturas solo – cal (4%) – fibras raque (R), barba (B) e pena completa (PC) .....	182
Figura 5-99 - RTCD para misturas solo – cal 4% – fibra pena completa .....	183
Figura 5-100 - RTCD para misturas solo – cal (4%, 6% e 10%) – fibra pena completa. ....	184
Figura 5-101 - RTCD em função de pF/e para as misturas solo – cal – fibras .....	186
Figura 5-102 - Corpos de prova solo – cal CH-I 4% após ruptura por compressão diametral: (a) 1 dia e (b) 60 dias de cura .....	188
Figura 5-103 - Ruptura por compressão diametral após trinta dias de cura em laboratório de corpos de prova compostos por misturas solo - fibra: (a) solo - barba e (b) solo - raque .....	189
Figura 5-104 – Influência da deformação na RTCD de misturas solo – 0,25% fibra.....	190
Figura 5-105 - Influência do teor (a) e (b) e do tipo de fibra (c) e (d) na RTCD.....	191
Figura 5-106 - RTCD residual em função de pF/e: (a) em função do teor de cal CH-I; (b) em função do tipo de cura .....	192

Figura 5-107 – Relação e.pF x Grau de saturação (%) .....	193
Figura 5-108 – análise (e.pF – pF.%cal/100) x Grau de saturação (%) .....	194
Figura 5-109 – RTCD x $pF \cdot (1 + \%F/10) \cdot (1 + \%cal/100) / (e \cdot w)$ .....	195
Figura 5-110 – Estimativa da RCTD sob influência do teor de fibras (a) .....	196
Figura 5-111 – Estimativa da RCTD sob influência do teor de cal (b).....	197
Figura 5-112 – Estimativa da RCTD sob influência da sucção (c).....	197
Figura 5-113 – Estimativa da RCTD sob influência do índice de vazios (d).....	198
Figura 5-114 – Estimativa da RCTD sob influência do teor de umidade (e).....	198
Figura 5-115 – Estimativa da RCTD sob influência do grau de saturação (f).....	199
Figura 5-116 – Dispersão de pontos na modelo universal do módulo de resiliência do solo puro .....	203
Figura 5-117 – Dispersão de pontos tensões aplicadas ensaio triaxial dinâmico solo - 0,25% pena completa.....	204
Figura 5-118 – Dispersão de pontos tensões aplicadas ensaio triaxial dinâmico solo – 4% cal .....	205
Figura 5-119 – Dispersão de pontos tensões aplicadas ensaio triaxial dinâmico solo – 4% cal – 0,25% pena completa .....	205
Figura 5-120 – Influência da tensão desvio na variação do Módulo de Resiliência do solo puro .....	206
Figura 5-121 – Influência da tensão confinante na variação do Módulo de Resiliência do solo puro.....	207
Figura 5-122 – Influência da tensão desvio no MR misturas solo fibra e solo fibra cal .....	209
Figura 5-123 – Influência da tensão desvio no MR misturas solos – cal.....	210
Figura 5-124 – Influência da tensão desvio no MR misturas de solo – cal 4% .....	210
Figura 5-125 - Variação do módulo de resiliência em função do teor de fibras pena completa (PC) e do tempos e métodos de cura de misturas solo - fibra .....	212
Figura 5-126 - Resultados de módulo de resiliência obtidos para misturas solo - cal .....	212
Figura 5-127 - Resultados de módulo de resiliência obtidos para misturas solo – fibra - cal .....	213
Figura 5-128 - Variação de módulo de resiliência em relação à variações da tensão desvio/pressão atmosférica de misturas solo – cal 4%.....	214
Figura 5-129 - Variação de módulo de resiliência em relação à variações da tensão desvio/pressão atmosférica de misturas solo – cal 4%.....	215



Figura 5-130 – Módulo de resiliência em função do índice de vazios (a), da umidade (b), da sucção (c) e de pF/e (d) para misturas solo – fibra pena completa (PC) e solo puro .....	216
Figura 5-131 – Módulo de resiliência em função do índice de vazios (a), da umidade (b), da sucção (c) e de pF/e (d) para misturas solo - cal e solo puro .....	218
Figura 5-132 – Módulo de resiliência em função do índice de vazios (a), da umidade (b), da sucção (c) e de pF/e (d) para misturas solo - cal e solo puro .....	220
Figura 5-133 – Deformações permanentes devido a cargas aplicadas no MR misturas solo fibra e solo fibra cal .....	221
Figura 5-134 – Deformações permanentes devido a cargas aplicadas no MR misturas de solo – cal .....	222
Figura A-1 – Influência de 0,50% de fibras em misturas solo-cal 4%. <b>(a)</b> cal tipo CH-I; <b>(b)</b> cal tipo CH-III.....	243
Figura A-2 – Influência de 0,50% de fibra no índice de vazios de misturas solo-cal 4% <b>(a)</b> cal tipo CH-I; <b>(b)</b> cal tipo CH-III.....	243
Figura A-3 – Influência de 0,50% de fibras em misturas solo-cal 6%. <b>(a)</b> cal tipo CH-I; <b>(b)</b> cal tipo CH-III.....	244
Figura A-4 – Influência de 0,50% de fibra no índice de vazios de misturas solo-cal 6% <b>(a)</b> cal tipo CH-I; <b>(b)</b> cal tipo CH-III.....	244
Figura A-5 – Influência de 0,50% de fibras em misturas solo-cal 10%. <b>(a)</b> cal tipo CH-I; <b>(b)</b> cal tipo CH-III.....	245
Figura A-6 – Influência de 0,50% de fibra no índice de vazios de misturas solo-cal 10% <b>(a)</b> cal tipo CH-I; <b>(b)</b> cal tipo CH-III.....	245
Figura B-1 – Influência de 0,75% de fibras em misturas solo-cal 4%. <b>(a)</b> cal tipo CH-I; <b>(b)</b> cal tipo CH-III.....	246
Figura B-2 – Influência de 0,75% de fibra no índice de vazios de misturas solo-cal 4% <b>(a)</b> cal tipo CH-I; <b>(b)</b> cal tipo CH-III.....	246
Figura B-3 – Influência de 0,75% de fibras em misturas solo-cal 6%. <b>(a)</b> cal tipo CH-I; <b>(b)</b> cal tipo CH-III.....	247
Figura B-4 – Influência de 0,75% de fibra no índice de vazios de misturas solo-cal 6% <b>(a)</b> cal tipo CH-I; <b>(b)</b> cal tipo CH-III.....	247
Figura B -5 – Influência de 0,75% de fibras em misturas solo-cal 10%. <b>(a)</b> cal tipo CH-I; <b>(b)</b> cal tipo CH-III .....	248

Figura B-6 – Influência de 0,75% de fibra no índice de vazios de misturas solo-cal 10% (a) cal tipo CH-I; (b) cal tipo CH-III.....	248
Figura C-1 – Resultados de mini CBR em função de pF/e obtidos para a fibra raque em misturas contendo 4% (a), 6% (b) e 10% (c) de cal CH-I e CH-III.....	249
Figura C-2 – Resultados de mini CBR em função de pF/e obtidos para a fibra barba e em misturas contendo 4% (a), 6% (b) e 10% (c) de cal CH-I e CH-III.....	250
Figura D-1 – Curvas de compressão RCS misturas solo fibra – cura em laboratório.....	251
Figura D-2 - Curvas de compressão RCS misturas solo fibra – cura em campo.....	251
Figura D-3 - Influência do tempo e tipo de cura na RCS da raque.....	252
Figura D-4 - Influência do tempo e tipo de cura na RCS da barba.....	253
Figura E-1 - RCS das misturas solo – barba – 4 % de cal CH-I.....	254
Figura E-2 - RCS das misturas solo – raque – 4 % de cal CH-I.....	255
Figura E-3 - RCS das misturas solo – pena completa – 6 % de cal CH-I.....	256
Figura E-4 - RCS das misturas solo – barba – 6 % de cal CH-I.....	257
Figura E-5 - RCS das misturas solo – raque – 6 % de cal CH-I.....	258
Figura E-6 - RCS das misturas solo – pena completa – 10 % de cal CH-I.....	259
Figura E-7 - RCS das misturas solo – barba – 10 % de cal CH-I.....	260
Figura E-8 - RCS das misturas solo – raque – 10 % de cal CH-I.....	261
Figura F-1 - RTCD das misturas solo – fibra barba.....	262
Figura F-2 - RTCD das misturas solo – fibra raque.....	263
Figura F-3 - Variação da RTCD em 4 tempos e 2 métodos de cura de misturas solo fibra 6%.....	264
Figura F-4 - Influência da umidade na RTCD em 4 tempos e 2 métodos de cura de misturas solo fibra cal 10%.....	264
Figura G-1 - Influência da umidade, índice de vazios, sucção e pF/e na RTCD misturas de solo 4% cal fibra barba.....	265
Figura G-2 - Influência da umidade, índice de vazios, sucção e pF/e na RTCD misturas de solo 4% cal fibra raque.....	266
Figura G-3 - Influência da umidade, índice de vazios, sucção e pF/e na RTCD misturas de solo 6% cal fibra pena completa.....	267
Figura G-4 - Influência da umidade, índice de vazios, sucção e pF/e na RTCD misturas de solo 6% cal fibra barba.....	268

Figura G-5 - Influência da umidade, índice de vazios, sucção e pF/e na RTCD misturas de solo 6% cal fibra raque .....	269
Figura G-6 - Influência da umidade, índice de vazios, sucção e pF/e na RTCD misturas de solo 10% cal fibra pena completa .....	270
Figura G-7 - Influência da umidade, índice de vazios, sucção e pF/e na RTCD misturas de solo 10% cal fibra barba .....	271
Figura G-8 - Influência da umidade, índice de vazios, sucção e pF/e na RTCD misturas de solo 10% cal fibra raque .....	272

## LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

<b>AASHTO</b>	<i>Americam Agency State Highwar and Transport Operation</i>
<b>SUCS</b>	Sistema Classificado de solos
<b>SP</b>	Solo Puro
<b>4I</b>	Solo-cal tipo CH-I 4%
<b>6I</b>	Solo-cal tipo CH-I 6%
<b>10I</b>	Solo-cal tipo CH-I 10%
<b>25PC</b>	Solo pena completa 0,25%
<b>50PC</b>	Solo pena completa 0,50%
<b>4I25PC</b>	Solo-cal tipo CH-I - pena completa 0,25%
$\omega_p$	limite de plasticidade
$\omega_l$	limite de liquidez
<b>IP</b>	ndice de plasticidade

# 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma breve introdução sobre o tema seguida dos objetivos da pesquisa e da estrutura da tese.

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com a revolução industrial, o homem teve acesso a uma melhor qualidade de vida. O desenvolvimento industrial, embora tenha aspectos positivos, pode gerar impactos negativos no meio ambiente. Geralmente, os níveis de contaminação crescem com tal desenvolvimento, afetando os recursos naturais e a existência do homem. O elevado consumo gera resíduos artificiais e/ou naturais que causam problemas de contaminação dos solos, ar e água. Destaca-se que parte destes resíduos provêm da indústria alimentícia.

A indústria de avicultura, subárea da indústria alimentícia, gera resíduos sólidos, efluentes e odores, sendo que a forma de disposição destes resíduos pode gerar importantes impactos no meio ambiente. Parte destes resíduos gerados antes do abate são, geralmente, reutilizados como adubo (Nascimento, 2011). No entanto, os resíduos posteriores ao abate das aves, como penas, sangue e vísceras, precisam de maior cuidado e investimento para evitar a contaminação ambiental.

Ao mesmo tempo, tem-se que o desenvolvimento regional leva à geração de polos de tráfego ampliando-se o transporte de carga e de passageiros por meio do fluxo veicular. Desta forma, as demandas de tráfego e a evolução do transporte, principalmente do modal rodoviário, levam à necessidade de se contar com rodovias de qualidade.

A construção das rodovias geralmente implica em grande movimentação de solos para a conformação da estrutura de pavimento. Quando os projetos são realizados em regiões carentes de material adequado, o custo de transporte encarece a construção da rodovia, levando muitas vezes à situação de isolamento de cidades mais afastadas, negando-se assim a sua integração com os centros econômicos.

Geralmente, são utilizados na construção rodoviária materiais de áreas próximas ao local de construção de modo a reduzir os custos com transporte, no entanto, quando inexitem materiais

apropriados faz-se necessário o uso de técnicas de melhoria dos materiais existentes para incremento da resistência e redução da deformabilidade de modo a diminuir a espessura das camadas do pavimento sem que se afete a vida útil de projeto.

Uma técnica recente, com antecedentes históricos, vem despertando interesse no campo da Geotecnia, a utilização de fibras naturais como reforço e melhoria de solos com baixo desempenho mecânico. Essas fibras naturais podem ser de origem animal e vegetal, sendo que as fibras naturais de origem animal ainda são pouco estudadas e reconhecidas como material de reforço embora se vislumbre o seu potencial de melhoria do comportamento mecânico dos solos.

Desta forma, mediante a reutilização dos resíduos da indústria avícola como reforço de solos de baixa resistência, pretende-se melhorar as características mecânicas destes solos, possibilitando a construção de rodovias econômicas e mais sustentáveis. De igual forma, visa-se a mitigação dos impactos ambientais gerados no processo de abate de frangos.

## **1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA**

Geralmente as fibras atuam no comportamento mecânico dos solos ampliando a resistência, em especial a resistência à tração. Como elas ampliam a resistência elas são passíveis de atuarem negativamente no processo de compactação reduzindo o peso específico aparente seco para uma mesma energia de compactação e tendo quase sempre por consequência uma ampliação do teor de umidade ótimo.

No presente estudo por meio da adição de fibras naturais ao solo se pretende melhorar o seu comportamento mecânico. A relevância maior da utilização das fibras como material de reforço está na absorção dos esforços de tração gerados na parte inferior das camadas que compõem a estrutura de pavimento.

As fibras, por se tratar de materiais orgânicos, tendem a sofrerem uma biodegradação natural. Este fenômeno esperado causaria variações de comportamento mecânico das misturas solo-fibra ao longo do tempo requerendo compatibilizar o seu uso com a previsão de durabilidade da via.

No presente estudo onde será analisada a influência da fibra pena de frango na melhoria do comportamento mecânico de um solo laterítico argiloso, surgem então as questões: 1) qual a variação temporal das características físicas e do comportamento mecânico de um solo de baixa resistência quando misturado com fibras naturais obtidas da indústria avícola? 2) qual seria o impacto da incorporação de aditivos químicos como a cal na melhoria do comportamento mecânico das misturas solo – fibras pena de frango? 3) no caso das misturas solo – fibra pena de franco qual seria o impacto deste aditivo químico na durabilidade das fibras?

Para entendimento do problema, foi elaborada uma matriz de causa e efeito apresentada na Figura 1-1, na qual expõe-se os possíveis fatores que condicionam o comportamento mecânico do solo de baixa resistência com adição de penas de frango.

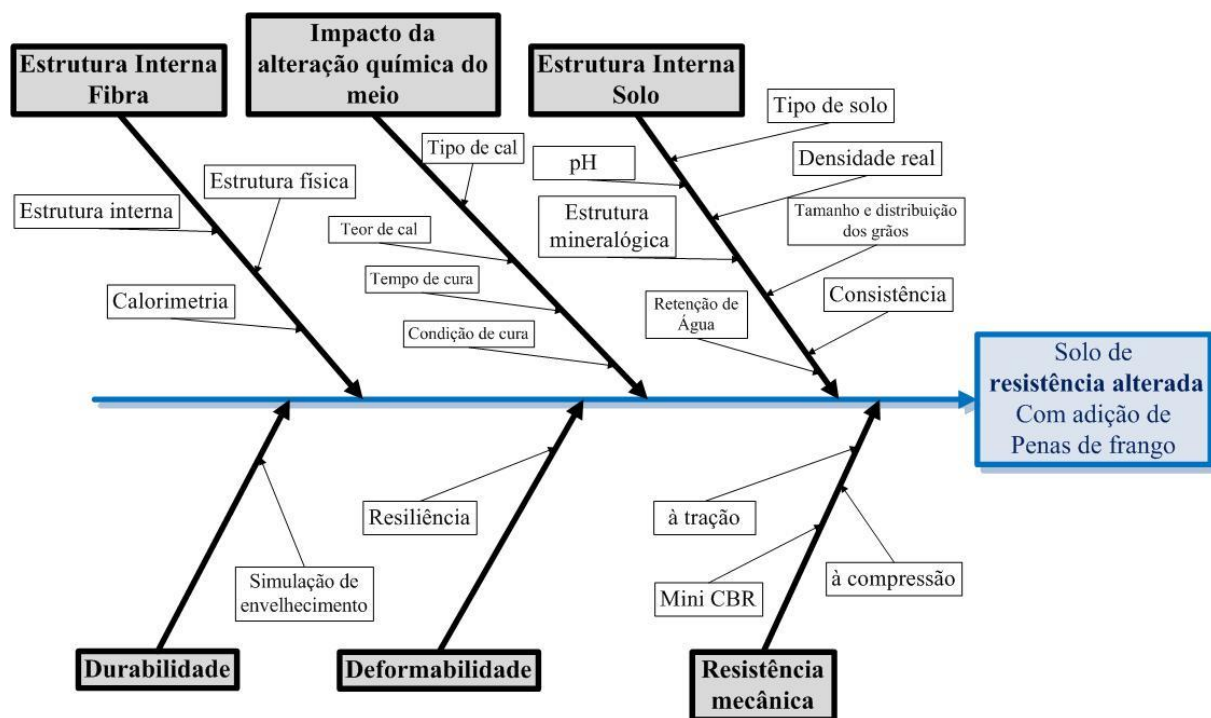


Figura 1-1 - Matriz causa e efeito para análise do problema

*Estrutura interna do solo e das fibras* – O conhecimento das estruturas internas das fibras e do solo possibilita um melhor entendimento do comportamento da mistura.

As características dos solos e das misturas solo - fibras e solo – fibras – cal a serem estudadas são: a estrutura física, química e mineralógica. Para entender a sensibilidade da pena a uma mudança do meio para alcalino, será modificado o pH por meio adição de cal hidratada. A

introdução da cal como aditivo a ser estudado se deve a dois fatores: 1) a pena é normalmente sensível a meios alcalinos; 2) a cal é um aditivo que geralmente conduz o meio a alcalino e é comumente usado na estabilização de solos sendo passível de utilização conjunta com as fibras pena.

Na pesquisa foram realizadas além das análises supracitadas avaliações do comportamento mecânico assim como da durabilidade das fibras pena quando comondo o solo e misturas solo - cal colocadas em meio natural.

### **1.3 HIPÓTESE PROPOSTA**

É possível melhorar as características e o comportamento mecânico de um solo de baixa resistência mediante a adição de fibras naturais obtidas da indústria avícola, sendo relevante definir as condições de uso.

### **1.4 OBJETIVOS**

Os objetivos do trabalho estão divididos entre principal ou geral e específicos.

#### **1.4.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral da pesquisa é avaliar, temporalmente, o comportamento mecânico de um solo de baixa resistência mecânica com adição de fibras naturais obtidas da indústria avícola (penas de frango), identificando-se, assim, as condições de uso da fibra e seu impacto como reforço de solos. No estudo foi utilizado um solo tropical argiloso coletado entre 2 a 3 m de profundidade.

#### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Com a execução desta pesquisa, pretende-se atingir os seguintes objetivos específicos:

- a. Verificar a compatibilidade física e química de misturas solo - fibra e solo – fibra – cal quando do uso de um solo tropical argiloso;
- b. Identificar fatores influentes no comportamento mecânico das misturas em função das características físicas das fibras;
- c. Avaliar a influência dos métodos de cura em misturas solo - fibra e solo – fibra - cal;



- d. Avaliar a degradabilidade da fibra pena quando misturada ao solo e ao solo – cal incluindo-se no estudo a exposição às condições ambientais naturais.

## 1.5 JUSTIFICATIVA

Segundo a CNT (2019), o Brasil possui 1.720.700,3 km de rodovias, sendo apenas 12,4% pavimentadas. Dos 213.452,8 km de rodovias pavimentadas, 52,4% apresentam problemas no pavimento.

As regiões com maior percentual de rodovias com problemas relacionados à deterioração de pavimento são o Norte e o Centro-Oeste, com 70% e 57% respectivamente (Figura 1-2). As principais causas de deterioração estão relacionadas à pouca resistência dos materiais e à falta de manutenção, em especial a preventiva, associadas a um crescimento veicular não previsto no projeto executivo (CNT, 2019).

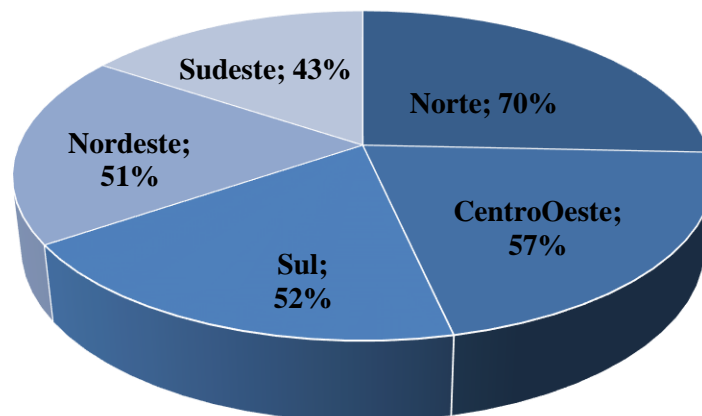


Figura 1-2 - Regiões com má qualidade do pavimento. Fonte (CNT, 2019)

A partir dos dados publicados no Manual de Custos do DNIT (2018a), os custos de construção de rodovias de pistas simples varia entre 1.758.393,79 R\$/km e 2.561.207,73 R\$/km. Os custos de restauração variam entre 478.986,67 R\$/km a 2.034.883,50R\$/km e, no caso das rodovias não pavimentadas, os custos de conservação variam entre 51.828,48 R\$/km a 112.387,01 R\$/km. Em todos os casos, os custos unitários compreendem distâncias de transporte de até 5 km (DNIT, 2003), mas muitas vezes no âmbito destas distâncias só existem materiais com qualidades que não correspondem às necessidades de projeto, passando a ser necessária a melhoria dos materiais existentes por meios físico, químico, ou físico-químico, o que por si só, além da importante relevância ambiental, já justifica o presente estudo.

Cabe destacar que historicamente nos anos 220 a.C., os chineses utilizaram fibras de origem vegetal na construção da Grande Muralha da China e, no século XVI, o Império Inca, famoso pela construção de uma ampla rede rodoviária até hoje existente, também utilizou fibras vegetais trançadas na construção das pontes de ligação entre várias rodovias da malha viária conhecida como “*los caminos del Inca*”. Esta rede de rodovias conectou os atuais, norte colombiano e sul chileno ao longo da cordilheira dos Andes, integrando, assim, as quatro regiões do Império pré-colombiano.

A utilização de fibras de origem animal é mais recente. A indústria aviária gera grandes volumes de resíduos e o processamento destes, visando a redução de impactos ambientais, vem sendo tema constante de inúmeras pesquisas. A grande resistência e a geralmente baixa degradação que tal resíduo apresenta levaram à investigação de novas formas de utilização dele.

Nos anos 220 a.C., os chineses utilizaram fibras de origem vegetal na construção da Grande Muralha da China e, no século XVI, o Império Inca, famoso pela construção de uma ampla rede rodoviária até hoje existente, também utilizou fibras vegetais trançadas na construção das pontes de ligação entre várias rodovias da malha viária conhecida como “*los caminos del Inca*”. Esta rede de rodovias conectou os atuais, norte colombiano e sul chileno ao longo da cordilheira dos Andes, integrando, assim, as quatro regiões do Império pré-colombiano.

A utilização de fibras de origem animal é mais recente. A indústria aviária gera grandes volumes de resíduos e o processamento destes, visando a redução de impactos ambientais, vem sendo tema constante de inúmeras pesquisas. A grande resistência e a difícil degradação que tal resíduo apresenta levaram à investigação de novas formas de reutilização dele.

Segundo os dados da EMBRAPA (2000) e da ABPA (2018), o Brasil é o terceiro maior produtor de carne de frango a nível mundial, com 14.000.000 t/ano, e o maior exportador, com 104.000 t/ano (Figura 1-3).

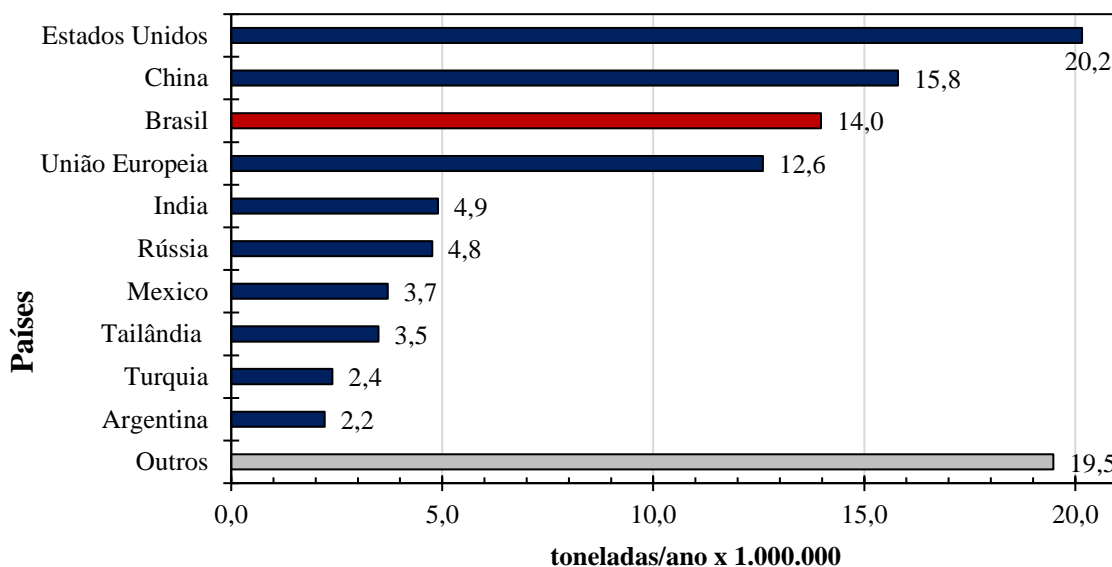


Figura 1-3 - *Ranking* mundial, primeiros 10 países produtores de carne de frango. Fonte: ABPA (2018)

Considerando-se o Brasil, a região com maior produção de carne de frango é a região Sul, sendo o estado do Paraná o que mais produz, com uma produção de 4.300.000 t/ano. No entanto, estados do Centro-Oeste e Norte do país também produzem carne de frango para exportação, confirmando-se, assim, a grande quantidade de resíduos advindos deste insumo no país como um todo. A (Figura 1-4) (ABPA, 2018), apresenta o *ranking* nacional dos dez maiores produtores de carne de frango do país.

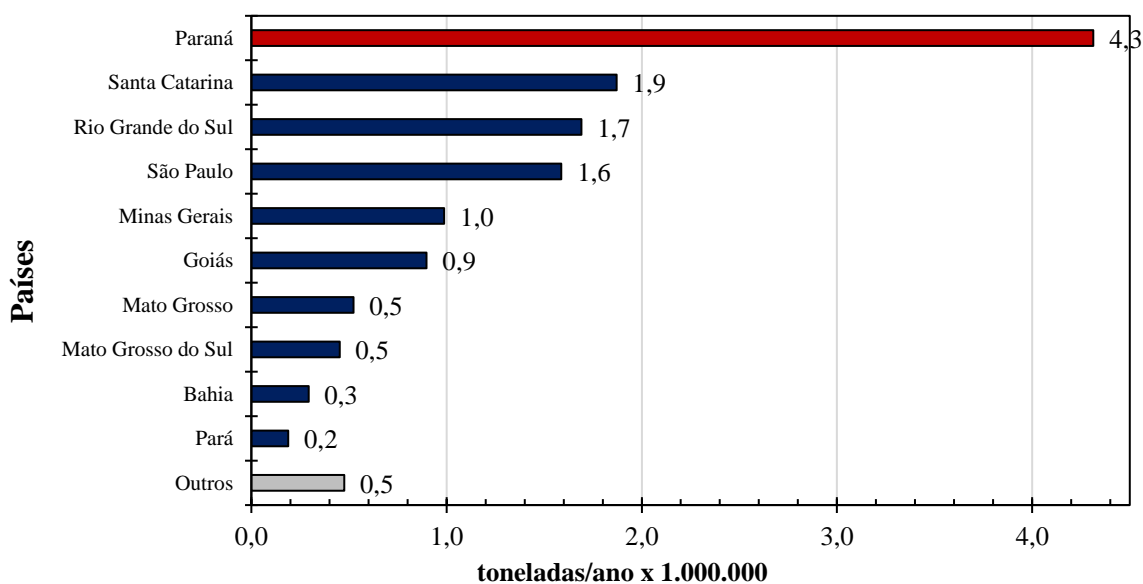


Figura 1-4 - *Ranking* local, primeiros 10 estados produtores de carne de frango. Fonte: ABPA (2018)

As normas brasileiras, conforme indicado no parágrafo seguinte, estabelecem que os resíduos provenientes do abate deverão passar por um processo de transformação ou degradação para evitar a contaminação do meio ambiente, o que por sua vez também amplia a importância do presente estudo.

Algumas leis que tratam sobre o assunto são: a Lei nº 12.300, de 16 de março de 2006, que institui a Política estadual, em São Paulo, de Resíduos Sólidos e define princípios e diretrizes para a gestão dos resíduos sólidos. No seu artigo 14º, esta Lei proíbe o lançamento destes resíduos *in natura* a céu aberto, preconizando que eles devem passar por um tratamento previamente ao descarte. Por sua vez, a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente.

Os resíduos da indústria de cria e abate de frango, quando descartados de modo inapropriado, ocasionam impactos no solo, água e ar, causando doenças e alterações no meio ambiente como expressaram Nascimento (2011), Gedoz (2014), Pinto *et al.* (2015), Carvalho de Oliveira *et al.* (2018) e Vincentini & Oliveira (2019).

Teoricamente, os resíduos gerados a partir do abate de aves de corte deveriam ser processados para evitar a contaminação do meio ambiente. Este processo demanda um custo adicional sobre o produto total.

Um frango pesa, em média, 2,5 a 3 kg, sendo que as penas correspondem a 7% deste peso. Desta forma, a partir da indústria de abate de frango, o Brasil gera, considerando somente as penas das aves, uma média anual de 980.000 toneladas deste resíduo.

Em face do exposto, o uso das penas de frango – provenientes da indústria de abate – como fibras para reforço em solos podem contribuir para melhorar o comportamento mecânico do solo e diminuir a poluição ambiental consequente desta indústria. Além disso, ao se evitar o custo de processamento dos resíduos (penas) se estará a gerar economia no custo de produção de carne de frango. Portanto, o estudo é plenamente justificável e pesquisas como a presente recomendáveis.

## **1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO**

No Capítulo 1, apresenta-se a introdução ao problema, a delimitação dos objetivos do trabalho, a justificativa para o uso potencial da pena de frango como material alternativo de reforço nas camadas do pavimento e a organização da tese;

Na sequência, a referência bibliográfica está organizada em dois capítulos: no Capítulo 2, apresenta-se a revisão bibliográfica sobre o solo de comportamento dos solos tropicais como material componente da estrutura do pavimento e uma análise dos solos estabilizados com cal. No Capítulo 3, é apresentada uma síntese bibliográfica sobre as características e uso potencial das fibras naturais como reforço de solos com fins de pavimentação;

No Capítulo 4, apresentam-se as características de obtenção dos materiais a serem analisados e a descrição da metodologia utilizada para avaliação do comportamento mecânico das combinações de fibra, solo e cal no âmbito desta tese.

No Capítulo 5, são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios para avaliação do comportamento mecânico do solo puro e das misturas solo – fibras; solo – cal e solo – fibras – cal considerando-se diferentes tempos e condições de cura.

Finalmente, no Capítulo 6, são apresentadas as considerações finais e recomendações para futuros trabalhos.

## **2 SOLOS TROPICAIS NA PAVIMENTAÇÃO**

Neste capítulo são analisados conceitos sobre as características físicas, químicas e mineralógicas de solos tropicais, em especial os solos de comportamento laterítico, assim como os resultados da variação das resistências a partir da variação do pH destes solos, mediante a sua estabilização com cal.

### **2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Pavimento é a estrutura construída sobre a terraplenagem cujos objetivos são: resistir aos esforços verticais e horizontais produzidos pelo tráfego, distribuir tais esforços pela espessura total de ação das tensões na estrutura de pavimento incluindo-se o subleito e melhorar as condições de rolamento com intuito de manter o conforto e a segurança.

Dependendo do tipo de pavimento, este é composto por poucas ou por várias camadas de espessuras finitas que se assentam sobre o subleito. O subleito é o terreno de fundação do pavimento, sendo que uma espessura de camada entre 1 m e 1,5 m de profundidade é geralmente considerada como fundação efetiva, embora, com a ampliação do número de eixos dos veículos de carga faz-se necessárias maiores reflexões sobre tal espessura. A resistência do subleito é tomada como uma variável de cálculo no dimensionamento de pavimentos. Nos perfis de intemperismo tropical tal resistência depende no nível de intemperização sofrido pela camada considerada.

A construção de uma estrutura de pavimento exige o conhecimento dos seus materiais componentes, principalmente do solo que estará presente desde as camadas inferiores às superiores geralmente de melhor qualidade em termos de comportamento e desempenho.

Quando as características mecânicas do solo não são aceitáveis como material de construção, há necessidade de melhorá-lo mediante técnicas acessíveis. Uma destas técnicas é a estabilização química, sendo a cal hidratada e o cimento Portland os aditivos mais comumente utilizados.

A estabilização química modifica a estrutura inicial do solo, levando-o a se comportar como material apto para construção de rodovias.

Outra técnica utilizada é a da estabilização física por meio da incorporação de outros materiais como brita, areia, materiais reciclados de construção e demolição (RCD) e fibras, sendo estas últimas mais utilizadas quando se pretende melhorar a resistência à tração dos solos. Sales, (2011) obteve bons resultados na melhoria de resistência à tração quando da incorporação da fibra natural cabelo humano à misturas de um solo tropical laterítico com areia, no entanto, não foram verificados ganhos em relação aos valores de mini CBR, resistência à compressão simples e módulo de resiliência.

## 2.2 OS SOLOS LATERÍTICOS COMO MATERIAL DE PAVIMENTAÇÃO

O Brasil encontra-se localizado entre os trópicos de Câncer e Capricórnio e, assim como outras regiões de clima semelhante, apresenta solos com características peculiares, os solos tropicais.

As condições climatológicas e de intemperismo, características da região compreendida entre os trópicos, não permitem tratar os solos da maneira recomendada por normas internacionais, como por exemplo a *American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO*, que geralmente limita os estados do solo a saturado e seco.

Villibor *et al.*, (2009) indicaram que os solos das regiões tropicais apresentavam uma série de peculiaridades decorrentes das condições ambientais, sendo necessário classificá-los identificando os tipos genéticos encontrados em regiões tropicais. Nesse sentido, Villibor *et al.* (2009) identificaram exemplificando três tipos de solos encontrados em regiões tropicais: os solos lateríticos, os solos saprolíticos e os solos transportados (Figura 2-1).

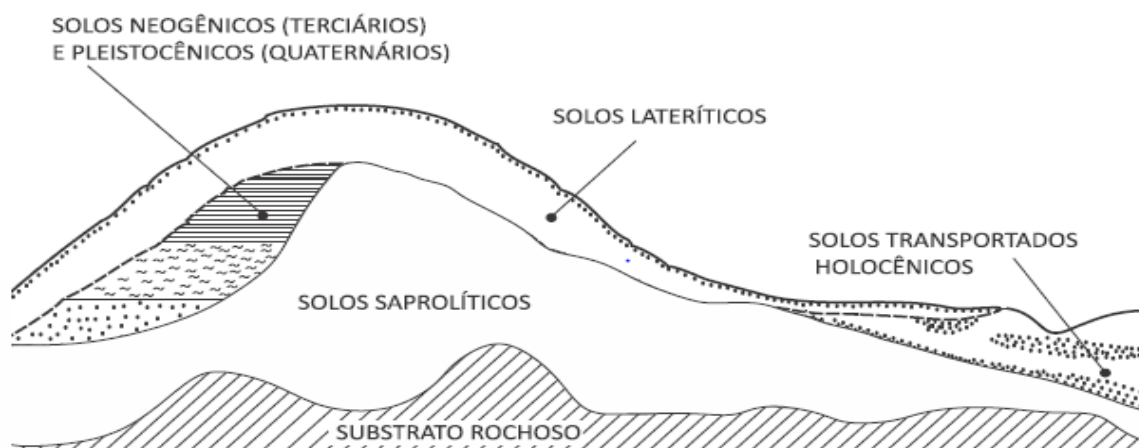


Figura 2-1 – Designação genética das camadas dos solos nos solos tropicais. Fonte: Villibor *et al.*, (2009)

Villibor *et al.* (2009), conceituaram estes solos como materiais naturais não consolidados, constituídos de grãos separáveis por processos mecânicos e hidráulicos, de fácil dispersão em água, e que podem ser escavados com equipamentos comuns de terraplenagem.

Segundo Camapum *et al.* (2015), os solos tropicais não se caracterizam apenas como solos compreendidos entre os trópicos, mas eles têm propriedades físico-químicas e comportamento mecânico diferenciados daquele geralmente considerado na mecânica dos solos tradicional.

Dutra e Vale, (2016) avaliaram a importância de melhor conhecimento dos solos tropicais como materiais de construção de rodovias, destaca a classificação de Villibor *et al.* (2009), no entanto, insta a necessidade de maior atenção a este tipo de solos.

Em síntese, as técnicas tradicionais de classificação de solos geralmente não contemplam as características peculiares dos solos da região tropical produto do intemperismo, em especial os solos profundamente intemperizados. Assim, no estado de São Paulo, desenvolveu-se uma nova metodologia de classificação de solos com fins de pavimentação, a metodologia Miniatura Compactado Tropical – MCT (Nogami e Villibor, 1981, 1995)

### **2.2.1 A METODOLOGIA MINIATURA, COMPACTADO, TROPICAL - MCT**

No início dos anos 80, Nogami e Villibor, (1981) desenvolveram um novo método de classificação de solos baseado no desempenho das rodovias do interior do estado de São Paulo. Atualmente, a metodologia é utilizada em vários estados, aplicada à construção de pavimentos rodoviários de baixo custo. Esta metodologia classifica os solos tropicais em dois grandes grupos: lateríticos e não lateríticos.

Os solos lateríticos são solos superficiais, típicos das partes bem drenadas das regiões tropicais úmidas, resultantes de uma transformação da parte superior do subsolo pela atuação do intemperismo, por processo denominado laterização. Eles provêm dos solos saprolíticos que se originam das rochas.

Os solos saprolíticos são aqueles que resultam da decomposição ou desagregação *in situ* da rocha matriz pela ação das intempéries (chuvas, insolação, geadas) e mantêm, de maneira nítida,



a estrutura da rocha que lhe deu origem, não guardando, no entanto, o seu comportamento hidromecânico.

A partir das características destes tipos de solo, é de interesse particular o entendimento dos solos de comportamento laterítico como material de construção da estrutura de pavimento em rodovias de baixo custo. Faz-se necessário destacar, no entanto, a presença com certa frequência dos solos saprolíticos no subleito rodoviário, em especial em áreas de corte.

Utilizando a nomenclatura tradicional de classificação de solos, este tipo de material está descartado para uso na construção de rodovias. Desta forma, nos anos 70, realizou-se acompanhamentos das rodovias construídas com esses materiais no interior do estado de São Paulo. A partir dos resultados obtidos, no início dos anos 80, Nogami e Villibor (1995) definiram o conceito de pavimentos de baixo custo.

Um pavimento é considerado de baixo custo se: o custo da base for reduzido em 15% a 25% quando comparado ao custo de uma base convencional; a espessura do revestimento betuminoso de tipo tratamento superficial for de até 3 cm e o Volume Médio Diário Anual (VMDA) for, no máximo, de 500 veículos/dia, com 30% a 40% de caminhões e ônibus. Os pavimentos deste tipo são considerados aptos para rodovias vicinais (Nogami e Villibor, 1995).

Anos mais tarde, Villibor e Nogami (2009) apresentaram uma tabela com 14 trechos de rodovias com camadas cujos graus de compactação eram superiores a 95% com energia Proctor modificado, na qual introduziram o termo “N” como parâmetro de análise do comportamento do fluxo veicular além do VMDA. O número N corresponde a um número de solicitações de um eixo padrão de 80 kN.

Recentemente, Villibor e Alves (2019) limitaram a  $N \leq 5 \times 10^6$  como fator determinante para uma rodovia de baixo custo. Definiram, também, um método de projeto de pavimento flexível por meio de relações básicas entre deflexão e desempenho e deflexão e resistência, conhecido como “Método CBR-regionalizado ou método CBR-R”. No entanto, este método não foi oficializado pelos órgãos do setor.

A metodologia adotada para a compactação, considerando a classificação de solos no contexto MCT, denomina-se mini-MCV (*Moisture Condition Value*). Esta metodologia foi proposta inicialmente por Parson, em 1976, e adaptada por Nogami e Villibor, (1981), que alteraram o diâmetro do cilindro de 100 mm para 50 mm.

O processo consiste em submeter um corpo de prova em uma determinada umidade a uma variação de energia de compactação até não haver acréscimo considerável da sua densidade. No processo, obtém-se vários pontos com alturas de corpo de prova diferentes, alcançadas em cada variação de energia. O processo é repetido em 5 corpos de prova variando somente a umidade.

São construídas curvas de deformabilidade para cada corpo de prova. O coeficiente angular denominado “coeficiente  $c'$ ” corresponde à inclinação da curva de deformabilidade do mini-MCV na interseção entre a ordenada correspondente à deformação de 2mm e a abscissa correspondente ao número de golpes igual a 10.

São construídas, também, as curvas de compactação para cada variação de energia e o coeficiente  $d'$  é a inclinação da parte retilínea do ramo seco da curva de compactação obtida para 12 golpes. A partir do parâmetro  $d'$  e da perda de massa por imersão, é calculado o índice de laterização  $e'$ .

Os coeficientes  $c'$  e  $e'$  são parâmetros importantes na classificação dos solos tropicais, sendo que eles estão relacionados com a granulometria e o grau de laterização, respectivamente. A variação de  $c'$  define o tipo de solo: valores entre 0 e 0,7 correspondem a areias, maiores que 0,7 e menores que 1,5 solos arenosos e entre 1,5 e 3,0 solos argilosos. A variação de  $e'$  define a laterização do solo, sendo lateríticos os solos finos com valor de  $e'$  menor que 1,15 e os solos com pouca presença de finos quando o  $e'$  for menor que 1,40.

Assim, os dois grupos de solos tropicais, lateríticos e não lateríticos, estão divididos em: LA – areias lateríticas quartzosa, LA' – solo arenoso laterítico, LG' – argilas lateríticas, NA – areias não lateríticas, NA' – solos arenosos não lateríticos, NS' – solos siltosos não lateríticos e NG' – solos argilosos não lateríticos. Sem dúvidas, o maior avanço da metodologia MCV foi a

implantação do ensaio de compactação mini-Proctor e do mini CBR em solos tropicais, como apresentado em Villibor e Nogami (2009).

Com o desenvolvimento deste método, muitos trabalhos foram desenvolvidos. Cardoso (2010) fez um levantamento geotécnico de várias áreas no Município de Goiânia – GO e, utilizando a metodologia MCT, conseguiu demonstrar o uso potencial dos solos em pavimentação e formar um banco de dados para futuros projetos rodoviários.

No Nordeste, Santana e Bernucci (2016) realizaram um levantamento de solos da Ilha de São Luís e determinaram formas de caracterização e classificação de 20 amostras. De acordo com o método MCT, 4 destes solos foram classificados como lateríticos, sendo dois de uso potencial em rodovias.

Na região Sul, o método também é relevante. Cita-se como exemplo Passos (2000), que estudou 24 tipos de solos obtidos em 12 trechos próximos à BR-285. Segundo classificações tradicionais, eles se enquadram nos grupos CL e A-6 do Sistema de Classificação de Solos Unificado (SUCS) e do sistema *Transport Research Boarding* (TRB) respectivamente. Mediante a classificação MCT, a maioria dos solos foram classificados como LG' e dois como LA. Desta forma, conseguiu-se fazer um levantamento informativo dos tipos de solos predominantes na região e das vantagens do método MCT na caracterização destes solos.

Dutra, (2014) realizou uma compilação teórica de muitas experiências mundiais com sucesso e confirmou a necessidade de organizar melhor o método MCT. Ela destacou os resultados obtidos em várias regiões de clima e solos tropicais.

Assim, percebe-se que várias regiões utilizam o método visando a construção de rodovias com baixo volume de tráfego, deslocando os conceitos tradicionais a segundo plano uma vez que eles não refletem a realidade da região.

### **2.3 CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS DE COMPORTAMENTO LATERÍTICO**

Os solos de comportamento laterítico, segundo Villibor e Alves (2019), são materiais nos quais a fração inerte (retida na peneira de 0,075 mm) é constituída de grãos resistentes e em

quantidade superior a 50% em peso, podendo ser, de acordo com sua granulometria, de granulação fina ou grossa.

O solo de comportamento laterítico deve estar enquadrado, segundo a metodologia MCT, em um dos três grupos: LA, LA' ou LG'. O bom comportamento desses solos em camadas que integram as estruturas de pavimento está relacionado à técnica construtiva adequada, ao tipo de solo e às condições climáticas e ambientais do local.

### **2.3.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS E MINERALÓGICAS DOS SOLOS LATERÍTICOS**

Os solos lateríticos apresentam características peculiares e são formados por silicatos e aluminatos. Os minerais predominantes neste tipo de solo geralmente são a caulinita, a goethita, a gibbsita e o quartzo, sendo que a predominância de um desses últimos irá definir a cor do solo. Nos solos menos intemperizados, solos de transição e solos saprolíticos se fazem presentes minerais primários e argilominerais 2:1 como as ilitas e as esmectitas.

Muitos autores realizaram inventários de algumas regiões na tentativa de levantar informações sobre os solos ali presentes e facilitar o conhecimento para realização de diferentes projetos de engenharia.

Oliveira (2003) analisou 6 poços com profundidades média de 50 m, e, com base na granulometria desses solos, elaborou um perfil lito-estratigráfico que permitiu identificar a variação de granulometria desses materiais, concluindo que há aumento do tamanho dos grãos com o aumento da profundidade. De igual forma, analisando a difração de raios X (DRX), o mesmo autor identificou a variação da estrutura mineralógica conforme varia a profundidade das camadas. Embora o autor não tenha utilizado a classificação MCT, é possível identificar presença de solos de comportamento laterítico na primeira camada devido às características de granulometria, coloração e DRX apresentadas.

Kamtchueng *et al.* (2015), na análise dos solos tropicais da região de Camarões, identificaram predominância de argila e compostos de minerais de quartzo, caolinita, goethita, magnetita e clorita, classificando esses solos como argilas lateríticas. Na análise química, tais solos

apresentaram 41% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 35% de  $\text{SiO}_2$  e 21% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . No entanto, pelas propriedades físicas e de resistência, estes solos não foram recomendados para construção de rodovias, sendo necessário estabilizá-los para construção de rodovias de baixo tráfego. Adicionalmente, identificaram a importância das condições climatológicas e da rocha mãe como fatores importantes nas características dos solos tropicais. Os mesmos autores ainda inferem que os solos com melhores propriedades mecânicas são formados em regiões semiáridas.

Felten (2005) analisou as características de 7 solos da planície costeira da região Sul do Brasil e identificou 5 solos pertencentes ao grupo de comportamento laterítico, sendo um deles com maiores condições de ser utilizado na construção de rodovias de baixo custo. Este solo em questão apresentou predominância de quartzo, caulinita, illita e vermiculita. Na análise química, apresentou 11,3% de  $\text{SiO}_2$ , 5,7% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 1,5% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Sob o aspecto geoquímico, este solo não tem comportamento laterítico, discordando da caracterização geotécnica, avaliada pelo MCT.

Lima (2013) avaliou as características dos solos de comportamento laterítico oriundos de 3 jazidas da região Nordeste classificando-os como laterítico arenosos conforme a metodologia utilizada. Verificando as características químicas, estas apresentaram 47,48 a 55,25% de  $\text{SiO}_2$ , 35,09 a 45,99% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 3,38% a 7,13% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , sendo estes elementos característicos dos solos lateríticos. Os argilominerais identificados nesses solos confirmaram a predominância de quartzo e caulinita nos solos das três jazidas.

### **2.3.2 A SUCCÃO EM SOLOS LATERÍTICOS**

A sucção dos solos é o seu potencial energético de retenção de água. Ela convencionalmente se divide em matricial e osmótica sendo que a soma das duas parcelas corresponde à sucção total. Embora a sucção matricial seja geralmente considerada como de ordem física por ser atribuída ao efeito capilar ela envolve forças de adsorção (Machado e Vilar, 2015). A sucção osmótica corresponde a forças de coesão entre as moléculas de água ou de uma solução aquosa e embora pouco considerada nas análises geotécnicas devido ao seu equilíbrio no interior do solo, no caso de fluxo de contaminantes químicos ela pode assumir relevância. Experimentalmente o mais frequente é a determinação da sucção osmótica por meio do cálculo da diferença entre a sucção total e a sucção matricial.

Uma característica importante dos solos não saturados é a sucção (Camapum *et al.*, 2015). Grande parte das obras de engenharia são feitas sobre ou com solos em condições não saturadas. Estes solos são suscetíveis a variações físicas, químicas e mineralógicas e de resistência mecânica.

Uma dificuldade dos solos não saturados é o controle da sucção e para entender melhor o comportamento dos solos no estado não saturado se elabora a Curva de Retenção de Água do Solo, também conhecida como Curva Característica, Curva de Retenção de Água e Curva Característica de Retenção de Água. Ela consiste em um gráfico de variação da sucção construído em função da variação da umidade gravimétrica, da umidade volumétrica ou do grau de saturação. Geralmente, esta curva depende de fatores físicos, químicos e mineralógicos dos solos e da química do fluido. A Curva Característica de Retenção de Água do Solo, como será tratada neste texto, pode ser definida em termos das sucções total, matricial e osmótica, sendo que, no presente estudo, se dará ênfase à sucção matricial.

Muitos métodos para obtenção da curva de retenção de água do solo foram desenvolvidos, tanto em campo quanto em laboratório. No entanto, a sua obtenção, por vezes, ainda é difícil e requer cuidados especiais.

Existem vários métodos para determinar a curva de retenção de água de solos, o mais simples e conhecido é o método do papel filtro. A técnica do papel filtro pode ser usada na determinação da sucção matricial e total. Geralmente a determinação da sucção segundo esta técnica requer um período de equilíbrio que geralmente varia entre 10 e 15 dias, período necessário para que ocorra equilíbrio de sucção entre material que se pretende determinar a sucção e o papel filtro cuja curva característica foi predeterminada. Para a determinação da sucção total tem sido usado com frequência o método do WP4, que é considerado um método preciso e que requer menor tempo de execução. No presente estudo, utilizou-se a técnica do papel filtro (Marinho, 2005) no estudo dos solos e das misturas e a técnica WP4 no estudo das fibras pena.

As variações sazonais, caracterizadas pelos ciclos de secagem e molhagem produzem variações estruturais nos solos, influências pelas variações de sucção que ocorrem. Nunes, (2017) destaca a variação sazonal como fator relevante na determinação da sucção de solos residuais em estado natural, sendo que meses de maior estiagem levaram a maiores valores de sucção. De igual

forma, destacou que maiores variações acontecem na superfície até uma profundidade entre 1,50 e 2,0 m e a partir dessa profundidade a sucção é pouco relevante. Esta constatação de Nunes, (2017) não pode, no entanto, ser considerada como universal, pois a zona ativa varia em função de fatores como nível de intemperização do perfil de solo, geomorfologia e condições climáticas.

Saab, (2016) demonstrou também a influência sazonal na sucção e na compressibilidade de um solo areno-argiloso até uma profundidade de 5 metros. No estudo foi verificado que a sucção variava conforme a profundidade sendo encontrados valores de 68 kPa a 0,4 m até 30 kPa a 5 m.

Conciani *et al.*, (2017), na análise que realizaram em campo de solo do Amazonas, identificaram variação da sucção até 0,75 m, a partir dessa profundidade não se considerava relevante a influência da sucção na caracterização dos solos.

Cassiano de Sousa *et al.*, (2016) relacionaram a sucção com a desagregação dos solos, obtendo que os solos lateríticos têm menor probabilidade de desagregar quando saturados, devido aos enlaces entre óxidos de silicatos e aluminatos que formam a coesão e dificulta a desagregação, enquanto os solos não lateríticos, que não possuem tais características apresentaram condições de desagregação. Comparando os dois tipos de solos, os solos lateríticos apresentam vantagens estruturais que favorecem o seu uso para construção civil.

A sucção é um fator importante na deformabilidade do solo como demonstrou Georgetti, (2014), ao analisar o comportamento de um solo laterítico LA', comparando seu estado deformado e indeformado e identificou a sucção como elemento relevante em solos não deformados.

Rocha, (2013) realizou a avaliação da variação de sucção de um perfil de solo e sua relação com estruturas de contenção. No estudo analisou a precipitação e sua influência nos parâmetros de resistência do solo. Utilizando 3 tipos de solos identificou que o tipo de solo influencia na variação da sucção e que a precipitação é um fator determinante na variação da sucção.

Miguel *et al.* (2014), compararam os resultados de duas amostras de um solo areno-argilo-siltoso coletadas nas mesmas condições a duas profundidades, 4 e 6 metros, e identificaram a amostra oriunda da profundidade de 4 metros com maiores sucções em relação à proveniente da profundidade 6 metros, e mediante as curvas características de retenção de água transformadas (Camapum de Carvalho e Leroueil, 2004) identificaram que um fator importante nesse comportamento eram os índices de vazios característicos das diferentes profundidades.

Outro fator importante é o nível de intemperização do solo. Peranić *et al.* (2018), na análise de um solo residual pouco intemperizado, consideraram esse fator crítico, diante da dificuldade de elaboração da curva característica de retenção de água no solo devido às variações de volume em função da perda de água.

Dada a relação existente entre a Curva Característica de Retenção de Água e as propriedades físicas, químicas e mineralógicas, é possível buscar associá-la a parâmetros e características dos solos que também se relacionam com estas propriedades. A título de exemplo, Zhang *et al.* (2018) identificaram relação entre as Curvas Características de Retenção de Água de 15 solos coesivos e os índices de plasticidade e os teores de finos passantes na peneira 0,074 mm. A partir desta relação, conseguiram modelar 15 Curvas Característica de Retenção de Água mediante a aplicação de modelos matemáticos.

Da mesma forma, Mahmood e Kareen (2018), ao ensaiarem 5 tipos de solos, identificaram os limites de plasticidade e liquidez, o índice de plasticidade e a porcentagem de finos que passa na malha 0,074mm como parâmetros relevantes no modelo proposto para simulação da Curva Característica de Retenção de Água.

Igualmente, Abhisekh *et al.* (2016a) e Abhisekh *et al.* (2016b) confirmaram a importância dos limites de consistência e da porcentagem de material passante na peneira 0,074 mm para a determinação das curvas de retenção de água em 4 solos.

Ainda considerando as propriedades físicas, Tao *et al.* (2017), consideraram a distribuição granulométrica, densidade seca, densidade real dos grãos e o índice de vazios inicial como parâmetros relevantes na determinação da Curva Característica de Retenção de Água. A partir



desses dados, conseguiram modelar as Curvas Característica de Retenção de Água com auxílio de algoritmos genéticos.

Utilizando o método do papel filtro, Heidemann *et al.*, (2016), durante a elaboração de Curvas Características de Retenção de Água, identificaram a relevância dos macro e microporos em dois solos, sendo o primeiro de comportamento laterítico e o segundo saprolítico. Destacaram, ainda, que a porosidade é mais relevante em solos lateríticos.

Camapum de Carvalho *et al.* (2002) realizando a determinação da sucção a diferentes profundidades mostraram a influência da distribuição de poros na forma das Curvas Características de Retenção de Água de um perfil de intemperismo do Distrito Federal. Estes autores mostraram ainda a importância de se considerar a distribuição dos poros na definição das curvas características, transformações em relação ao índice de vazios quando se analisa perfis de intemperismo tropicais nos quais se fazem presentes curvas características bimodais com microporosidade predominando no interior dos agregados e microagregados e macroporosidade entre eles.

Outros parâmetros importantes identificados por Osinubi e Bello (2011), na avaliação de 3 solos tropicais, foram a umidade inicial de compactação e o tipo de solo considerados nos ensaios para determinar a curva característica de retenção de água. O estudo envolveu a determinação das curvas características de retenção de água de um solo compactado sob diferentes teores de umidade na mesma energia.

Marinho (2005) analisou o comportamento de 18 solos plásticos e, reiterando a importância do estado de tensões na elaboração das curvas, demonstrou a necessidade de relacionar o limite de liquidez e o histórico de tensões com a sucção para a obtenção de melhores resultados.

Camapum de Carvalho e Leroueil (2004) analisaram as variações da Curva Característica de Retenção de Água devidas a variações do índice de vazios dos solos. Determinaram, então, uma curva de sucção modificada, chamada de Curva Característica de Retenção de Água Transformada pelo índice de vazios ( $pF \times e$ ), sendo  $pF$  o logaritmo da sucção em centímetros de coluna de água. A curva transformada se constitui em um elemento ideal para identificar o grau de influência do índice de vazios na sucção do solo.

No processo de modelagem de 11 tipos de solos brasileiros, Gerscovich e Sayão (2002) compararam esses modelos e identificaram como influentes as profundidades das camadas dos solos, possivelmente influenciados pela mineralogia, tamanho dos poros e a estrutura do solo na definição da curva característica. Os autores ainda identificaram o estado de tensões e a energia de compactação como fatores influentes na capacidade de retenção de água dos solos.

Em resumo, a sucção é um fator relevante no estudo do comportamento hidromecânico dos solos não saturados e sua variação depende de fatores como propriedades físico-químicas e mineralógicas do solo, variação sazonal, condições de drenagem e profundidade. A partir dessa informação é evidente em relação a interferência climática a importância não só de se identificar o período de coleta do material como também, na medida do possível, em especial nos casos dos solos estabilizados quimicamente, se proceder a curas em condições de campo com atuação do clima e do meio circundante.

## **2.4 MÓDULO DE RESILIÊNCIA DOS SOLOS LATERÍTICOS**

Inicialmente, o dimensionamento de pavimentos era realizado mediante métodos empíricos, calculando um número equivalente do trânsito ao longo da vida útil do pavimento que associado ao CBR dos materiais e mediante tabelas elaboradas com dados históricos padronizados de solos, obtidos em campo, são calculadas as espessuras das camadas dos pavimentos. Nessa abordagem, não são considerados a influência e o impacto das cargas oriundas do tráfego sobre a estrutura de pavimento.

Posteriormente, uma nova abordagem foi desenvolvida, nela se considerou o impacto das cargas oriundas do tráfego de veículos de maior capacidade sobre a estrutura do pavimento, fatores ambientais e características mecânicas dos solos (Vassoler *et al.*, 2011).

A partir da concepção desse novo enfoque, surge o método mecanístico – empírico. Com ele apareceram novas considerações de dimensionamento e um importante parâmetro a ser considerado foi introduzido, o módulo de resiliência. O termo resiliência significa a energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações; corresponde à energia potencial de deformação (Medina e Motta, 2015).

O módulo de resiliência é obtido mediante o ensaio de carga repetidas definido na norma para determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio ME-134/2018 (DNIT, 2018b). Mediante o ensaio se busca simular as condições reais de solicitação em campo. O módulo de resiliência depende da natureza do solo, das condições de estado, das solicitações de tensões e com isso ele é geralmente expressado em função dos estados de tensões, conhecidos como modelos matemáticos com constantes experimentais. Quatro são os modelos comumente conhecidos: o modelo para solo arenoso que depende da tensão confinante, o modelo para solos areno-argilosos que depende da tensão desvio, o modelo composto que inclui as duas tensões e o modelo universal utilizado pela AASHTO. Os modelos de determinação de módulo de resiliência MR estão apresentados na Tabela 2-1.

Tabela 2-1 – Modelos de determinação do MR. Fonte: (Ribeiro, 2013)

<b>modelo</b>	<b>Equação</b>
Modelo em função da tensão desvio	$M_R = k_1 * \sigma_d^{k_2}$
Modelo em função da tensão confinante	$M_R = k_1 * \sigma_3^{k_2}$
Modelo composto	$M_R = k_1 * \sigma_3^{k_2} * \sigma_d^{k_3}$
Modelo Universal - AASHTO	$M_R = k_1 * p_a * \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{k_3}$

Segundo o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), os fatores que influenciam o comportamento resiliente de solos granulares são: índice de vazios crítico, densidade do material, grau de saturação e valor da tensão repetida aplicada que influenciam diretamente na variação do número de repetição da tensão desvio. No período inicial da vida do pavimento em solos granulares, se produzem grandes deformações devido à acomodação das partículas gerando uma deformação permanente inicial considerável. Depois o solo alcança certa estabilidade e as deformações permanentes serão geralmente mínimas ao longo da vida do pavimento.

Em solos finos, distintamente dos solos arenosos nos quais a deformação resiliente diminui com o número de repetições de carga, o módulo diminui muito com o aumento da umidade de compactação. Os solos finos geralmente apresentam comportamentos dependentes das tensões desvio e confinantes, denominados como modelos compostos (DNIT, 2006). A influência da variação de umidade foi confirmada com o trabalho de Klinsky *et al.*, (2014) que avaliaram o

módulo de resiliência com variação do tempo de cura em solos argilosos estabilizados por meio do uso de cal. Eles identificaram uma variação do módulo em relação ao tempo de cura e à capilaridade e encontraram que quanto maior o tempo de cura maior será a capilaridade e consequentemente, menor o módulo de resiliência.

A profundidade e estrutura do solo também são importantes para determinar o modelo matemático. Silva, *et al.*, (2016) avaliaram um solo coletado a 0,50 m de profundidades e msiturado com fosfogesso, cal e cimento. Os modelos que representaram o melhor comportamento foram os dependentes da tensão confinante com coeficientes de correlação superiores a 0,80. Neste estudo o módulo de resiliência variou com o tempo de cura (Tabela 2-2).

Tabela 2-2 – Valores de módulo resiliente em para amostras com e sem cura. Fonte: Silva, *et al.*, (2016)

Misturas	Tipo de fosfogesso	Tempo de cura		
		0	7	28
Fosfogesso + 9% cal	Anidro	5303	3961	4290
Solo + 11% fosfogesso + 9% cal	Di-Hidratado (Metogo,2010)	322	-	-
	Anidro	666	961	1412
Fosfogesso + 9% Cimento	Anidro	2385	3517	3498
Solo + 11% fosfogesso + 9% cimento	Anidro	1497	2045	2419

Uma conclusão parecida foi encontrada por Elsharief *et al.*, (2013) na avaliação de dois solos expansivos e um solo argiloso. Neste estudo o módulo de resiliência das misturas variou com o tempo de cura e com as características das misturas (Tabela 2-3) e se observou o seu incremento com o teor de cal.

Tabela 2-3 – Resultados do CBR e MR dos solos estabilizados. Fonte: Elsharief *et al.*, (2013)

Código	Cal (%)	CBR (%)	MR (kPa)		
			7 dias	28 dias	56 dias
Solo 1	0,0	1,0	22,5		
	3,0	89,6	57,8	79,8	91,8
	6,5	104,7	91,9	116,3	142,4
Solo 2	0,0	1,0	39,8		
	3,5	64,9	75,6	118,6	148,6
	7,0	112,7	191,7	228,4	262,9
Solo 3	0,0	18,0	59,3		
	2,0	90,1	93,5	164,5	224,5
	4,0	125,0	390,2	436,8	486,9

Na teoria de determinação da deformação permanente apareceu um conceito utilizado pela primeira vez por Medina e Motta, (2015), o conceito de *shakedown* que é um termo em inglês que, para pavimentos asfálticos, pode ser interpretado como acomodamento das deformações permanentes, servindo para descrever o comportamento da estrutura ou do material sob carregamento cíclico repetido.

As deformações permanentes dependem do tipo de solo e do percentual de finos nele presentes. Lima, (2016) avaliou dois tipos de britas utilizadas como material da camada de sub-base e identificou variações nos modelos de deformação permanente sendo que a presença de finos influenciou de forma relevante nos resultados aumentando as deformações permanentes. A autora utilizou o modelo que foi proposto por Guimarães, (2009) e ela destaca a importância de considerar a duração de carga em função do tráfego de dimensionamento.

Ribeiro, (2013) e Ribeiro *et al.*, (2018) avaliaram um solo arenoso laterítico LA', coletado a uma profundidade de 1,70 m, com IP 7. Em todos os casos o modelo composto foi apresentou coeficiente de correlação maior que 0,90 demonstrando sua representatividade nos modelos de módulo de resiliência. Os resultados indicaram diminuição do módulo de resiliência conforme incrementa o teor de umidade na amostra. Foi verificado também que os solos com maior umidade apresentaram *Shakedown* mais rápido comparando aos solos com menos umidade. Eles não identificaram o limite de *Shakedown* devido à pouca informação adquirida.

## **2.5 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL**

A cal é um aditivo usado na estabilização de solos desde tempos antigos. A melhoria do comportamento do solo depende não só das propriedades e características do solo, como também das especificidades da cal. Geralmente, a cal, a depender do tipo de solo, contribui para a melhoria do comportamento mecânico dos mesmos (Rezende, 2003; Pessoa, 2004; Önal, 2015; Leite *et al.*, 2016). Essa melhoria pode ocorrer em consequência de trocas iônicas e/ou da formação de ligações cimentícias entre os grãos. A cal quase sempre contribui, ainda, para a melhoria da trabalhabilidade do solo. Ambos os efeitos, melhoria da trabalhabilidade e ganho de resistência, potencializam seu uso em construções rodoviárias.

### **2.5.1 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CAL ADOTADO**

Existe mais de um critério para a determinação do teor ótimo de cal a ser usado na estabilização de um solo (Oliveira, 2010; Basso *et al.*, 2003; Basso *et al.*, 2005). No presente estudo, optou-se por considerar o método baseado na variação do pH com o teor de cal, por este ser um método simples e de rápida avaliação dos resultados, conforme citado por Medeiros, (2017).

Da Silva (2016) utilizou o método do pH, testando teores de cal entre 2% e 6% e verificou um incremento da RCS até 28 dias, recomendando este tempo como ótimo para controle, sendo que, posteriormente, a resistência era constante. No entanto, identificou-se que a RCS, em nenhum dos casos, alcançou a resistência obtida pelo solo natural.

Corteleti (2013) também utiliza o método do pH para análise da RCS, concluindo que os resultados dependerão do tipo de solo e da forma de execução dos ensaios.

Desta forma, conclui-se que a eficiência da cal para a estabilização química de solos dependerá do tipo de solo, sua composição químico-mineralógica e das propriedades da própria cal.

### **2.5.2 DESEMPENHO DA TÉCNICA DE ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS**

O método da estabilização química, em termos de custo e trabalhabilidade, é muitas vezes considerado econômico e acessível, mas nem sempre ele é viável tecnicamente.

Amadi e Okeiyi (2017) consideraram o aporte da cal na melhoria de um solo argiloso e avaliaram o uso de dois tipos de cal: cal virgem e cal hidratada. Os autores identificaram uma mudança de tendência na resistência à compressão simples das misturas solo-cal hidratada quando foram adicionados 7,5% e 10% de cal em peso do total. Esta variação no comportamento não foi registrada nas misturas solo-cal virgem que, por suas vezes, apresentaram uma tendência linear crescente indicando melhoria. O comportamento para ambos os tipos de cal foi linearmente ascendente, em proporção até 2,5% de teor de cal passando a tendência de crescimento a ser polinomial e os autores recomendam o uso dessa curva para construção de rodovias.

Leite *et al.* (2016) avaliaram a influência da cal em um solo expansivo e verificaram que ela reduziu a fração argila e aumentou as frações silte e areia do solo, além de reduzir o índice de plasticidade e gerar uma redução da expansão de 20% para 1,8%. Estes resultados foram obtidos a partir de um tempo de cura de 7 dias.

Alrubaye *et al.* (2016) avaliaram a influência de uma cal hidratada nos limites de Atterberg de uma argila caulínica e verificaram que a mesma gerou uma redução no índice de plasticidade, sendo tal redução atribuída às reações pozolânicas ocasionadas pela presença de silicatos e aluminatos no solo. Os autores verificaram que, a partir de 9% de teor de cal, ocorria um aumento no limite de liquidez.

Em relação à resistência a compressão simples, a cal geralmente tende a incrementar a RCS da mistura devido a processos de floculação que depende do tipo de solo.

Teixeira *et al.*, (2019) e Teixeira, (2019) estudaram um solo argilo-arenoso de plasticidade média e consideraram que o processo de floculação é proporcional ao teor de cal na mistura e que para o tempo de cura de 30 dias, as mudanças devidas a esse processo vão desde físicas, químicas e mineralógicas até de desempenho mecânico. Identificaram diminuição do peso específico aparente seco e incremento da umidade conforme se incrementa o teor de cal. Em relação a RCS, identificaram uma mudança considerável na resistência até 5% de cal, a partir desse teor os valores foram próximos a 700 kPa, com incrementos pouco relevantes. Em relação a resistência a tração por compressão diametral (RTCD), identificaram um incremento potencial de RTCD até 7% de teor de cal, a partir desse valor a RTCD apresentou uma diminuição leve.

Tenório, (2018), demonstrou o controle da expansibilidade de um solo argiloso mediante a adição de cal, comparando à adição de mármore. Pelas suas características a cal demonstrou melhor resultados a partir de 2%, já que os corpos de prova com esse teor não resistiram a inundação antes do ensaio. As misturas com cal demonstraram melhor desempenho mecânico em relação às misturas solo - resíduos de mármore. Foi verificado que a RCS incrementa inversamente proporcional à porosidade das misturas, o que o autor atribui ao fato de que quanto maior a porosidade, menor será o contato entre grãos, diminuindo assim a área efetiva de contato e em consequência a RCS.

Rocha, (2018) avaliou o comportamento da RCS de um solo residual em 4 tempos de cura, 3, 7, 28 e 90 dias e dois métodos de cura, cura normal e acelerada. Na cura acelerada foram variando as temperaturas em 10°, 30°, 40° e 50° em tempos de 12, 24, 48 e 96 horas, o autor verificou um incremento linear de resistência conforme aumenta o tempo de cura das misturas, alcançando 1844 kPa para 4% e 2626 kPa para 6% em 90 dias. Na cura acelerada as resistências alcançadas foram 1742 kPa para 4% e 2271 kPa para 6%. O autor ainda conclui que esta resistência acelerada obtida para as misturas solo cal 6% poderia se incrementar em períodos de cura maiores.

Pereira *et al.*, (2018) avaliaram a RCS e o CBR de um solo arenoso argiloso LA', testaram o desempenho dos corpos de prova variando a energia de compactação. O CBR obtido para uma energia intermediária foi 59% para um valor inicial de 13%. O valor obtido foi recomendado para construção de subleitos, reforço de subleito e camadas de sub base. Com relação à RCS, o resultado obtido para um tempo de cura de 28 dias em misturas solo-cal compactadas com energia intermediária foi 578 kPa.

Joaquim, (2017) verificou o desempenho de solos lateríticos e não lateríticos estabilizados quimicamente com cimento e cal utilizando os teores de 2,5%, 3%, 3,5% e 4% de cimento e 2%, 4%, 6% e 8% de cal. Ele identificou um melhor desempenho para misturas com teores de 4% de cimento e 8% de cal para as quais o CBR incrementou de 18% e 20% para 56% e 78,8% quando misturados com os aditivos. As RCS obtidas em condições ótimas e com energia intermediária foram 1710 kPa e 1440 kPa para as misturas com aditivo cimento e cal e finalmente a resistência RTCD obtidas foram 40 kPa para o solo puro, 140 kPa misturas solo - cimento e 130 kPa em misturas solo - cal. Demonstrando neste caso o desempenho dos aditivos em solos lateríticos.

Önal (2015), avaliando a influência da cal em solos salinos, verificou resultados satisfatórios da resistência à compressão simples para teores de cal de 8% com um tempo de cura de 6 meses. Obteve-se um aumento na RCS de 120 kPa para 772 kPa. Em termos de classificação, considerando o que é preconizado pelo SUCS, o solo mudou de CH para MH.

Thyagaraj e Zodinsanga (2015) usaram uma técnica de precipitação com cal em solos expansivos, adicionando CaCl<sub>2</sub> e NaOH. Esta técnica reduziu o índice de plasticidade de 48



para 19 e 10 e melhorou a resistência à compressão simples de 200 kPa para 365 kPa e 444 kPa, uma vez que acelerou a atividade pozolânica nos compostos.

Tempos de cura curtos também influenciam no desempenho de misturas solo-cal. Dois tipos de cal, em 3 teores, foram analisados por Llanque *et al.* (2018) e se demonstrou a influência das trocas catiônicas nas características físicas, químicas e mineralógicas dos solos e no desempenho mecânico das misturas. A formação de novos minerais durante este processo influencia no comportamento mecânico das misturas.

Segundo Lime (2006), em misturas solo - cal hidratada, a secagem acontece pelas mudanças químicas do solo que reduzem a capacidade deste reter água e aumentam sua estabilidade. No entanto, faz-se necessário avaliar a mineralogia do solo, pois a influência na química é função desta propriedade.

A eventual redução da umidade em função das reações químicas do solo com a cal impactará diretamente na sucção, e por consequência, no comportamento mecânico avaliado. Em campo, estas variações de umidade dependerão da composição químico-mineralógica do solo e das condições geológicas e geomorfológicas impositivas da umidade de equilíbrio, que não é necessariamente a umidade de compactação.

Após a mistura do solo com a cal, a cal substitui íons do solo e este muitas vezes tende a se comportar como material granular, facilitando a trabalhabilidade do material e diminuindo a plasticidade da mistura em relação ao solo não tratado (Lime, 2006). Igualmente, aqui faz-se necessário mais análises e reflexões, pois dependendo da composição químico-mineralógica do solo, em lugar de agregação, pode ocorrer desagregação e, ao invés de redução da plasticidade, pode ocorrer o seu aumento (Grim, 1962).

O teor ótimo de cal está diretamente relacionado com a mineralogia do solo como foi mostrado por Elsharief, *et al.* (2013). Estes autores analisaram a trabalhabilidade das misturas solo - cal mediante ensaios de consistência, objetivando encontrar um teor ótimo de cal para 3 tipos de solo: dois solos altamente plásticos, expansivos e com predominância de montmorilonita, e um terceiro solo argiloso, não expansivo e com predominância de caulinita (90%) e illita (10%) na sua composição. Os referidos autores verificaram como ideais, em termos de trabalhabilidade,

os teores de 6,5% e 7% para os solos expansivos, e 4% para o solo não expansivo de plasticidade média. Cabe destacar que provavelmente em nenhum dos casos se tem solos profundamente intemperizados, pois a presença da ilita aponta para solos de transição e não muito alterados.

Na avaliação da melhoria de um solo argiloso altamente plástico, Amadi e Okeiyi (2017) utilizaram dois tipos de cal (viva e hidratada) e um tempo de cura de 28 dias. Estes autores analisaram o CBR das misturas e a resistência à compressão não confinada (RCS) e identificaram um incremento geral na resistência das misturas. Na análise do ganho de RCS, verificaram que o limite de liquidez cai levemente, no entanto, em ambos os casos, verificaram que o limite de plasticidade aumenta quando o teor de cal de ambos os tipos é igual a 10%.

Portelinha *et al.* (2012) estudaram um solo argiloso, de baixa plasticidade, para dois tempos de cura e tratados com cal e cimento. Eles constataram diminuição do limite de liquidez para ambos os casos, sendo de maior relevância em solos melhorados com cimento. Os tempos de cura adotados foram 7 e 28 dias, e os teores de cal e cimento variaram de 0 a 3%. Os autores concluíram que a resistência das misturas apresentou incremento significativo em série até 3% de cal e cimento. Os maiores incrementos de cal, acima de 3% implicando na dissolução de alguns minerais e, possivelmente, na formação de outros, afetando o comportamento mecânico de modo prejudicial.

## **2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A seleção do tipo de solo para construção de uma rodovia implica analisar em detalhe as características geotécnicas deste material, além de definir e recomendar seu uso levando em conta a disponibilidade para a obra.

Por esta razão, em países de clima tropical como é o caso do Brasil, é importante analisar as características dos solos tropicais, suas classificações e seus usos como material de construção de rodovias. É fundamental, também, quantificar a resistência destes solos e adaptá-la às necessidades de projeto, considerando as alternativas de melhoria apresentadas nos itens anteriores.

Pela natureza de grande parte dos solos das regiões tropicais, segundo a normativa de classificação tradicional, eles não estariam aptos para formarem parte da estrutura de pavimento. No entanto, foi desenvolvida uma metodologia que considera o grau de laterização dos solos e suas granulometrias, a chamada “metodologia MCT”. Estima-se que, muitos quilômetros de rodovia, de baixo tráfego, podem ser viabilizados se este método for utilizado.

A estabilização química dos solos também é uma técnica muito utilizada no Brasil, sendo que a cal é um aditivo comumente empregado. Neste contexto, as misturas de solo - cal apresentam muitas vezes resultados satisfatórios no que diz respeito ao comportamento mecânico. Para determinar o teor ótimo de cal no solo, geralmente, é utilizado o método do pH, pela praticidade e resultados confiáveis e o comportamento mecânico é inicialmente avaliado por meio de ensaios de resistência à compressão simples.

Aspectos de resistência foram avaliados na revisão de literatura, identificando-se que a grande maioria dos estudos não avaliaram a variação de resistência da mistura solo-cal no longo prazo e em condições de cura em campo. Por esta razão, é importante avaliar o desempenho da mistura em diferentes períodos e condições de cura.

### **3 REFORÇO DE SOLOS COM FIBRAS NATURAIS**

O estudo das fibras, uma das bases desta pesquisa, começa com a origem, classificação, comportamento e exemplos de uso.

#### **3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

A natureza é caracterizada pela diversidade biológica representada por espécies tanto da flora quanto da fauna. A evolução da indústria, que busca aumentar a qualidade de vida dos habitantes de uma determinada região ou país, gera, também, resíduos advindos dos principais produtos consumidos ao longo da vida destes mesmos habitantes.

É evidenciado que estes resíduos, em grande parte, são compostos de fibras. Muitos autores identificam estas fibras, pela origem, em artificial e natural. As fibras artificiais são aquelas geralmente com base polimérica, enquanto as fibras naturais podem ser de origem mineral, vegetal e animal.

A utilização de fibras de origem animal nasce quase sempre da necessidade de mitigar os impactos ambientais oriundos das indústrias de abate, procurando-se alternativas de reutilização desses resíduos em projetos viáveis e econômicos.

#### **3.2 CONTAMINAÇÕES GERADAS PELA INDÚSTRIA DE ABATE DE FRANGO**

Muitas pesquisas para tratamento e reutilização dos resíduos da indústria de abates vêm se desenvolvendo em diferentes áreas.

Assi (2016) trouxe o conceito de segurança alimentar, além da contextualização e desenvolvimento da avicultura brasileira, a situação do abate informal no Brasil, os impactos na saúde pública e o papel do médico veterinário em relação às avícolas. O autor analisou a existência e funcionamento das avícolas na cidade de São Paulo, na qual constatou que os locais não ofereciam condições para alojamento dos animais, pensando na segurança pública e no bem-estar animal. A execução da atividade a qual se propõe, as caracteriza como estabelecimentos informais e ilegais. O autor aponta, como perspectiva para a regularização das avícolas e otimização da fiscalização, a possível criação de um banco de dados integrado entre

os órgãos estatais diretamente envolvidos, possibilitando cruzar, relacionar e completar informações pertinentes a esta questão.

Sunada *et al.* (2015) avaliaram a eficiência da compostagem no tratamento e reciclagem do resíduo sólido de abatedouro avícola. Utilizando resíduos de abatedouro comercial compostos por fragmentos de vísceras, tecido muscular, adiposo e ósseo, sangue coagulado e penas e, como fonte de carbono, casca de arroz. Na pesquisa, foram monitorados os parâmetros: temperatura, teores de sólidos totais (ST), voláteis (SV), N, P, K, carbono orgânico (C), matéria orgânica compostável (MOC), matéria orgânica resistente à compostagem (MORC), demanda química de oxigênio (DQO), massa e número mais provável (NMP) de coliformes totais e termotolerantes, bem como suas reduções durante o processo. Os autores constataram que a compostagem demonstrou ser um método eficiente para o tratamento dos resíduos sólidos de abatedouro avícola. No entanto, concluíram que existe a necessidade de reduzir as elevadas perdas de nitrogênio observadas no composto final.

Pinto *et al.* (2015) apontaram os principais impactos ambientais causados pelo abate e processamento de aves a partir de informações bibliográficas. Os autores concluíram que o setor avícola necessita de adequações constantes para manter o processo produtivo eficiente e minimizar a geração de impactos ambientais causados no meio ambiente. Eles sugeriram, também, a conscientização das indústrias abatedoras de aves no que diz respeito aos impactos ambientais e apontaram processos nos quais melhorias da produção são necessárias quanto ao reaproveitamento de subprodutos, ou até mesmo quanto ao tratamento dos resíduos por elas gerados.

Pinto *et al.* (2015 a) apontaram os principais impactos ambientais causados pela indústria avícola brasileira, dado que o Brasil é o maior produtor de carne aviária do mundo, os impactos tomam enormes proporções. Por tanto, torna-se necessário, a análise dos aspectos relacionados ao abate das aves compreendendo as peculiaridades deste processo produtivo. Além disso, cita-se a necessidade de conscientização das empresas que atuam na área sobre o correto tratamento dos resíduos gerados de modo a se obter um menor impacto no meio ambiente.

Romaniw *et al.* (2014) conduziram dois experimentos com Resíduos Orgânicos de Abatedouro (ROA) a fim de avaliar a percolação de nitrato no solo. Para isso, eles utilizaram duas colunas

de PVC: a primeira continha uma amostra indeformada de solo e a segunda uma amostra peneirada de solo. O estudo concluiu que a crescente taxa de nitrificação era obtida pela também crescente dose de ROA. Além disso, a amostra de solo indeformado apresentou maior tendência de percolação de  $\text{NO}_3$ . Os autores inferiram então, que a adição de Resíduos Orgânicos de Abatedouros em solos como fonte de nitrogênio (N) é uma prática econômica e apresenta-se como uma alternativa viável para obtenção de benefícios ambientais.

Gedoz (2014b) analisou o caso de uma propriedade destinada à criação de aves para abate, pesquisando formas eficientes para gerenciar a estocagem e o correto descarte de resíduos gerados por essa atividade. Para isso, foi necessário quantificar e qualificar esses resíduos. Concluiu-se que, com correto gerenciamento e descarte deste material, problemas como poluição visual, contaminação de lençóis freáticos, contaminação dos solos e aumento da oferta de nutrientes para determinadas espécies são atenuados e até mesmo extintos.

Feistel (2011) demonstrou as principais formas de tratamento, destinação e aproveitamento de resíduos e efluentes de matadouros e abatedouros utilizadas pela agroindústria. Para isso, foi realizada a caracterização desses materiais para que fosse determinada a melhor maneira de processamento. O autor aponta que a agroindústria brasileira necessita estabelecer uma melhor relação entre a rentabilidade e a redução do impacto ambiental por possuir uma grande relevância no cenário internacional e produzir volumosas quantidades de resíduos e efluentes. Tal fato é relevante visto que as alterações climáticas, assim como a degradação dos solos e a contaminação de lençóis freáticos, deram-se por ações não calculadas da expansão urbana e industrial.

FEAM (2010), em seu Diagnóstico Ambiental das Indústrias de Abate do Estado de Minas Gerais, constatou que a indústria de abate é capaz de gerar severos danos ambientais se medidas preventivas e/ou compensatórias não forem adotadas. Além disso, observou que grande parte dos frigoríficos e das indústrias de carne e derivados no Estado de Minas Gerais encontram-se em desacordo com a legislação ambiental. Portanto, julgou-se necessária a adoção de políticas públicas para conscientizar sobre o uso racional de recursos naturais e a adoção de boas práticas no processo produtivo com a finalidade de redução de geração de resíduos.

Prazeres (2004) buscou determinar maneiras de mitigar os impactos ambientais gerados por um frigorífico de aves, realizando um estudo de caso com uma abordagem qualitativa, além de pesquisa em bibliografias especializadas na área. Após análise, verificou-se que os maiores impactos de um frigorífico de aves estão relacionados à poluição hídrica. Para sanar tais problemas, desenvolveu-se 14 ações baseadas na NBR-ISSO 14.001 (ABNT, 2004), sendo algumas delas, em relação às penas. Dentre elas cita-se: construção de estação para tratamento de efluentes líquidos para reutilização da água na indústria; utilização de peneira estática no flotor; indústria de compostagem dos resíduos sólidos; implantação de biodigestores para resíduos sólidos através de lagoas de decantação e utilização do sangue, penas, vísceras, carcaças, ossos e graxa na fábrica de subprodutos.

Ferrolí *et al.* (2001) identificaram, por meio de pesquisa bibliográfica, consultas a especialistas e pesquisa praticada na própria graxaria, as principais causas da variação de tempo de processamento das vísceras nos digestores. Estes autores notaram que a maior parte dos problemas eram gerados pelo não treinamento da mão de obra, afetando, portanto, todo o sistema produtivo. A partir destas constatações, foi elaborado um plano de ação para sanar as dificuldades na cadeia produtiva. O combate aos problemas diminuiu o desperdício de matéria-prima tal como o descarte dos resíduos tóxicos no meio ambiente. Além disso, todo o processo tornou-se mais sustentável, tendo um melhor aproveitamento de horas-homens e horas-máquinas.

Ferreira *et al.* (2002) identificaram os impactos ambientais causados por abatedouros de frangos e propuseram medidas mitigadoras visando minimizar os impactos negativos desse tipo de empreendimento. Tal trabalho teve como método a utilização de uma matriz de interação entre as ações impactantes e os fatores ambientais, indicando, desta maneira, os impactos ambientais positivos e negativos causados na implantação e operação de abatedouros (Tabela 3-1). Concluiu-se, então, sobre a importância de um manejo ambientalmente adequado dos resíduos gerados em abatedouros, sugerindo a aplicação de alternativas de produção sustentáveis, adequando-se o processo industrial às condições ambientais e obedecendo à legislação ambiental.

Tabela 3-1 - Matriz de impactos ambientais em abatedouros. Fonte: Ferreira *et al.* (2002)

Fatores ambientais / Ações impactantes		IMPLANTAÇÃO						OPERAÇÃO								
		Geração de empregos	Ruídos	Dispersão de material particulado	Remoção de vegetação	Desvalorização imobiliária	Aumento do trânsito de veículos pesados	Geração de empregos	Produção de alimentos	Ruídos	Transporte de animais	Geração de efluentes líquidos	Geração de resíduos sólidos	Emissões de caldeiras	Odores desagradáveis	Proliferação de insetos
Meio físico	Ar			-										-	-	
	Solo											-	-	-		
	Águas superficiais											-	-			
	Águas subterrânea											-	-			
Meio biótico	Fauna aquática											-	-			
	Cobertura vegetal				-									-		
Meio antrópico	Estrutura viária						-			-						
	Oportunidade de emprego	+						+								
	Oferta de alimentos para população								+							
	Mercado imobiliário					-										
	Desconforto para a população		-	-						-					-	-
Risco sanitário para a população			-								-	-	-		-	

+ impactos positivos; - impactos negativos

Moraes e Paula Junior (1999) pesquisaram a origem, caracterização, aproveitamento e tratamento de resíduos gerados por abatedouros de aves. Os autores constataram que sangue, gordura, penas, vísceras abdominais, restos de tecidos de aves e conteúdo da moela são os principais componentes dos despejos deste tipo de indústria. O tratamento dos efluentes gerados pelos abatedouros é uma necessidade real e urgente para a sociedade brasileira. Por possuir grandes dimensões e pelo elevado potencial poluidor de águas,

Desta forma, torna-se importante desenvolver métodos de reuso dos resíduos em projetos econômicos e ambientalmente corretos. Assim, as penas de frango têm sido estudadas como fibras com alto potencial de reutilização na construção civil.

### 3.3 FIBRAS NATURAIS

As fibras naturais se caracterizam por se compor de polímeros biodegradáveis, compostos por vários monômeros que cumprem uma função específica na fibra, assim, a celulose e a queratina,



formam o esqueleto das fibras vegetais e animais, dando a forma e resistência características a essas fibras. São identificados três tipos de fibras: animal, vegetal e mineral.

As fibras de origem mineral têm como característica principal o predomínio da estrutura mineralógica do material. Existem vários tipos de fibras de origem mineral, entre elas: a Crisólita e a Fibra de basalto e amianto.

As fibras de origem vegetal têm como componente principal a celulose, proteína característica das plantas, que lhe conferem a resistência característica. As fibras de cana, sisal, coco, entre outras, são consideradas neste grupo.

As fibras de origem animal têm um componente característico: a queratina, proteína de elevada dureza e resistência à degradação. Esta proteína está presente, por exemplo, em cabelos, pelos, unhas, bicos, couraças, penas e escamas.

### **3.3.1 AS FIBRAS ANIMAIS**

A estrutura das fibras de origem animal é constituída basicamente de biopolímeros que realizam uma determinada função. Um destes, a queratina, está presente em todas as partes das estruturas de fibra.

As penas integram parte da estrutura física da família das aves. Esta característica constitui um diferencial da classe, sendo que tais penas equivalem a 7% do peso total das aves e, por esse motivo, uma quantidade elevada deste material é descartado.

Estes resíduos que abundam na natureza poderiam ser reutilizados devido ao alto teor de queratina que apresentam na sua estrutura. A quantidade de queratina das penas oscila entre 90% e 97%.

Muitos pesquisadores, atualmente, realizam estudos para reutilizar os resíduos animais devido à grande quantidade gerada no planeta. Quando não utilizados, para acelerar sua degradação, estes resíduos são submetidos a algum processo químico que termina, muitas vezes, contaminando o planeta. Como indicado anteriormente, a queratina compõe as fibras de origem

animal, existem dois tipos de queratina: a queratina- $\alpha$ , de forma helicoidal, caracterizada pela flexibilidade e pela predominância nos cabelos e pelos e a queratina- $\beta$ , por sua vez, tem forma laminar e predominância nas unhas, bicos, escamas e parte das penas.

É de interesse da presente pesquisa utilizar como fibra natural a pena de frango, devido às suas propriedades de elevada resistência e ao fato de, no mundo inteiro, serem geradas, aproximadamente 5.000.000 de toneladas de penas anualmente. Estas penas são simplesmente eliminadas dos abatedouros e deixadas no meio ambiente, enterradas ou, em menor quantidade, utilizadas como alimentos para aves e peixes. As penas são constituídas de fibras mais flexíveis (barba) e fibras mais rígidas (raque). Tal variação de rigidez está bastante ligada à predominância do tipo de queratina na estrutura: queratina tipo  $\alpha$  dá a característica de flexibilidade, enquanto a queratina tipo  $\beta$  caracteriza a maior rigidez.

Atualmente, muitos autores investigam a reutilização destas fibras (Barone *et al.*, 2005; Korol, 2012; Martínez-Hernández *et al.*, 2007). Reddy *et al.* (2011) avaliaram a utilização das fibras de galinha como base de polímeros. Os brasileiros Moore *et al.* (2005), Martelli (2005), Plácido (2007) e Arruda (2010) são alguns dos autores que avaliaram a possibilidade de elaboração de polímeros com base nas penas de frango, chegando a obter resultados procurados em cada caso.

### 3.3.2 A QUERATINA

A queratina é um polímero formado por 18 monômeros que ocupam uma função determinada. Recorda-se que existem dois tipos de queratina: alfa ( $\alpha$ ) e beta ( $\beta$ ). Dos 18 monômeros, ou aminoácidos, a cisteína constitui a parte dura e resistente da queratina que é um monômero que se liga mediante pontes de di sulfuro (S), sendo essas ligações as responsáveis pela resistência e durabilidade da queratina. A estrutura da cisteína é apresentada na Figura 3-1.

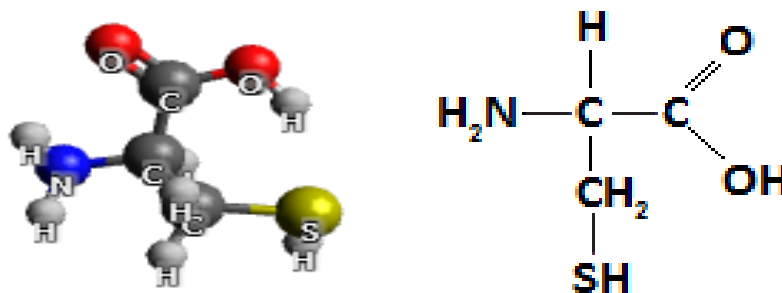


Figura 3-1 – Estrutura geral da cisteína

A queratina  $\alpha$  apresenta forma helicoidal que lhe dá um comportamento flexível. Este tipo de queratina predomina nos cabelos e pelos e a flexibilidade é devida às ligações de hidrogênio e poucas de sulfureto (Garrett e Grisham, 2010). Uma desvantagem da queratina  $\alpha$  é a desnaturação da proteína, significando a quebra de ligações de hidrogênio. Ela acontece pelo excesso de calor e ante meios extremos alcalinos e ácidos, no entanto, o processo é reversível e permite reestabelecer suas características iniciais. Cita-se como exemplo o cabelo, no qual, durante a aplicação de shampoos são quebradas algumas pontes de hidrogênio que depois da aplicação de um hidratante são repostos os hidrogênios para voltar a sua estrutura inicial.

A queratina  $\beta$  apresenta uma estrutura diferente, ela é caracterizada por formar lâminas e dependendo do número delas, a dureza será maior (Garrett e Grisham, 2010). Esta característica é devido às ligações em dobro formadas entre lâminas.

Esse tipo de estrutura é identificado nas unhas, garras, penas, escamas, chifres, couraças, etc., a degradabilidade deste tipo de queratina é de maior dificuldade.

As penas apresentam na sua estrutura os dois tipos de queratina, assim, é possível aproveitar as potencialidades da pena. A reutilização do material como matéria prima da elaboração de plástico sustentável é um exemplo. Barone *et al.*, (2006a), Barone e Arikan, (2007), Barone *et al.*, (2006b) e Barone *et al.*, (2005), Barone, (2005) e Barone e Schmidt, (2012) em todos os casos utilizam água, glicerol e sulfito de sódio para separar a queratina para elaboração de polímeros para plásticos. Um fator determinante para a qualidade do polímero é a temperatura aplicada na separação das pontes. Em todos os casos os autores recomendam 120°C para obtenção de polímeros de maior densidade. De igual forma, Moore *et al.* (2005), Martelli (2005), Plácido (2007), Arruda (2010) identificaram resultados favoráveis na obtenção de biopolímeros para utilização em substituição aos polímeros conhecidos e de atual uso.

### **3.3.3 A BIODEGRADAÇÃO DAS PENAS**

As penas de frango são compostas por até 90% de queratina  $\beta$  e é devido a este composto que elas têm elevada durabilidade e alta resistência à degradação.

Reddy *et al.*, (2013a), Reddy *et al.*, (2013b) e Reddy *et al.*, (2011) utilizaram dois tipos de monômeros, o meta, eta e butil – acrilato e o meta acrilato como reforço na obtenção de queratina de maior viscosidade e durabilidade. Eles utilizaram o método de hidrólise alcalina e identificaram uma difícil degradação das fibras ao longo do tempo e confirmaram que a degradação da queratina é menor segundo o grau de proteção que os monômeros apresentam na fibra.

Martínez-Hernández *et al.*, (2007), na tentativa de elaborar novos biopolímeros misturaram a queratina com o monômetro metilmetaacrilato, variando a queratina desde 0 até 5% em peso do total da amostra. Um resultado que identifica o ponto de degradação da fibra é a temperatura. Segundo os autores, a temperatura de degradação total da queratina é 269° e misturando ao monômero a temperatura de degradação total chegará até 308°.

Pahua-Ramos *et al.*, (2017) elaboraram um resumo com os métodos de degradação de penas obtidos a partir da literatura, classificando eles em biológicos e físico-químicos, a queratina obtida foi recomendada para uso em enzimas, amino ácidos, biocombustíveis, biofertilizantes, biopolímeros, micro e macro partículas, base retardante de chamas, materiais dielétricos, supercondensadores entre outros.

Bustillos (2010) menciona que 75% do frango é aproveitado e o restante é considerado resíduo, sendo estes últimos compostos, em maior porcentagem, por penas. O autor utiliza uma enzima para degradar as penas. Teoricamente, mediante o processo de sulfitólise, é possível separar os bissulfetos da cisteína. Com este processo, o autor obtém até 80% de queratina pura da lã de ovelhas.

A degradação das fibras naturais é um fenômeno passível de ocorrer e é uma questão que será abordada na presente pesquisa. Pretende-se avaliar a degradabilidade das fibras oriundas das penas quando postas em contato com o solo e com a mistura solo - cal. A opção pela cal se deu devido ao fato deste material ser um aditivo químico frequentemente usado na melhoria do comportamento mecânico dos solos, podendo ser empregado como complemento no processo de estabilização de solos com fibras. Adicionalmente, este aditivo químico geralmente propicia uma elevação no pH do solo, sendo possível que ele interfira na durabilidade das fibras oriundas

de penas em contato com o solo ou mesmo na estabilidade dos agregados e microagregados presentes no próprio solo.

Acredita-se que o conhecimento dos mecanismos da degradação, caso as penas se degradem quando em contato com o solo ou com o solo estabilizado quimicamente com cal, facilitará a análise de tecnologias para combater tal degradação.

### 3.3.4 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DA FIBRAS

Foram coletadas informações das propriedades de resistência das penas pesquisadas na literatura e são apresentadas na Tabela 3-2.

A resistência à tração da fibra pena varia desde 68.6 MPa (Schelestow *et al.*, 2017), na raque que é a parte dura da pena, até 220 MPa (Reddy e Yang, 2007; Zhan e Wool, 2011; Barone e Schmidt, 2012) correspondente à pena completa e barbas.

Tabela 3-2 – Resultados das Características Mecânicas da Pena

Autor	Módulo de Young (GPa)	Deformação (%)	Resistência à Tração (MPa)
Barone e Schmidt, (2012)			200
Dash e Tripathy, (2018)	20		75**
Kock, (2006)	10,18+-7,08	1,74+- 5,49	70**
Reddy e Yang, (2007)*	4,7	7,7+-0,85	180
Schelestow <i>et al.</i> , (2017)	0,98+-0,1		68,6+-4,3*
Zhan e Wool, (2011)		3,59+-1,09	220/7%def

\* barbas; \*\* raque

Alonso, (2013) realizou a avaliação da pena de frango como material têxtil. Após previa titulação da fibra e determinação do peso, avaliou sua resistência à tração e a comparou com a da lã de alpaca.

Comparando os coeficientes de variação em ambas fibras, a autora constatou uma amostragem homogênea, sendo, portanto, os resultados representativos. A pena apresenta um valor de resistência próximo da lã de alpaca.

Gowthaman *et al.*, (2018) realizaram um levantamento das características mecânicas de várias fibras de origem vegetal que estão apresentadas na Tabela 3-3. Com base nos resultados destacaram que as propriedades bioquímicas governam o comportamento das fibras naturais e associadas às condições do solo, determinarão o desempenho final das misturas. Finalmente, as características hidrofílicas e de degradação das fibras frente a constante variação de umidade do solo influenciarão na durabilidade da fibra. Para evitar o impacto negativo na durabilidade das fibras, os autores recomendaram um tratamento de proteção das fibras previamente à utilização nas misturas. Os materiais recomendados para o tratamento foram betumem, nano argilas, acetileno, entre outros. A seleção do tipo de tratamento dependerá das características da fibra.

Tabela 3-3 – Propriedades mecânicas de algumas fibras de origem vegetal. Fonte: modificado Gowthaman *et al.*, (2018)

<b>fibra</b>	<b>densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>módulo de Young (GPa)</b>	<b>resistência a tração (MPa)</b>	<b>deformação (%)</b>	<b>umidade de adsorção (%)</b>
bambu	715 - 1225	33 - 40	400 - 1000	-	40 - 52,45
juta	1300 - 1450	10 - 30	393 - 860	1,5 - 1,8	12
juta		10 - 55	80 - 840	1,3 - 10	
coco	1390 - 1520	3 - 6	100 - 225	12 - 51,4	130 - 180
palma	463	26 - 32	100 - 400	19	1 - 10
banana		27 32	529 - 914	3	
bagaço de cana	1250	15 - 19	66,29 - 290	1,1	-
jacinto de água	800	-	295,5 - 329,5	13,6	32
casca de arroz	-	-	-	-	-
sisal	700 - 1330	9 - 20	400 - 700	3,64 - 13	56 - 230
sisal		22	500	2,1	
linho	1500	27,6 - 80	345 - 1500	1,2 - 2,7	7
banana	1350	27 - 32	711 - 779	2,5 - 3,7	-
cânhamo	1140 - 1470	30 - 70	690 - 920	16	8 - 9
kenaf	1040	136	1000	-	307
pinho	813	-	61,65	10,68	-
cevada	870	-	-	-	400
trigo	868	-	-	-	280 - 350

### **3.4 SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS**

Recentemente, o uso de fibras naturais vem sendo alvo de muitas pesquisas, algo que era mais restrito às fibras artificiais. Existe uma variedade de trabalhos abordando fibras de origem vegetal e, em menor quantidade, fibras de origem animal.

#### **3.4.1 COMPORTAMENTO DOS SOLOS COM INCLUSÃO DE FIBRAS ARTIFICIAIS**

A inclusão de fibras como reforço no solo produz variações no comportamento mecânico, sendo tais variações positivas na maioria dos casos.

Kalita *et al.*, (2016) avaliou o desempenho de um solo argiloso altamente plástico ( $IP = 27,6$ ) sob adição de três tipos de fibras, fibra de vidro, fibra de coco e sacos de cimento. Eles testaram os teores 0,25%, 0,50%, 0,75% e 1,0% de fibras em peso do total. A partir dos resultados identificaram melhores desempenhos em misturas com teores de 1%. Os autores destacaram a relevância do uso dos sacos de cimento como opção de fibra de reforço.

Mathew e Ramesan, (2016) avaliaram a resistência a compressão simples (RCS) e o CBR de uma argila misturada a dois tipos de fibras, coco e polipropileno. No estudo foram usadas fibras com comprimento 3 cm testados em quatro teores 0,50%, 1,0%, 1,5% e 2,0%. Os resultados de RCS indicaram incremento de resistência proporcional ao teor de fibra, no entanto, houve um limite em ambos os materiais, sendo que no caso das fibras de coco, 1,5% de fibras teve o melhor desempenho e para a fibra de polipropileno o teor ótimo foi 1,0%. A partir desses teores, a RCS diminuía, o que significa que há uma quantidade ótima de fibras e a partir desse limite, o volume de fibra tende a prejudicar o desempenho das misturas.

Em relação ao CBR, a Figura 3-2, ilustra os resultados obtidos para o solo puro e para o solo misturado a 1,5% de fibras de coco e 1,0% de fibras de polipropileno e que corresponderam ao melhor desempenho das misturas comparadas à situação sem fibras. Os autores identificaram às fibras de polipropileno como de melhor desempenho em relação às misturas com coco. Cabe destacar que o segundo trecho das curvas são coincidentes entre as fibras coco e polipropileno e correspondem a uma menor penetração na intersecção com o eixo das abcissas que a registrada pelo solo puro sendo, no entanto, que a fibra de coco apresenta ainda um terceiro

trecho cuja inclinação leva a uma intersecção no eixo das abscissas semelhante ao solo natural. De todas formas, as fibras demonstraram melhor desempenho em relação ao solo sem reforço.

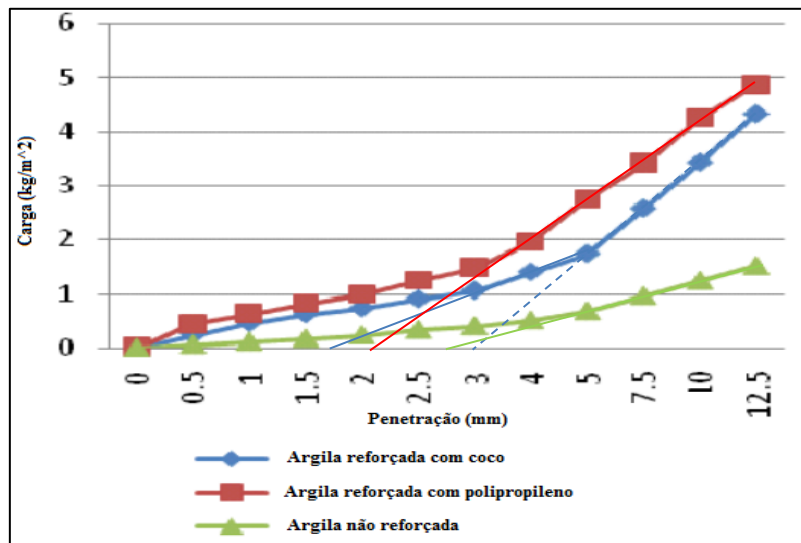


Figura 3-2 – Curvas de penetração de carga, solo reforçado com diferentes fibras. Fonte: Modificado Mathew e Ramesan, (2016)

Corte (2013) quantificou a influência da cal, da porosidade e da relação porosidade/cal na avaliação das resistências à compressão e à tração de misturas solo-cal-fibra de polipropileno. O tipo de solo melhorado é um silte argiloso. Um resultado obtido foi que a adição de cal influenciou linearmente no aumento das resistências avaliadas. Verificou-se, também, que a redução da porosidade melhora a resistência à compressão das misturas, independentemente do teor de cal. Fazendo uma comparação de misturas solo-cal com e sem fibras, a autora constatou que a inclusão de fibras acarreta uma diminuição das resistências à compressão e à tração das amostras em função da maior porosidade.

Festugato (2008), ao analisar a influência de fibras de polipropileno em solos granulares finos, destacou a importância dos fatores e propriedades a seguir:

- *teor de fibra* – confere maior resistência pós-fissuração desde que as fibras possam absorver as cargas adicionais causadas pela fissura;
- *módulo de elasticidade da fibra* – quanto maior o módulo de elasticidade, maior a probabilidade de haver o arrancamento das fibras;



- *aderência entre a fibra e a matriz* – as características de resistência, deformação e padrões de ruptura dependem, fundamentalmente, da aderência fibra/matriz. Verificou-se, ainda, que uma alta aderência entre a fibra e a matriz permite reduzir o tamanho das fissuras e ampliar sua distribuição pelo compósito;
- *resistência da fibra* – aumenta a ductilidade do compósito, assumindo que não ocorra rompimento das ligações de aderência.

O autor ainda cita que, dependendo do teor da fibra e das propriedades de aderência fibra-matriz, maiores comprimentos de fibras propiciam menor possibilidade delas mesmas serem arrancadas.

Consoli *et al.*, (2007) avaliaram uma areia uniforme, não plástica (SP). No estudo foram testados comprimentos de 6, 12 e 24 mm e os teores de 0,25%, 0,50% e 1,00% de fibras de polipropileno, os resultados obtidos demonstraram incremento nos parâmetros de resistência das misturas, esse incremento foi proporcional ao comprimento de fibras. Em relação ao teor de fibras, as misturas com 1% de fibras, foram aquelas que apresentaram melhor desempenho.

Trindade *et al.*, (2006) avaliaram o desempenho de um solo arenoso sob a adição de fibras de polipropileno nos teores 0,25%, 0,50% e 0,75% e comprimentos de 10, 15, 20 e 30 mm. Os resultados obtidos para RCS indicaram, segundo os autores, que as misturas com 0,75% de fibra apresentaram melhor desempenho. Quanto ao tamanho das fibras eles identificaram o comprimento de 20 mm como o de melhor desempenho. A partir dos resultados obtidos, foram calculados a coesão e atrito das misturas e comparadas ao do solo puro, sendo esses valores 99 kPa e 38° para a mistura e 15 kPa e 35° para o solo puro.

Feuerharmel (2000) estudou o comportamento das fibras de polipropileno, com e sem cimento, em solo argilo-siltoso e solo arenoso, evidenciando que as fibras provocam uma queda do módulo de elasticidade do solo, sendo esta diminuição dependente do tipo e das características do solo. As fibras ocasionam uma queda de resistência quando adicionado o cimento no compósito. Todas as variações provocadas pelas fibras dependem da adesão solo-fibra, característica relevante nos solos coesivos, assim como do potencial de engastamento das fibras nos grãos, característica importante nos solos granulares. No que tange à adesão, são

importantes as características de adesividade das superfícies dos minerais que compõem o solo e das fibras. Já o engastamento depende da textura granular do solo e da flexibilidade das fibras.

### **3.4.2 COMPORTAMENTO DOS SOLOS COM INCLUSÃO DE FIBRAS NATURAIS**

Alguns autores utilizaram fibras naturais, como o cabelo humano e a lã de ovelha, buscando melhorar o comportamento mecânico dos solos. Brahmachary e Rokonzaman, (2018) avaliaram a variação do CBR de um solo orgânico de classificação OH estabilizado com fibras de bambu. Foram testados dois comprimentos de fibras, (quais), e duas condições de cura, submerso e não submerso.

A partir dos resultados obtidos se constatou incremento de CBR com o incremento do teor de fibras. Verificou-se ainda que o diâmetro da fibra não apresenta influência relevante no comportamento, no entanto, a condição de cura mostrou-se relevante com melhores resultados para as misturas sem submersão.

Subramani *et al.* (2017), na avaliação do desempenho da juta, reconheceram, como fator crítico, a biodegradabilidade do material, o que requer que esta seja considerada tendo em mente a vida útil da obra. Do ponto de vista ambiental, o seu uso em obras com vida útil menor do que a necessária à degradação das fibras é positiva, pois quando da degradação das mesmas o desempenho mecânico já não é requerido e contribuiu-se para minimizar a poluição ambiental.

Upadhyay e Singh, (2017a) avaliaram os parâmetros de resistência e a resistência a compressão simples de dois tipos de solo reforçados com fibras de coco. Os solos testados eram um pouco plástico (IP = 6,32) e o outro altamente plástico (IP = 24,35). Foram testados, além dos solos sem mistura, 3 teores de fibras de coco 0,5%, 1% e 1,5%. Os resultados demonstraram o uso potencial da fibra em solos altamente plásticos, não sendo o caso do solo de baixa plasticidade. A partir desses resultados, conclui-se ser importante identificar o tipo de solo a ser reforçado, já que o desempenho final dele dependerá.

Shukla *et al.* (2015) conseguiram demonstrar a eficiência das fibras de coco na melhoria do CBR em solos expansivos. Os teores avaliados foram 0,25%, 0,50%, 0,75% e 1,0%, duas condições foram testadas, saturados e não embebidos. Mediante os resultados obtidos pelos

autores foi possível a elaboração da Figura 3-3, na qual se identifica o incremento do CBR de forma proporcional ao teor de fibras na mistura.

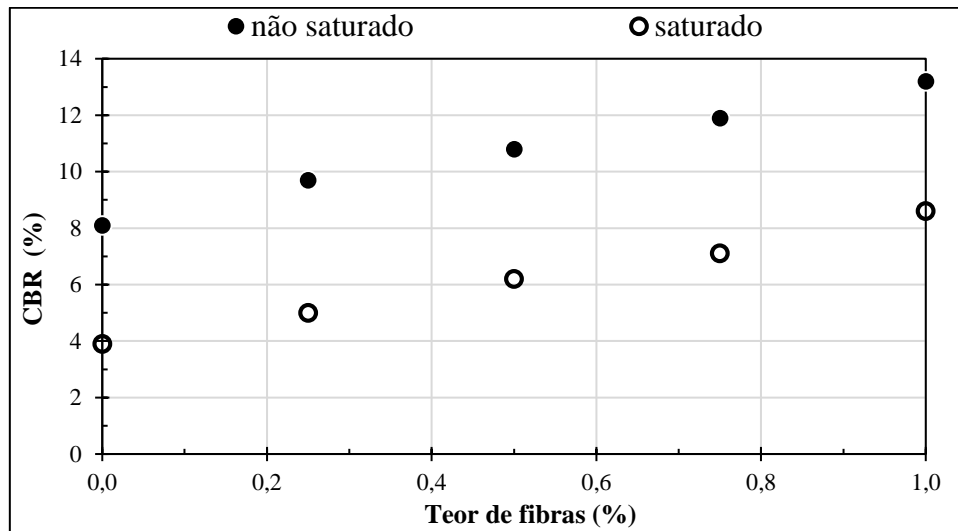


Figura 3-3 – Relação de variação de valores de CBR. Fonte: modificado Shukla *et al.* (2015)

Manoj *et al.*, (2017) avaliaram o desempenho mecânico de um solo mole, com índice de plasticidades de 28 quando da adição de penas com comprimentos entre 1 e 4 cm. Os autores verificaram que a partir de 5% de fibra o incremento no teor de fibras diminui a RCS das misturas.

Shaia e Hassan Al-Humeidawi, (2016) avaliaram um solo siltoso com índice de plasticidade 13,8%. A fibra utilizada no estudo foi obtida de sacos de juta e protegidas com betume contra possível ataque de microrganismos e degradação. Os corpos de prova foram preparados em 5 camadas e o tecido de juta foi testado nas camadas 2, 4 e 5. Os resultados obtidos indicaram que juta foi eficiente quando colocada sobre as camadas 2 e 4 sendo pequena a influência do betume em relação a resistência, cabendo, no entanto, destacar que o propósito principal de seu uso foi a proteção da fibra.

Butt *et al.* (2016) estudaram o cabelo como reforço em solos argilosos e identificaram o seu grande potencial na melhoria da resistência mecânica destes solos. Sales (2011), ao misturar areia ao composto solo-fibra, mostrou que a incorporação de material de natureza granular contribui para a ampliação das melhorias trazidas pelas fibras no comportamento mecânico.

Comparando o comportamento de compósitos formados por fibras de sisal frente ao comportamento das fibras de curauá em um solo arenoso fino, Leucádio (2012) evidenciou que o processo de impermeabilização como estratégia de proteção frente ao ataque de fungos permite atingir maior durabilidade das fibras vegetais no composto. No estudo a impermeabilização das fibras foi realizada com EPS ou com CAP. A presença das fibras no compósito permite um acréscimo de resistência ao cisalhamento, sendo que a dilatância da areia não foi alterada pela inclusão das fibras. Houve aumento significativo nos módulos de deformabilidade nas amostras com reforço em comparação às sem reforço. As fibras das misturas com solo não se romperam à tração, dando-se a ruptura no compósito por deslizamento das fibras.

Pillai e Ramanathan (2012) estudaram um solo argiloso com IP 27%, com predominância de caulinita. No estudo o solo foi reforçado com cabelo e demonstraram o bom desempenho do material, principalmente na ductilidade. As fibras utilizadas foram cortadas entre 4 e 40 mm e foram usados os teores 0,50%, 1,0%, 1,5%, 2,0% e 2,5%. Os resultados identificaram incremento de RCS proporcional ao teor de fibras até o teor 2% diminuído em seguida (Figura 3-4). A deformação de ruptura aumentou até 1% de fibras passamos em seguida a diminuir. Dessa forma, os autores recomendaram o uso da fibra como material de reforço.

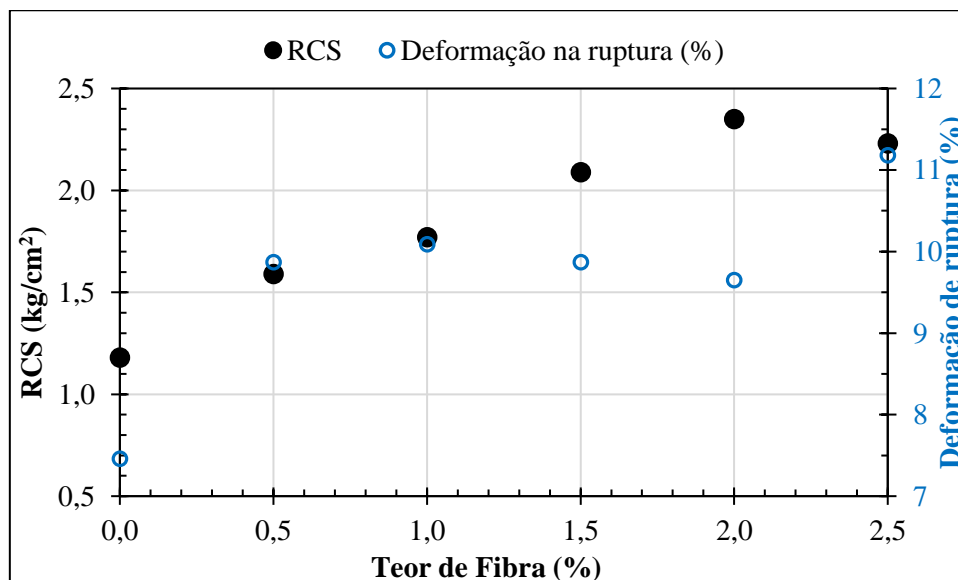


Figura 3-4 – Resultados RCS. Fonte: modificado Pillai e Ramanathan (2012)

Da Silva (2011) avaliou os resultados de dois solos siltosos reforçados com fibras de sisal, PET, polipropileno e pneus. Identificou-se que as fibras de polipropileno forneciam melhores resultados como reforço do solo. Paralelamente, também se estudou a melhoria do solo siltoso com aditivos químicos e orgânicos, identificando-se a cal como elemento que ofereceu melhor desempenho.

Galán-Marín *et al.* (2010) utilizaram a fibra natural lã de ovelha na melhoria do comportamento de um solo. O reforço com este material permitiu o melhoramento da resistência à compressão do solo quando este foi combinado com outro aditivo: o alginato obtido das algas marinhas.

Montes-Zarazúa *et al.* (2015) reforçaram solos expansivos para fundações com diferentes teores de penas de frango para controlar a relação de vazios e concluíram que um teor de 3% de fibras forneceu os melhores resultados. As misturas com barba suportam maiores cargas quando comparadas ao solo natural. A raque fornecia melhores condições de controles de vazios.

Santiago e Botaro, (2009) avaliaram o desempenho de um solo argiloso, obtido a 2,5 m de profundidade, classificado como CL no sistema unificado e com IP 11,6%. A fibra avaliada como reforço foi o sisal cortado em comprimentos de 10, 15, 20 e 25 mm e teores de 0,25%, 0,50%, 0,75% e 1,0% em peso da amostra total. As fibras foram tratadas com betume antes do seu uso como reforço. Os resultados apontaram como condições ótimas o comprimento 15 mm e o teor 0,50% de fibra.

Pinto (2008) avaliou a adição de fibras de curauá e sisal em matrizes de solo com adição de cimento empregado em argamassas. Houve melhorias no comportamento: a estabilização química aumentou a rigidez e resistência final dos compósitos.

Cabala (2007) utilizou fibras de coco em combinação com hastes de bambu, areia e cimento CP-E-32. A partir desta combinação, o autor evidenciou melhoras nas características de expansão, sendo que as fibras diminuíram a resistência mecânica do material quando utilizadas isoladamente. O conjunto fibra de coco – haste de bambu – areia – cimento permitiu o aumento da tenacidade do composto.

Leucádio (2005) misturou fibras de sisal com solo e verificou que o comprimento das fibras influi nos resultados de compactação. Ao aplicar um tratamento com filme polimérico sobre a superfície das fibras, o autor verificou uma excelente adesão e observou, ainda, que as fibras tratadas absorvem menor quantidade de água do que as fibras não tratadas. As fibras tratadas favorecem o incremento do CBR em relação às sem tratamento, sendo que, na resistência ao cisalhamento, existe pouca variação entre os resultados obtidos utilizando-se as fibras com e sem tratamento.

Em solos expansivos, Montes-Zarazúa *et al.* (2015b) analisaram as penas de frango como material de reforço em solos de fundação e identificaram o caráter hidrofóbico da pena como responsável pela circulação da água através dos poros sem ser retida na estrutura.

Gaw e Zamora, (2003), com base em experiência das antigas casas de algumas comunidades do Rio de Janeiro, avaliaram a fibra de coco como material de construção. O solo analisado foi de tipo areno-argiloso. As fibras foram preparadas com um lubrificante composto de linhaça, parafina e solvente cítrico. Elas foram submersas na mistura por 7 minutos e após submersão, elas foram secadas ao ar por 48 horas. As fibras foram cortadas em comprimentos de 35 mm e 50 mm, foram testados 4 teores de fibra, 0,8%, 1,8%, 2,4% e 3,2% em peso total da amostra. Os resultados mostraram que a resistência a tração obtidas para as misturas solo - fibras de coco melhoraram em até 8 vezes a resistência inicial do solo, sem fibra. O melhor comportamento foi verificado para as fibras de tamanho 35 mm sendo o teor 0,8% o que apresentou melhor trabalhabilidade. Com o incremento do teor de fibras os pontos tendem a ser mais dispersos. Este comportamento associa-se ao volume de fibra e sua dificuldade em se misturar com o solo.

### **3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O comportamento das fibras sintéticas e naturais de origem vegetal e animal foi analisado neste capítulo mostrando que a influência das fibras no comportamento mecânico depende de vários fatores como tipo de solo tratado, tipo e características das fibras e tipo e condições de ensaios usados no estudo.

As fibras naturais de maior difusão foram classificadas, segundo sua origem, em vegetal e animal. Nas fibras de origem animal a identificação da queratina assume grande relevância,

pois a queratina constitui o esqueleto da fibra e sua dureza e resistência estão associadas à presença e ao tipo de estrutura da queratina.

Foram identificados dois tipos de queratina: queratina  $\alpha$ , cuja estrutura apresenta forma helicoidal e, dependendo das ligações, irá definir a flexibilidade da fibra, e a queratina  $\beta$ , cuja estrutura é formada por lâminas organizadas em camadas e o número de camada irá definir o grau de dureza da fibra. Ou seja, se a fibra apresenta predominância de queratina do tipo  $\alpha$ , esta será mais flexível, como, por exemplo, o cabelo e pelos. Se a predominância for de queratina do tipo  $\beta$ , a fibra será mais rígida, como nas unhas, bicos, escamas e raque das penas.

A maioria dos resultados apresentados neste capítulo indicam incrementos de resistência a compressão em forma proporcional ao teor de fibras, no entanto, a partir de um determinado teor, a resistência começa a cair e as deformações a aumentarem. A explicação foi atribuída à característica de fluidez das fibras e ao fato de que o elevado volume de fibras tenderia a limitar os contatos com o solo, não permitindo a ação conjunta solo – fibra na mistura e conseqüentemente conduzindo a redução da resistência. O teor ótimo de fibras depende do tipo de solo e das características das fibras.

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

As características de localização da obtenção dos materiais utilizados ao longo do trabalho e os procedimentos dos ensaios realizados segundo as normas vigentes, foram os tópicos tratados neste capítulo.

Os solos brasileiros se caracterizam geralmente por apresentar um pH ácido, característico de solos com predominância de ferro. Dependendo da região, esses solos apresentam predominância do mineral goethita ou hematita. A predominância de um deles geralmente contribui para a determinação da cor do solo. Solos ricos em goethita geralmente tendem a apresentar cor amarelada e os ricos em hematita cor avermelhada.

As penas, por se tratarem de materiais orgânicos, tendem a se degradarem em meios ácidos e alcalinos mediante um processo de hidrólise. O meio básico geralmente ataca a queratina, presente nas penas. Dessa forma, para entendimento e avaliação da degradação da fibra foi utilizada a cal como aditivo de modificação do pH no solo para básico.

### **4.1 OS MATERIAIS**

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram: solo puro, cal hidratada dos tipos CH-I e CH-III e as fibras provenientes dos resíduos da indústria avícola, ou seja, penas de frango *in natura*.

#### **4.1.1 O SOLO**

O local de origem do solo de estudo foi o do Campo Experimental do Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB). Os solos do local apresentam no manto profundamente intemperizado de cor vermelha característica da maior parte da região.

A fim de trabalhar com um solo com características homogêneas foi escolhida a profundidade de coleta entre 2 e 3 metros. O material apresentou comportamento plástico, cor avermelhada intensa e textura fina (diâmetro menor que 2 mm). Para manter a característica de umidade natural as amostras foram colocadas em sacos plásticos



devidamente selados e armazenados no laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília.

Durante o processo de ensacamento foi determinada a umidade natural como parâmetro de referência para a realização dos demais ensaios e para o próprio controle da preservação da condição de umidade inicial durante a fase de armazenamento. Obteve-se como umidade natural ( $\omega_0$ ) 19%. Os sacos foram abertos conforme se realizavam os ensaios, tomando-se máximo cuidado para não alterar a umidade natural do material, pois objetivava-se realizar todos os ensaios do estudo partindo-se do solo em condições mais naturais possíveis, ou seja, sem secagem e sem eventuais contaminações químicas. Na Figura 4-1 observa-se o local de coleta do solo.



Figura 4-1 – Localização da coleta de amostras de solo. Fonte: Google

#### 4.1.2 A CAL

Com intuito de verificar o comportamento da fibra ante um meio alcalino se mudou o potencial hidrogeniônico (pH) do solo. Optou-se por misturar o solo com diferentes teores de cal uma vez que esta poderia eventualmente ser usada para a melhoria das misturas solo-fibras. A cal apresenta um pH alcalino e ao se misturar com o solo, as reações químicas internas muda o pH da mistura, levando-a a um estado alcalino.

Para atingir este objetivo, inicialmente dois tipos de cales hidratadas magnesianas, como foi classificado por LIME, (2006) foram utilizadas na pesquisa: cal hidratada tipo I (CH-I) da marca MASSICAL e cal hidratada tipo III (CH-III) da marca da SUPERCAL.

Os ensaios iniciais de caracterização, ensaio de ISC e parte dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral contemplaram a utilização dos dois tipos de cales. Devido à variação pouco relevante dos resultados obtidos para ambos os tipos de cales, optou-se por usar na continuidade dos estudos apenas a cal tipo CH-I.

A determinação dos teores de cal adotados no estudo observaram as variações admitidas nas normas de ensaios ASTM D6276/2006 e DNIT-ME419/2019. Para a determinação do teor de cal ideal para estabilização foram preparadas 12 amostras individuais seguindo o procedimento estabelecido em EMBRAPA, (2017). O primeiro correspondeu a 0% de cal e os 11 pontos restantes corresponderam aos pontos com variação do teor de cal de 2% a 12% com adições de 1%. O pH do solo puro medido foi 5,5 em água e 6,2 em KCl, valor característico da maioria dos solos intemperizados brasileiros. Com isso tem-se para o solo um ponto de carga zero (PCZ) determinado segundo Keng e Uehara (1974) ( $PCZ = 2 \cdot pH_{KCl} - pH_{H_2O}$ ) igual a 6,9.

O pH medido em ambas as cales foi igual a 13,3. Assim, o pH do solo incrementa com a adição da cal e a análise dessa variação é relevante, pois ao passar pelo ponto de carga zero existe o risco de sua desagregação. Faz-se necessário, no entanto, considerar os PCZs de cada componente do solo assim como o fato de que a fração argila tende a apresentar a máxima floculação e mínima dispersão no ponto de carga zero (PCZ) ou próximo a ele e que a medida que se afasta do PCZ, a argila tende a dispersar-se progressivamente tendo em vista o aumento da repulsão entre as cargas elétricas de mesmo sinal. A fração argila tende a apresentar a máxima floculação (ou mínima dispersão) no ponto de carga zero (PCZ) ou próximo do PCZ. A medida que se afasta do PCZ, a argila tende a dispersar-se progressivamente porque aumenta a repulsão entre as cargas elétricas de mesmo sinal.

A Figura 4-2 apresenta a variação do pH da mistura solo-cal em função do teor de cal incorporado ao solo. Definiu-se nesta Figura como pontos de referência para os estudos

desta pesquisa o ponto de inflexão da curva em 4% de cal, o ponto em que a tendência propende à constância (10% de cal) e um ponto intermediário considerado como 6%.

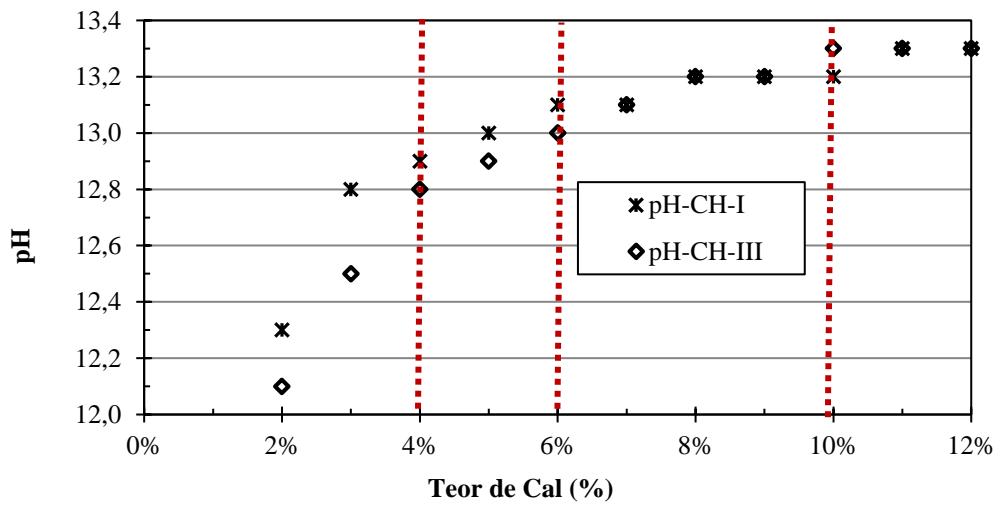


Figura 4-2 – Influência do teor de cal no pH do solo

#### 4.1.3 AS FIBRAS

As fibras utilizadas durante o desenvolvimento da pesquisa foram coletadas no abatedouro “Casagrande”, localizado em distrito Recanto das Emas, Distrito Federal. Elas foram coletadas diretamente das pilhas de resíduos no mesmo local de abate, encontrando-se misturadas com sangue e vísceras provenientes da atividade de abate das aves.

Antes da fibra ser armazenada no laboratório de solos do Departamento de Pós-Graduação em Geotecnia, passou por um processo intenso de lavagem com água e desinfecção com álcool propanol para evitar possíveis riscos de contaminação e contração de doenças na fase de manipulação.

Não conhecendo o comportamento da estrutura da fibra, se manteve todos os cuidados para não alterar a sua forma natural. O preparo da fibra foi organizado em 4 etapas, como se apresenta na Figura 4-3.

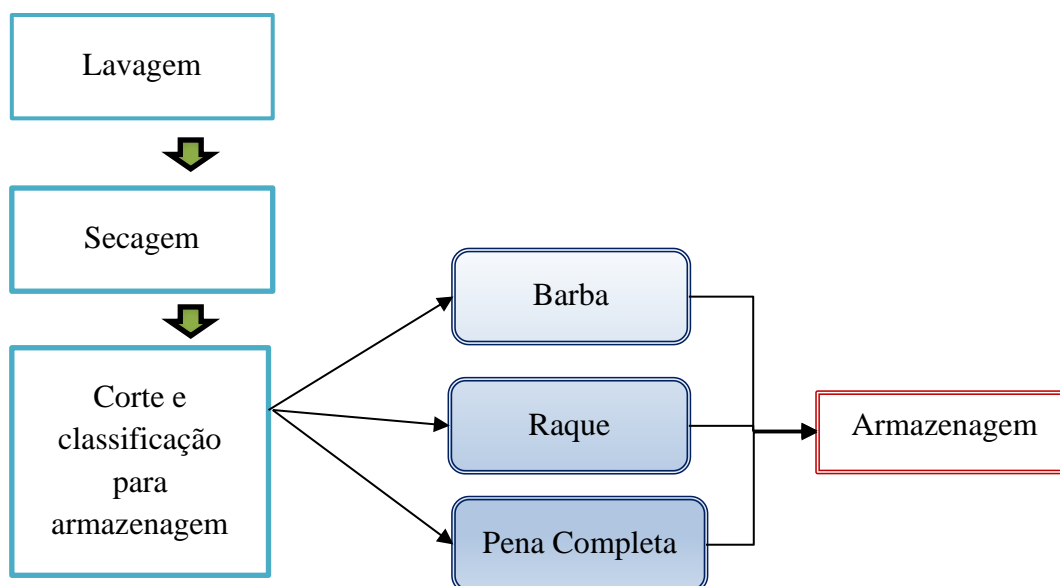


Figura 4-3 - Processo de preparação das fibras

Na primeira etapa, as penas foram antes dos cortes lavadas com água e desinfetadas com álcool propanol. Seguindo diretrizes de Quintero-Curvelo *et al.*, (2017), o álcool permitiu a realização de uma limpeza superficial dado a resistência das fibras sem afetá-las.

Na segunda etapa, as penas foram secadas em ambiente natural e protegidas com filme plástico para eliminar toda a possibilidade de contaminação bacteriana.

Na terceira etapa foram cortadas em comprimentos entre 10 a 15 mm e separadas por características (raque, barba ou pena completa). Finalmente, na quarta etapa as fibras foram armazenadas separadamente segundo suas características (raque, barba ou pena completa).

A barba – B é considerada a parte mais flexível, a raque – R corresponde à parte central da pena sendo mais dura e rígida e a pena completa – PC, assim considerada por compreender a barba e a raque sendo, no entanto, cortada em tamanhos variando entre 10 e 15 mm para a realização dos estudos (Figura 4-4). Cabe destacar ainda que ligadas à barba então as bárbulas compostas por ganchos conforme ilustrado nesta figura.

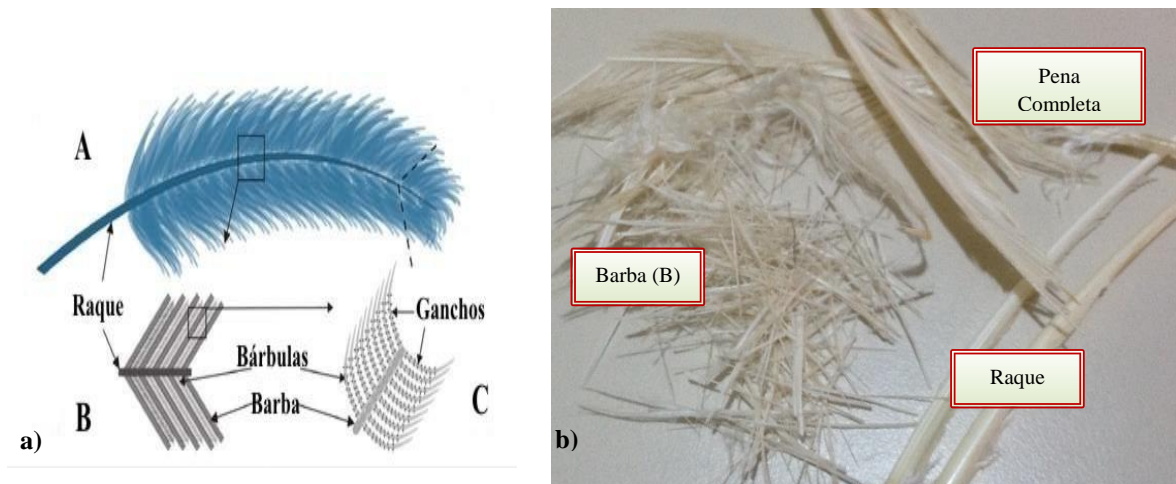


Figura 4-4 – Estrutura da pena, a) estrutura “A” pena completa, “B” barbas e “C” bárbulas. Fonte: adaptado Gallardo *et al.*, (2015); b) Distribuição da pena para ensaios

As características da fibra de pena de frango e estudos apresentados na literatura para outros tipos de fibra de origem orgânica (Llanque, 2014, Leucádio, 2005, Kafodya e Okonta, 2018 e Shukla *et al.*, 2015), permitiram adotar nesta pesquisa os teores 0,25%, 0,50% e 0,75% do peso total da amostra de solo seca e comprimentos médios entre 10 mm a 15 mm, sendo assim inferior a 50% do diâmetro dos corpos de prova conforme por Sachetti (2012).

Dessa forma, as quantidades de fibra e aditivo utilizados no trabalho foram: cal tipo CH-I e CH – III nos teores de 4%, 6% e 10%; pena de frango nos tipos R = raque, B = barba e PC = pena completa nos teores 0,25%, 0,50% e 0,75%. As combinações analisadas foram do tipo: solo puro, solo com cal nos três teores, solo com fibra nos três teores para cada tipo de fibra e solo com fibra e cal nos três teores e tipos de fibras e cal, cabe destacar que parte do estudo foi realizado usando-se inicialmente as duas cales e finalizado apenas com a cal tipo CH-I.

As combinações e teores analisados estão descritos na Tabela 4-1, as porcentagens consideradas são com referência à massa total da amostra de solo seca. Se contabilizou 70 combinações analisadas neste estudo.

Tabela 4-1 - Resumo das combinações de solo, solo – cal, solo – pena e solo – cal – pena

Solo mais fibra ou aditivo		Solo mais fibra mais cal CH-I ou CH-III	
Tipo de fibra ou aditivo	Teor de fibra ou aditivo	Tipo de fibra mais aditivo	Teor por tipo de fibra
-	0%	R - B - PC + 4% cal	0,25%
R - B - PC	0,25%	R - B - PC + 4% cal	0,50%
R - B - PC	0,50%	R - B - PC + 4% cal	0,75%
R - B - PC	0,75%	R - B - PC + 6% cal	0,25%
I - III	4%	R - B - PC + 6% cal	0,50%
I - III	6%	R - B - PC + 6% cal	0,75%
I - III	10%	R - B - PC + 10% cal	0,25%
-	-	R - B - PC + 10% cal	0,50%
-	-	R - B - PC + 10% cal	0,75%

R = raque, B = barba, PC = pena completa, I = cal tipo CH - I, III = cal tipo CH-III

## 4.2 MÉTODOS DE CURA

Os métodos de cura adotados na pesquisa foram dois: em laboratório e campo. Conforme apresentado na Figura 4-5 (a), os corpos de prova foram empilhados em caixas de ISOPOR e armazenados na câmara climatizada e ensaiados em tempos coincidentes com os corpos de campo, e na Figura 4-5 (b) apresentam-se os CP enterrados em campo, em valas de dimensões 1,00 m de largura, 1,50 de comprimento e 0,50 m de profundidade.

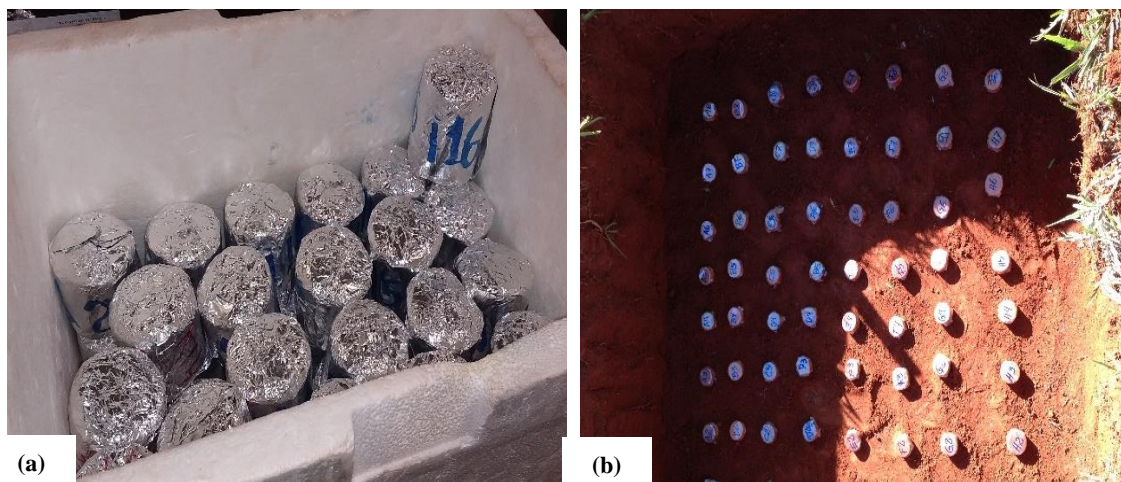


Figura 4-5 - Condições de cura: (a) câmara climatizada; (b) campo



Em todos os casos, a localização das valas foi o campo experimental do programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, como se apresenta na Figura 4-6.



Figura 4-6 - Localização das valas de cura. Fonte: Google

Os tempos e métodos de cura programados foram definidos por tipo de ensaio. Os tempos T1 e T2 correspondem aos ensaios realizados segundo as normas vigentes, portanto, com cura em laboratório, deixando os tempos T3, T4 e T5 para avaliação pelo método de cura enterrados. A Tabela 4-2 apresenta o detalhe da programação dos tempos e métodos de cura adotados nesta pesquisa.

Tabela 4-2 – Programação de tempos e métodos de cura por tipo de ensaio

Ensaio	Tempo de cura (dias)					Método Cura
	T1*	T2*	T3	T4	T5	
Mini CBR	1	-	-	-	365	Enterrado
RCS	-	30	60	90	-	E/C
RTCD	1	30	60	90	-	Enterrado
MR	1	30	60	90	-	E/C

CBR = índice de suporte Califórnia; RCS = resistência à compressão simples; RTCD = resistência à tração por compressão diametral; T1, T2, T3, T4 e T5 = tempo de cura em dias, E/C = enterrado / câmara climatizada; \* ensaios realizados só após cura em laboratório

### 4.3 MÉTODO DE ENSAIOS

A realização dos ensaios obedeceu a análise de duas grandes etapas: caracterização e desempenho da resistência mecânica para as condições apresentados na Figura 4-7.

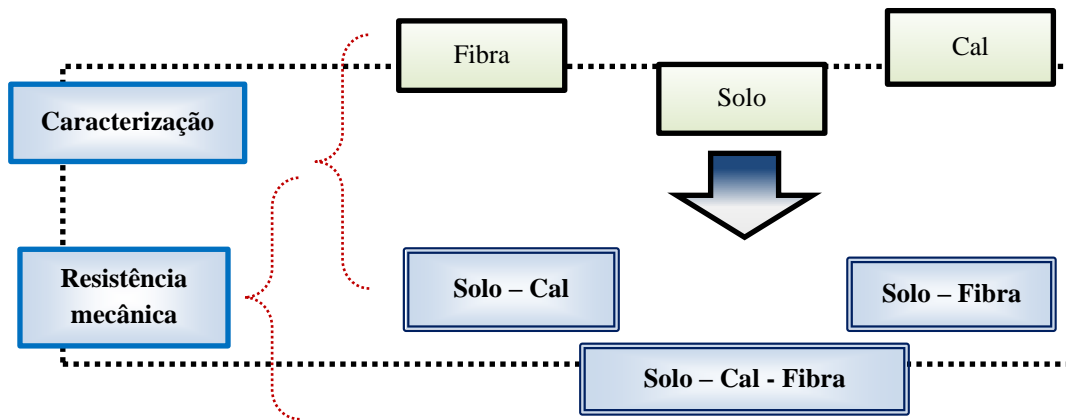


Figura 4-7 – Relação dos ensaios e as combinações avaliadas

As etapas da metodologia adotada estão organizadas em 3 grupos, que são: a caracterização física, química e mineralógica de todos os componentes dos ensaios, ensaios de resistência mecânica e análise temporal das combinações da Etapa 2 conforme apresentado no fluxograma da Figura 4-8.

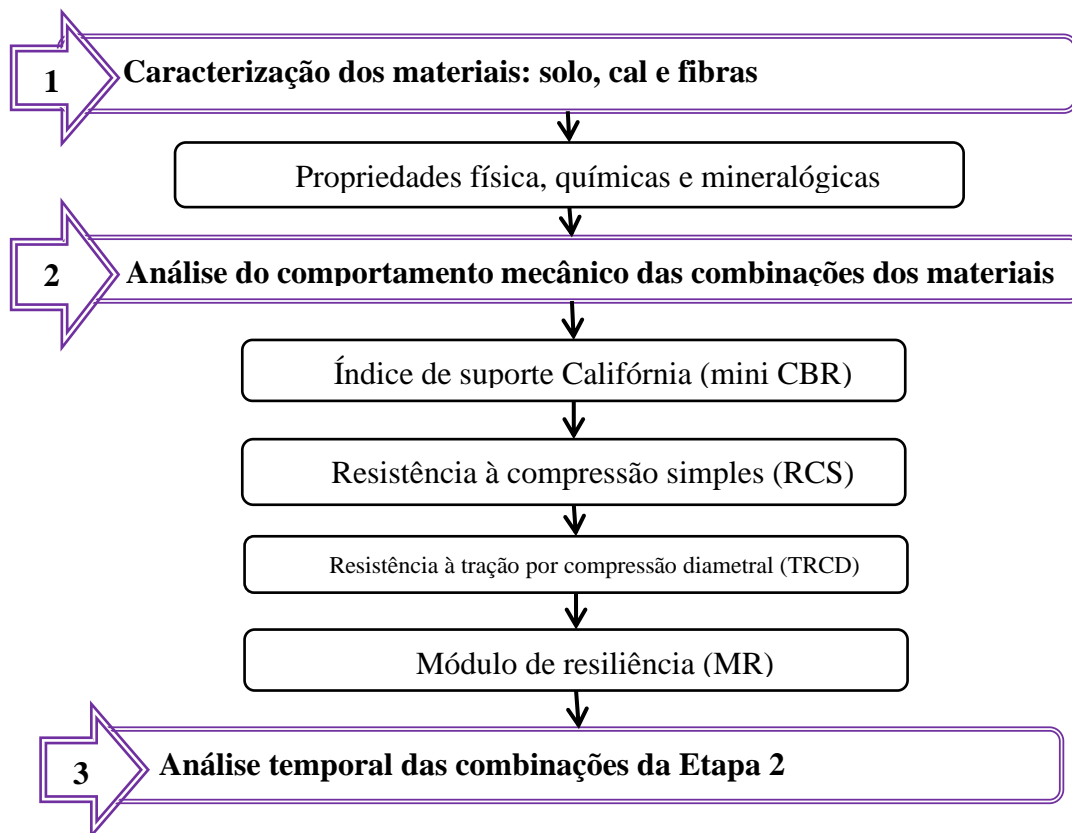


Figura 4-8 – Etapas dos ensaios propostos



### 4.3.1 PERÍODO DE COLETA

Os períodos e tempos de coleta dos corpos de prova diferem em cada tipo de ensaio, os correspondentes ao ensaio mini CBR foram enterrados em maio de 2017, por um período de 1 ano e 3 meses (Figura 4-9 e Figura 4-10) e coletados em agosto 2018. As condições iniciais deles foram precipitação 64 mm e temperaturas média de 22° e máxima de 27° como se observa na Figura 4-9, as condições finais foram precipitação 21 mm e temperaturas média de 21° e máxima de 26 apresentados na Figura 4-10, por tanto, pode-se concluir que os corpos de prova estiveram submetidos a um ciclo completo de variações de temperatura e precipitação alcançando em 6 meses as precipitações máximas entre 26° a 31° e precipitações entre 219 a 320 mm e 4 meses sem precipitação alguma, associado às maiores temperaturas entre 29° a 31°.

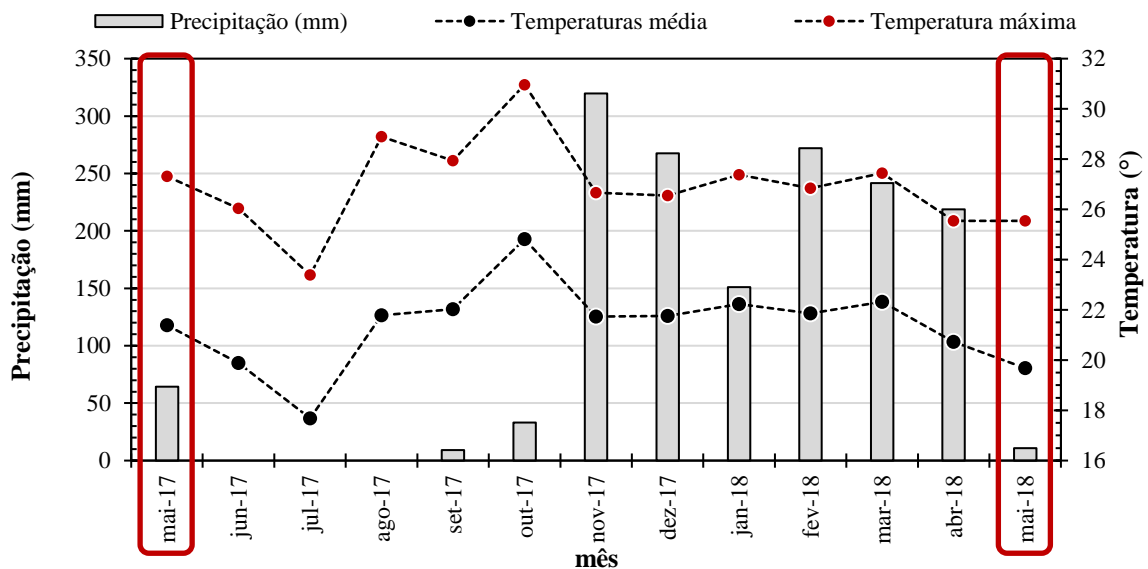


Figura 4-9 – Precipitações e temperaturas máximas e médias no cenário de estudo, ensaio mini CBR.

Fonte: INMET, (2018)

Os ensaios de resistência a compressão e tração por compressão indireta foram enterrados em agosto 2018 e coletados em duas épocas, aos 30 dias em dezembro 2018 e aos 60 dias em março de 2019. Durante o tempo de enterro eles estiveram submetidos a precipitações entre 74 a 372 mm e temperaturas máximas entre 26° a 30° (Figura 4-10), devido à época de enterro, a umidade natural do solo e dos corpos de prova foi em média 22%.

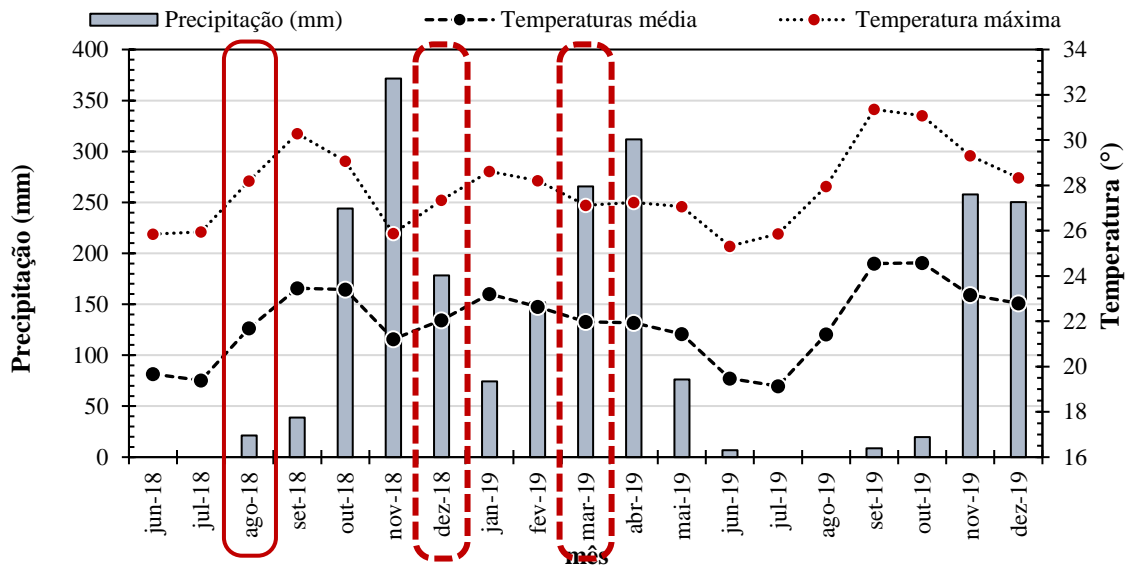


Figura 4-10 – Precipitações e temperaturas máximas e médias no cenário de estudo, ensaios RCS e RTCD. Fonte: INMET, (2019)

#### 4.4 ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Na etapa inicial foram analisados o solo objeto da pesquisa, a cal como aditivo e a fibra pena de frango. Na Etapa 1 foram identificados três características principais a serem analisadas como apresentado na Figura 4-11.

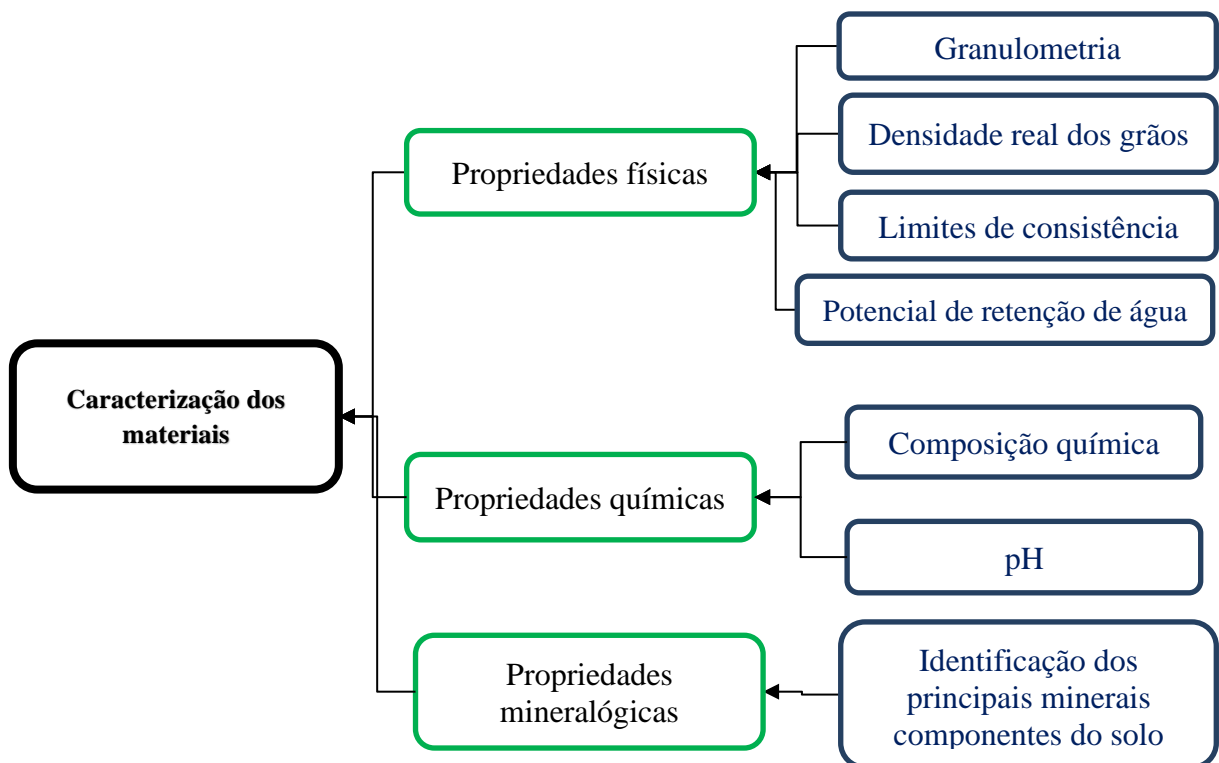


Figura 4-11 - Etapa 1: Ensaios de caracterização do solo, cal e penas

#### 4.4.1 GRANULOMETRIA

Neste ensaio foram realizados os ensaios de granulometria seguindo a norma NBR 7181 (ABNT, 1984) utilizando-se, no entanto, material em umidade natural, isso para simular a situação real do solo.

A granulometria foi realizada em dois estágios: por sedimentação, para encontrar a distribuição granulométrica dos grãos de diâmetros menores que 0.074 mm, e por peneiramento para o material retido na malha #200. Destaca-se que no ensaio de sedimentação foi utilizado o solo passando na peneira de malha #10, ou seja, partículas com diâmetros inferiores a 2 mm.

Os ensaios de granulometria foram inicialmente realizados para as condições solo puro natural com e sem uso de defloculante. No entanto, sendo o parâmetro tempo um fator passível de intervir na granulometria do solo e misturas solo-cal, foi realizado um segundo ensaio de granulometria para os corpos enterrados, após um ano de cura em campo, segundo apresentado na Figura 4-12.

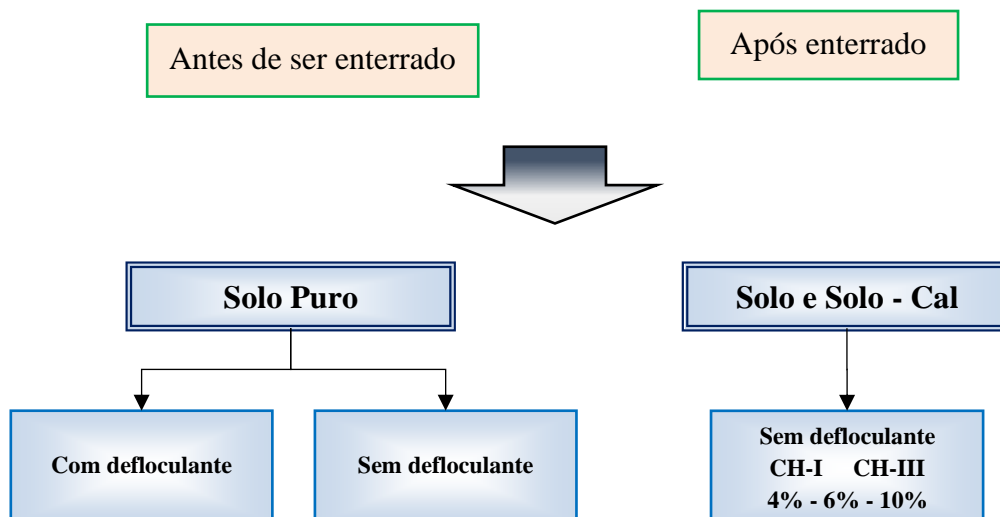


Figura 4-12 - Relação de ensaios de granulometria

#### 4.4.2 DENSIDADE REAL DOS GRÃOS

O ensaio de densidade real dos grãos (Gs) foi determinado no penta picnômetro de marca *Quantachrome Instruments*. As amostras secas em estufa foram secadas, destorroadas e

levadas ao penta picnômetro. No presente estudo usou-se o mesmo solo em 5 células e considerou a média dos resultados obtido como valor representativo da amostra.

O ensaio foi realizado para os casos antes e depois do tempo de cura em campo, seguindo o roteiro do item de granulometria. Excepcionalmente, também foi realizado a 30 dias de cura em solos misturados com cal CH-I para verificar possível variação a tempos menores.

Seguindo o procedimento do método, também foi determinado o Gs das fibras, para os 3 grupos classificados como barba, raque e pena completa.

#### **4.4.3 LIMITES DE CONSISTÊNCIA**

Os limites de consistência foram determinados com os ensaios limites de liquidez realizados segundo a NBR 6459 (ABNT, 2016a) e de plasticidade segundo a NBR 7180 (ABNT, 2016b). Ambos os ensaios foram realizados com o solo na umidade natural e considerando-se a amostra integral, ou seja, não apenas a que passa pela peneira #40. A umidade natural do solo variou entre 19,9% e 20,8%. Cabe destacar, conforme se observará quando da apresentação dos resultados, que nesta condição natural 97% do solo passa por esta peneira de número 40 (0,42 mm).

Os ensaios foram realizados para o solo puro e solo-cal. Para o solo-cal os ensaios foram realizados 24 horas após a mistura e com tempos de cura segundo norma e um ano depois de enterrados e executado o ensaio de mini CBR.

Para os corpos de prova com tempo de cura de um ano, após realizado o ensaio de mini CBR eles foram secos ao ar e destorroados até alcançar a finura solicitada na norma e proceder ao ensaio conforme estabelecido.

#### **4.4.4 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS**

A classificação tradicional do solo: foi determinada seguindo os conceitos estabelecidos em DNIT, (2006). O ensaio de classificação de solos tropicais foi realizado mediante o

ensaio mini-MCV DNER-ME 258/94 (DNER, 1994a) e classificado seguindo a norma DNER-CLA 259/96 (DNER, 1996).

A classificação tradicional da *Transport Research Board* - TRB, foi feito utilizando os resultados dos ensaios de granulometria e limites de consistência. Foram calculados os índices de grupo e finalmente, definidos os tipos de solos no ábaco constante da norma DNIT (2006).

Para a classificação tradicional do Sistema Unificado de Classificação de Solos - SUCS, de igual forma, foram considerados os resultados da análise de granulometria que definiam se o solo era classificado como fino ou grosso e com os limites de consistência e fazendo-se uso da carta de Casagrande apresentada em DNIT (2006) se identificou o tipo de solo.

Segundo a metodologia MCT, foi realizado o ensaio de classificação de solos seguindo o método mini-MCV (DNER, 1994a) e a norma DNER-CLA 259/96, que classifica como solo argilo arenoso laterítico (LA'), esta classificação é adequada para o tipo de solo, portanto, será a classificação utilizada. Na Tabela 4-3 apresenta-se o resumo da caracterização do solo estudado.

Tabela 4-3 - Resumo classificação do solo

<b>Material</b>	<b>Solo</b>
Classificação MCT	LA'
Classificação SUCS (SD)	SC
Classificação HRB (SD)	A-2-6
G <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	2,71
ω <sub>l</sub> (%)	35
ω <sub>p</sub> (%)	23
IP (%)	12

SD= sem defloculante; G<sub>s</sub> = densidade real dos grãos; ω<sub>l</sub> = limite de liquidez; ω<sub>p</sub> = limite de plasticidade; IP = índice de plasticidade

#### 4.4.5 CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA

O potencial de retenção de água, foi determinado utilizando-se a técnica do papel filtro seguindo-se, com pequenas alterações, a norma D5298 (ASTM, 2003). A curva transformada foi calculada utilizando-se a equação proposta por Camapum de Carvalho e Leroueil, (2004). O papel filtro utilizado foi de marca Quanty e as curvas de calibração utilizadas foram propostas por Borges *et al.* (2010) e estão apresentadas nas equações 4.1 e 4.2.

$$\text{Para } \omega_f > 55 \quad \psi = e^{\left[ \frac{(161,44 - \omega_f)}{24,7} \right]} \quad (4.1)$$

$$\text{Para } \omega_f \leq 55 \quad \psi = e^{\left[ \frac{(79,782 - \omega_f)}{6,26} \right]} \quad (4.2)$$

Em que,  $\psi = \psi$  é a sucção do solo e  $\omega_f$  a umidade do papel filtro.

Para o traçado de cada curva característica de retenção de água foram preparados 14 corpos de prova, compactados dinamicamente na umidade ótima, com energia intermediária. Após cada compactação os corpos de prova foram medidos e pesados.

As dimensões dos corpos de prova seguiram uma relação altura/diâmetro de 1:2, sendo assim, eles apresentaram 25 mm de altura e 50 mm de diâmetro. Foram utilizados em cada determinação da sucção matricial três diâmetros de papel filtro, sendo que um papel com 48 mm de diâmetro foi colocado sobre o corpo de prova de modo a evitar a contaminação dos demais; sobre ele foi colocado um papel com 40 mm de diâmetro e finalmente servindo como proteção favorável ao equilíbrio de umidade no papel central um papel com 44 mm de diâmetro.

Na análise dos resultados foram consideradas as determinações efetuadas para o papel do meio de 40 mm de diâmetro e em caso de problemas em sua determinação adotou-se a medida do papel superior. A Figura 4-13 apresenta o croqui da disposição dos 3 diâmetros do papel filtro. Após a colocação dos papéis filtro em cada corpo de prova eles foram imediatamente envoltos com filme plástico selado por fita isolante para evitar perda de umidade e garantir o contato entre o conjunto de papel filtro e o corpo de prova.

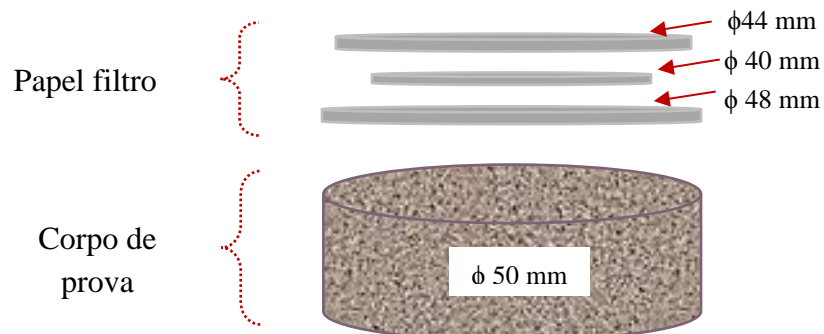


Figura 4-13 - Preparação dos corpos de prova, curva de retenção de água

Na definição de cada curva característica foi utilizada a técnica mista de variação do grau de saturação dos corpos de prova, ou seja, partindo-se da umidade de compactação alguns corpos de prova foram submetidos à secagem e outros ao umedecimento por gotejamento de água sobre os CPs até se atingir os graus de saturação desejados para cada CP. Procurou-se fazer a distribuição dos pontos entre 5% e 99% de grau de saturação.

Em todos os ensaios com tempo de cura superiores a 15 dias foram determinadas a sucção do corpo de prova, de tal forma a facilitar a análise e localização da amostra na curva característica. A curva característica da fibra pena completa foram determinadas no equipamento *Dewpoint Potentiometer* (WP4) medindo-se assim apenas a sucção total das mesmas.

#### 4.4.6 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA FIBRA

Devido à pena ser um polímero de estrutura definida e alvo de muitas pesquisas na área da química, foram coletadas as propriedades físicas da literatura em trabalhos relacionados a tratamentos de penas em vários âmbitos. Os resultados são apresentados na Tabela 4-4.

Tabela 4-4 – Propriedades físicas da pena segundo a literatura

Autor	Gs (g/cm <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	Temperatura de secagem (°C)	Temperatura de decomposição (°)	Condutividade
Barone e Schmidt, (2012)	0,89				
Brebu e Spiridon, (2011)				170 - 300	
Dash e Tripathy, (2018)	1,20E+0 3		-	-	-
Kock, (2006)	0,7 – 1,2	16 – 20*			
Martínez-Hernández <i>et al.</i> , (2007)				269	
Pourjavaheri <i>et al.</i> , (2014)				225-363	
Reddy e Yang, (2007)	0,8				
Schelestow <i>et al.</i> , (2017)					
Tesfaye <i>et al.</i> , (2018)			100° - 125°	230-380	2,84E-12

\* barbas

O ensaio de Gs realizado na pena completa deu como resultado 1,07 g/cm<sup>3</sup>, sendo compatível com os resultados obtidos por Kock, (2006). A pena completa degrada em uma temperatura de 170° a 380° segundo Brebu e Spiridon, (2011), Martínez-Hernández *et al.*, (2007), Pourjavaheri *et al.*, (2014) e Tesfaye *et al.*, (2018). As deformações na pena não são geralmente homogêneas. Barone e Schmidt, (2012) indicaram que a pena tem polímeros 40% hidrofílicos e 60% hidrofóbicos.

Tesfaye *et al.*, (2017) coletaram dados das características biológicas e físico-químicas das penas para reaproveitar e demonstrar as características das penas. Elaboraram a Tabela 4-5 em que quantificaram as proporções de aminoácidos da proteína e a funcionalidade de todas. A partir dessa tabela modificada, pode-se inferir o caráter hidrofóbico e higroscópico predominante na pena ao longo do tempo.



Tabela 4-5 – Quantificação dos aminoácidos da queratina e sua relação com as características.

Modificado: Tesfaye *et al.*, (2017)

<b>Grupo funcional</b>	<b>Amino ácido</b>	<b>Quantidade (%)</b>
Carregado positivamente	Arginina	4,30
Carregado negativamente	Ácido aspártico	6,00
	Glutamina	7,62
Hidrofóbico	Tirosina	1,00
	Leucina	2,62
	Isoleucina	3,32
	Valina	1,61
	Cisteína	8,85
	Alanina	3,44
	Fenilalanina	0,86
	Metionina	1,02
Higroscópico	Treonina	4,00
	Serina	16,00
Especial	Prolina	12,00
	Asparagina	4,00

Tesfaye *et al.*, (2017b) determinaram o teor de umidade das penas e a umidade recuperada apresentadas na Figura 4-14, as variações destacaram as barbas com a variação de 12,33%, a pena completa com 10,54% e finalmente a raque com 8,75% do total. A umidade recuperada indica a capacidade de retenção de água da fibra, fator que incrementa o peso específico da fibra e é mantida por longo tempo com pouca probabilidade de deterioro do material. Os resultados tendem a indicar que a pena é higroscópica, especificamente as barbas, por acumularem melhor em relação aos outros dois casos.

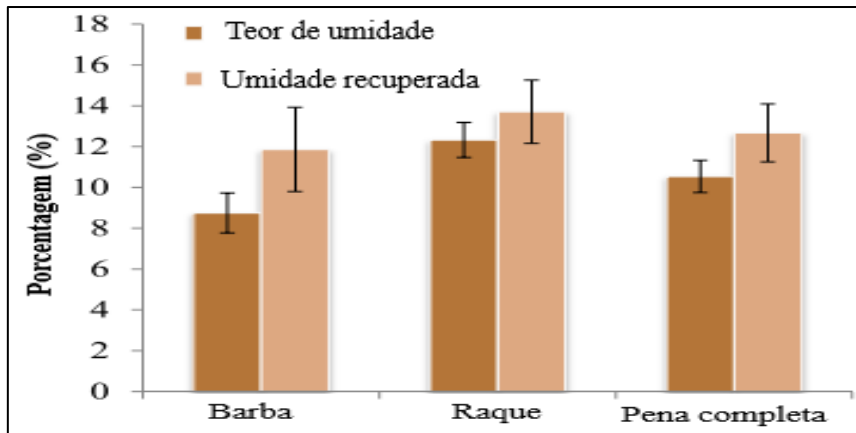


Figura 4-14 – Teor de umidade e umidade recuperada da pena. Fonte: modificado Tesfaye *et al.*, (2017b)

A Figura 4-15 apresenta a variação de pressão de superfície/pressão de poros  $P/P_0$  e sua relação com a adsorção e dessorção em barbas e raque, demonstrou-se que a quantidade de nitrogênio adsorvido é visivelmente mais baixa para a barba em comparação com a raque. Esses resultados mostraram que a raque possui adsorção e dessorção muito estáveis, resultando em uma área superficial mais alta em comparação com a barba, (Tesfaye *et al.*, 2017b).

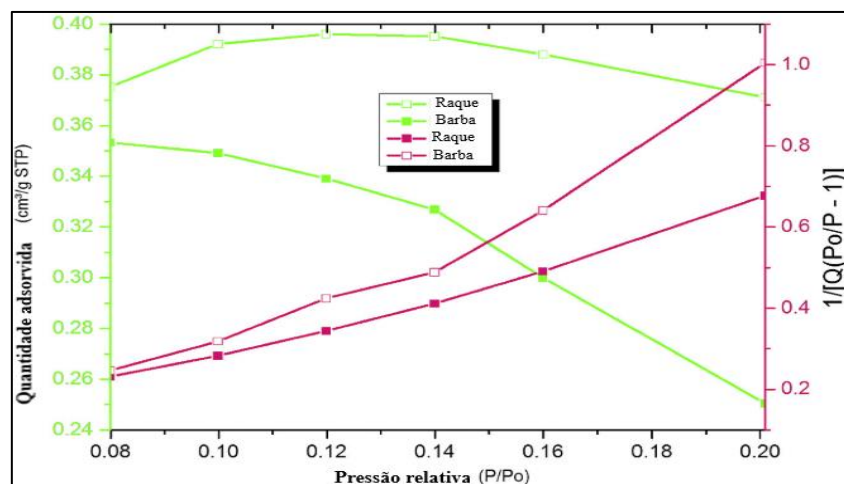


Figura 4-15 – Relação da pressão dos poros e adsorção da barba e raque. Fonte: modificado Tesfaye *et al.*, (2017b)

A Tabela 4-6 apresenta a variação percentual de umidade, avaliada como a umidade obtida a 25°C e 57% de umidade relativa do ar, bem como, a recuperação de umidade (*Regain*) que se traduz como a quantidade de água absorvida pelo material seco a 70°C e

65%, avaliadas sobre a massa seca do material, (Alonso, 2013). Os resultados verificaram umidades próximas, variações pouco relevantes. Os resultados obtidos indicam adsorção pouco relevante.

Tabela 4-6 – Resultados das Características Mecânicas da Pena. Fonte: Alonso, (2013) modificado

Nº	Teor de umidade	Teor de umidade recuperada
	(%)	(%)
1	0,70	0,70
2	4,34	4,54
3	0,72	0,73
4	3,77	3,92
5	2,22	2,28
6	3,80	3,96
7	2,34	2,40
8	1,95	1,99
9	4,54	4,77
10	1,39	1,40
11	5,10	5,38
12	1,94	1,99
13	3,30	3,42
14	1,07	1,09
15	0,91	0,92
16	2,46	2,52
17	2,25	2,30
18	2,08	2,12
19	1,50	1,53
20	2,52	2,59
<b>Média</b>	<b>2,44</b>	<b>2,52</b>
<b>CV (%)</b>	<b>53,27</b>	<b>54,76</b>

#### 4.4.7 PROPRIEDADES MINERALÓGICAS DO SOLO

No estudo das propriedades mineralógicas foram identificados os principais minerais do solo mediante o ensaio de difração de raios X (DRX). Para a análise, foram utilizados os corpos de prova oriundos dos ensaios de compactação, o equipamento de difração de raios X (DRX) utilizado foi de marca RIGAKU.

A preparação das amostras começou com a moagem de uma parte dos corpos de prova em uma capsula de ágata até alcançar um estado uniforme. O material preparado e em estado seco foi levado a uma lâmina de vidro e espalhado e levemente compactado em uma cavidade padrão da lâmina. Após esta preparação as lâminas foram levadas ao equipamento para determinar a mineralogia da fração total.

Para determinar a mineralogia da fração argila foram pesados 3 g do solo e misturados com água destilada em provetas plásticas fechadas hermeticamente. As provetas foram levadas a um centrifugador por 7 minutos, após esse tempo obteve-se a separação das fases sólida e líquida com sólidos ainda em suspensão das amostras. Rejeitando-se os sólidos submeteu-se a fase líquida a uma segunda centrifugação por um tempo de 30 minutos. O objetivo desta segunda centrifugação foi obter de modo separado apenas a fração argila do solo que se adere às paredes das provetas. O material coletado nas paredes das provetas foi colocado utilizando-se a técnica do esfregão em lâminas de vidro e levadas ao equipamento de DRX.

Finalmente o resultado de ambos representam a fração total, em que se identificam os principais picos dos minerais presentes no solo como um todo e a fração argila de modo isolado possibilitando a obtenção de uma melhor identificação dos principais argilominerais predominantes no solo.

#### **4.4.8 PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO**

No estudo das propriedades químicas analisou-se em uma primeira etapa a composição química e o pH em H<sub>2</sub>O e KCl do solo por meio de análises realizadas no laboratório *Soloquímica*.

Em uma segunda etapa o pH do solo e da cal foram determinados no laboratório do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília. As amostras foram nesta etapa preparadas seguindo o manual da EMBRAPA (2017). Os resultados obtidos nesta etapa utilizando-se o pHmetro da marca Quimis, foram semelhantes aos obtidos na primeira etapa no laboratório *Soloquímica*.

Os ensaios para determinação dos principais elementos químicos presentes no solo foram realizados no laboratório “Central Analítica” do Instituto de Química da Universidade de Brasília. O ensaio para determinação dos elementos predominantes foi a espectroscopia de fluorescência de raios – X por energia dispersiva (XRF/EDX). O equipamento utilizado foi o de marca SHIMADZU, modelo EDX 720HS. Neste ensaio a amostra foi homogeneizada e transferida em fina camada dispersa para uma porta amostra. Em seguida as porta amostras foram numeradas em série.

#### **4.4.9 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA - MEV**

O ensaio foi realizado no laboratório de FURNAS e no laboratório de Microscopia e Microanálise do departamento de Biologia da Universidade de Brasília - LMM. O equipamento utilizado no laboratório LMM foi o de marca JEOL, modelo JSM – 7000F. Os microscópios usados nesta fase foram os de alto vácuo que exigem a metalização das amostras de modo a possibilitar a varredura por raios no equipamento.

A preparo das amostras teve início com a preparação de cubos com aproximadamente 8 mm de lado tendo-se o cuidado de não se submeter a superfície a ser analisada a corte, pois isso induziria a alteração da estrutura do solo. Em seguida fez-se a metalização dos corpos de prova com ouro em equipamento externo ao MEV.

As amostras analisadas correspondem a corpos de prova antes e depois de enterrados. Foram analisados o solo puro, solo – cal 4%, solo fibra 0,25% e a pena completa sendo que esta foi observada apenas em seu estado natural. De igual forma, foram tomadas fotografias com lupa da marca *Scope* do laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília. Esse equipamento oferece a vantagem em relação ao MEV de alto vácuo de não requerer a desidratação do sol para a sua metalização evitando-se assim possíveis alterações estruturais do solo oriundas do processo de secagem.

#### **4.4.10 ENSAIOS PRELIMINARES – MINI COMPACTAÇÃO**

O ensaio de mini compactação foi realizado com o solo em estado natural, seguindo a norma DNER-ME 228/94 (DNER, 1994b). A preparação dos corpos de prova começou

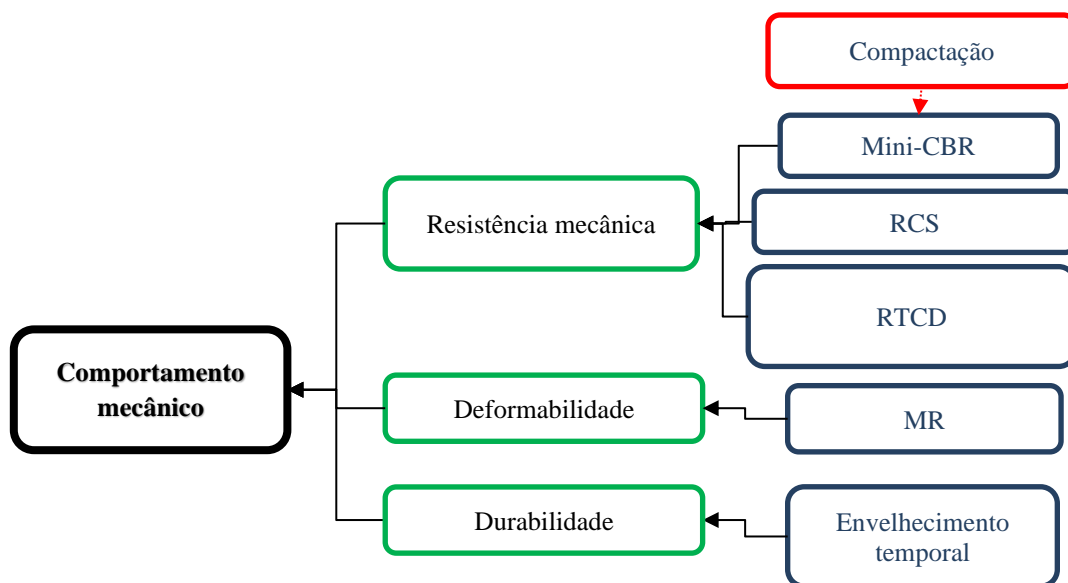
24 horas antes, misturando o solo com água, foi acrescentado 2% de água para cada ponto da curva de compactação no ramo úmido, no ramo seco deixou-se o solo secar naturalmente até se atingir as umidades pretendidas observando-se diferenças de umidade de aproximadamente 2% entre os pontos. Para garantir a homogeneização das misturas solo-água, se deixou as amostras em sacos plásticos devidamente fechados na câmara climatizada por 24 horas.

Utilizou-se na compactação a energia intermediária na qual foram aplicados 6 golpes na face superior em seguida, após a inversão do corpo de prova (CP), mais 6 golpes na outra face. Imediatamente foram pesados e medidos os diâmetros e alturas de cada CP. Os corpos de prova foram levados a imersão por 24 horas para determinação da expansão do material. Os passos seguintes corresponderam ao ensaio de mini CBR.

O processo de compactação seguiu duas etapas: compactação para determinar o peso específico aparente seco máximo e a umidade ótima dos 70 casos inicialmente estudados; compactação dos corpos de prova a serem submetidos aos ensaios programados para a realização do estudo.

#### **4.5 ETAPA 2: ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS MATERIAIS**

Na segunda etapa, foi avaliado o comportamento mecânico dos materiais e suas combinações. Na Figura 4-16, apresenta-se a lista de ensaios realizados para avaliação do desempenho da resistência das misturas.



CBR=índice de suporte Califórnia; RCS = resistência a compressão simples; RTCD = resistência a tração por compressão diametral; MR = módulo de resiliência

Figura 4-16 – Programa de ensaios

Para melhor organização dos ensaios, 1.051 corpos de prova foram preparados desde a compactação e destino nos ensaios de mini CBR, resistência a compressão simples, resistência a tração por compressão diametral, módulo de resiliência e curva característica de retenção de água. O detalhe de combinações e ensaios está apresentado na Tabela 4-7.

Tabela 4-7 – Quantificação dos corpos de prova preparados para os ensaios de resistência

Teores solo - fibra - cal/combinções			Número de corpos de prova					
Reforço - aditivo	Combinação	Teor	Mini compactação	Mini CBR	RCS	RTCD	MR	CC
Solo	-	0%	5	5	6	9	3	14
Fibra	R - B - PC	0,25%	15	15	18	21	6	14
	R - B - PC	0,50%	15	15	18	21	6	14
	R - B - PC	0,75%	15	15	18	21	-	-
Cal	I - III	4%	10	10	12	15	6	14
	I - III	6%	10	10	12	15	6	14
	I - III	10%	10	10	12	15	-	14
Cal-Fibra	R - B - PC e 4%I	0,25%	15	15	18	21	6	14
	R - B - PC e 4%I	0,50%	15	15	18	21	6	-
	R - B - PC e 4%I	0,75%	15	15	18	21	-	-
	R - B - PC e 6%I	0,25%	15	15	18	21	-	-
	R - B - PC e 6%I	0,50%	15	15	18	21	-	-

Teores solo - fibra - cal/combinções			Número de corpos de prova					
Reforço - aditivo	Combinação	Teor	Mini compactação	Mini CBR	RCS	RTCD	MR	CC
	R - B - PC e 6%I	0,75%	15	15	18	21	-	-
	R - B - PC e 10%I	0,25%	15	15	18	21	-	-
	R - B - PC e 10%I	0,50%	15	15	18	21	-	-
	R - B - PC e 10%I	0,75%	15	15	18	21	-	-
	R - B - PC e 4%III	0,25%	15	15	-	-	-	-
	R - B - PC e 4%III	0,50%	15	15	-	-	-	-
	R - B - PC e 4%III	0,75%	15	15	-	-	-	-
	R - B - PC e 6%III	0,25%	15	15	-	-	-	-
	R - B - PC e 6%III	0,50%	15	15	-	-	-	-
	R - B - PC e 6%III	0,75%	15	15	-	-	-	-
	R - B - PC e 10%III	0,25%	15	15	-	-	-	-
	R - B - PC e 10%III	0,50%	15	15	-	-	-	-
	R - B - PC e 10%III	0,75%	15	15	-	-	-	-

CO = resistência à compressão simples; RTCD = resistência à tração por compressão diametral; MR = módulo de resiliência; CC = curva característica de retenção de água; R = raque; B = barba; PC = pena completa; I = cal tipo CH - I; III = cal tipo CH-III

#### 4.5.1 MINI CBR

Os ensaios foram realizados em duas etapas, uma inicial conforme norma DNER-ME 254/97 (DNER, 1997). Para realização do ensaio foram usados os corpos de prova oriundos do ensaio de compactação. Os corpos de prova foram ensaiados na prensa de CBR de marca SOLOTEST automática.

Os corpos de prova submergidos em água foram levados à prensa mecânica para ruptura por penetração. Terminado o ensaio, foi determinada a umidade de cada corpo de prova e este armazenado para ser enterrado em campo.

Uma vez terminados os ensaios mini CBR do solo, solo fibra, solo – cal e solo fibra – cal, os corpos de prova foram medidos e pesados para serem enterrados em campo segundo a disposição apresentada na Figura 4-17. A localização foi descrita no item métodos de cura. Todos os corpos de prova foram enterrados em dois dias consecutivos, para manter as mesmas características e tempo de cura.



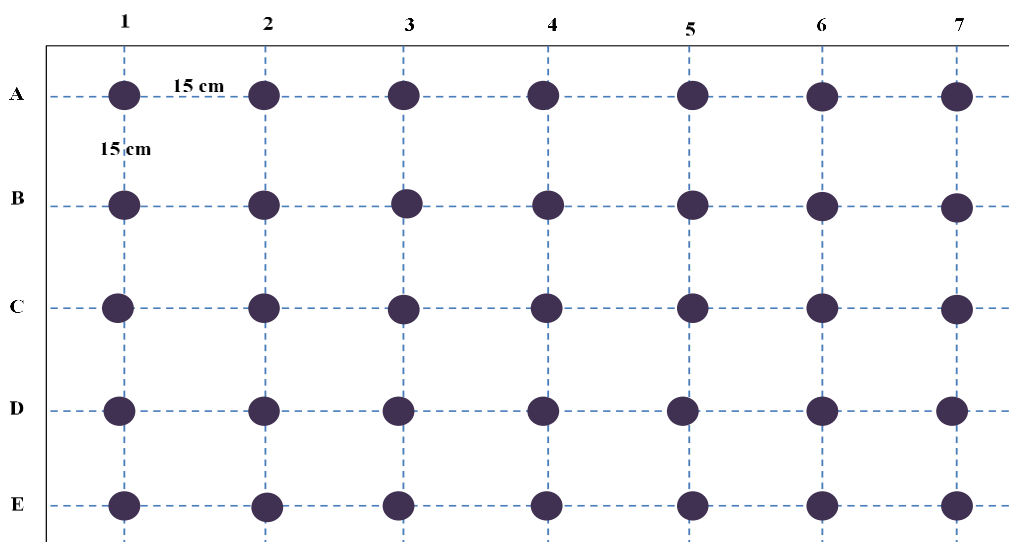


Figura 4-17 – Disposição dos CPs enterrados em campo

A segunda etapa dos ensaios começou com a escavação e remoção dos corpos de prova, depois de um ano de cura em campo. A coleta teve início em 17 de maio de 2018. No momento das coletas foram determinadas as umidades do solo natural ao redor das valas e nos seus interiores. Coincidindo com a época de seca, a umidade média do solo foi 17%.

O procedimento de escavação envolveu o trabalho de uma vala por vez, conseguindo-se abrir 2 valas por dia. Os corpos de prova após a coleta foram imediatamente levados ao laboratório para serem medidos e pesados. Durante a escavação, como apresentado na Figura 4-18, vários corpos de prova se romperam devido a seu estado de fragilidade.

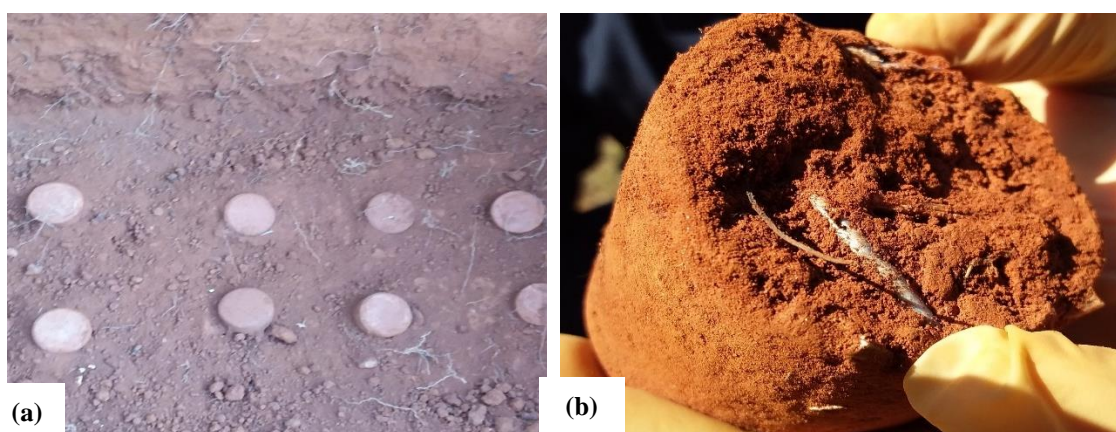


Figura 4-18 – Recuperação dos corpos de prova. (a) desenterrado; (b) ruptura devido à estrutura fragilizada

Antes de realizar o ensaio de mini CBR se realizou a determinação da sucção atuante em cada corpo de prova. O procedimento utilizado para determinação da sucção matricial foi o método do papel filtro e consistiu na medição inicial e determinação do peso dos corpos de prova imediatamente após coletados das valas. Foram colocados três camadas de papel filtro e envolvidas em uma camada de papel filme depois vedada com fita adesiva para garantir a área de contato do corpo de prova ao papel filtro, depois várias camadas de papel filme foram colocadas no corpos de prova para evitar a perda de água e levados na câmara climática pelo período de 15 dias.

Após esses 15 dias, foi realizado o mesmo procedimento de pesagem e levantamento de medidas, assim como a pesagem dos papéis filtro e determinação de suas respectivas umidades, o papel filtro foi levado na estufa por 4 horas para depois ser pesados imediatamente. Todo o processo de pesagem do papel filtro deve ser realizado de imediato para evitar erros de ensaio.

Finalmente, após concluídos os procedimentos do ensaio de sucção, foram realizados os ensaios de mini CBR nas umidades em que se encontravam os CPs. Os corpos de prova foram rompidos na prensa mecânica e posteriormente foi determinada a umidade das amostras, mediante o método da estufa. A Figura 4-19 apresenta o procedimento de preparação e armazenamento das amostras para determinação da sucção.



Figura 4-19 – Determinação da sucção: (a) preparação; (b) condição de armazenamento

#### **4.5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES - RCS**

O ensaio de resistência à compressão simples foi realizado seguindo a norma NBR 12770 (ABNT, 1992). Para a preparação das amostras se adotou a metodologia de compactação (DNER, 1994b).

No ensaio pretendeu-se avaliar a influência da cura sobre a resistência à compressão simples do solo e de suas combinações com fibra e cal.

Foram compactados 6 corpos de prova na condição ótima determinada no ensaio de compactação utilizando-se o solo na umidade natural, ou seja, sem secagem prévia. As dimensões dos corpos de prova seguiram uma relação 2:1 adotando-se 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro.

Para cada condição foram preparados um conjunto de 6 corpos de prova, 2 foram ensaiados após 30 dias de cura, no entanto, 15 dias antes eram preparados com papel filtro para determinação da sucção e transcorrido esse tempo de equilíbrio foram ensaios a RCS. Os 4 restantes foram divididos em dois grupos, aqueles que iriam ser enterrados (1) e os que foram armazenados em câmara climatizada (2).

No 45º dia, um corpo de prova curado em campo e um em laboratório foram preparados para a determinação das sucções neles atuantes após 60 dias de cura. Portanto, o corpo de prova curado em campo foi mantido 45 dias enterrado e 15 dias em condições de cura de laboratório. Após a cura os CP foram submetidos ao ensaio de compressão simples.

O mesmo procedimento foi realizado aos 75 dias para determinação da sucção do grupo submetido a 90 dias de cura. A Figura 4-20 apresenta o número, tempo e método de cura dos corpos de prova preparados para a resistência à compressão simples, para cada tempo de cura foi testado um corpo de prova com método de cura em campo e laboratório.

Para a ruptura, cada corpo de prova foi antes devidamente pesado e medido. Durante o ensaio, o pistão com diâmetro 50 mm cobre toda a região ou face superior do corpo de prova.

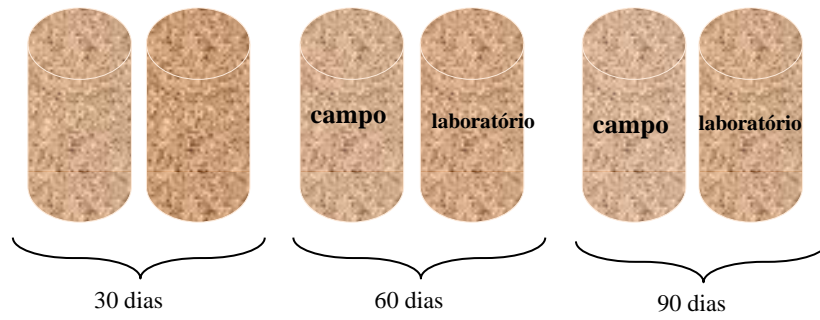


Figura 4-20 – Corpos de prova RCS – planejamento de ensaios, tempo e métodos de cura

Aplicada a carga a velocidade constante de 1,26 mm por minuto, foram levantados os dados de carga e deformação de cada corpo de prova. Os ensaios foram considerados concluídos quando da ruptura dos corpos de prova. No caso das misturas com fibra, o corpo de prova fissa e começa a atuar a fibra, por esse motivo as curvas de deformação diferem das amostras sem fibra. Posteriormente à ruptura de cada corpo de prova, foram determinadas suas umidades. A Figura 4-21 apresenta um corpo de prova no momento do ensaio (a) e após ruptura (b).



Figura 4-21 – Resistência à compressão simples: montagem do ensaio durante (a) e após (b) ruptura



### 4.5.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL - RTCD

O ensaio de resistência à tração foi realizado seguindo a norma DNER-ME 181 (DNER, 1994c), e DNIT-ME 138 (DNIT-IPR, 2018). Para preparar os corpos de prova foi utilizada a norma (DNER, 1994b).

Os 6 corpos de prova foram preparados na umidade ótima do ensaio de compactação com dimensões obedecendo à relação de 1:2, ou seja, 25 mm de altura e 50 mm de diâmetro. Do total, 2 corpos foram rompidos e 4 armazenados para enterrar.

Antes de realizar o ensaio de tração por compressão diametral, foi determinada a sucção atuante em cada corpo de prova. Os tempos de cura adotados foram: 1 e 30 dias para a cura em laboratório e 60 e 90 dias em campo. A Figura 4-22 apresenta a montagem do ensaio, antes e depois da ruptura. Na imagem do corpo de prova rompido se observa fibras fazendo o elo entre os dois lados do CP rompido.

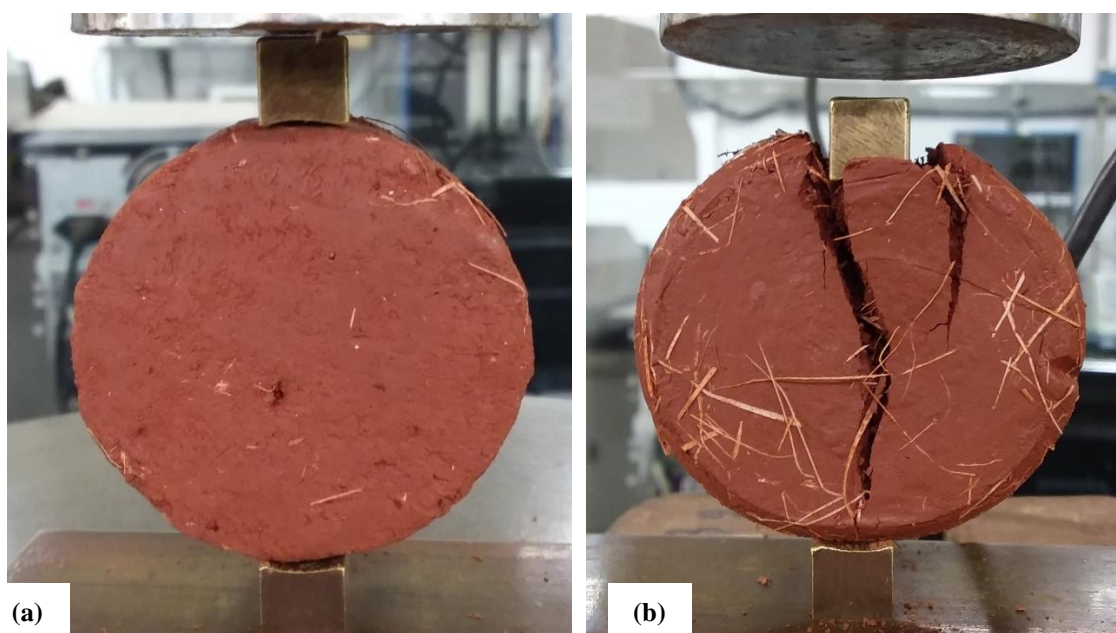


Figura 4-22 – Montagem do ensaio de resistência à tração por compressão diametral: (a) antes da ruptura; (b) após ruptura

#### 4.5.4 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O ensaio de determinação do Módulo de resiliência foi realizado seguindo as normas DNIT – 134/2018 (DNIT, 2018b) e DNIT – 181/2018 (DNIT, 2018c). Para a preparação das amostras se adotou a metodologia de compactação DNER (1994b).

O ensaio consiste na aplicação de cargas repetidas em três grupos e suas combinações simulam a passagem de diferentes tipos de veículos sobre a estrutura do pavimento. O módulo é calculado mediante a relação da tensão desvio dividido pela deformação recuperável ( $M_r = \sigma_d / \epsilon_R$ ).

A marca do equipamento utilizado para determinar o módulo de resiliência foi a *Universal Testing Machine*. – UTM. O equipamento foi programado em pares de cargas predefinidas segundo a norma utilizada. Na Figura 4-23 é apresentado o esquema de montagem do ensaio.

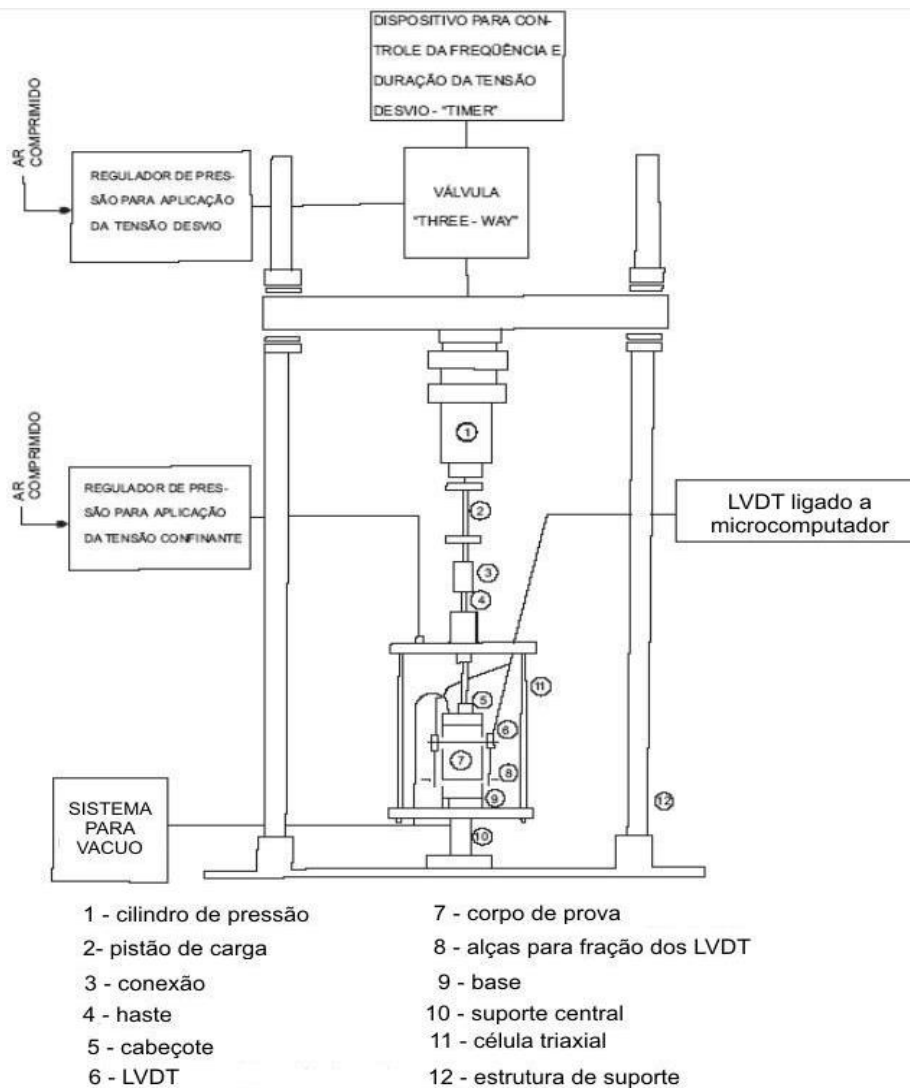


Figura 4-23 – Esquema de montagem do equipamento de cargas repetidas. Fonte: modificado DNIT – 134/2018 (DNIT, 2018b)

O tamanho de cada corpo seguiu a relação 2:1, sendo 100 mm a altura e 50 mm o diâmetro. Eles foram compactados na umidade ótima, determinada no ensaio de compactação. Inicialmente, foram preparados 3 corpos de prova para verificação dos modelos constitutivos dos materiais. Em seguida, para cada ponto foram testados 3 corpos de prova.

Para realizar os ensaios de módulo de resiliência foram escolhidos 11 corpos de prova sendo que se verificou o melhor desempenho nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral como critério de escolha. Após os ensaios os corpos de prova foram

submetidos ao ensaio de resistência a compressão simples e em seguida determinadas as umidades.

#### 4.6 ETAPA 3: ANÁLISE TEMPORAL DAS COMBINAÇÕES DA ETAPA 2

Conforme programado os tempos de cura analisados corresponderam a 5 estágios, compreendidos entre 1 e 365 dias sendo adotados dois métodos de cura, laboratório e campo. A Tabela 4-8 apresenta o detalhe dos tempos e métodos de cura adotados para execução dos ensaios. O objetivo desse estudo foi verificar a ocorrência ou não de degradação das fibras em diferentes períodos e métodos de cura.

Tabela 4-8 – Detalhe de tempos e métodos de cura por tipo de ensaio

<b>Ensaio</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>
Mini CBR	Norma (laboratório)				365 dias (campo)
RCS	-	30 dias (laboratório)	60 dias (campo e laboratório)	90 dias (campo e laboratório)	-
RTCD	1 dia (laboratório)	30 dias (laboratório)	60 dias (campo)	90 dias (campo)	-
MR	1 dia (laboratório)	30 dias (laboratório)	60 dias (campo e laboratório)	90 dias (campo e laboratório)	-

#### 4.6.1 ETAPA 4: ANÁLISE INDIVIDUAL E COMPARATIVA DOS RESULTADOS

Finalmente, esta etapa abordou uma análise individual dos resultados, continuando com uma análise comparativa de todos os casos conforme mostrado na Figura 4-24. As análises foram realizadas de forma qualitativa e quantitativa.



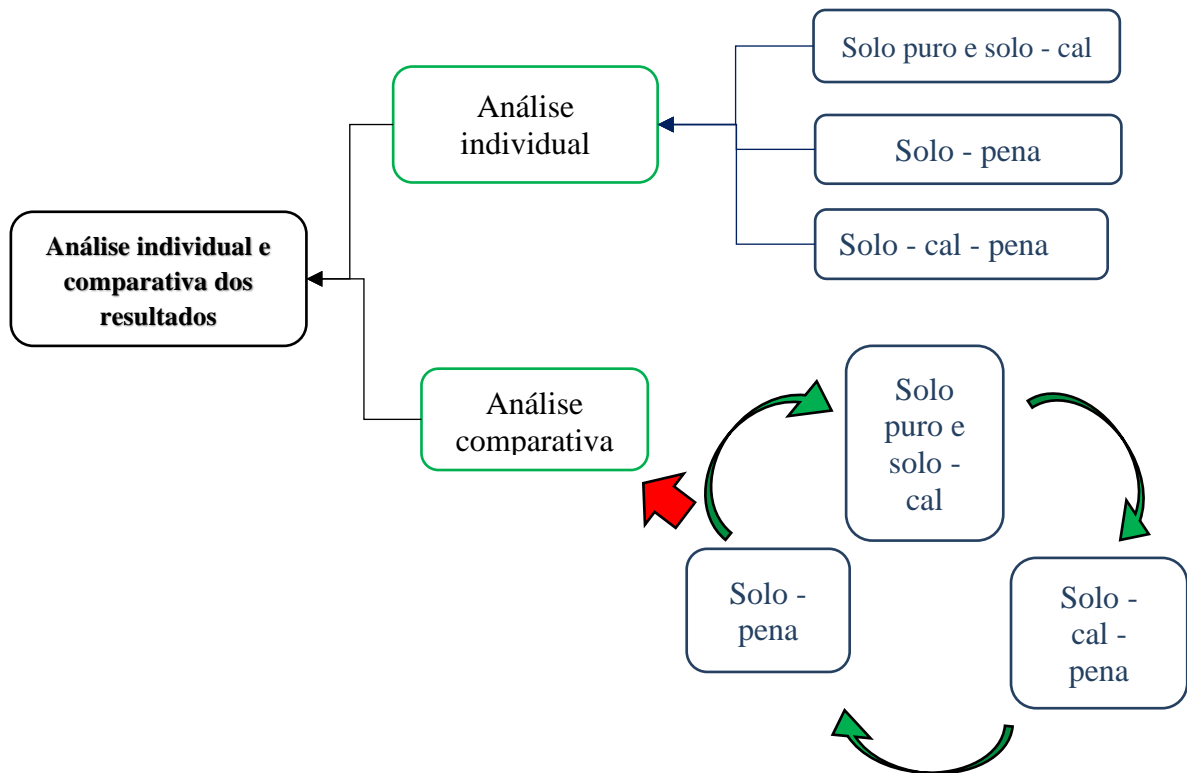


Figura 4-24 - Etapa 4: Desenvolvimento das análises individuais e comparativas

## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

### 5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo tem por objetivo apresentar e analisar os resultados dos ensaios de caracterização física, química, mineralógicas e de estudo do comportamento mecânico realizados no solo puro, solo-fibra, solo-cal e solo-fibra-cal.

Na apresentação e análise dos resultados os tempos e métodos de cura foram agrupados por tipo de ensaio.

### 5.2 GRANULOMETRIA

Os resultados dos ensaios de granulometria obtidos para o solo puro e para as misturas com a cal CH-I, são apresentados na Figura 5-1 e para a cal CH-III na Figura 5-2. Nestas figuras, SP representa o solo puro; CD e SD são os estados com e sem o uso de defloculante; 1D (um dia após a mistura) e 1A (um ano após a mistura e compactação) são as condições referentes ao tempo de cura das misturas; 4, 6 e 10 representam os teores em % das cales tipo CH-I e CH-III adicionadas nas misturas solo-cal.

Observa-se nas curvas granulométricas correspondentes ao estado inicial, apresentadas na Figura 5-1(a), uma desagregação moderada do solo para os 3 teores de cal utilizados em relação ao solo puro sem o uso de defloculante, no entanto, na Figura 5-1(b) observa-se a ampliação desta desagregação após um ano de cura em campo. Esta desagregação passa a ser significativa para os grãos menores que 0,074 mm sendo mais relevantes para os teores 4% e 10% e menos significativa para 6% de cal. A explicação para o fato do teor 6% de cal ter fugido à tendência de aumento da desagregação com o teor de cal poderia ser devido a sua localização na vala de deposição dos corpos de prova para cura *in situ* (ver item 4.2 métodos de cura).

Destaca-se ainda que, como os corpos de prova preparados com o solo puro foram enterrados em vala comum com os provenientes das misturas solo-cal, eles também apresentaram certa desagregação até a malha 0,04 mm, embora, como esperado, menor. Em relação à situação inicial, pode-se identificar um incremento da fração silte. Esta

constatação verificada para o solo puro tem grande relevância, pois em camadas subjacentes e subleitos compostos por solos profundamente intemperizados sensíveis à cal, estes podem passar por comprometimento da estabilidade estrutural dos agregados ao longo do tempo.

Na apresentação e análise dos resultados os tempos e métodos de cura foram agrupados por tipo de ensaio.

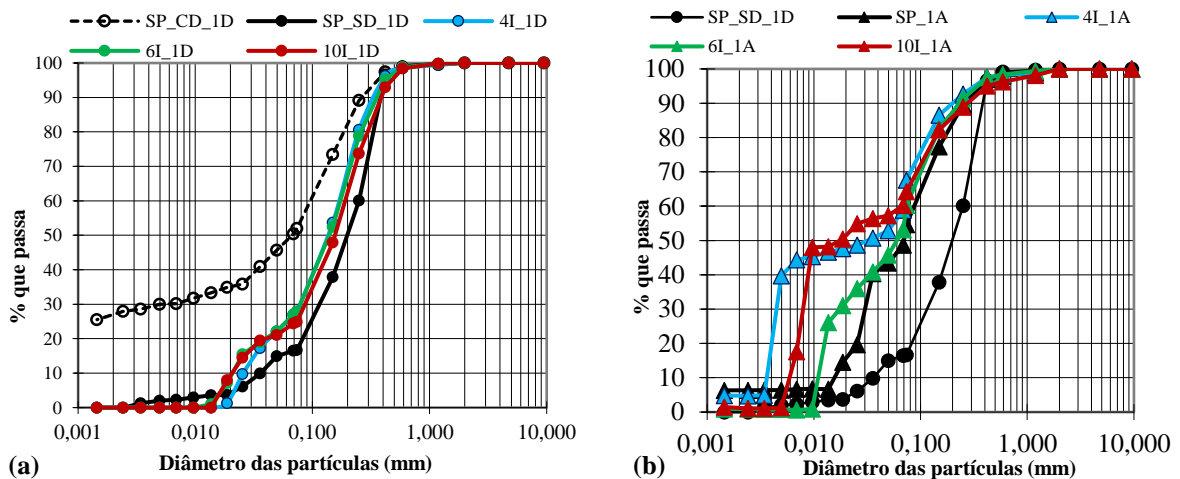


Figura 5-1 – Influência do tempo de cura na granulometria do solo - cal CH-I (a) imediato; (b) um ano de cura

A análise da influência da cal tipo CH-III na desagregação do solo foi realizada nas mesmas condições das misturas solo-cal tipo CH-I. Os resultados são apresentados nas curvas granulométricas da Figura 5-2 (a) e (b).

Identificam-se desagregações pouco relevantes para um tempo de cura curto apresentado na Figura 5-2(a). Quando o corpo de prova é submetido a um tempo de cura maior, como apresentado na Figura 5-2(b), a desagregação amplia para grãos menores que a malha 0,074 mm, esta desagregação diminui no diâmetro 0,009 mm caindo o valor a menos de 5% de finos, no entanto, para o solo-cal 10% a desagregação acontece a partir da abertura 0,025 mm e é menos relevante em relação aos outros teores e ao próprio solo puro.

A exemplo do comentado em relação à cal CH-I, a localização dos corpos de prova na vala em que foram dispostos para cura pode ter interferido diretamente nos resultados

sinalizando para a grande relevância das condições de drenagem no comportamento das misturas. Outra possibilidade é que além da desagregação favorecida pelas trocas catiônicas a formação de cimentações quando do uso de maior teor de cal pode ter restabelecido parte da estabilidade estrutural dos agregados.

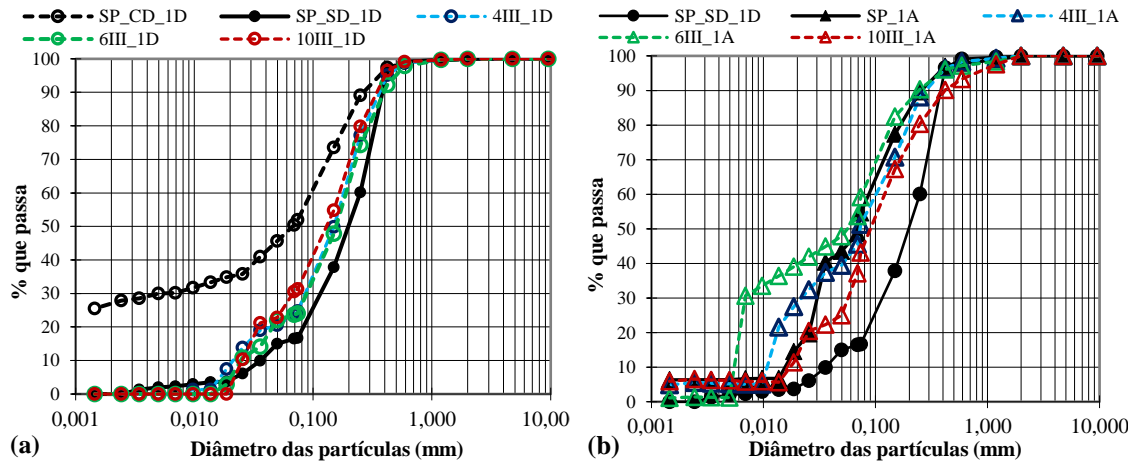


Figura 5-2: Influência do tempo de cura na granulometria das misturas solo-cal CH-III: (a) imediato; (b) um ano de cura

Verifica-se que para tempos de cura maiores e em condições de cura naturais, a desagregação não pode ser diretamente relacionada ao tipo de cal, com base nas condições do estudo realizado, embora se perceba diferenças entre os resultados oriundos das cales CH-I e CH-III. O fator condição de drenagem sugere ter influenciado nos resultados obtidos.

A ampliação da desagregação do solo puro quando da cura em condições ambientes aponta para a contaminação dos corpos de prova por compostos químicos provenientes das misturas solo-cal dos corpos de prova enterrados na vala comum, o que requer maiores cuidados em relação ao maciço não tratado de contorno do solo tratado quimicamente.

Contrariando o citado por Cassiano de Sousa *et al.* (2016), os solos de comportamento lateríticos podem desagregar quando elementos químicos reagem com os silicatos e aluminatos componentes das suas estruturas.

### 5.3 DENSIDADE REAL DOS GRÃOS (GS)

Na Figura 5-3 (a), são apresentados para misturas com a cal tipo CH-I os resultados de densidade real dos grãos (Gs) para um dia após a mistura, 30 dias após a mistura e 1 ano após a mistura. Na Figura 5-3 (b) estão os resultados obtidos para misturas com a cal tipo CH-III.

Em ambas as figuras são apresentados os valores ponderados das misturas solo-cal considerando-se a densidade do solo puro ( $G_s = 2,71$ ) e a densidade da cal oriunda do *site* cal SUPERCAL REBOCAL ( $G_s = 2,21$ ). Observa-se destes resultados que os valores ponderados, a exceção do ponto correspondente a 10 % de cal, foram muito próximos dos determinados para as misturas, pois nelas os valores obtidos para este teor foram semelhantes aos obtidos quando da incorporação de 6% de cal. Cabe destacar que para as cales usadas nesta tese foram obtidos os valores de  $G_s$  respectivamente de 2,50 e 2,57 para as Cales CH-I e CH-III após secagem na estufa a 105-110°C (Llanque *et al.*, 2018) e não o valor de referência 2,21, possivelmente afetado por umidade, ou por composição químico-mineralógica distinta.

A cura do solo por um ano se deu *in situ* e no mesmo local foram enterrados corpos de prova solo-cal e corpos de prova de solo não tratado com cal. Os resultados indicam que para um tempo de cura curto (1 dia), existe em relação ao solo natural, uma diminuição do  $G_s$  das misturas solo-cal para ambos os tipos de cal utilizados, isto devido ao menor valor apresentado pela cal. Ao se ampliar o tempo de cura tem-se de um modo geral uma pequena redução da densidade real em relação ao tempo de cura de 1 dia sinalizando para a formação de compostos com menor densidade de grãos. Cabe destacar que o solo natural não teve sua densidade real afetada, ou seja, a ação química limitou-se às trocas catiônicas que atuaram instabilizando os agregados.

Destaca-se ainda que ao passar de 6% para 10% de cal as variações do  $G_s$  das misturas foi praticamente nula apontando para o fato de que em 30 dias ocorrem as alterações químico-mineralógicas responsáveis pelas variações no  $G_s$ .

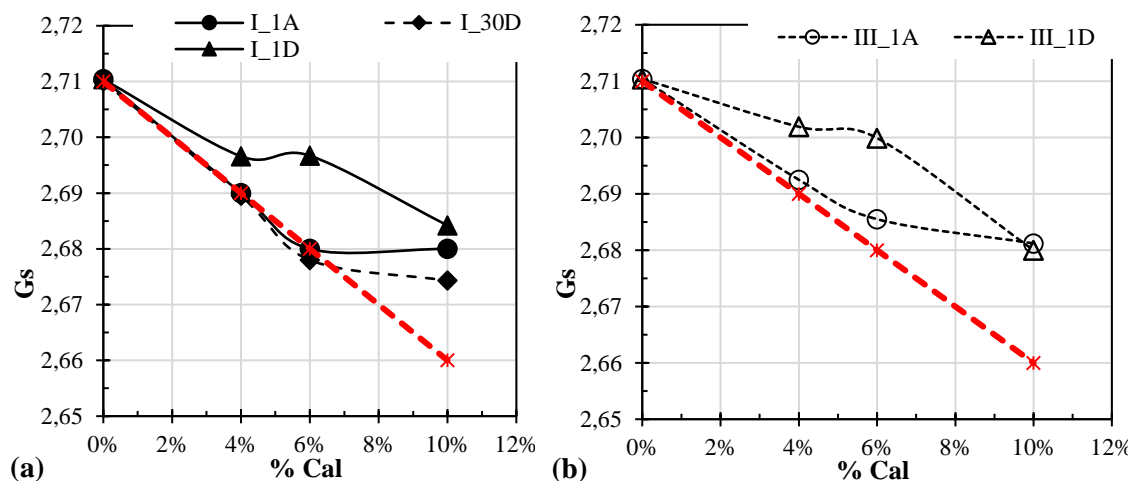


Figura 5-3 – Influência do tempo e método de cura na densidade real dos grãos: (a) cal CH-I; (b) cal CH-III

#### 5.4 LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Realizados os ensaios de limites de Atterberg para os dois tempos e situações de cura das misturas solo-cal CH-I e CH-III obteve-se os resultados apresentados na Figura 5-4(a) para a cal tipo CH-I e (b) para a cal CH-III. Nessas figuras  $\omega_l$  representa o limite de liquidez,  $\omega_p$  é o limite de plasticidade, IP é o índice de plasticidade, I é a cal CH-I, III a cal CH-III, 1A representa o tempo de cura de um ano para o solo puro e misturas solo-cal enterradas.

Dadas as variações com aumentos e reduções de  $\omega_l$  e  $\omega_p$  com o teor de cal, é razoável admitir que as diferenças se devem a variabilidade dos resultados dos ensaios. Nos limites de plasticidade, por exemplo, as diferenças em relação à média são inferiores a 5%, percentual admitido em norma como variabilidade permitida. No entanto, os resultados obtidos permitem chegar as seguintes conclusões relevantes:

1) Independente do tempo de cura e do teor e tipo de cal usado não se verificou alterações significativas dos limites de Atterberg dos solos estabilizados, portanto, conclui-se que as alterações verificadas em relação ao solo natural são devidas quase que exclusivamente à eventuais instabilizações nos micro agregados ou a trocas iônicas que afetam pouco as propriedades deste solo tendo em vista ser ele de natureza caulínica com baixa capacidade de troca de cátions (CTC = 2,64 mE / 100 mL). Ademais, tratando-se de um solo caulínico, o recebimento do cálcio presente nas cales contribuiria, segundo os

resultados apresentados por White (1955) e reportados por Grim (1962) para o aumento dos limites de Atterberg, verificando-se, no entanto, na Figura 5-4, que o limite de liquidez se manteve praticamente inalterado e o limite de plasticidade diminuiu, o que sinaliza para pouco ou nenhum impacto das trocas catiônicas nestes resultados.

2) Os resultados obtidos para o solo puro, após 1 ano de cura, se aproximaram daqueles obtidos para as misturas solo-cal. Isso significa que ocorreu migração química das misturas solo-cal para o solo puro proporcionando eventuais trocas iônicas e/ou instabilizações de microagregados responsáveis pelas mudanças nos limites de plasticidade indicadas na conclusão 1. Esta última observação tem grande relevância, pois indica que os subleitos de estruturas de pavimentos nas quais se utilizou solo estabilizado com cal nas camadas de base e/ou sub-base pode passar por alterações de propriedade e comportamento em consequência dos compostos químicos que migram das camadas compactadas estabilizadas quimicamente.

3) Observa-se nestas figuras que a maior alteração em relação ao solo natural não enterrado para os diferentes teores de cal, inclusive o 0%, se deu para o limite de plasticidade o que sinaliza para alterações mais de cunho estrutural, pois estaria contribuindo para o aumento da resistência à tração do solo por meio da ampliação dos pontos de contato, mas essa é uma questão que requer maiores análises e reflexões.

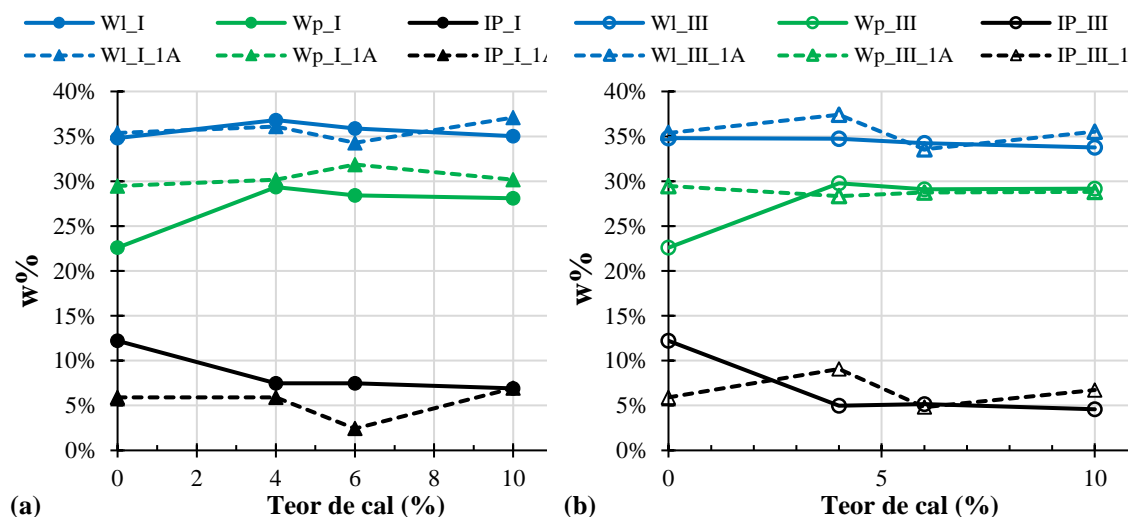


Figura 5-4 – Influência da cal na consistência do solo ao longo do tempo: (a) cal tipo CH-I; (b) cal tipo CH-III

## 5.5 CLASSIFICAÇÃO DO SOLO

Os resultados de classificação dos solos oriundos dos corpos de prova, obedecendo os métodos e condições de cura são apresentados na Tabela 5-1 e neles verifica-se a influência da cura na classificação das misturas solo-cal, onde observa-se que para as amostras estabilizadas e ensaiadas não houve variação entre o tempo de cura 30 dias e 1 ano. Destaca-se ainda que o solo puro ensaiado sem o uso de defloculante (SD) após a cura enterrada teve sua classificação alterada para a mesma das misturas solo-cal provavelmente em consequência da contaminação química oriunda das misturas solo-cal.

Tabela 5-1 – Influência do tempo de cura na classificação do solo

CP	Tempo de Cura					
	Imediato		30 dias		1 ano	
	SUCS	HRB	SUCS	HRB	SUCS	HRB
SP_CD	CL	A-6				
SP_SD	SC	A-2-6			ML	A-4
4I	SM	A-2-4	ML	A-4	ML	A-4
6I	SM	A-2-4	ML	A-4	ML	A-4
10I	SM	A-2-4	ML	A-4	ML	A-4
4III	SM	A-2-4			ML	A-4
6III	SM	A-2-4			ML	A-4
10III	SM	A-2-4			ML	A-4

CP - Corpo de Prova

Diante do exposto, verifica-se que para tempos de cura curtos, as misturas apresentaram uma classificação A-2-4 no sistema TRB, equivalente a uma areia siltosa no sistema SUCS, a partir de 30 dias a classificação TRB muda para um solo A-4 e a SUCS para um silte pouco plástico. Destaca-se que embora o solo puro tenha apresentado a mesma classificação TRB das misturas após um ano de cura na classificação SUCS ele passou de uma areia argilosa para um silte pouco plástico.

Para fins de pavimentação verifica-se, portanto, que as cales utilizadas levaram a uma pior classificação do solo estudado, devido ao efeito da desagregação temporal.



## **5.6 POTENCIAL DE RETENÇÃO DE ÁGUA**

A partir dos resultados dos ensaios de determinação da sucção foram elaboradas as curvas características de retenção de água para as misturas solo-cal e para as misturas solo-fibras.

### **5.6.1 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DA UMIDADE GRAVIMÉTRICA**

Analisando-se a influência do teor de cal na sucção matricial do solo em função da umidade gravimétrica (Figura 5-5 (a)), verifica-se que ocorre com a incorporação da cal uma pequena redução na sucção na zona de microporosidade ( $\omega < 13,6\%$ ) e um aumento para umidades maiores que 13,6% correspondente a zona de macro e mesoporos apontando para um certo fechamento dos poros nesta zona.

Na região de microporosidade, observa-se um ponto de inflexão em todas as curvas próximo à aproximadamente 4% de umidade, o que corresponde a sucção residual do solo puro e das misturas.

Nas curvas características de retenção de água do solo-fibra pena completa 0,25% e 0,50% (PC) observa-se que na zona de microporosidade ( $\omega < 13,6\%$ ) não houve alteração da curva característica com a incorporação das fibras. Saindo da zona de microporosidade para a zona de meso e macroporos se observa que a incorporação de 0,25% de fibras gerou a elevação da curva característica (Figura 5-5(b)), no entanto, os resultados foram praticamente os mesmos do solo puro para 0,5% de fibras.

Embora não se comprovando o efeito para 0,5% de fibras, é possível que o aumento da sucção para 0,25% de fibras em umidades superiores a entrada de ar nos microporos do solo se deva ao fato de parte da umidade se situar no interior dos raques, tornando a umidade efetiva que contribui para a sucção entre partículas do solo menor, e por consequência, ampliando a sucção. Em princípio o mesmo fenômeno e com o dobro da intensidade deveria ocorrer para 0,5% de fibras.

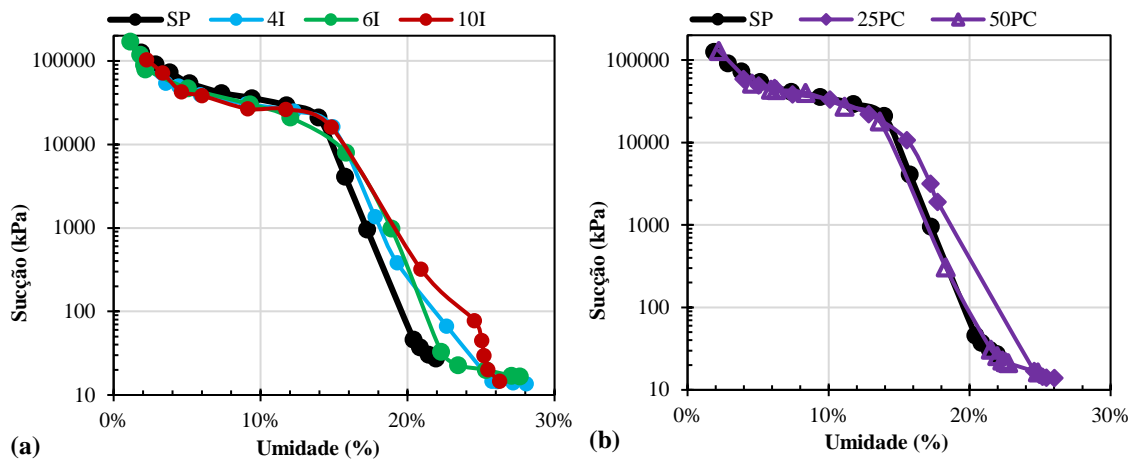


Figura 5-5 – Curva característica em função da umidade. (a) cal tipo CH- I (b) fibras pena completa

Analisando a influência da fibra pena completa em misturas solo-cal em relação à umidade gravimétrica foram elaboradas as Figura 5-6(a) e (b) sendo que esta última compreende todas as misturas analisadas. Identifica-se nestas figuras um pequeno aumento na umidade de entrada de ar dos microporos em relação ao solo natural fazendo com que ela passe de 13,6% para aproximadamente 15%. Essa alteração ocorre também para a mistura solo-fibra pena completa sem adição de cal o que leva à conclusão de que esse acréscimo de umidade se deve a hidratação das fibras em especial no que tange à raque. Pode-se pensar que o percentual de pena adotado, por ser pequeno não deveria levar a tal diferença. Cabe, no entanto, lembrar que enquanto a densidade real do solo é igual a  $2,71 \text{ g/cm}^3$  a da pena é igual a  $1,07 \text{ g/cm}^3$ . Tem-se também que água inerte, ou seja, sem contribuição para a sucção, pode se abrigar no interior das fibras contribuindo para a elevação da umidade.

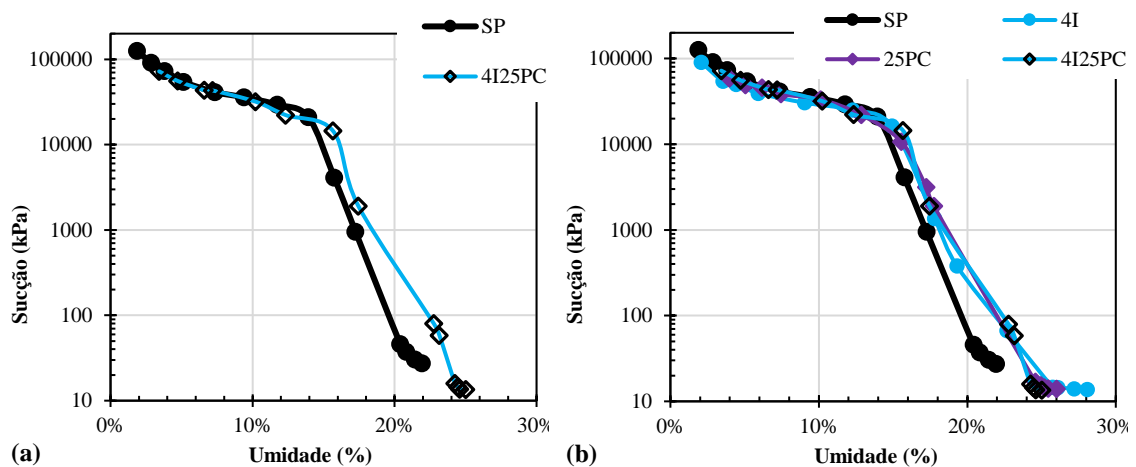


Figura 5-6 – Influência da fibra nas curvas cracterísticas de retenção de água (a) solo e misturas solo-cal-fibra (b) solo e misturas solo-cal, solo-fibra e solo-cal-fibra

## 5.6.2 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DO GRAU DE SATURAÇÃO

Como a porosidade também interfere nos resultados das curvas de retenção de água optou-se por analisá-los também em função do grau de saturação ( $S_r$ ).

Para a análise da influência do teor de cal nas curvas características de retenção de água plotadas em função do grau de saturação foi elaborada a Figura 5-7(a). Observa-se nesta figura uma redução similar para os diferentes teores de cal em relação ao solo natural na zona de microporosidade ( $S_r < 59\%$ ). Na zona de meso e macroporos verifica-se uma maior redução nos valores de sucção para 4% de cal sendo que para 10% de cal a curva se aproxima nessa zona daquela obtida para o solo puro.

Para verificar a influência da fibra pena completa na curva característica de retenção de água do solo com relação ao grau de saturação elaborou-se a Figura 5-7(b). Esta Figura mostra que a fibra pena completa não afeta a curva característica de retenção de água na zona de microporosidade, quando a análise é feita em função do grau de saturação, no entanto, ela tende a ampliar a sucção na zona de meso e macroporos.

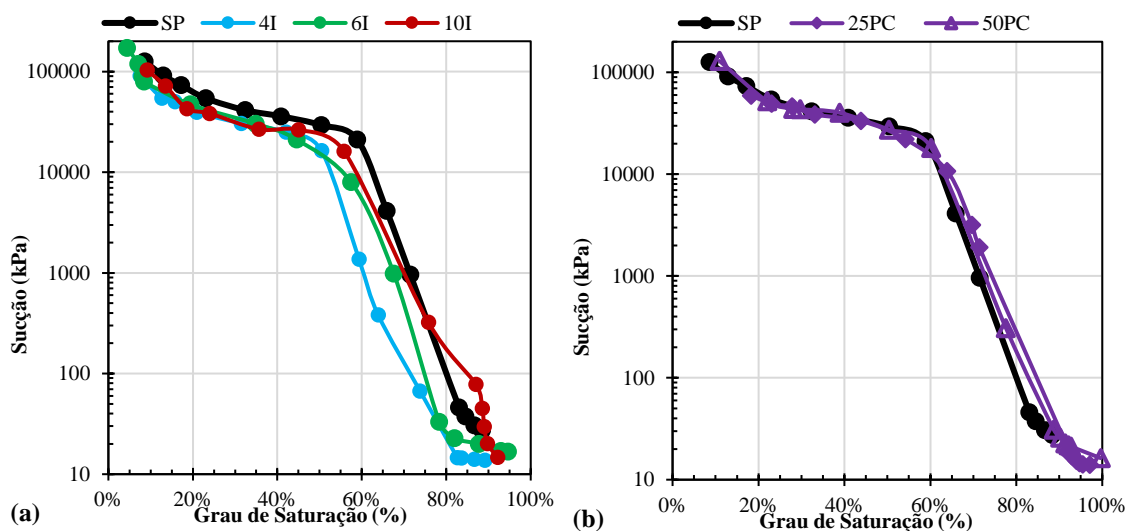


Figura 5-7 – Influência da cal (a) e da fibra pena completa (b) na curva característica de retenção de água

Para a análise da influência do teor de cal - fibra pena completa na curva característica de retenção de água em função do grau de saturação foram elaboradas as Figura 5-8 (a) e

(b). Os resultados apresentados nestas figuras mostram que a pena, embora não afete a sucção na zona de microporosidade, ela tende a ampliá-la na zona de meso e macroporos. Cabe destacar que a redução da sucção oriunda da incorporação apenas da cal não ocorre quando acrescentadas as fibras, aliás, mesmo nesse caso, a sucção tende a ser maior que a do solo puro na zona de meso e macroporos.

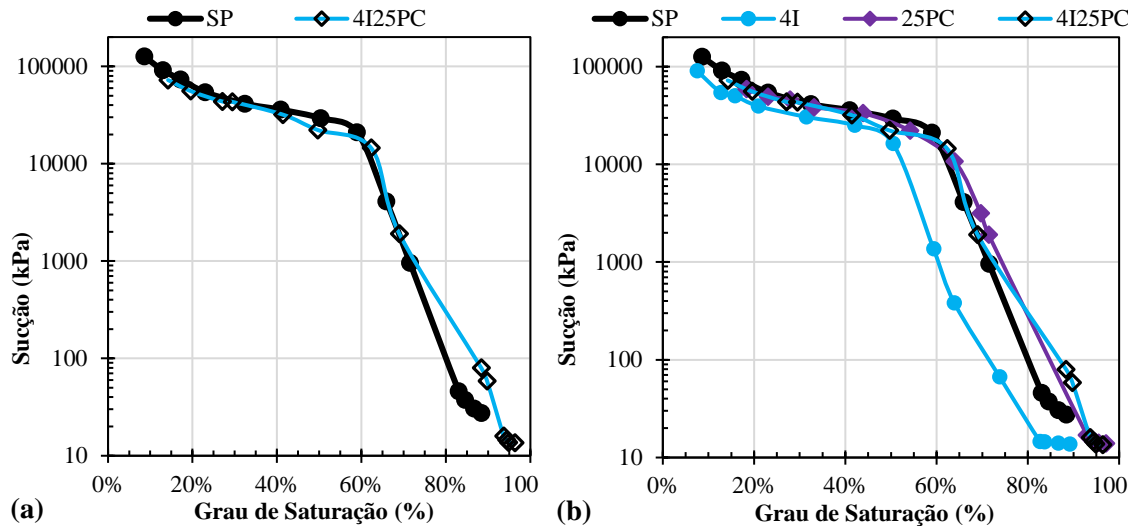


Figura 5-8 – Influência da cal-fibra (a) e cal, fibra, cal-fibra (b) na curva característica de retenção de água do solo ( $S_r$ )

### 5.6.3 VARIACÃO DA SUCCÃO EM FUNÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS

A Figura 5-9(a) apresenta as curvas de variação da sucção em função do índice de vazios de solos melhorados com cal. Destaca-se que o deslocamento das curvas entre elas quanto ao índice de vazios se dá principalmente em função dos índices de vazios de compactação serem distintos, uma vez que as variações de densidade real são pequenas afetando pouco os resultados. Como as curvas guardam certo paralelismo entre elas tem-se que o teor de cal não afetou a deformabilidade do solo em função das variações de sucção.

Para o caso das fibras, o comportamento é diferente, pois se observa que a deformabilidade das misturas solo-fibra em função das variações de sucção é maior que a observada para o solo puro, no entanto, a incorporação de 4% de cal à mistura contendo 0,25% de fibra levou à deformabilidade em função da sucção similar à registrada para o solo puro.

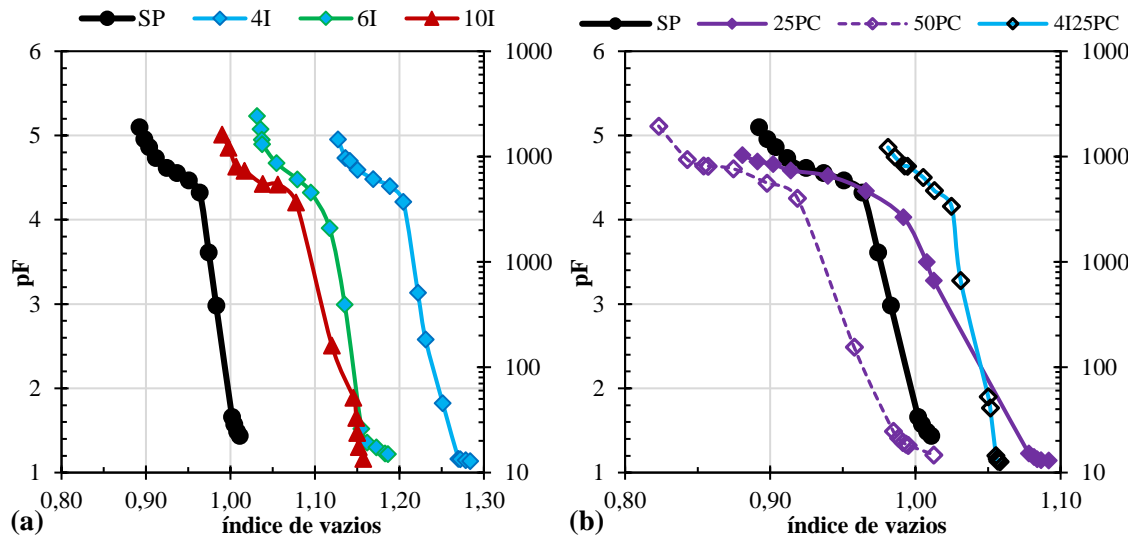


Figura 5-9 – Influência da sucção em pF no índice de vazios: (a) misturas com adição de cal (b) misturas com adição de fibra e fibra e cal

Diante do exposto, pode-se concluir que a cal não altera a variação de índice de vazios do solo em função da sucção atuante mantendo a inclinação paralela no trecho compreendido entre o término da entrada de ar nos macroporos e o ponto de entrada de ar dos microporos. Já a presença das fibras gera uma mudança de inclinação deste trecho de curva suavizando-o, o que corresponde a uma maior deformabilidade do conjunto em consequência das variações de sucção. A incorporação da cal à mistura solo-fibra retorna a sua deformabilidade em consequência das variações de sucção aos níveis do solo puro. Na região de microporos, como em princípio os poros se situam no interior dos agregados e microagregados, observa-se que um certo paralelismo entre as curvas é mantido quando da incorporação das fibras.

#### 5.6.4 INFLUÊNCIA TEMPORAL DAS FIBRAS NA VARIAÇÃO DE ÍNDICE DE VAZIOS

Para melhor entendimento da influência das fibras sobre o índice de vazios obtido nos ensaios realizados para determinação das curvas características de retenção de água antes e depois do tempo de repouso do ensaio, plotou-se o índice de vazios nos estados inicial e final das misturas analisadas.

Na Figura 5-10 apresenta-se o índice de vazios dos estados inicial e final para o solo puro. O balão em preto indica a condição de compactação. Esta condição encontra-se entre a pressão de entrada de ar dos microporos e a pressão correspondente ao término de entrada de ar nos macroporos. Os resultados mostram que no intervalo de umidade considerado e, portanto, de sucção, o índice de vazios variou pouco e apresentou uma certa expansão dos corpos de prova durante o período de repouso. Esses resultados são compatíveis com o tipo de solo e sua natureza mineralógica não expansiva.

Observa-se ainda uma certa expansão do solo na zona de macroporosidade com o aumento da umidade e uma contração na zona de microporosidade com sua diminuição em relação à condição de compactação. A expansão na zona de macroporosidade era esperada devido a redução da sucção, no entanto, a contração na zona de microporosidade não era esperada, pois as alterações se dão sobretudo no interior dos agregados e sua ocorrência sinaliza para a contração dos agregados por efeito do aumento da sucção.

Destaca-se que para valores de umidade iguais ou menores que 5% os valores de índice de vazios se tornam similares cabendo destacar que é para umidades inferiores a esta, segundo as curvas características, que a sucção assume caráter residual (Figura 5-5 e Figura 5-6). As constatações verificadas nessa análise de resultados são importantes uma vez que geralmente se admite que o índice de vazios se torna constante após a entrada de ar dos macroporos.

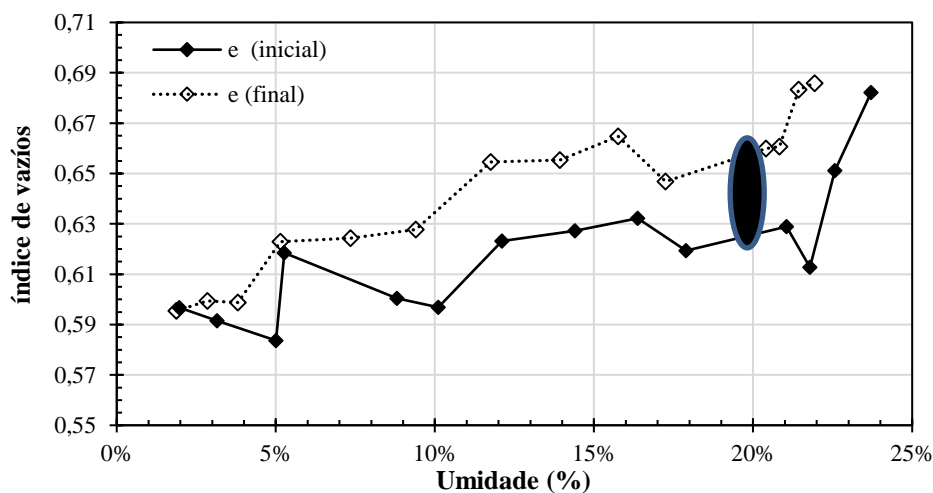


Figura 5-10 – Variação temporal do índice de vazios solo - puro

Nas Figura 5-11(a) e Figura 5-11(b) são apresentadas as variações do índice de vazios em misturas solo-cal 4% e solo-cal 6% em função da umidade, ou seja, da sucção atuante. As variações registradas nestas figuras durante a fase de repouso são pouco relevantes em ambos os casos se situando certamente no campo da variabilidade dos resultados.

A comparação destas figuras com a Figura 5-10 deixa claro que a cal inibe a expansão estrutural do solo durante o período de repouso, no entanto, embora não se observe contrações significativas do solo oriundas da secagem, ou seja, do aumento da sucção em relação à condição de compactação, verifica-se que ele expande com o umedecimento, ou seja, com a diminuição da sucção em relação à condição de compactação.

Para as misturas solo-cal considerando-se o estado inicial como a umidade ótima indicada nas figuras, verifica-se que a medida que se adiciona água aos corpos de prova eles tendem a incrementar o índice de vazios para ambos os teores de cal. Observa-se, no entanto, que apesar do índice de vazios de compactação ser distinto para os dois teores de cal o índice de vazios após expansão ele tende a ser similar, ou seja, as forças interpartículas são semelhantes.

Verifica-se também que a expansão registrada nas misturas solo cal ao adicionar água ao solo é maior que a registada para o solo puro na Figura 5-10. Observa-se ainda, embora se deva atentar para o efeito escala, que contrariamente ao observado para o solo puro, não ocorrem variações de índice de vazios evidenciáveis quando se adentra na zona de microporosidade.

Comparando-se as Figura 5-11(a) e (b) verifica-se que a cal aumenta o índice de vazios de compactação em relação ao solo puro, sendo que esse aumento, no entanto, diminui ao se passar de 4% de cal para 6% de cal. A Figura 5.12(a) mostra, quando comparada à figura 5.11(b), que ao se passar de 6% para 10% de cal, ela praticamente não interviu no resultado da compactação.

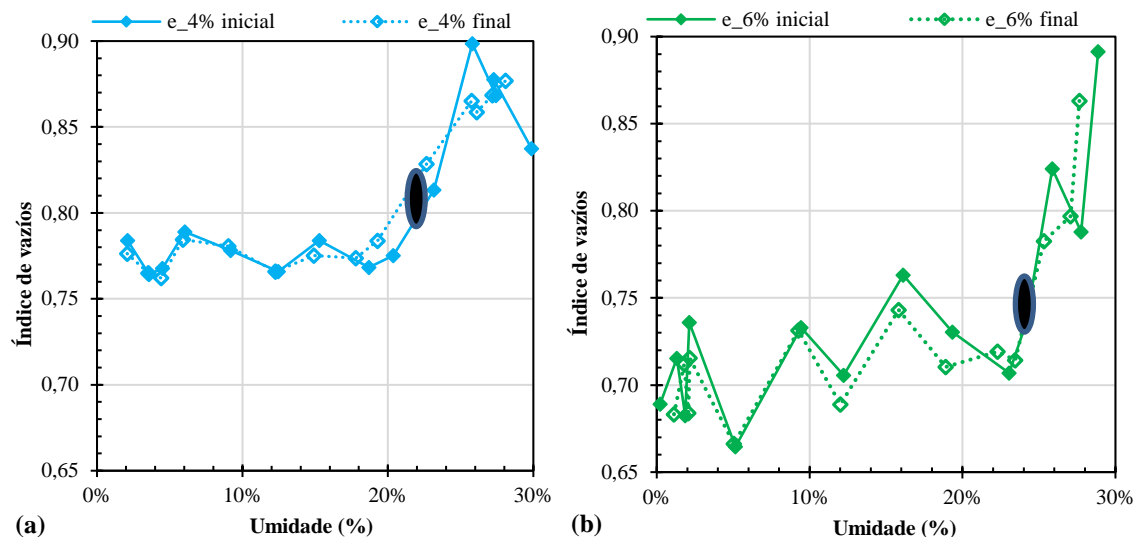


Figura 5-11 – Influência da cal nos índice de vazios: (a) cal 4% (b) cal 6%

Na de igual forma, são apresentadas as curvas de variação do índice de vazios em função da umidade dos corpos de prova para o teor de cal 10%.

Na Figura 5-12 (a) se observa que com o aumento da umidade em relação à condição de compactação ocorre certa ampliação do índice de vazios ao longo do tempo de repouso ocorrendo o inverso para umidades inferiores à condição de compactação. Esses comportamentos podem estar atrelados ao consumo de água e aumento da sucção para umidades inferiores à de compactação e queda nas forças interpartículas quando da presença de água em abundância e pequenas sucções atuantes.

Na Figura 5-11(b) verifica-se que já com 6% de cal aparece uma pequena tendência ao comportamento verificado para 10% de cal (Figura 5.12(a)). A Figura 5.12(a) mostra ainda que para a menor umidade e, portanto, maior sucção a diferença entre o resultado inicial e final se amplia de modo significativo apontando para a instabilização e contração estrutural dos agregados.

A Figura 5-12 (b) apresenta a influência das fibras na variação do índice de vazios das misturas solo-cal considerando-se o teor 4% de cal CH-I. Exceto para o ponto de menor umidade observa-se nesta figura um comportamento bastante similar ao observado na

Figura 5-12 (a) na qual se tem 10% de cal sem incorporação de fibra.



A origem do comportamento similar para umidades inferiores à de compactação é provavelmente a mesma, aumento da sucção durante o período de repouso, no entanto, no caso das fibras o destino da água responsável pelo aumento da sucção que proporcionou a redução do índice de vazios foi certamente ampliado por outro, enquanto para 10 % de cal a água teria sido consumida em reações químicas, no caso das fibras ela teria sido em parte consumida em reações e em parte adentrado em seus poros deixando de intervir na interação entre partículas de solo e proporcionando assim um aumento da sucção.

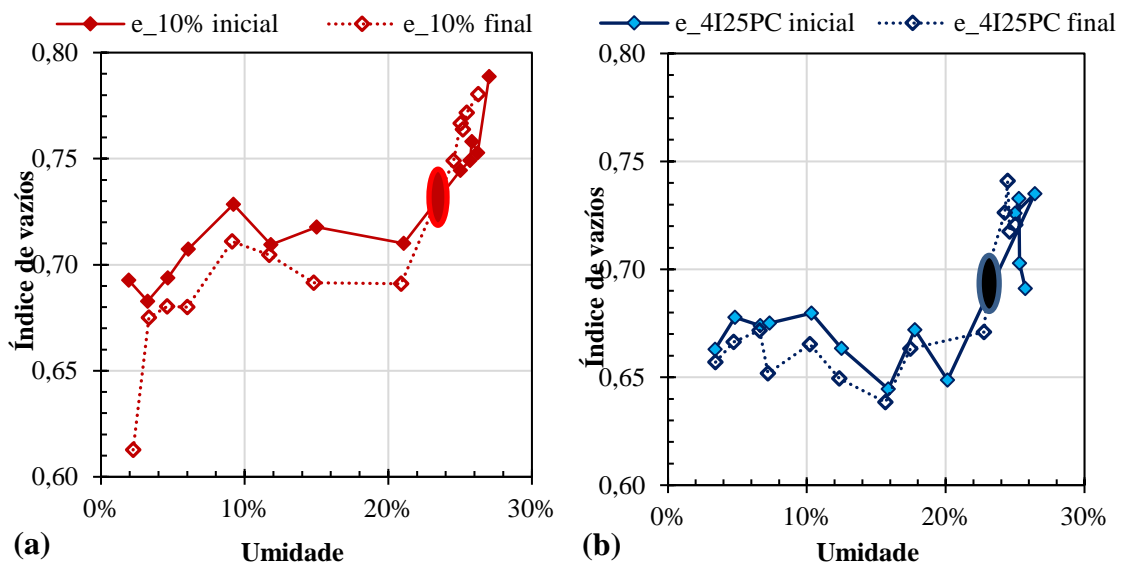


Figura 5-12 - Variação do índice de vazios em função da umidade e repouso: (a) cal 10% (b) fibra em misturas solo - cal 4% - fibra 0,25%

Nas curvas das amostras de solo – 0,25% de fibra, apresentadas na Figura 5-13(a) identifica-se pouca variação dos índices de vazios entre os estados inicial e final. Verifica-se que apenas para umidades menores que a de entrada de ar dos microporos, aproximadamente 13%, há uma diminuição dos índices de vazios em relação ao estado inicial, ou seja, as fibras estão por um lado conferindo certa estabilidade estrutural ao solo e por outro aumento na sucção em função da captação de água pelos poros das fibras.

A Figura 5-13(b) mostra que ao se ampliar o teor de fibra não só estas variações de índice de vazios se ampliam como também aparecem pequenas variações de índice de vazios ao longo do restante da curva. Para ambos os teores de fibra e mais ainda quando ele se

amplia as reduções dos índices de vazios com o tempo de repouso em função da presença das fibras indicam ter origem na migração da água para o interior das mesmas fazendo com que a sucção interpartículas de solo se amplie. Para a análise do efeito das fibras na expansão é relevante a constatação de que independentemente da umidade ocorreu uma contração do solo durante o período de repouso.

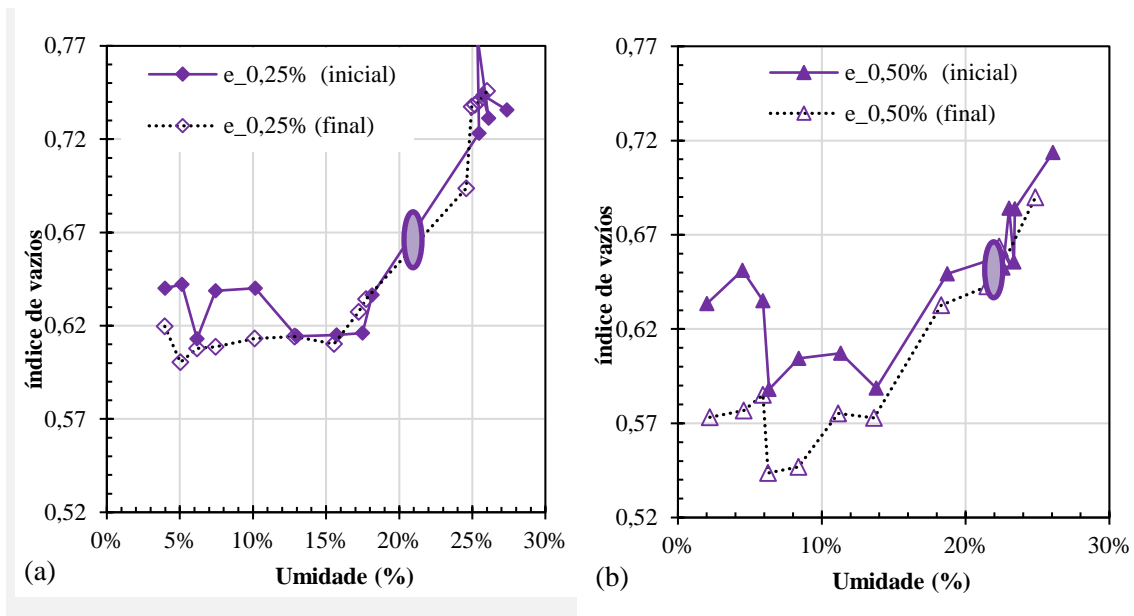


Figura 5-13 – Influência da fibra no índice de vazios nos estágios: (a) solo-fibra 0,25% (b) solo fibra 0,50%

## 5.7 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS FIBRAS

As propriedades físicas das fibras foram levantadas a partir de uma revisão extensa da literatura, considerando valores fixos por se tratar de materiais biológicos de estrutura característica representativa do grupo biológico.

### 5.7.1 MORFOLOGIA EXTERNA E INTERNA

Nas Figura 5-14(a) e (b) são apresentadas imagens das fibras utilizadas nos ensaios, sendo a Figura 5-14 (a) representativa da vista lateral da raque e a Figura 5-14 (b) correspondente a um corte transversal da raque.

A composição por camadas de queratina nas penas conduz a uma superfície lisa na parte externa (a), sendo porosa no interior (b). É esta estrutura porosa que pode não só se deformar sob o efeito de tensões e sucções mátricas como armazenar água que entra no

cálculo do teor de umidade, mas que termina não interferindo na sucção mátrica interpartículas do solo.

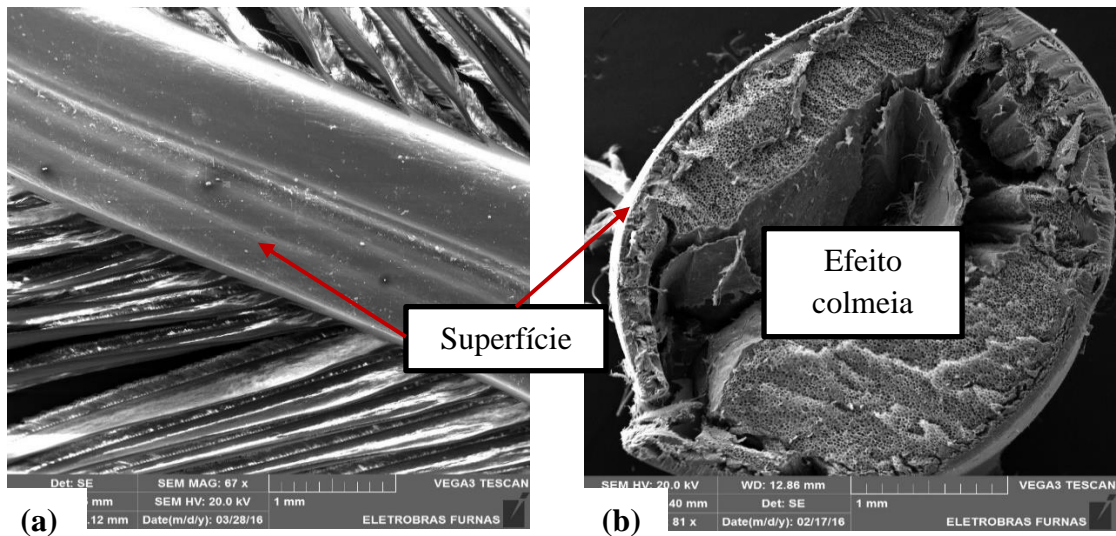


Figura 5-14 – Detalhe da estrutura: (a) detalhe externo, aumento 67x; (b) detalhe interno, aumento 81x

Na Figura 5-15 são apresentadas, a estrutura externa (a) e interna (b) das barbas secundárias e terciárias da pena. Verifica-se nestas imagens uma textura lisa na parte externa, enquanto predomina uma estrutura porosa na parte interna cabendo aqui o mesmo comentário feito no parágrafo anterior em relação à raque.

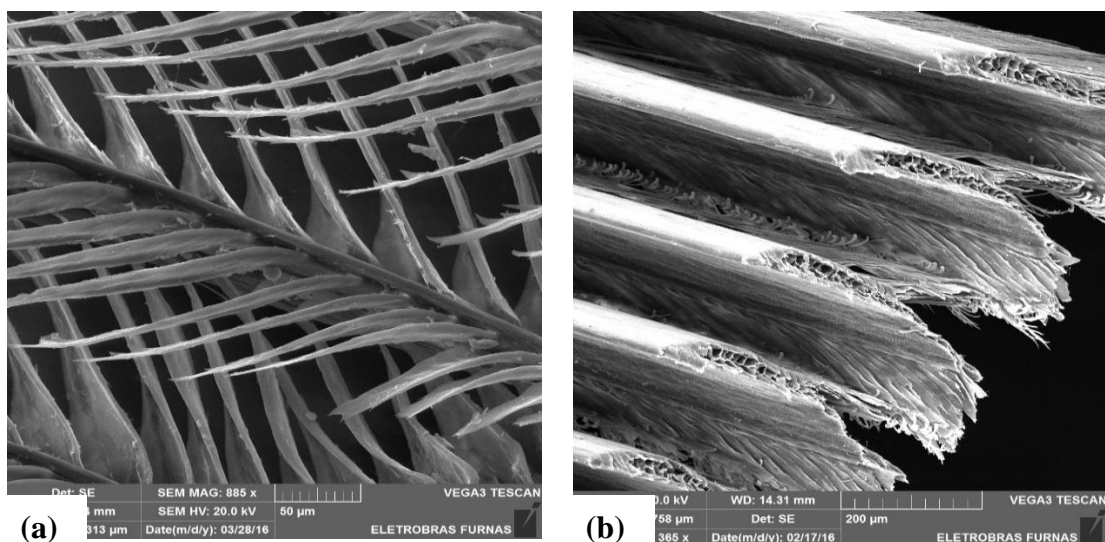


Figura 5-15 – Detalhe das fibras: (a) fibras terciárias, aumento 885x; (b) corte das fibras secundárias, aumento 365x

O tamanho das penas varia. Tesfaye *et al.*, (2017b) elaboraram a Figura 5-16 que apresenta a distribuição de frequências do comprimento total das penas medidas na raque. Nela se identifica 25% de penas com tamanho entre 131 e 140 mm, este comprimento corresponde à pena das asas, as propriedades das penas variam relativamente em relação ao tamanho e localização no frango.

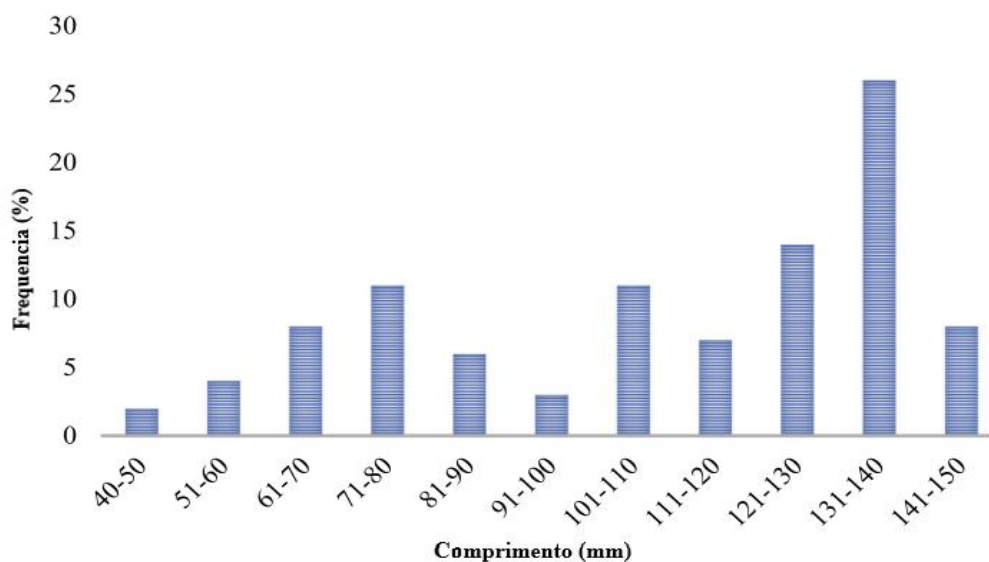


Figura 5-16 – Comprimento médio da pena, raque de um frango. Fonte: modificado Tesfaye *et al.*, (2017b)

### 5.7.2 CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DA FIBRA PENA

Para determinar a curva característica de retenção de água da fibra pena, utilizou-se o método *Dewpoint Potentiometer* (WP4) na determinação da curva característica de retenção de água em termos de sucção total.

A Curva característica de retenção de água em sucção total da fibra pena utilizada na pesquisa é apresentada na Figura 5-17. Identifica-se um trecho ascendente correspondente aos menores poros quando a umidade diminui a partir de 17,5% situando-se a umidade residual em aproximadamente 6%.

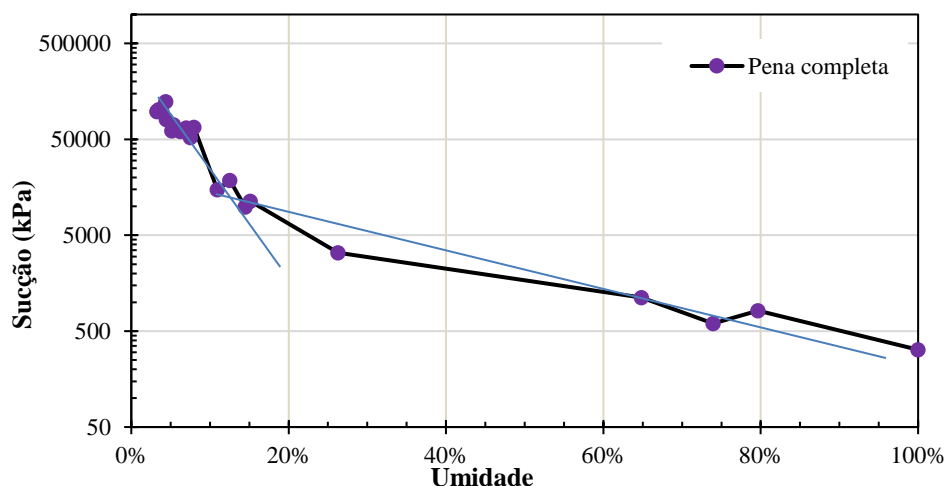


Figura 5-17 – Curva característica de retenção de água da pena

Analisando a influência da fibra pena na curva característica do solo foi elaborada a Figura 5-18. Observa-se que a sucção da fibra pena, na região de poros menores é um pouco maior que a registrada para o solo ( $\omega < 8\%$ ) passando em seguida a ser um pouco menor que a da microporosidade do solo. Cabe lembrar que apesar do WP4 medir a sucção total estima-se que a sucção osmótica das fibras tende para zero fazendo com que a sucção medida no WP4 no caso das fibras se aproxime da sucção matricial.

Dada a proximidade das curvas características do solo, do solo-fibra e da fibra pena na zona de microporosidade do solo correspondendo a umidades inferiores a 13,6% entende-se que nesta zona as fibras não interferem por meio da sucção no comportamento do solo, no entanto, para umidades maiores que esta, a fibra pena completa passa a apresentar maior sucção que o solo e que as misturas solo-fibra o que poderia implicar na influência no comportamento mecânico do solo por meio da sua sucção.

No entanto, pelas imagens mostradas na Figura 5-14 supõe-se, e as próprias curvas características do solo e solo-fibras mostradas na Figura 5-17 apontam nesse sentido, que esta atuação da sucção se restringe aos poros da fibra sendo pequena a contribuição para o comportamento do solo, exceto pela retenção de parte da umidade nos poros das fibras, como se dá nos microporos dos agregados presentes nos solos lateríticos. Há que se considerar ainda o pequeno teor de fibra em relação ao teor de solo, mesmo sendo sua densidade menor.

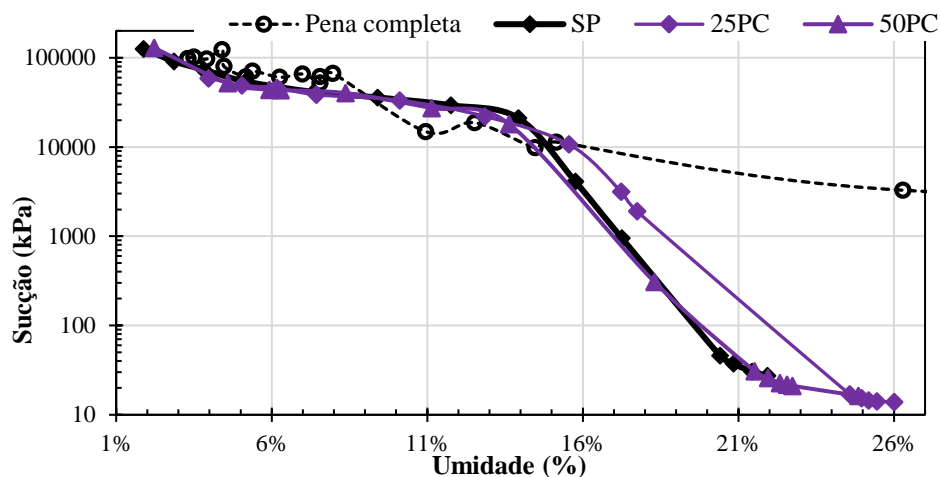


Figura 5-18 – Influência da fibra pena na sucção do solo

## 5.8 CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS DOS MATERIAIS

A mineralogia dos materiais foi analisada por meio de ensaios de raios x. Para melhor entendimento dos processos químicos internos foi elaborada a Tabela 5-2 que identifica a composição química dos principais minerais componentes das amostras analisadas.

A Tabela 5-3 apresenta os principais minerais presentes nas amostras analisadas nos tempos de cura inicial (1D) e final (1A). Os principais minerais identificados nos corpos de prova foram: quartzo (Q), caulinita (K), gibbsita (G), hematita (H), rutilo (R), anastácio (A), goethita (Go), vermiculita (V) e calcita (Ca) no solo puro; portlandita (P), aragonita (Ar), anidrita (Ah) e calcita (Ca) na cal; nas misturas solo-cal fez-se presente a gipsita (Gy), o sulfato de cálcio hidratado que apresenta a composição com a fórmula  $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Cabe destacar que a calcita se fez presente no solo puro após estar enterrado por um ano na área onde também se encontravam os corpos de prova contendo cal, o que aponta para a ocorrência de migração de compostos químicos das misturas solo-cal.

Este sulfato de cálcio hidratado geralmente apresenta aspecto lamelar e característica aglutinante, o que pode ter contribuído para a agregação da fração argila não agregada presente no solo em estado puro. Sua densidade,  $2,32 \text{ g/cm}^3$ , é próxima à da gibbsita que varia entre 2,3 e 2,4. Sendo a propriedade principal deste mineral a característica de aumento de volume ele pode proporcionar maior porosidade na mistura.

Tabela 5-2 – Composição química dos principais minerais identificados nas amostras

<b>Mineral</b>	<b>Símbolo do mineral</b>	<b>Composição Química</b>
Quartzo	Q	SiO <sub>2</sub>
Caulinita	K	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>
Gibbsita	G	Al(OH) <sub>3</sub>
Hematita	H	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Rutilo	R	TiO <sub>2</sub>
Anastacio	A	TiO <sub>2</sub>
Goethita	Go	FeO(OH)
Vermiculita	V	Mg*(Mg <sub>3</sub> Fe) <sub>3</sub> (SiAl) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> *4H <sub>2</sub> O
Calcita	Ca	CaCO <sub>3</sub>
Portlandita	P	Ca(OH) <sub>2</sub>
Aragonita	Ar	CaCO <sub>3</sub>
Anhidrito	Ah	CaSO <sub>4</sub>
Gipsita	Gy	CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O
Illita	I	(KH <sub>3</sub> O)Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> AlO <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>

Na Tabela 5-3 são identificados os picos de cada mineral de forma proporcional considerando-se a fração total – Fr. Total – e a fração argila – Fr. Argila. Os picos são analisados em proporção comparados entre eles, em quatro intensidades, assim, um pico 4 é quatro vezes o pico do mineral com intensidade 1 e 2 vezes a intensidade do mineral com intensidade 2.

Analisando os resultados da situação final da análise de DRX, o solo puro não apresenta mudanças nos picos da fração total, a fração argila apresenta uma leve variação no pico do quartzo e aparecem picos menores de calcita que inicialmente não existiam. Na mistura solo-cal 4%, existe maior variação de picos de minerais na fração argila, o pico do quartzo e a gibbsita desaparecem, o pico da caulinita se amplia; o pico da goethita diminui e o de gipsita quase desaparece. Analisando as possíveis causas, principalmente a diminuição

do quartzo e gibbsita, foi verificada a equação química dos componentes dos minerais afetados.

A gibbsita de fórmula  $\text{Al}(\text{OH})_3$  e o quartzo de fórmula  $\text{SiO}_2$  apresentam diminuição na intensidade do pico. O fenômeno ocorre a partir da instabilidade do mineral gipsita  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Um período longo de variação térmica e condição úmida instabilizou a gipsita gerando lixiviação do mineral. Esse fenômeno gerou mudanças na estrutura da mistura afetando a estabilidade do quartzo devido a ataques dos minerais de transição (enxofre), alumínio e hidróxidos (OH). A dissolução parcial do quartzo liberando o silício para se combinar com a gibbsita teria gerado um incremento nos picos de caulinita de fórmula  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ .

Tabela 5-3 – Principais minerais presentes nas amostras analisadas - fracção total e fracção argila

Código Minerais	Cal I-III		Solo puro				Solo - cal 4%				
	inicial		inicial		final		inicial		final		
	Fr. Total	Fr. Argila	Fr. Total	Fr. Argila	Fr. Total	Fr. Argila	Fr. Total	Fr. Argila	Fr. Total	Fr. Argila	
Q	-	-	4	4	4	3	3	3	3	3	0
K	-	-	3	3	1	2	3	3	3	3	4
G	-	-	2	2	2	2	3	3	2	2	2
H	-	-	2	2	1	1	1	1	1	1	1
R	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1
A	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	2
Go	-	-	1	1	1	1	2	2	2	2	1
V	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Ca	2	-	-	-	1	1	2	2	2	2	2
P	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ar	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ah	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gy	-	-	-	-	-	-	4	4	2	2	2
I	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	2
Cor	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	2

Fr = fracção; Q = quartzo; K = caulinita; G = gibbsita; H = hematita; R = rutilo; A = anastácio, Go = goethita; V = vermiculita; Ca = calcita; P = portlandita; Ar = aragonita; Ah = anidrita; Ca = calcita; Gy = gipsita; I = illita e Cor = correncita. 1, 2, 3 e 4 são as intensidades dos picos dos gráficos





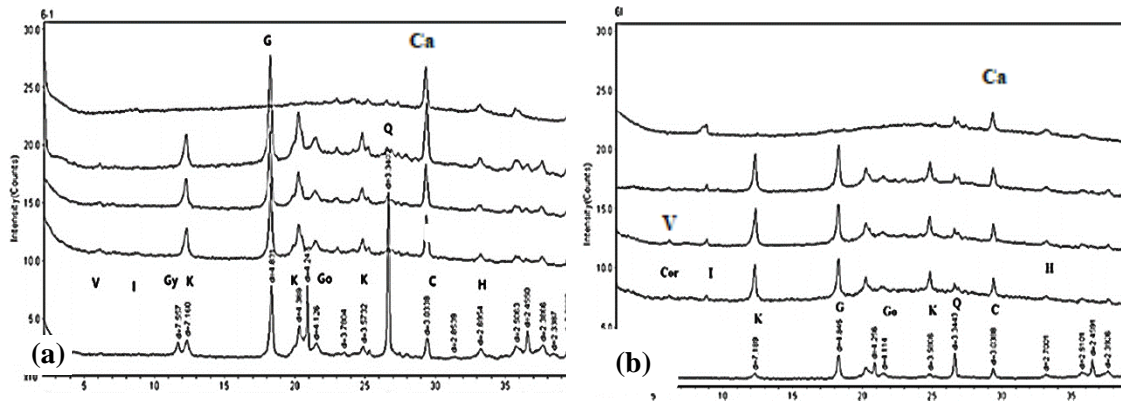


Figura 5-20 – Picos de minerais identificados nas amostras de solo-cal 6% (a) estado inicial e (b) estado final

Na Figura 5-21 identificam-se as intensidades de picos para o estado inicial (a) (1 dia de cura) e estado final (b) (1 ano de cura), dos principais minerais das misturas solo-fibra, sendo que não houve formação de novos minerais é possível identificar um aumento de intensidade no pico da Caulinita sem que se observe grandes variações nas intensidades de picos dos demais minerais.

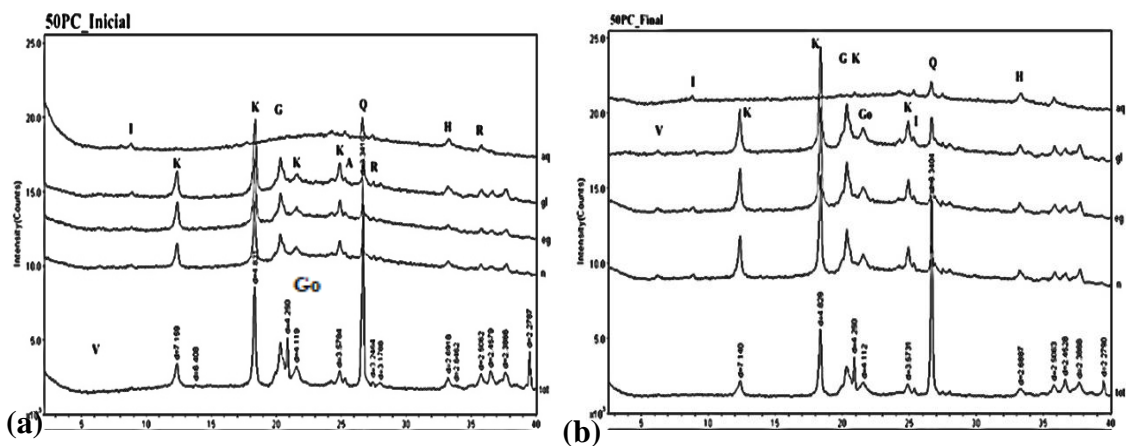


Figura 5-21 – Picos de minerais identificados nas amostras de solo-fibra (a) estado inicial e (b) estado final

A Figura 5-22 ilustra a variação das intensidades de picos dos principais minerais das misturas solo-cal-fibra, no estado inicial (a) e estado final (b). Não se identifica formação de novos minerais, no entanto, há um incremento leve no pico da calcita e diminuição do pico do quartzo. O pico da gibbsita praticamente desaparece e o da caulinita apresenta um pequeno aumento após um ano de cura em campo.

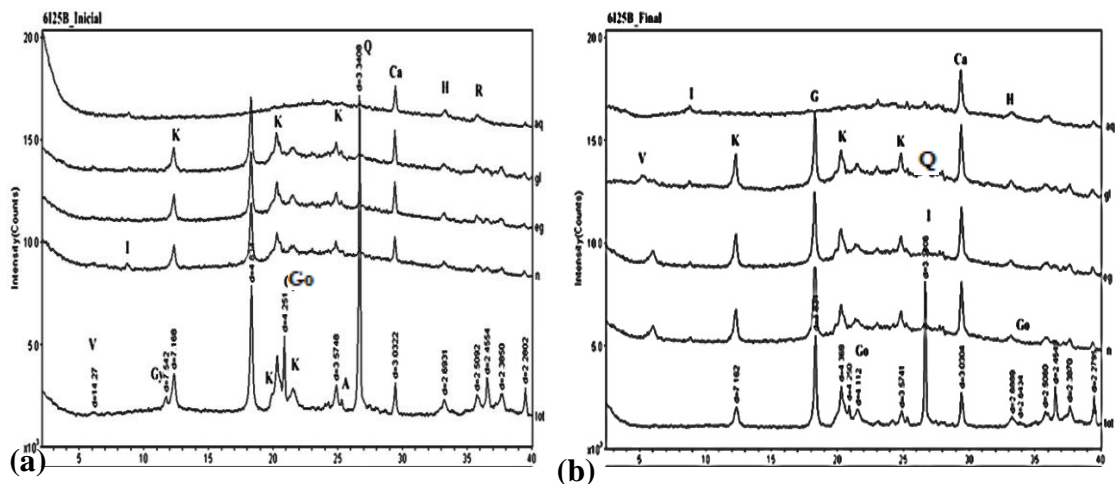


Figura 5-22 – Picos de minerais identificados nas amostras de solo-cal-fibra (a) estado inicial e (b) estado final

Perante o exposto, identificaram-se variações nas intensidades dos picos de alguns minerais, como o quartzo, caulinita, gibbsita, gipsita, hematita e goethita. A variação é mais evidente nas misturas solo-cal e solo-cal-fibra do que no solo puro e nas misturas solo-fibras e poderia estar relacionada com reações químicas em menor escala que não afetam a estrutura mineralógica com formação de novos minerais, mas, afetam a quantificação deles nas amostras estudadas. Cabe lembrar que em campo tanto o solo puro como o solo-fibra sofreram contaminação química a partir de migrações oriundas das misturas solo-cal.

A diminuição do teor de gibbsita, hematita e goethita com o tempo de cura pode estar atrelada à solubilização e lixiviação desses compostos ao longo do tempo de cura o que assume caráter preocupante na estabilização dos solos lateríticos com cal, pois tal ocorrência é susceptível de propiciar a fragilização e mesmo a desagregação desses solos inclusive aqueles que se encontram sob camadas de solo estabilizadas quimicamente.

Outro aspecto relevante, mas que merece maiores estudos específicos em especial devido ao pequeno intervalo de tempo considerado, diz respeito ao aumento, mesmo que pequeno, da intensidade de pico da caulinita e diminuição da intensidade do pico de quartzo e da gibbsita. O fenômeno pode estar atrelado à junção da Gibbsita solubilizada com o Quartzo existente no solo gerando Caulinita e diminuindo o teor de Quartzo. Destaca-se que, embora considerando intervalos de tempo bem maiores, Martins *et al.*, (2004) aponta a ocorrência de caulinitização em um perfil de solo do Distrito Federal

enquanto Senaha, (2019) analisa a possibilidade de quartzilização em perfis de solos tropicais, ou seja, a formação e/ou transformação de minerais é possível quando se encontra condições favoráveis a tais ocorrências.

## 5.9 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS, ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X POR DISPERSÃO

A Tabela 5-4 identifica os principais elementos químicos componentes das amostras ensaiadas e analisadas. Sendo SP o solo puro, 25B é o solo com 0,25% de barba, I e III são os tipos de cales misturadas ao solo nos teores em peso de 4% e 6%, PC representa a pena completa com teores de incorporação ao solo e solo-cal de 0,25% e 0,50% em peso.

Tabela 5-4 – Principais elementos químicos identificados nas amostras

CP (%)	SP		25B		CH-I	solo-cal 4%		I	-	III	4I50B		4III25B		6I50PC	
	1D	1A	1D	1A		1D	1A				1A	1D	1A	1A	1D	1A
Al	44,11	44,57	44,26	45,15	-	39,94	40,93	40,45	40,99	41,22	41,08	38,29	38,90			
Fe	38,96	30,71	29,41	31,94	0,86	27,34	29,86	28,61	28,97	28,67	28,46	27,63	28,62			
Si	13,31	19,63	22,43	18,68	0,60	20,26	16,07	18,85	17,16	17,29	18,27	17,17	16,44			
Ca	-	0,08	-	0,05	88,31	7,24	8,40	7,08	7,39	7,90	7,55	11,09	11,06			
Ti	3,22	2,84	3,06	3,20	-	2,91	3,14	2,65	3,14	3,10	3,01	2,91	2,93			
Mg	-	-	0,34	-	9,64	1,28	0,73	0,55	1,36	0,86	0,50	1,80	1,07			
K	-	0,53	-	0,47	0,22	0,48	0,39	0,48	0,27	0,46	0,41	0,47	0,46			
Zr	0,22	0,20	0,22	0,22	-	0,22	0,22	0,24	0,20	0,22	0,22	0,21	0,19			
Mn	0,08	-	0,04	0,03	0,04	0,02	0,06	-	0,06	0,02	0,05	0,04	0,04			
Cr	0,07	0,09	0,08	0,07	-	0,07	0,08	0,09	0,07	0,08	0,07	0,06	0,07			
Ba	-	1,18	-	-	-	-	-	0,79	-	-	-	-	-			
S	-	0,06	0,10	0,14	0,13	0,07	0,07	-	0,13	0,11	0,07	0,11	0,06			
Sr	-	-	-	-	0,20	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03			
Cu	0,04	-	0,04	0,04	-	-	0,03	-	-	0,04	-	-	0,04			
Ta	-	-	-	-	-	0,14	-	-	-	-	-	0,10	-			
Er	-	0,11	-	-	-	-	-	-	-	-	0,27	-	-			
Ga	-	-	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-	0,01	-			
V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,11	0,08			

Al = alumínio; Fe = ferro; Si = silício; Ca = cálcio; Ti = titânio; Mg = magnésio; K = potássio; Zr = zircônio; Mn = manganês; Cr = cromo; Ba = bário; S = enxofre; Sr = estrôncio; Cu = cobre; Ta = tântalo; Er = érbio; Ga = gálio; V = vanádio

Analisando o tempo de cura imediato observa-se que nas misturas solo-cal durante a troca catiônica acontecem processos químicos em que carbonatos são liberados para reagir com

os hidrogênios do solo fenômeno que influencia diretamente no pH. Nesse processo há formação de hidroxilas e em consequência um incremento do pH da mistura.

Paralelamente, a variação de pH no solo para um meio alcalino gera precipitação de parte do alumínio e do ferro presente no solo. Esse fenômeno químico gera diminuição de Alumínio e Ferro nas misturas solo-cal. Parte do processo de troca catiônica leva a formação de um novo mineral, a gipsita, elemento cimentício do cimento cuja característica é a retardação do tempo de pega. A formação desse novo mineral é atribuída a aparição de cálcio nas misturas solo-cal.

Após um ano de cura, verificou-se nas amostras solo-cal, incremento nos picos da calcita enquanto a gipsita deixou de manifestar-se presente. A diminuição dos picos de gipsita, a longo prazo, se deve ao processo de solvatação, sendo essa afirmação validada ao se observar teor de enxofre nas amostras de solo puro e solo fibra.

A equação química da gipsita é  $\text{Ca SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , ela pertence à família dos sais e como todo sal, precisa de dois fatores para começar o processo de solvatação, temperatura e umidade. Ela se dissolve a temperaturas superiores a  $25^\circ$  e precipitações elevadas, dessa forma na Figura 5-23 apresenta-se a representação do fenômeno de solvatação do sulfato de cálcio.

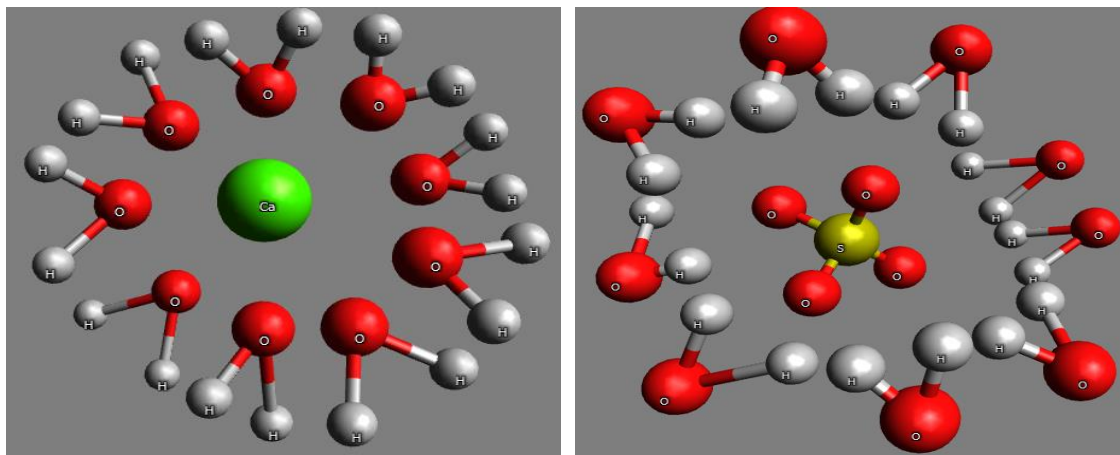


Figura 5-23 – Fenômeno de solvatação da molécula da gipsita

A solvatação da gipsita associado à percolação da água, gera a lixiviação de finos. Destaca-se que o enxofre, componente importante da gipsita, é identificado no solo puro e nas misturas solo fibra, confirmando-se o fenômeno da lixiviação nas misturas solo-cal.

### 5.9.1 POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (PH)

Os resultados dos ensaios de pH do solo e solo-cal são apresentados na Figura 5-24, para o tipo de cal CH-I em (a) e para o CH-III em (b). As análises foram realizadas para 1 dia e 1 ano de cura, lembrando que a cura de 1 ano se deu em condições de campo.

O pH das misturas solo-cal apresentou diminuição considerável, no entanto, o pH do solo puro sofreu um pequeno incremento, provavelmente devido à contaminação por elementos químicos oriundos das misturas solo-cal. A variação de pH respalda claramente a dissolução e lixiviação da Gipsita durante o processo de cura *in situ* das misturas solo-cal, e aporte dos elementos químicos lixiviados aos corpos de prova de solo puro e solo-fibra.

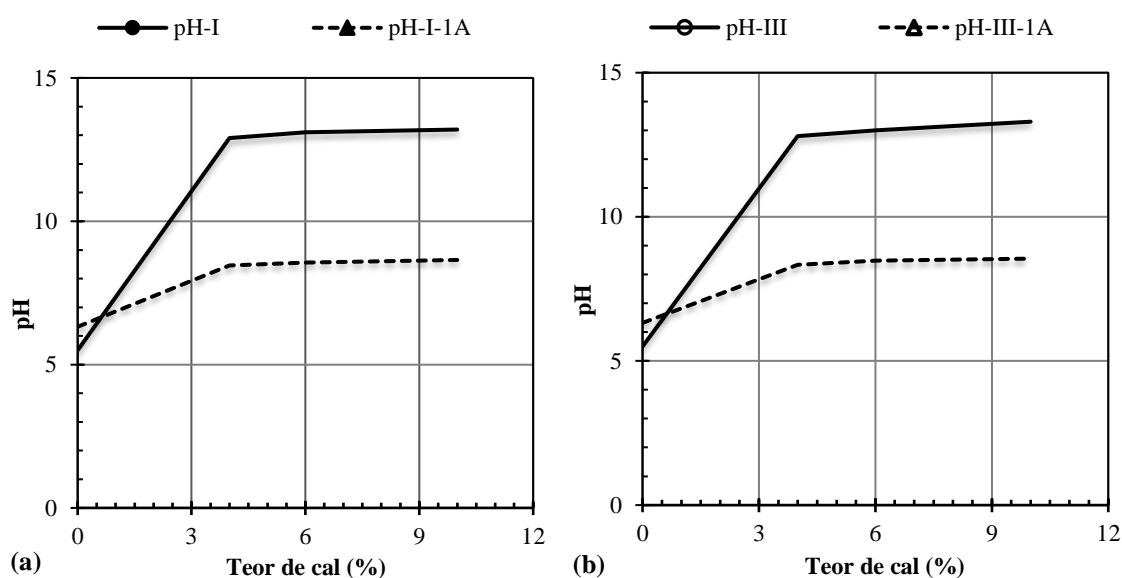


Figura 5-24 – Influência temporal da cal no pH do solo: (a) cal CH-I; (b) cal CH-III

### 5.10 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A Figura 5-25 apresenta a estrutura do solo puro em estado inicial (a) e final (b), identificando-se uma mudança na sua estrutura após um ano enterrado na vala comum com os corpos de prova do solo-fibra, solo-cal e solo-cal-fibra. O solo puro, após um ano de cura em campo, aparentemente apresenta uma certa modificação da estrutura, com ampliação da macroporosidade em relação à situação inicial. Tal constatação corrobora

com o observado na Figura 5-10 que, embora em intervalo de tempo bem menor (15 dias) mostrou aumento com o tempo do índice de vazios do solo puro compactado.

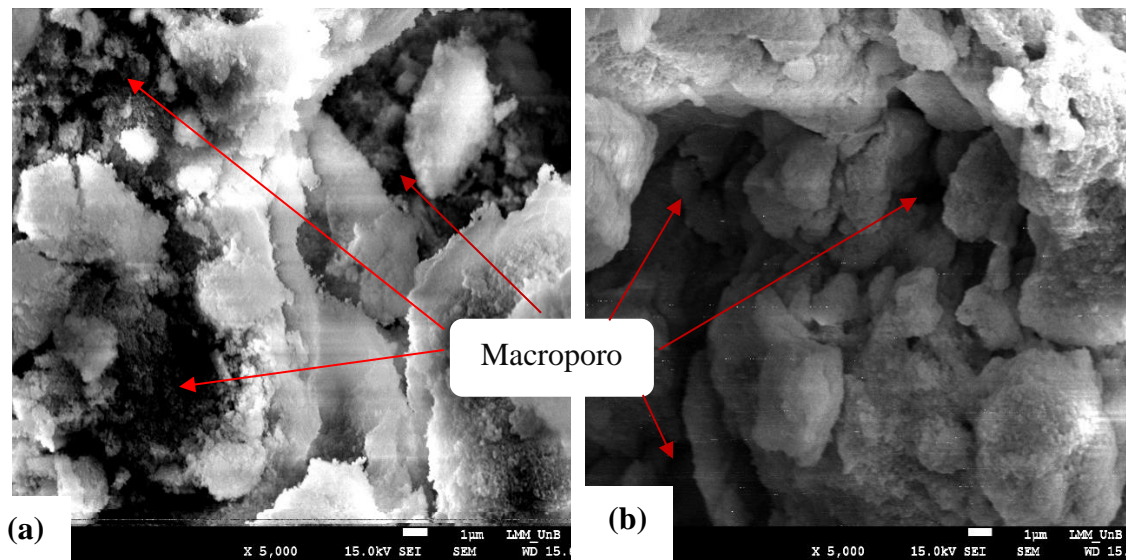


Figura 5-25 – Microscopia eletrônica de varredura do solo puro: (a) estado inicial (5000x); (b) estado final (5000x)

Na Figura 5-26 apresentam-se as imagens da mistura solo-cal 4% na condição inicial (a) e no estado final (b). Embora não correspondendo exatamente ao mesmo nível de aumento da Figura 5-25, percebe-se nestas imagens certo fracionamento dos agregados sendo que este fracionamento aparentemente se amplia ao se atingir 1 ano de cura (b).

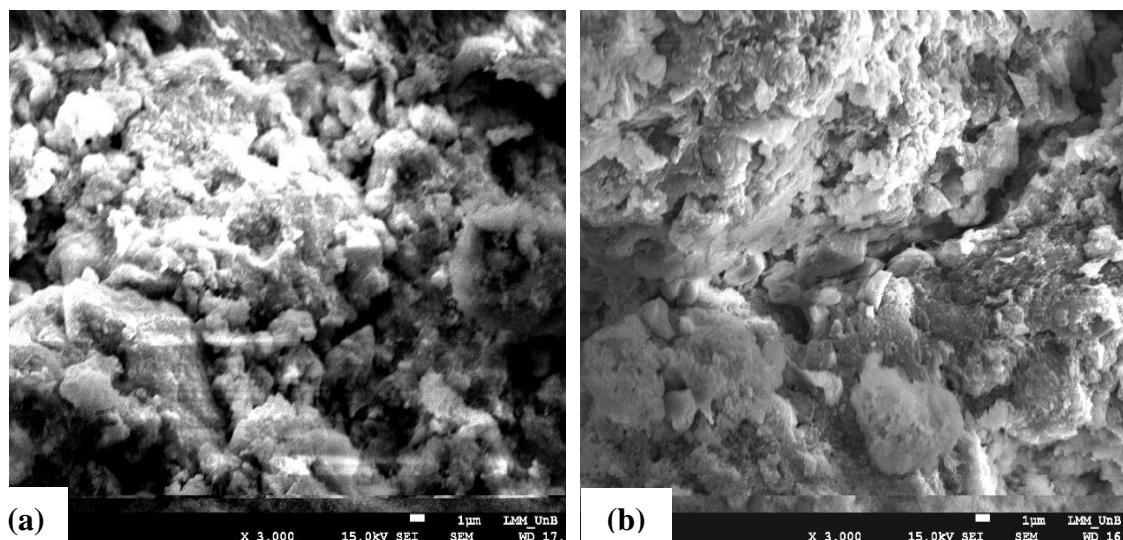


Figura 5-26 – Solo - cal 4%: (a) estado inicial 3000x; (b) estado final 3000x

A Figura 5-27 apresenta a estrutura das misturas solo - 0,25% de fibra, no estado inicial (a) e final (b). Identificam-se certas diferenças entre os dois tempos de cura. Observa-se



a deterioração da fibra com o tempo (b) quando comparada ao estado inicial (a). O fenômeno pode ser atribuído ao ataque oriundo da contaminação com elementos químicos alcalinos provenientes das misturas contendo cal. A afirmação é fruto da observação da presença de Cálcio e incremento de enxofre nas misturas solo-fibra.

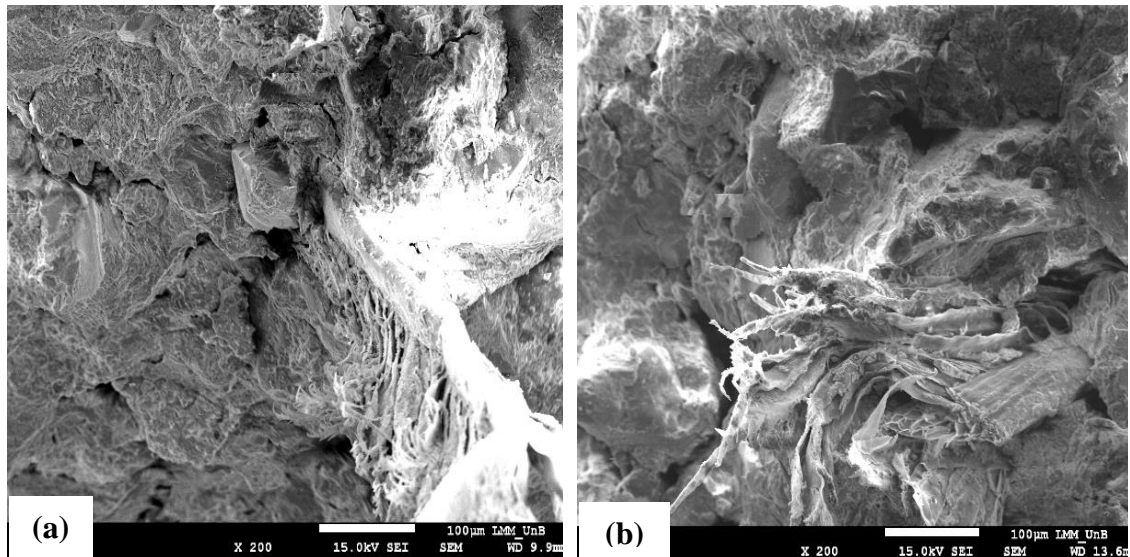


Figura 5-27 – Mistura solo 0,25% de fibra: (a) estado inicial, 200x; (b) estado final, 200x

Analisando-se em detalhe a degradação da fibra no solo por meio das imagens apresentadas na Figura 5-28 no estado inicial (a) e final (b) observa-se que após um ano de cura é possível identificar certa degradação da camada superficial da pena (a), deixando as camadas interiores em evidência (b).

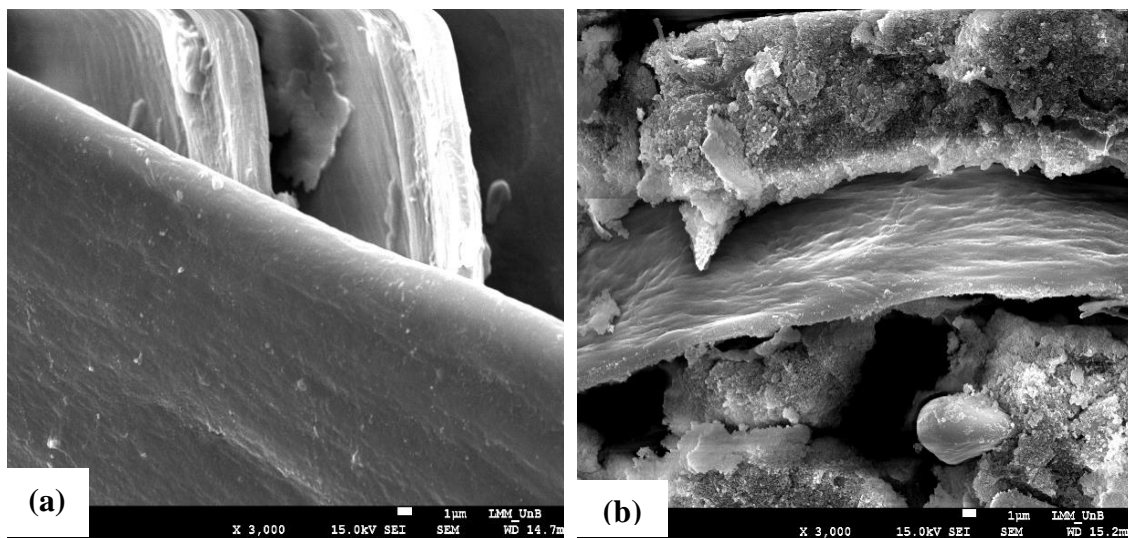


Figura 5-28 – Detalhe da degradação da pena (0,25%) no solo: (a) estado inicial, 3000x; (b) estado final, 3000x



A Figura 5-29 apresenta a degradação das fibras das misturas solo-cal-fibra ao passar do estado inicial (a) para o final (b).

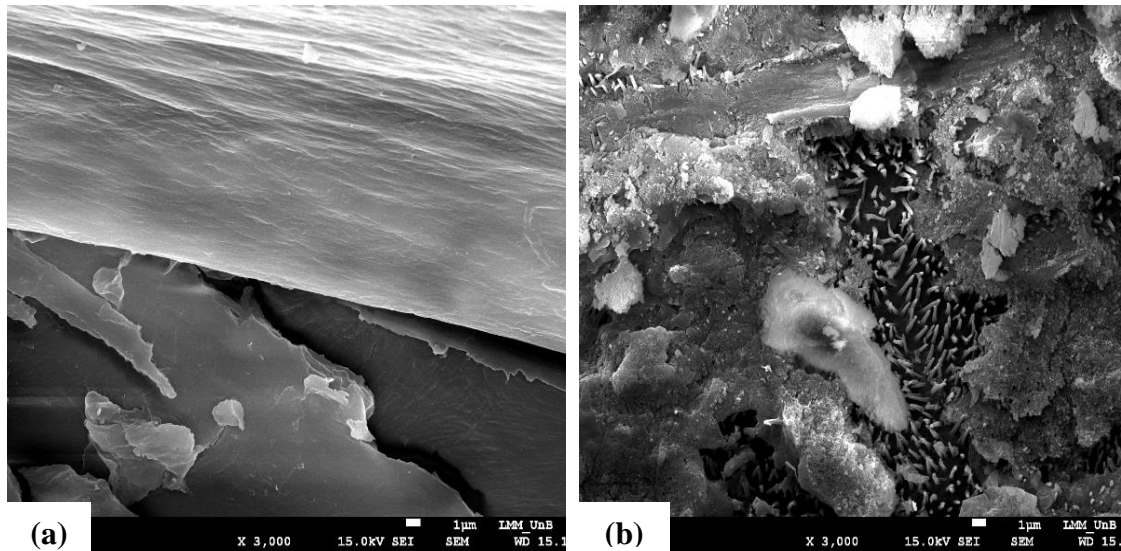


Figura 5-29 – Estado de degradação pena-solo-cal (a) estado inicial 3000x, (b) estado final 3000x

O meio alcalino levou a uma degradação acelerada da fibra e uma quebra total da estrutura observada no estado inicial como pode ser observado na comparação entre as Figura 5-30 (a) (estado inicial) e (b) (estado final). Esse fenômeno observado confirma a teoria de degradação mencionada em Prasanthi *et al.*, (2007); Brebu e Spiridon, (2011); Ma *et al.*, (2017) e outras fontes de estudo de degradação da fibra para obtenção de queratina.

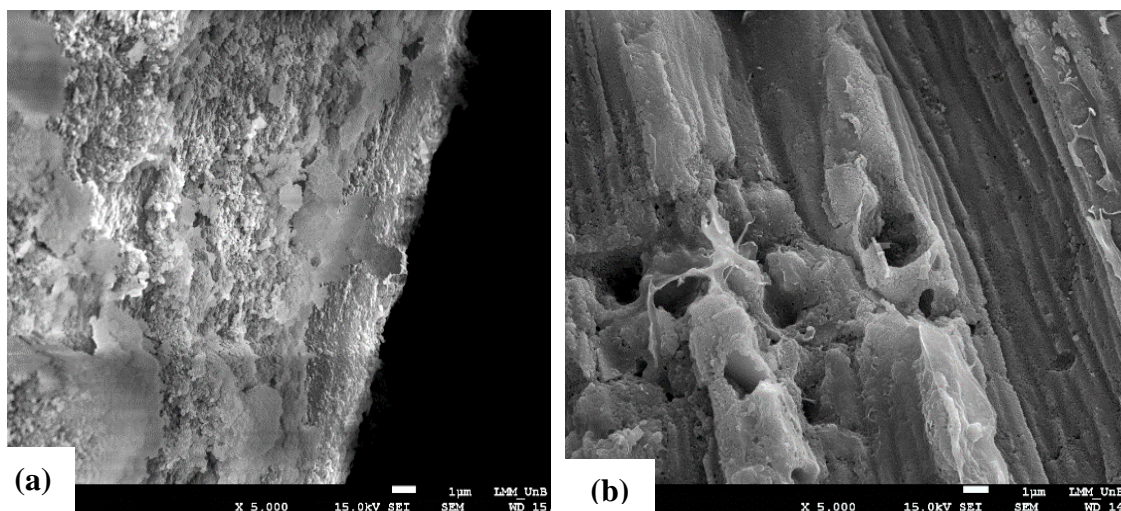


Figura 5-30 – Estado de degradação da pena em meios alcalinos: (a) estado inicial 5000x: (b) estado final 5000x

## 5.11 ENSAIOS DE MINI – COMPACTAÇÃO

Para realização dos ensaios de resistência mecânica precisou-se do auxílio do ensaio de compactação para identificar o ponto ótimo de preparação de todos os corpos de prova ao longo dos testes de resistência. Mediante o ensaio de mini – compactação, com procedimento detalhado no capítulo de metodologia, foram determinados o peso específico aparente seco máximo e a umidade ótima de cada uma das amostras ensaiadas ao longo da pesquisa. Considerando-se que, embora pequenas, ocorreram variações na densidade real das misturas ensaiadas em relação ao solo puro, os resultados foram também analisados em termos do índice de vazios.

### 5.11.1 COMPACTAÇÃO DO SOLO PURO

A Figura 5-31 apresenta a curva de compactação do solo puro, em que SP é o solo puro. Nesta curva de compactação tem-se o peso específico aparente seco máximo de  $15,9 \text{ kN/m}^3$  e a umidade ótima de  $19,2\%$ . O índice de vazios mínimo correspondente à condição ótima é  $0,68$ . Na condição ótima o solo apresenta um grau de saturação igual a  $79\%$ .

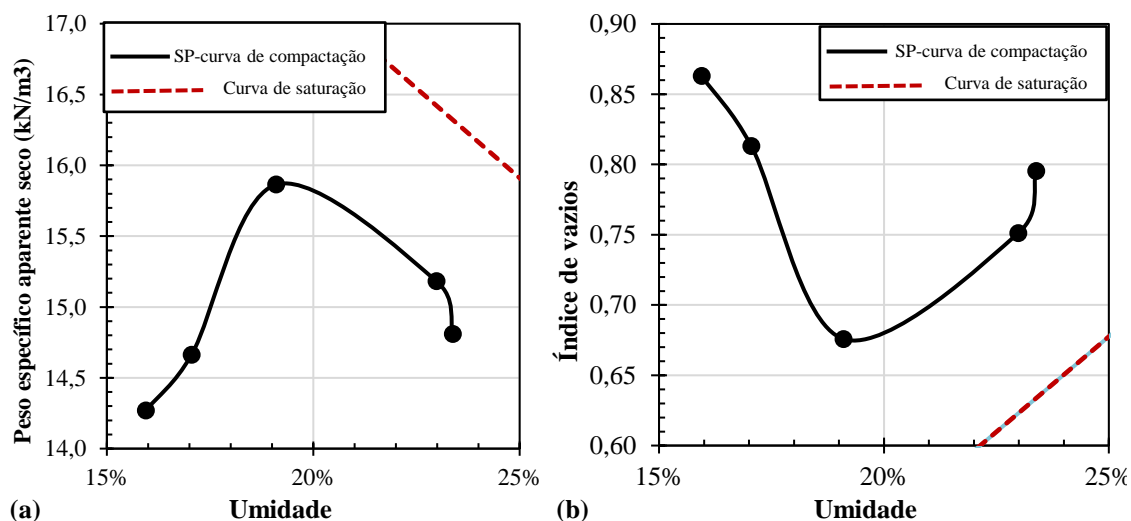


Figura 5-31 – Curva de compactação do solo puro: (a) em função do peso específico aparente seco; (b) em função do índice de vazios

Observando-se a curva característica apresentada para o solo puro na Figura 5-5 verifica-se que o ramo seco da curva de compactação encontra-se, em termos de umidade, entre o término da entrada de ar nos macroporos (aproximadamente  $50 \text{ kPa}$ ) e a entrada de ar nos

microporos (aproximadamente 15000 kPa) correspondendo a uma grande variação de sucção o que justifica a acentuada inclinação do ramo seco da curva de compactação.

Já o ramo úmido segue aproximadamente paralelo à curva de saturação indicando uma certa uniformidade do aumento da macroporosidade em relação ao aumento da umidade cabendo lembrar que no ramo úmido a diminuição do peso específico ou o aumento do índice de vazios com o aumento do teor de umidade de compactação se dão em proporção direta com a diminuição da energia efetiva de compactação devido à geração de pressão neutra positiva em consequência do aumento desta mesma umidade de compactação.

### 5.11.2 CURVAS DE COMPACTAÇÃO SOLO – CAL

Para a cal tipo CH-I e cal tipo CH-III, os pesos específicos aparentes secos máximos e umidades ótimas obtidos dos ensaios de mini – compactação estão apresentados na Tabela 5-5.

Tabela 5-5 – Resultados dos ensaios de compactação do solo puro e das misturas solo – cal CH-I e CH-III para 4%, 6% e 10% de cal

CP	W <sub>ot</sub> (%)	$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	e <sub>ót.</sub>	S (%)
Solo Puro	19,2	15,9	0,68	79
4I	21,9	15,06	0,76	77
6I	22,0	14,96	0,78	77
10I	23,7	14,49	0,83	76
4III	23,5	15,16	0,75	84
6III	23,8	14,84	0,79	81
10III	24,0	14,48	0,84	77

I, III = cal tipos CH-I e CH-III; 4, 6 e 10 = teores de cal 4%, 6% e 10%

As Figura 5-32 (a) e (b) apresentam respectivamente os resultados dos ensaios de compactação das misturas solo-cal para os dois tipos de cal, CH-I e CH-III, em termos de peso específico aparente seco. Para facilitar as comparações são apresentadas nestas figuras a curva de compactação obtida para o solo puro verificando-se que o peso específico aparente seco máximo obtido para cada mistura é menor que o oriundo do solo puro.

Observa-se nestas figuras que a presença da cal CH-I gera a suavização do ramo seco das curvas de compactação sendo que com a cal CH-III esta suavização se amplia e ocorre também no ramo úmido. De um modo geral a suavização dos ramos seco e úmido da curva de compactação amplia a faixa de umidade de compactação no campo, pois geralmente ela é indicativa de uma menor variação do comportamento hidromecânico do solo para uma mesma faixa de umidade adotada.

A maior suavidade do ramo seco da curva de compactação solo-cal CH-I em relação ao solo puro encontra-se em consonância com os resultados obtidos para as curvas características (Figura 5-5) que se mostraram mais suaves que a obtida para o solo puro entre o término da entrada de ar nos macroporos e a entrada de ar nos microporos, ou seja, ocorrem menores variações de sucção quando se incorpora água ao solo-cal CH-I que quando se incorpora água ao solo puro, o que implica, em princípio, que a perda de resistência com a incorporação de água é menor no solo-cal CH-I.

A manutenção da inclinação do ramo úmido sinaliza para a manutenção das distribuições dos poros na zona de macroporosidade uma vez que com a oclusão da fase ar a partir da umidade ótima as variações de sucção se tornam pequenas com o aumento da umidade.

Embora não tenham sido determinadas curvas características para as misturas solo-cal CH-III depreende-se pelas formas dos ramos secos das curvas de compactação que elas seriam ainda mais suaves. O aumento da suavidade dos ramos úmidos em relação ao ramo úmido do solo puro e das misturas solo-cal CH-I apontam para uma menor geração de pressão neutra positiva com aumento da umidade comparativamente ao solo puro e solo-cal CH-I. Não se pode evidentemente desprezar a possibilidade de influência das próprias químicas das cales nos resultados.

Tem-se ainda, que embora a quebra de agregados possa conduzir a uma ampliação na inclinação dos ramos secos e úmido das curvas de compactação e nessa linha de raciocínio tanto a suavização do ramo seco como do ramo úmido com a adição de cal estariam apontando na direção da agregação ou solidificação dos agregados existentes no solo, considerando-se que a desagregação do solo conduziria a poros mais uniformes com menores variações de sucção com a umidade, esta seria uma segunda possibilidade a ser

considerada e as análises microestruturais apresentadas sinalizam nesta direção (Figura 5-32).

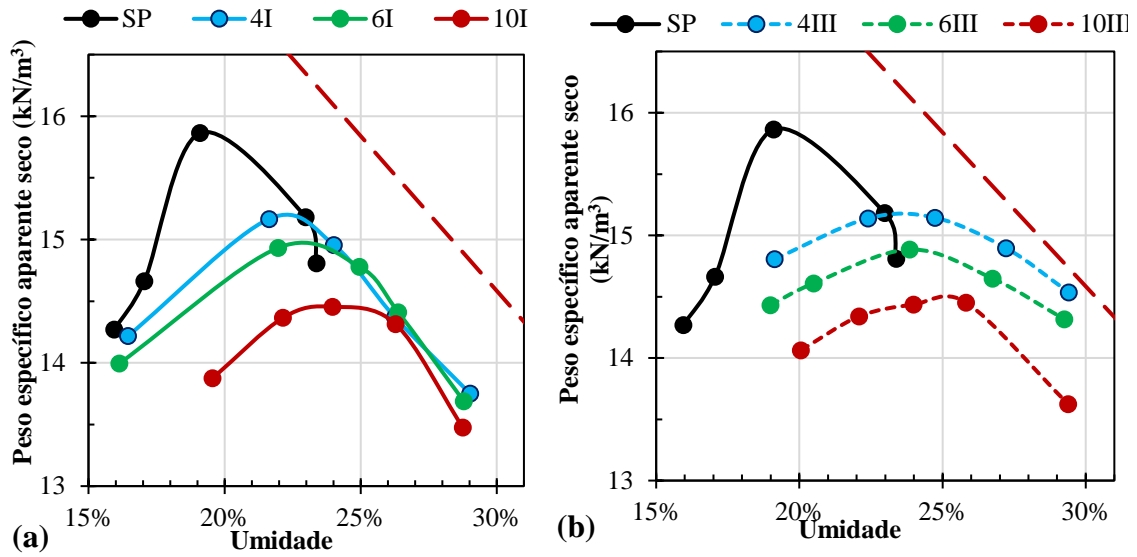


Figura 5-32 – Influência da cal nas curvas de compactação do solo: (a) cal tipo CH-I; (b) cal tipo CH-III

As Figura 5-33 (a) e (b) apresentam as curvas de compactação em termos dos índices de vazios em função da umidade de compactação. A partir destas curvas obteve-se os valores de índice de vazios mínimos 0,75, 0,76 e 0,81 para misturas com cal tipo CH-I e 0,75, 0,78 e 0,82 para misturas com cal III considerando-se respectivamente os teores de 4% 6% e 10% de cal. Inversamente à situação do peso específico aparente seco máximo, os índices de vazios mínimos obtidos para as misturas solo-cal foram, como esperado, maiores que o do solo puro e tanto maior quanto maior o teor de ambas as cales.

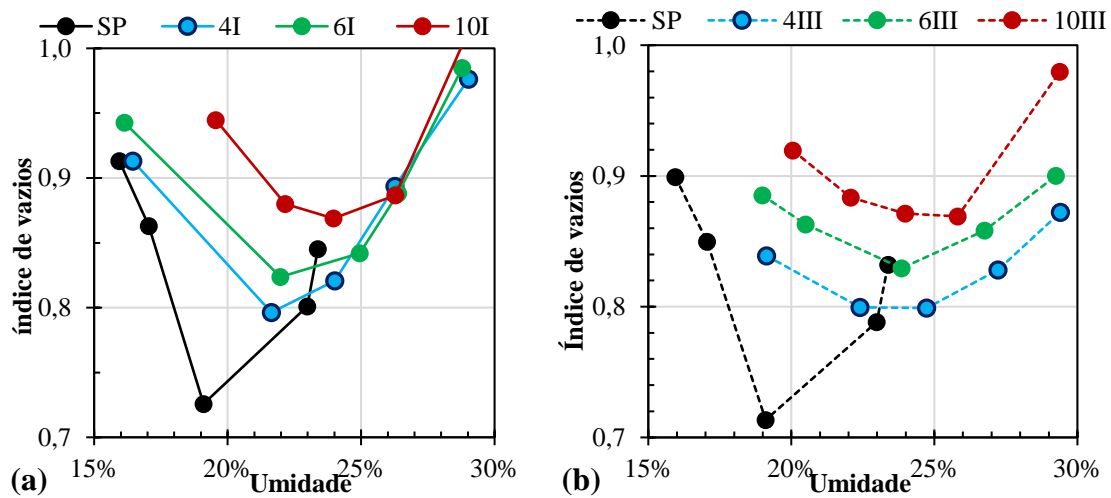


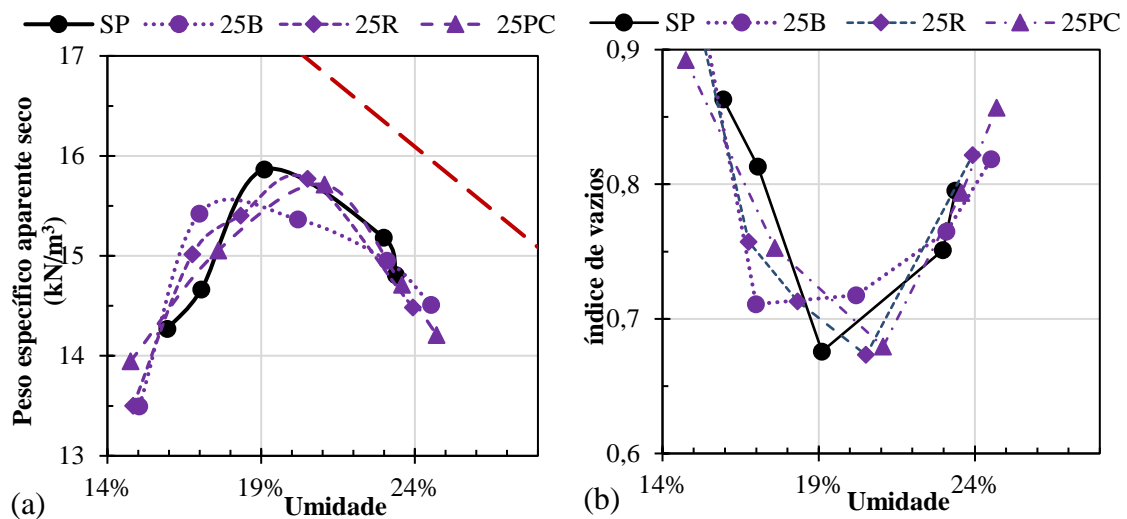
Figura 5-33 – Influência da cal no índice de vazios do solo. (a) cal tipo CH-I; (b) cal tipo CH-III

Os resultados de compactação coincidem com os apresentados por Teixeira *et al.*, (2019) em relação a diminuição do peso específico aparente seco e o incremento da umidade, no entanto, o incremento de umidade neste caso tende a acompanhar o teor de cal na mistura e o processo de floculação acontece de forma proporcional.

### 5.11.3 INFLUÊNCIA DO TEOR DE FIBRAS NAS CURVAS DE COMPACTAÇÃO SOLO - FIBRA

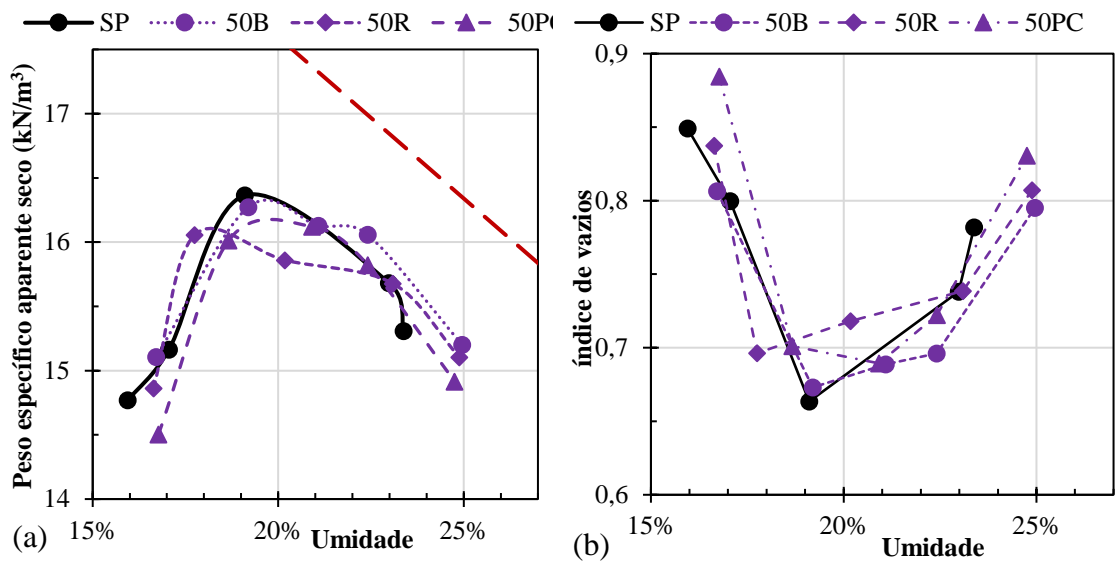
As Figura 5-34 (a) e (b), Figura 5-35 (a) e (b) e Figura 5-36 (a) e (b) apresentam respectivamente as curvas de compactação das misturas de solo com os teores de 0,25%, 0,50% e 0,75% de fibra considerando-se a raque (R), a barba (B) e a pena completa (PC).

De um modo geral observa-se nas três figuras tanto em termos de peso específico aparente seco (a) como de índice de vazios (b) que a introdução das fibras gerou pouco impacto nas curvas de compactação tornando difícil indicar uma tendência sobre a influência do teor e tipo de fibra nos resultados obtidos sendo que apenas para a incorporação de 0,75% de fibras se observa certa tendência mais expressiva na diminuição do peso específico aparente seco máximo e aumento no índice de vazios mínimo em relação ao solo puro. Neste caso a influência foi maior para a pena completa seguida da barba e finalmente a raque.



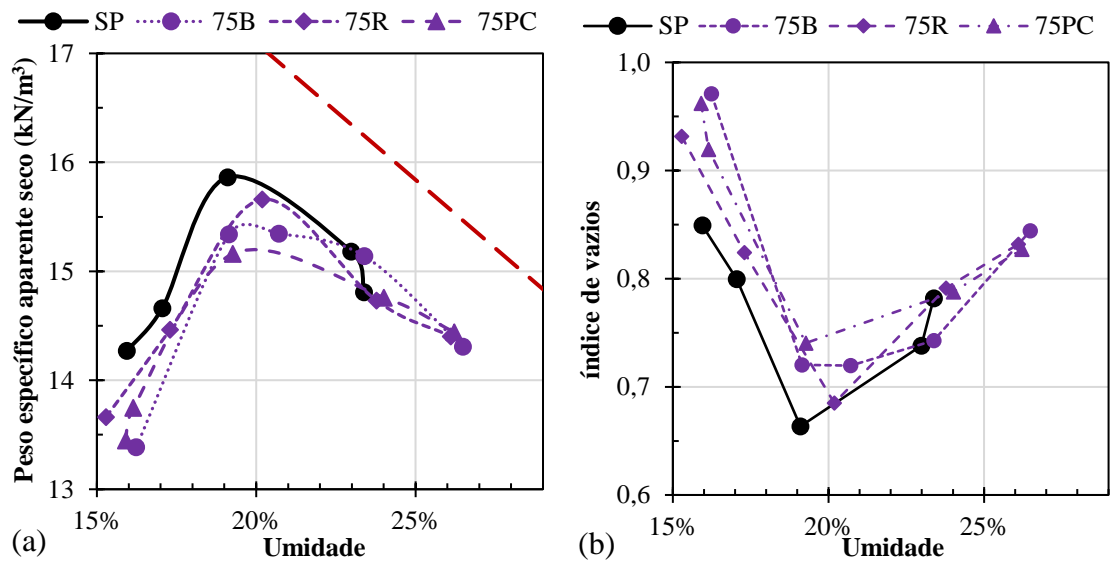
R = raque; B = barba; PC = pena completa

Figura 5-34 – Influência do teor de 0,25% de pena na curva de compactação do solo: (a) peso específico aparente seco; (b) índice de vazios



R = raque; B = barba; PC = pena completa

Figura 5-35 – Influência do teor de 0,50% de pena na curva de compactação do solo: (a) peso específico aparente seco; (b) índice de vazios



R = raque; B = barba; PC = pena completa

Figura 5-36 – Influência do teor de 0,75% de pena na curva de compactação do solo: (a) peso específico aparente seco; (b) índice de vazios

As Tabela 5-6 apresenta uma síntese dos Resultados de peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dmax}$ ), índice de vazios mínimo ( $e_{ót}$ ), umidade ótima ( $w_{ót}$ ) e grau de saturação correspondente à umidade ótima ( $S_r$ ) para as misturas com fibra e solo puro. Os pesos específicos aparentes secos máximos tendem a diminuir e as umidades ótimas a

incrementarem conforme aumenta o teor de fibra no solo. No caso da umidade a água tende a preencher os vazios internos da fibra contribuindo para o aumento da umidade ótima.

Tabela 5-6 – Resultados oriundos do ensaio de compactação de misturas solo - fibra

CP	w <sub>ot</sub> (%)	γ <sub>dmax</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	e <sub>ót</sub>	Sr%
SP	19,2%	15,86	0,68	81%
25R	20,0%	15,76	0,69	79%
25B	20,2%	15,64	0,70	78%
25PC	20,0%	15,59	0,71	77%
50R	20,6%	15,56	0,71	79%
50B	20,8%	15,76	0,69	82%
50PC	20,9%	15,69	0,69	82%
75R	21,3%	15,39	0,73	79%
75B	21,9%	15,50	0,72	83%
75PC	21,8%	15,27	0,74	80%

SP = solo puro; R = raque; B = barba; PC = pena completa; 25, 50 e 75 = teores de fibra 0,25%, 0,50% e 0,75%

#### 5.11.4 CURVAS DE COMPACTAÇÃO DAS MISTURAS SOLO – CAL – 0,25% DE FIBRA

As Figura 5-37 (a) e (b) e Figura 5-38 (a) e (b) apresentam respectivamente em termos de peso específico aparente seco e de índice de vazios as curvas de compactação para as misturas solo – 4% de cal CH-I para a adição de 0,25% de fibra. Como referência são apresentadas as curvas de compactação obtidas para o solo puro e para o solo – cal 4%.

Observa-se dos resultados obtidos que assim como a cal influencia a curva de compactação do solo, ela promove efeito similar quando adicionada às misturas solo-fibra, sendo que para a cal CH-I ocorre quando da incorporação de 0,25% de fibra uma maior redução do peso específico aparente seco máximo e maior aumento no índice de vazios mínimo acompanhados de uma ampliação na umidade ótima em relação ao solo-cal, enquanto para a cal CH-III as fibras interferem pouco na condição ótima.

Quanto ao formato das curvas obtidas para as misturas do solo com fibra e cal CH-I elas apresentam formato similar ao da curva solo-cal CH-I. Já nas misturas solo-fibra- cal CH-III observa-se que apesar da similaridade do ramo seco elas apresentam o ramo úmido



mais íngreme que nas misturas solo-cal indicando que as fibras estão a possibilitar uma maior geração de pressão neutra positiva com o aumento do teor de umidade de compactação.

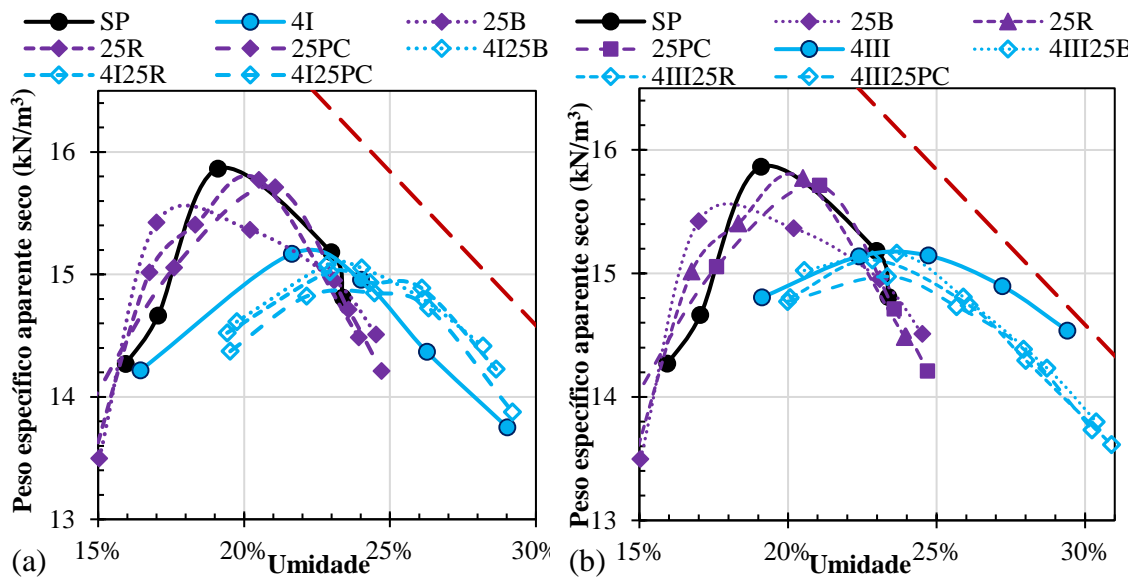


Figura 5-37 – Influência de 0,25% de fibra em misturas solo-cal 4% (a) cal tipo CH-I; (b) cal tipo CH-III

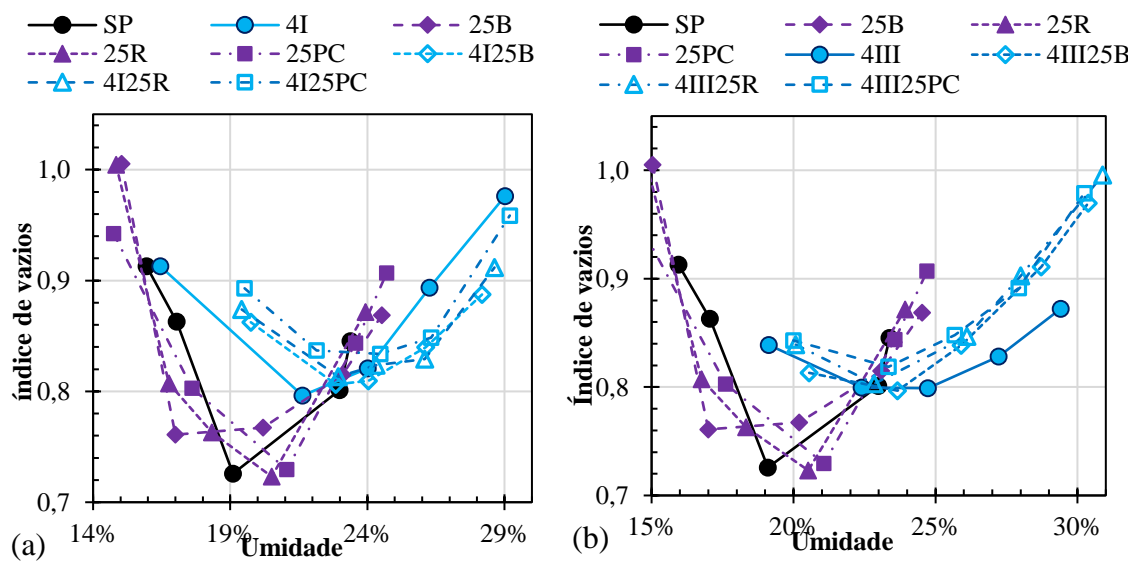


Figura 5-38 – Influência de 0,25% de fibra no índice de vazios de misturas solo-cal 4%: (a) cal tipo CH-I; (b) cal tipo CH-III

As Figura 5-39 (a) e (b) e Figura 5-40 (a) e (b) apresentam as curvas de compactação de misturas solo - 6% de cal e 0,25% de fibra. São apresentadas como referência as curvas de compactação do solo puro e da mistura solo - cal 6%. Observa-se nestas figuras que

para a cal CH-I as fibras aumentam a umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo diminuindo o índice de vazios mínimo.

Para a cal CH-III embora tenda a ocorrer o aumento do peso específica aparente seco máximo e diminuição do índice de vazios mínimo com a incorporação das fibras a umidade ótima se mantém aproximadamente constante. Em termos de formato de curva, as fibras geram um aumento de declividade do ramo seco das curvas obtidas para as misturas com cal CH-I e do ramo seco e úmido das misturas com a cal CH-III.

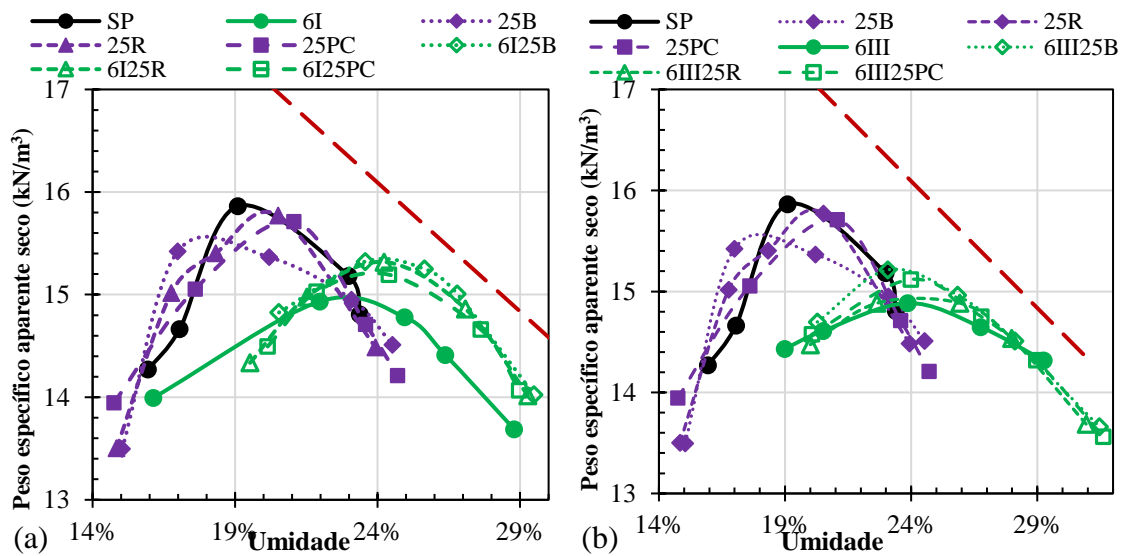


Figura 5-39 – Influência de 0,25% de fibra na compactação de misturas solo-cal 6%: (a) cal tipo CH-I; (b) cal tipo CH-III

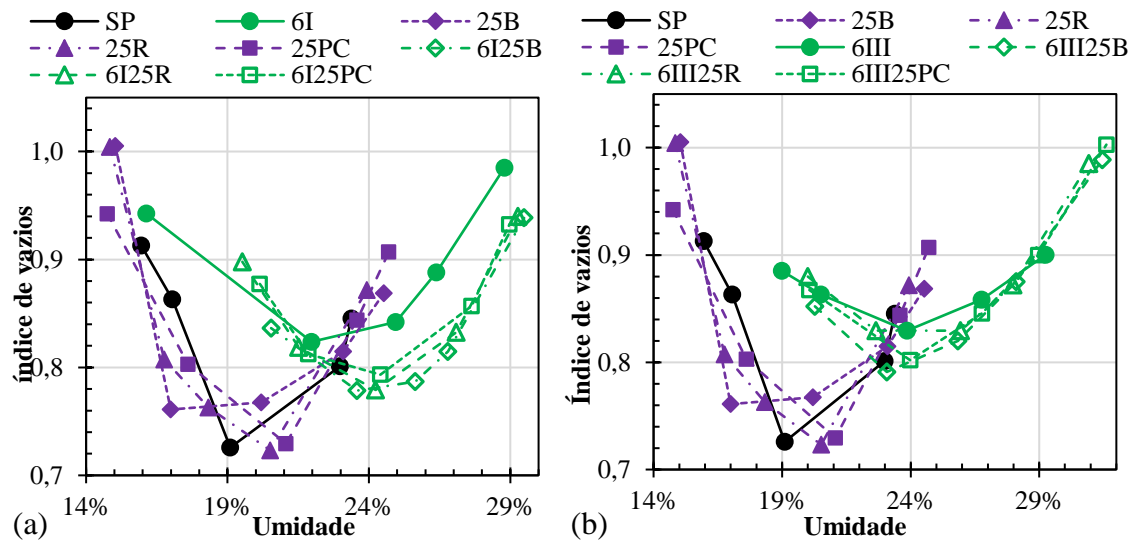


Figura 5-40 – Influência de 0,25% de fibra no índice de vazios de compactação de misturas solo-cal 6%: (a) cal tipo CH-I; (b) cal tipo CH-III

As Figura 5-41 (a) e (b) apresentam respectivamente as curvas de compactação em termos do peso específico aparente seco de misturas solo-cal CH-I 10% e solo-cal CH-III com adição de 0,25% de fibra. Na Figura 5-41 (a), se identifica um deslocamento para a direita em relação à curva obtida para a mistura solo-cal CH-I quando da incorporação das fibras às misturas. Já para a cal CH-III tal comportamento não é verificado (Figura 5-41 (b)).

Embora a umidade ótima das misturas com fibras seja aproximadamente a mesma, o peso específico aparente seco torna-se maior para a fibra barba (B) e menor para a pena completa (PC) sendo que a raque (R) assume valor intermediário. Entende-se neste caso específico que a barba absorve menos a energia de compactação e a pena completa absorve mais. A raque por ser um elemento de maior diâmetro e mais compressível tende a ter uma atuação de cunho mais físico.

Para as misturas com a cal CH-III observa-se um menor deslocamento para a direita e a sequência de variação do peso específico aparente seco máximo segundo o tipo de fibra já não é o mesmo alterando-se para a raque como maior valor, a barba como menor e a pena completa como valor intermediário.

O deslocamento maior da umidade ótima nas misturas solo-cal CH-I-fibras para a direita em relação ao solo-cal CH-I do que no caso da mistura com a cal CH-III pode estar ligado a fenômenos de agregação ou desagregação e a trocas catiônicas. Já a diferença entre a ordem da interferência do tipo de fibra entre as duas cales pode estar atrelada à questão da agregação ou desagregação, mas também sinalizar para a variabilidade da influência do tipo de fibra neste parâmetro.

Finalmente cabe destacar que as fibras tornaram o ramo seco das curvas de compactação mais íngremes em relação às misturas solo-cal sendo a diferença mais acentuada para a cal CH-III. Quanto ao ramo úmido não se percebe alterações de inclinação significativas em relação ao solo-cal.

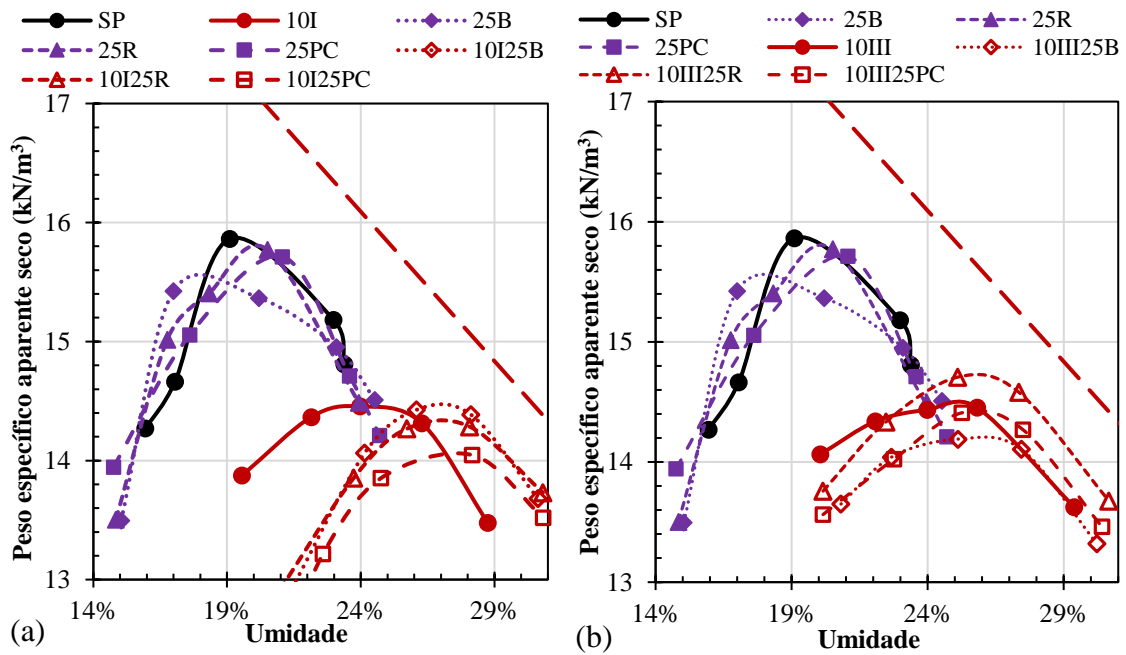


Figura 5-41 – Influência de 0,25% de fibras na compactação de misturas solo-cal 10%: (a) cal tipo CH-I; (b) cal tipo CH-III

Na Figura 5-42 são apresentadas as curvas de compactação considerando-se o índice de vazios em função da umidade de compactação. As discussões realizadas para curvas considerando-se os pesos específicos aparentes secos em lugar dos índices de vazios tendo em vista que as variações de densidade real das diferentes misturas não foram tão significativas continuam válidas dispensando-se maiores comentários.

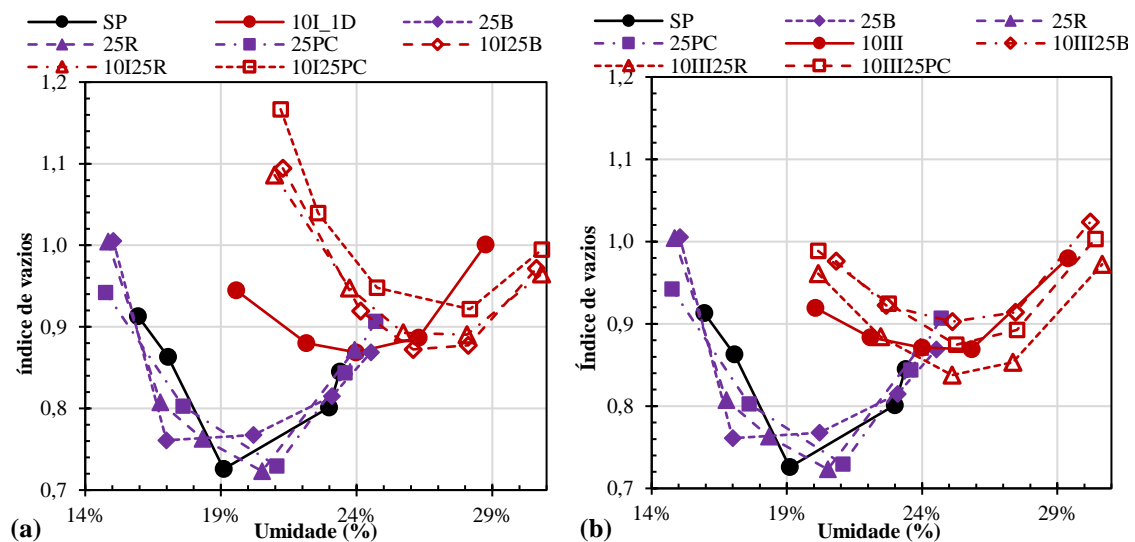
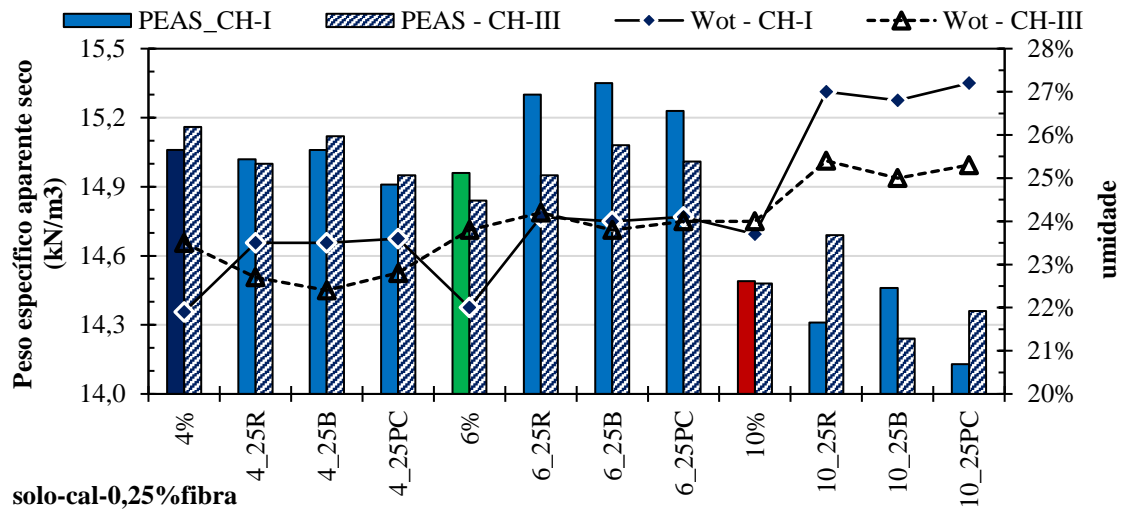


Figura 5-42 – Influência de 0,25% de fibra no índice de vazios de compactação de misturas solo-cal 10%: (a) cal tipo CH-I; (b) cal tipo CH-III

A Figura 5-43 apresenta a síntese dos resultados obtidos para o peso específico aparente seco e umidade ótima nas misturas analisadas, identificando-se incremento da umidade

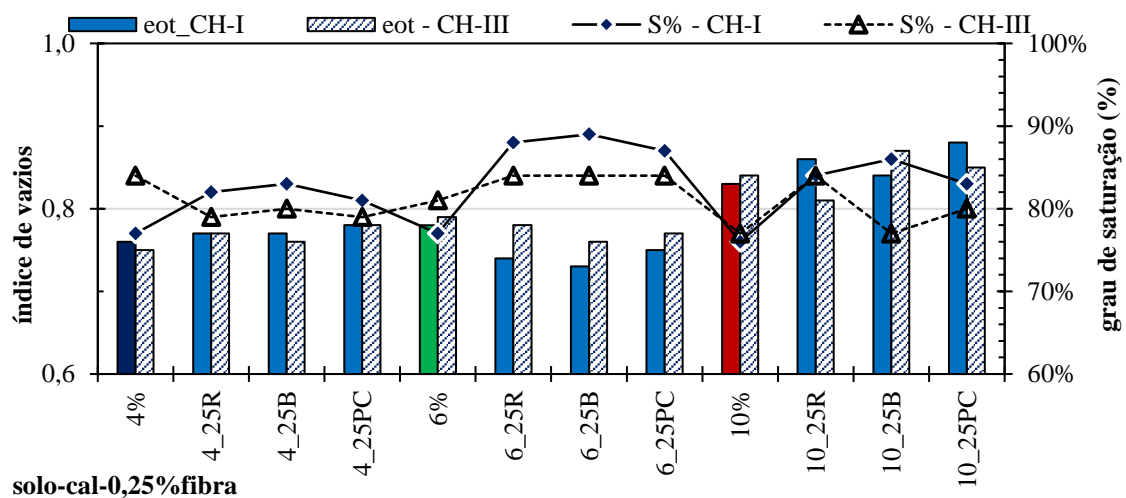
das misturas conforme aumenta seu teor de cal, esse incremento é maior nas misturas com fibra em relação às misturas solo-cal, exceto nas misturas com 10% de cal. Os resultados acompanharam às conclusões obtidas por Teixeira *et al.*, (2019) e Teixeira, (2019).



I e III = cal tipo CH-I e CH-III, 4, 6 e 10 = teores de cal 4%, 6% e 10%; R = raque; B = barba; PC = pena completa; 25= teor de fibra 0,25%

Figura 5-43 – Resultados dos ensaios de compactação ds misturas solo – cal – 0,25% fibra

A Figura 5-44 apresenta a distribuição do índice de vazios dos pontos ótimos das curvas de compactação, observando-se o seu incremento nas misturas solo – cal - fibra confirmando a influência da estrutura da fibra nos parâmetros de compactação das misturas.



I e III = cal tipo CH-I e CH-III, 4, 6 e 10 = teores de cal 4%, 6% e 10%; R = raque; B = barba; PC = pena completa; 25= teor de fibra 0,25%

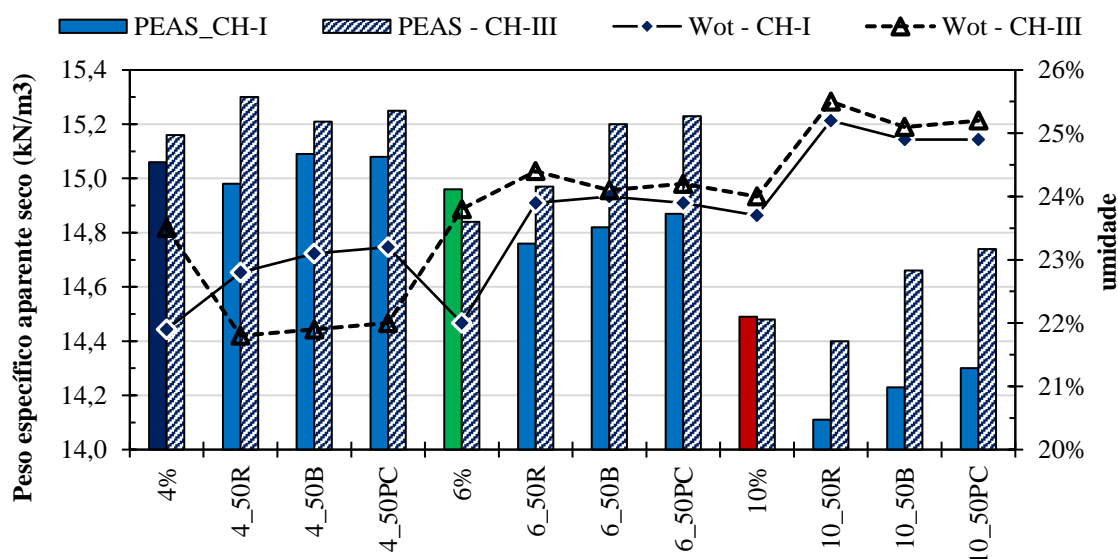
Figura 5-44 – Índices de vazios e grau de saturação dos pontos ótimos das curvas de compactação das misturas solo – cal – 0,25% fibra

### 5.11.5 RESULTADOS DE COMPACTAÇÃO DAS MISTURAS SOLO – 0,50% DE FIBRA – CAL

A Figura 5-45 e Figura 5-46 apresentam a síntese dos resultados de peso específico aparente seco máximo, índice de vazios mínimo, umidade ótima e grau de saturação correspondente à umidade ótima para as misturas contendo 0,50%.

Em todos os casos, se destacaram os incrementos da umidade ótima e diminuição do peso específico aparente seco conforme se amplia o teor de cal nas misturas o que aponta para a ocorrência de reações químicas das misturas solo – cal - e fibra. As variações entre os tipos de fibra são pouco relevantes.

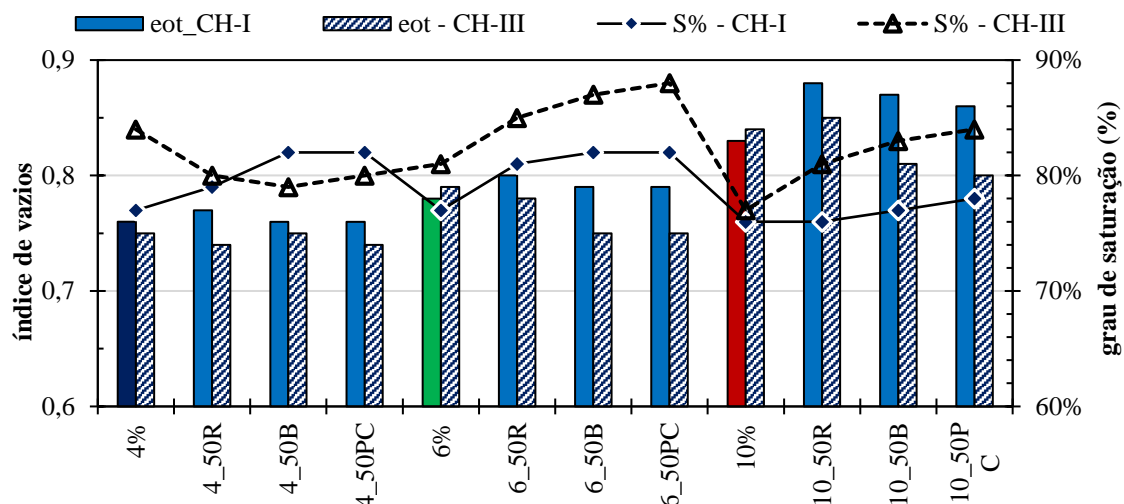
Cabe destacar que para o teor de cal 4%, tanto para a cal CH-I como para a cal CH-III, os resultados obtidos com incorporação de 0,50% de fibras, foi muito similar aos resultados obtidos quando da incorporação de 0,25% de fibras permanecendo válidos para 0,50% de fibras os comentários apresentados para 0,25% de fibras.



I = cal tipo CH-I 4, 6 e 10 = teores de cal 4%, 6% e 10%; R = raque; B = barba; PC = pena completa; 50 = teor de 0,50% fibra

Figura 5-45 – Resultados dos ensaios de compactação das misturas solo - cal e solo – cal – 0,50% fibra

O incremento de índice de vazios observado na Figura 5-46 era um resultado esperado, uma vez que o incremento de cal no solo tende a levá-lo a um processo de floculação.



I = cal tipo CH-I 4, 6 e 10 = teores de cal 4%, 6% e 10%; R = raque; B = barba; PC = pena completa; 50 = teor de 0,50% fibra

Figura 5-46 – Índices de vazios e grau de saturação dos pontos ótimos das misturas solo – cal e solo – cal – 0,50% fibra

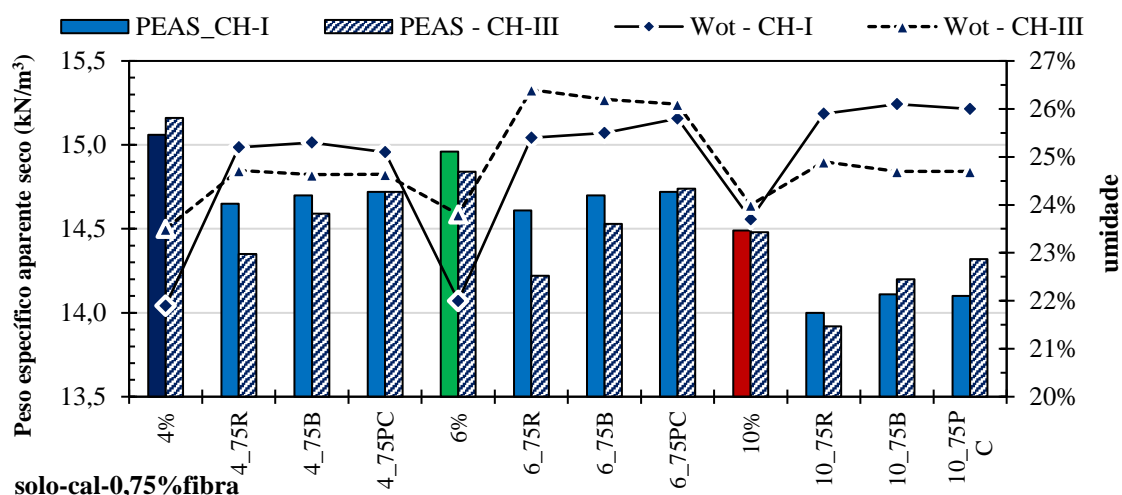
Tendo em vista, salvo pequenas exceções, que os resultados em termos de curvas de compactação para esse teor de fibra são semelhantes aos obtidos quando da incorporação de 0,25% de fibra, as figuras obtidas estão apresentadas no Apêndice A sendo apresentados a seguir apenas alguns comentários sobre estes resultados.

Cabe destacar que para o teor de cal 4%, tanto para a cal CH-I como para a cal CH-III, os resultados obtidos com incorporação de 0,50% de fibras, foi muito similar aos resultados obtidos quando da incorporação de 0,25% de fibras permanecendo válidos para 0,50% de fibras os comentários apresentados para 0,25% de fibras.

Quando da incorporação de 6% de cal CH-I percebe-se uma redução nos valores de peso específico aparente seco máximo em relação ao que foi obtido para a incorporação de 4% de cal. Essa redução pode estar atrelada à variabilidade, mas também ao maior efeito da cal, agora em maior teor, sobre as agregações e floculação das partículas de solo. Quando da incorporação de 10% de cal observa-se um menor deslocamento para a direita da umidade ótima o que deve estar ligado a agregações, floculações ou mesmo a simples alteração nas forças interpartículas devido às trocas catiônicas oriundas da incorporação da cal.

### 5.11.6 RESULTADOS DE COMPACTAÇÃO DAS MISTURA SOLO – 0,75% DE FIBRA – CAL

A Figura 5-47 e a Figura 5-48 apresentam a síntese dos resultados de peso específico aparente seco máximo, índice de vazios mínimo, umidade ótima e grau de saturação correspondente à umidade ótima para as misturas contendo 0,75% dos três tipos de fibra analisados.



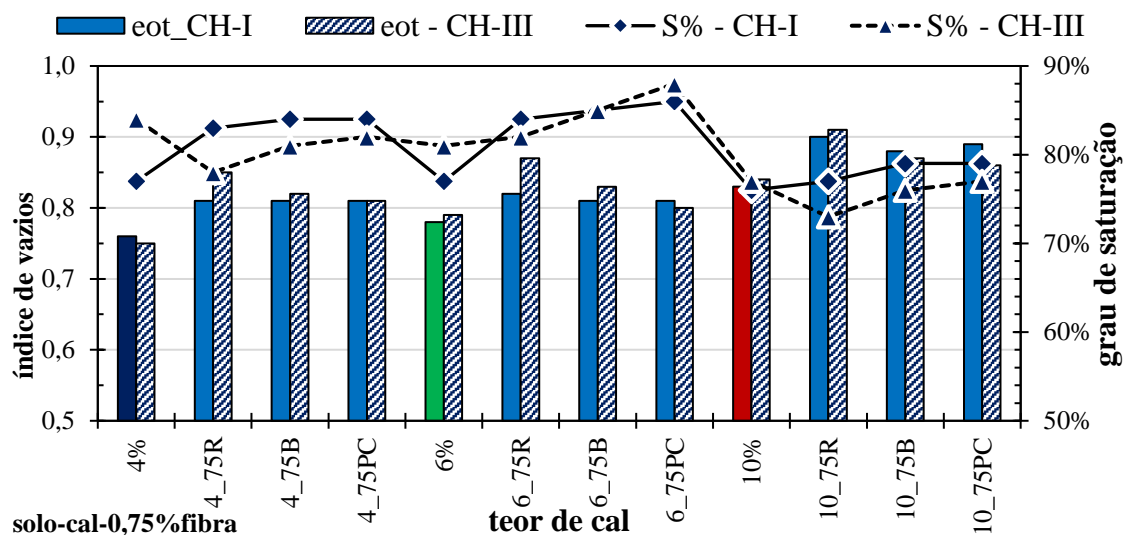
I e III = cal tipo CH-I e CH-III; 4, 6 e 10 = teores de cal 4%, 6% e 10%; R = raque; B = barba; PC = pena completa; 75 = teor de 0,75% fibra

Figura 5-47 – Resultados dos ensaio de compactação para as misturas solo – cal e solo – cal – 0,75% fibra

O comportamento não é diferente das misturas com teores de fibra de 0,25% e 0,50%. Em todos os casos há um incremento da umidade e redução do peso específico aparente seco conforme se adiciona as fibras, conforme Amadi e Okeiyi (2017) concluíram.

De igual forma, o índice de vazios tende a ser maior que os das misturas solo - cal, devido provavelmente ao preenchimento com água dos vazios das fibras nas misturas. A Figura 5-48 confirma a influência da fibra no índice de vazios em relação às misturas solo cal.





I e III = cal tipo CH-I e CH-III; 4, 6 e 10 = teores de cal 4%, 6% e 10%; R = raque; B = barba; PC = pena completa; 75 = teor de 0,75% fibra

Figura 5-48 – Índices de vazios e grau de saturação pontos ótimos das curvas de compactação das misturas solo – cal e solo – cal – 0,75% fibra

Ao longo deste item serão tecidos comentários analíticos a respeito dos resultados obtidos sendo as curvas experimentais apresentadas no Apêndice B.

Para a incorporação de 0,75% de fibras e 4% de cal ao solo estudado, observa-se nos resultados obtidos para a cal CH-I que em relação à incorporação de 0,25% de fibras é mantido o deslocamento da umidade ótima ocorrendo, no entanto, uma diminuição no peso específico aparente seco máximo e um aumento no índice de vazios mínimo. Embora com menor deslocamento na umidade ótima, redução semelhante é observada quando da incorporação da cal CH-III à mistura.

Cabe destacar que para ambos os tipos de cal, CH-I e CH-III, verifica-se nas curvas uma tendência de alinhamento do ponto correspondente à condição ótima aos das curvas referentes aos demais resultados, ou seja, do solo puro, solo - fibra e solo - cal. Diante disso, apesar do pequeno deslocamento registrado para as misturas com a cal CH-I, tem-se uma tendência de alinhamento dos ramos úmidos obtidos para todas as misturas.

Esse conjunto de observações leva ao entendimento que a intervenção das fibras nos resultados de compactação, foram sobretudo de ordem física, na qual as fibras atuam resistindo ao processo de compactação. Nesse sentido os resultados obtidos para a raque

corroboram para esta análise tendo em vista que por serem porosos e compressíveis tendem a atuar amortecendo a energia oriunda dos golpes na compactação dinâmica.

Para a incorporação ao solo estudado de 0,75% de fibras e 6% de cal observa-se nos resultados obtidos para a cal CH-I que em relação à incorporação de 0,25% de fibras é mantido, a exemplo do observado para 4% de cal, o deslocamento da umidade ótima para a direita, ocorrendo, no entanto, uma diminuição no peso específico aparente seco máximo e uma diminuição no índice de vazios mínimo.

Para a cal CH-III observa-se o deslocamento da umidade ótima para a direita e redução no peso específico aparente seco máximo e uma diminuição no índice de vazios mínimo. Nota-se que para esta cal os resultados apresentaram maior deslocamento para a direita e maior redução no peso específico aparente seco para a fibra raque.

Para ambos os tipos de cal se observa um certo deslocamento do ramo úmido para a direita confirmando igual tipo de deslocamento para a umidade ótima. Esses resultados indicam o deslocamento do ponto de oclusão da fase ar para maiores valores de umidade.

Tem-se então, que para a adição de 6% de cal a interação fibra-cal-solo está a gerar um comportamento distinto do observado para 4% de cal indicando que ao efeito físico das fibras está a se somar o efeito químico da cal.

Para a incorporação ao solo estudado de 0,75% de fibras e 10% de cal observa-se nos resultados obtidos para a cal CH-I que em relação à incorporação de 0,25% de fibras é mantido, porém em menor escala, o deslocamento da umidade ótima para a direita ocorrendo, no entanto, um menor deslocamento do ramo úmido para a direita.

Para a cal CH-III a umidade ótima mante-se a mesma da mistura solo-cal fazendo com que, para o caso da raque, como ocorre uma significativa redução do peso específico aparente seco máximo tem-se lugar o deslocamento do ramo úmido para a esquerda em relação à tendência geral de alinhamento.

Tem-se então, que para a adição de 10% de cal a interação fibra-cal-solo está a gerar um comportamento distinto do observado para 0, 25% de fibra e 10% de cal sendo de menor intensidade o deslocamento da umidade ótima para a direita o que aponta para uma significativa influência do teor de fibras nos resultados.

## **5.12 MINI CBR**

Os resultados dos ensaios de mini CBR, com procedimento detalhado no capítulo de metodologia, são apresentados neste item. Cabe destacar que os ensaios correspondentes à fase inicial foram realizados na condição inundada e com os corpos de prova ainda dentro dos moldes. Mesmo nas misturas contendo cal o tempo de cura foi tão somente o tempo de imersão, ou seja, neste caso, a influência da cal se deu sobretudo por meio das trocas catiônicas e eventuais reações mais rápidas como as de carbonatação.

Neste caso de ruptura imediata são apresentadas nas figuras de mini CBR em função da umidade as umidades de compactação e as umidades de ruptura. Após os ensaios na condição imediata os corpos de prova foram retirados dos moldes e uma fina camada de solo da zona ensaiada foi usada na determinação da umidade e o restante do corpo de prova enterrado por um ano em contato com as condições ambientes do solo em uma vala. Após um ano os corpos de prova foram retirados, colocados em moldes bipartidos.

Os ensaios de mini CBR foram então realizados no lado oposto dos corpos de prova e em seguida determinadas as umidades em que eles se encontravam. Os índices de vazios iniciais correspondem à condição de compactação e os índices de vazios após um ano de cura foram calculados com base nas determinações do peso, diâmetro e altura de cada corpo de prova realizados antes dos ensaios de mini CBR, logo após o período de 15 dias usado na determinação das sucções atuantes.

As análises apresentadas a seguir terão por fundamento estas informações, sendo que inicialmente são apresentados os resultados de sucção obtidos para os corpos de prova ensaiados em condição não saturada em relação às curvas características obtidas. Em seguida apresenta-se uma breve análise dos índices de vazios dos corpos de prova

ensaiados para em seguida se passar a análise do comportamento do solo puro e diferentes misturas.

### **5.12.1 SUCCÕES E PROPRIEDADES FÍSICAS DOS CORPOS DE PROVA APÓS UM ANO DE CURVA EM RELAÇÃO ÀS CURVAS CARACTERÍSTICAS INICIAIS**

Antes de adentrar nas análises dos resultados de mini CBR propriamente ditos é feita neste item uma breve análise sobre as sucções obtidas para os corpos de prova após um ano de cura em campo em relação às curvas características de referência. Cabe destacar que não se dispõe de curvas características de referência para todas as misturas, sendo no caso usadas curvas características de misturas que mais se aproximavam das respectivas situações dos corpos de prova curados por um ano em campo.

A Figura 5-49 apresenta as curvas características das misturas (a) solo – 0,25% de fibra incluindo-se os pontos obtidos após um ano de cura para o solo puro e misturas solo - 0,25%, 0,50% e 0,75% de fibras; (b) solo – 4% 6% e 10% de cal incluindo-se os pontos obtidos após um ano de cura para o solo puro e misturas solo - 4%, 6% e 10% de cal; (c) solo – 4% de cal – 0,25% de fibra incluindo-se os pontos obtidos após um ano de cura para as misturas solo - 4%, 6% e 10% de cal e 4%, 6% e 10% de cal com adição em cada uma delas de 0,25%, 0,50 e 0,75% de fibras (raque, barba e pena completa); (d) solo – 4% de cal – 0,25% e solo – 4%, 6%, 10% de cal incluindo-se os pontos obtidos após um ano de cura para as misturas solo - 4%, 6% e 10% de cal e 4%, 6% e 10% de cal com adição em cada uma delas de 0,25%, 0,50 e 0,75% de fibras (raque, barba e pena completa).

Observa-se nestas figuras que os pontos obtidos após um ano de cura se encontram deslocados para a direita, tendendo a seguir, porém, a mesma linha de tendência da região das curvas características correspondente a zona de microporosidade (patamar superior horizontalizado, Camapum de Carvalho *et al.*, 2002).

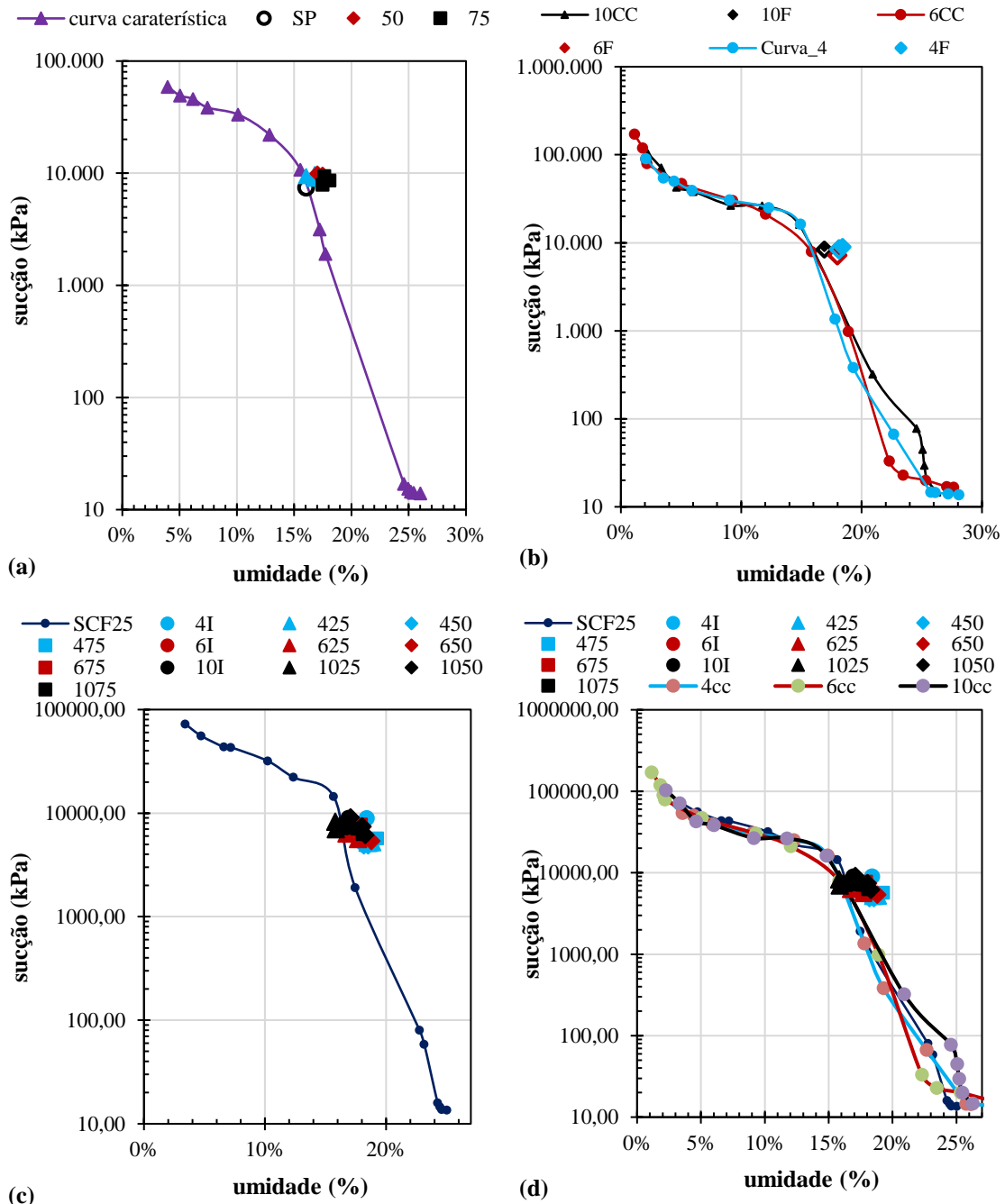


Figura 5-49 – Sucção após cura por um ano em campo em relação às curvas características: (a) solo – fibra; (b) solo – cal; (c) solo cal – fibra; solo – fibra, solo – cal e solo - cal – fibra

A Figura 5-50 apresenta a relação entre os resultados de índice de vazios obtidos após compactação e após um ano de cura em campo considerando-se (a) as misturas solo – fibras (raque, barba e pena completa; 0,25%, 0,50% e 0,75%); (b) as misturas solo – cal (4%, 6% e 10%; cales CH-I e CH-III); (c) as misturas solo - cal CH-I (4%, 6% e 10%) – fibras (raque, barba e pena completa; 0,25%, 0,50% e 0,75%); (d) as misturas solo - cal

CH-I (4%, 6% e 10%) – fibras (raque, barba e pena completa; 0,25%, 0,50% e 0,75%).  
 Na Figura 5-51 estão apresentados todos os resultados constantes da Figura 5-50. Em todas estas figuras foram incluídos os índices de vazios correspondentes ao solo puro.

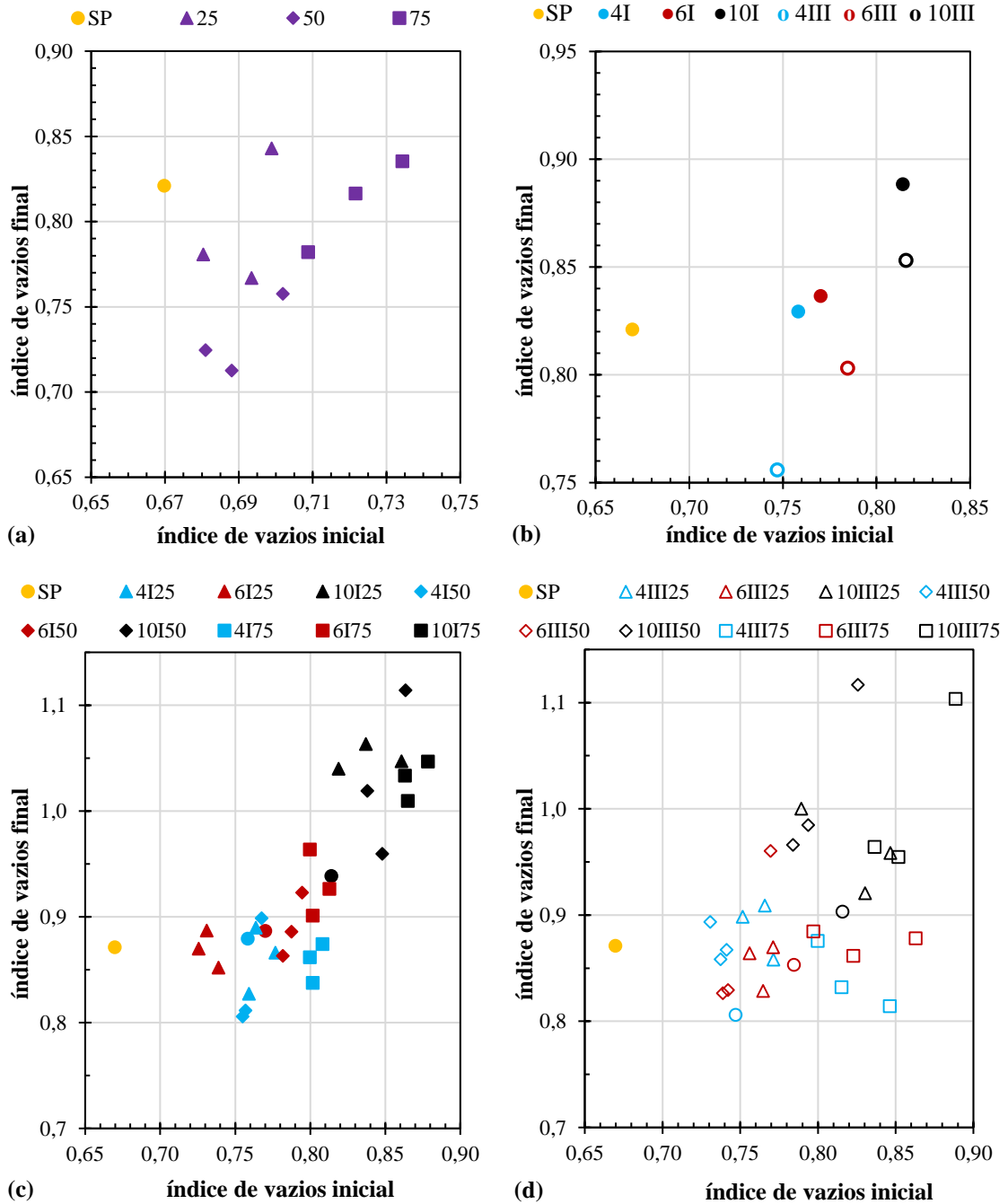


Figura 5-50 - Figura 5 51 - Relações entre os índices de vazios de compactação e após um ano de cura:  
 (a) solo – fibras; (b) solo – cal; (c) solo – cal CH-I – fibras; (d) solo – cal CH-III – fibras

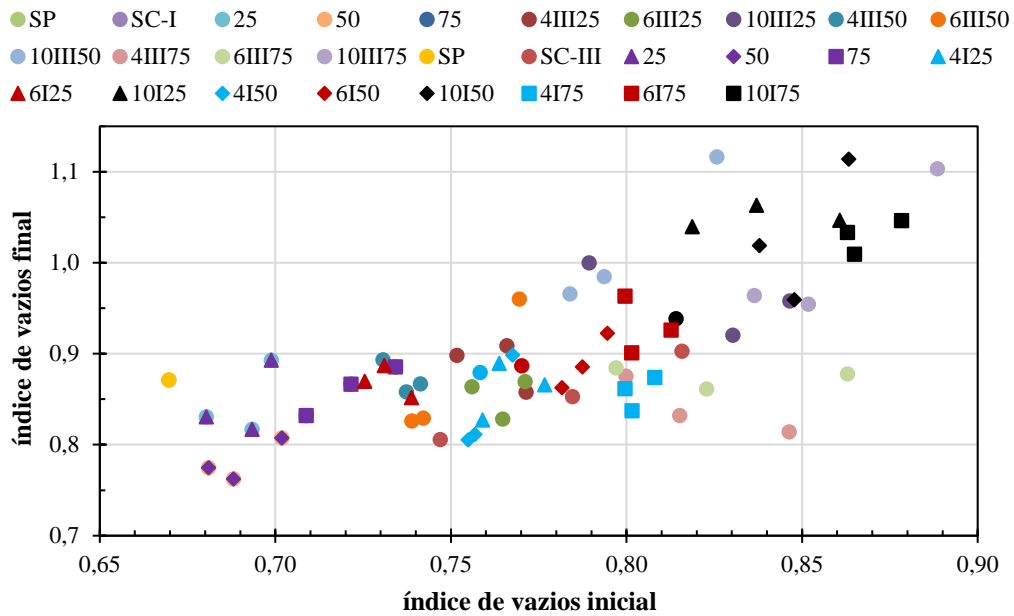


Figura 5-51 - Relação entre os índices de vazios de compactação e após um ano de cura para as misturas solo – fibras, solo – cal, solo – cal CH-I – fibras e solo – cal CH-III - fibras

Com base nas características de distribuição dos pontos de sucção após um ano de cura em campo em relação às curvas características, assim como na relação entre os índices de vazios de compactação e após um ano de cura em campo sobressaem as seguintes estimativas comportamentais:

- a) O volume de microporos tendeu a se ampliar, pois vários pontos de sucção em função da umidade após um ano de cura se deslocaram para a direita das curvas características (Figura 5-50 (a), (b), (c) e (d)), porém, seguindo a mesma tendência da zona de microporosidade;
- b) Tendendo os pontos a avançarem para a direita das curvas características (Figura 5-49 (a), (b), (c) e (d)), o que corresponde a maiores umidades necessárias ao preenchimento dos microporos, isso está a indicar uma ampliação no volume dos microporos o que pode ter se dado por geração de cimentação do caso das misturas com cal ou mesmo por contaminação proveniente da cal presente em outros corpos de prova para o caso de algumas misturas solo – fibra. Outra possibilidade, considerando-se a tendência dos valores de sucção serem menores após um ano de cura, é os tamanhos dos microporos terem se ampliado;

- c) A sucção ao passar a atuar na zona de microporosidade faz com que desapareça o elo por meio do fluido entre vários pontos de contatos externos aos agregados e microagregados. Com isso, por dois motivos, a resistência e capacidade de suporte do solo tende a diminuir: 1) desaparecimento da sucção mátrica em pontos de contato; 2) falta de continuidade na atuação da sucção osmótica nestes pontos. Esta situação pode ser facilmente compreendida caso se pense em uma praia em areia quartzosa. Na zona de baixa umidade, como se tem poucos pontos de contato a sucção capilar e a osmótica tendem a desaparecer e a resistência torna-se pequena. Na zona intermediária entre a zona saturada e a quase seca, a atuação das sucções osmótica e principalmente da mátrica são importantes e a resistência é significativa. Ao entrar na zona saturada situada abaixo do nível d'água, a sucção mátrica desaparece e a osmótica pela natureza mineralógica da areia torna-se pequena e a resistência volta a diminuir;
- d) Das figuras relacionando o índice de vazios inicial após compactação ao obtido após um ano de cura em campo sobressai a expansão dos corpos de prova o que contribui para a perda de resistência dos mesmos que se soma ao fato da sucção para as umidades após cura em campo se situarem, apesar de significativas, na zona de microporosidade minimizando o seu efeito sobre a resistência do solo;
- e) A Figura 5-50 (a) mostra, que partindo-se do solo puro até o solo contendo 0,75% de fibras o aumento da porosidade após um ano de cura tendeu a diminuir com o aumento do teor de fibras, ou seja, as fibras conferem uma certa estabilidade estrutural ao solo, limitando o processo de expansão;
- f) A Figura 5-50 (b) mostra que as expansões apresentadas pelas misturas solo - cal CH-I após um ano de cura em campo foram maiores que as registradas pelas misturas com a cal CH-III e ambas menores que as registradas para o solo puro, ou seja, a cal inibe a expansão estrutural, mas este efeito depende da composição química da cal. Embora ao se comparar os resultados de expansão das misturas solo – cal se verifique que a cal contribuiu para a redução da expansão em campo, esta expansão tendeu a aumentar com o teor de cal;



- g) A tendência geral mostrada na Figura 5-51 indica que os corpos de prova expostos à cura em campo, desde o solo puro até as misturas solo - cal – fibras expandiram, o que aponta na direção da necessidade de se considerar este efeito quando da análise do comportamento mecânico de solos como o estudado;
- h) Outro fator susceptível de afetar os resultados piorando-os, é o fato de não se conseguir dar aos corpos de prova curados *in situ* o mesmo estado de confinamento dos corpos de prova ensaiados sem que fossem removidos dos moldes.

### **5.12.2 ANÁLISE DO MINI CBR DO SOLO PURO**

O valor de mini CBR determinado para a condição ótima foi 11%, valor aceitável para o solo como camada de subleito. A Figura 5-52 apresenta a variação do peso específico aparente seco nos ensaios de mini CBR ao se passar do estado inicial (in) com os ensaios realizados na condição inundada para o estado final (fim) no qual os ensaios foram realizados na condição de campo, ou seja, sem inundação.

Estes resultados correspondem aos pontos da curva de compactação sendo o SP3 correspondente a um ponto próximo à condição ótima, os pontos à sua esquerda encontram-se no ramo seco e os pontos à sua direita no ramo úmido. Observa-se nestes resultados que, exceto para o ponto mais úmido com maior possibilidade de contração por atuação da sucção, ocorreu uma diminuição do peso específico aparente seco após um ano de cura em campo.

Os resultados de mini CBR obtidos para a condição inicial inundada são compatíveis com as variações verificadas para os valores de peso específico aparente seco, no entanto, após um ano de cura o comportamento se inverte e os menores valores de mini CBR são obtidos para os maiores valores de peso específico aparente seco. Tal comportamento está certamente ligado a maior atuação da sucção na zona de microporosidade nos corpos de prova mais densos.

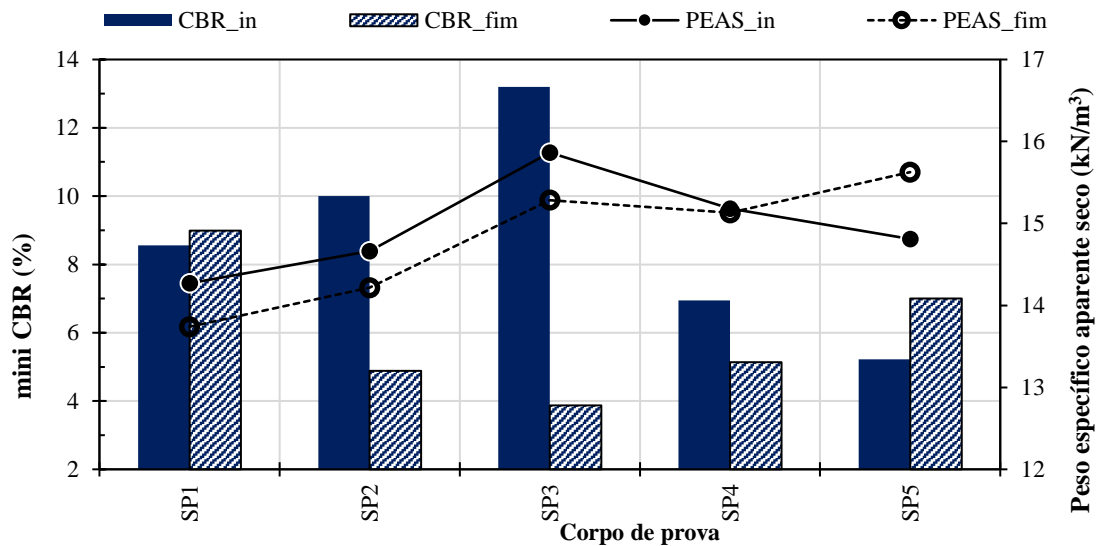


Figura 5-52 – Influência do peso específico aparente seco no mini CBR solo puro

Os resultados mostrados na Figura 5-53 apresentando a variação da umidade nos estados inicial (in) e final (fim) dos corpos de prova usados na determinação dos mini CBR do solo puro corroboram com esse entendimento sobre a maior atuação da sucção na zona de microporosidade no caso dos solos com maior peso específico após um ano de cura, em especial o correspondente à condição ótima para o qual se registrou a menor umidade. No estado inicial, como os mini CBR foram determinados para a condição inundada, prevalece a influência do peso específico aparente seco uma vez que não se tem o efeito da atuação da sucção.

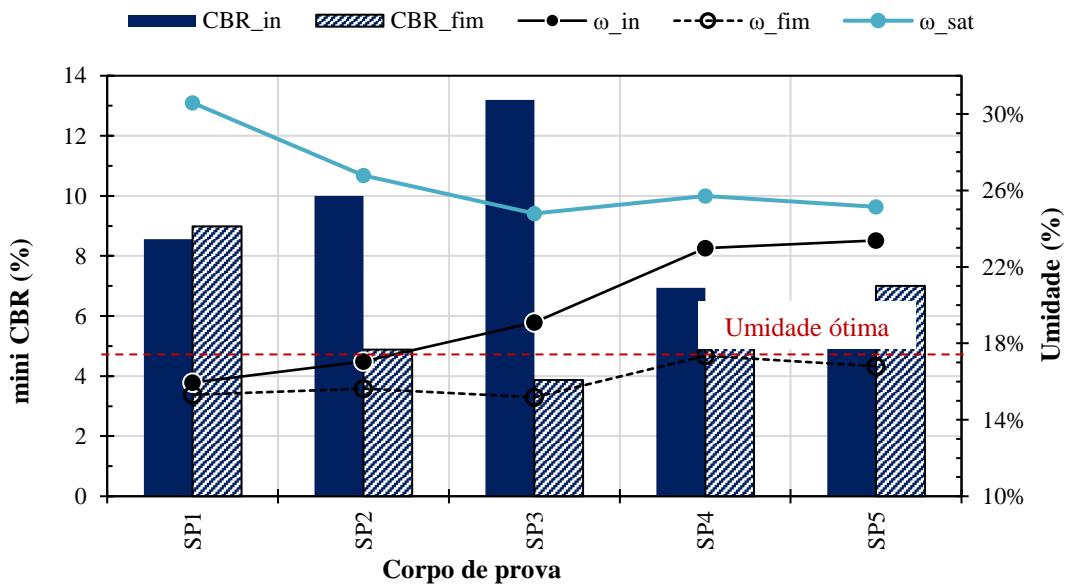


Figura 5-53 - Influência da umidade no mini CBR do solo

### 5.12.3 MINI CBR DAS MISTURAS SOLO - FIBRA, SOLO - CAL E SOLO - CAL - FIBRA

A Figura 5-54 apresenta os resultados de mini CBR obtidos para as misturas solo – fibras (0,25%, 0,50% e 0,75%; raque (R), barba (B) e pena completa (PC) na condição inicial inundada e após um ano de cura na condição não saturada. Observa-se neste gráfico que a incorporação das fibras, exceto para a raque na condição imediata, tendeu a melhorar o comportamento do solo em relação ao solo puro, tanto para a condição imediata como após um ano de cura. Os resultados apresentados nesta figura tanto para o solo puro como para as misturas correspondem à condição ótima.

De um modo geral o melhor desempenho foi verificado para a barba e o pior para a raque. Faz-se, no entanto, necessária a avaliação do comportamento levando-se em consideração os fatores que podem afetá-lo. Embora se observe certa tendência aos melhores resultados serem obtidos quando da incorporação de 0,50% de fibras as diferenças entre os teores não são de um modo geral expressivas.

Após um ano de cura, o mini CBR das misturas obtidos inicialmente caem de uma faixa de variação situada entre 12% e 18% para o valor médio próximo de 7% após um ano de cura, reduzindo assim em aproximadamente 50% em relação ao estado inicial. Destaca-se também que as faixas de variação por tipo de fibra, antes e após a cura, não variaram muito independentemente do tipo de fibra.

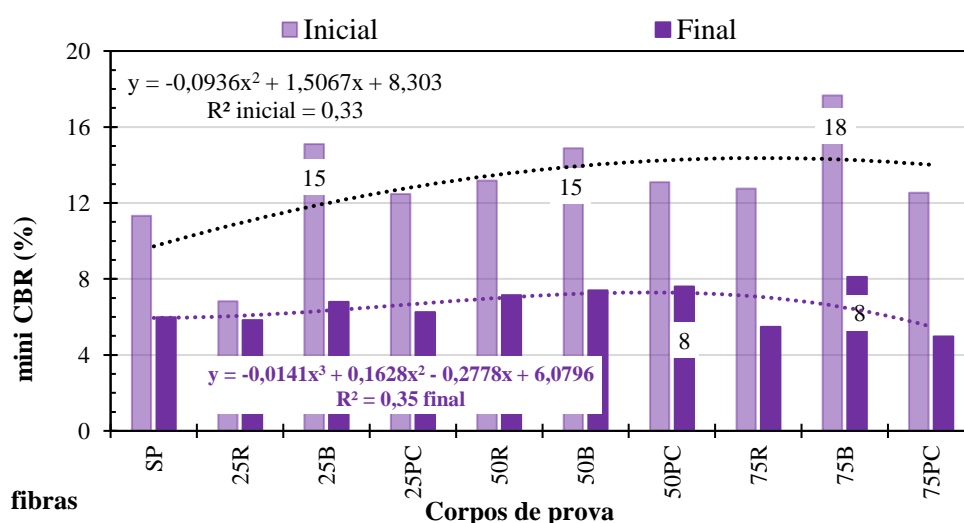


Figura 5-54 - Variação do mini CBR inicial e final de misturas solo - fibra

Como se esperava que a condição não saturada levasse a uma melhoria do comportamento mecânico das misturas solo – fibras ampliou-se as análises para a avaliação do impacto da porosidade e da sucção no comportamento das misturas a longo prazo.

A Figura 5-55 apresenta os resultados de mini CBR em função (a) do índice de vazios, (b) da umidade sendo que neste caso as umidades dos corpos de prova ensaiados logo após a compactação foram apresentadas para a condição de compactação e após inundação, (c) da sucção e (d) da sucção em pF normalizada pelo índice de vazios. Observa-se na Figura 5-55 (a) que o mini CBR tende a diminuir com o aumento do índice de vazios não se percebendo, no entanto, uma clara influência do teor de fibras no comportamento, cabendo destacar que na condição inundada para os ensaios realizados logo após compactação a presença das fibras melhorou o comportamento em relação ao solo natural.

A Figura 5-55 (b) não coloca em evidência a influência esperada da umidade nos valores de mini CBR, sendo que os maiores valores obtidos para as amostras após inundação podem estar ligados aos menores índices de vazios dos corpos de prova atrelados a eventuais deteriorações das fibras em campo durante o período de cura.

Na Figura 5-55 (c) não fica clara a influência da sucção e do teor de fibras no comportamento das misturas após um ano de cura. Analisando-se os resultados em função de pF/e, Figura 5-55 (d), sobressai a influência conjugada da sucção com o índice de vazios no comportamento das misturas sem que se evidencie, no entanto, a influência do teor de fibras.

O conjunto de resultados indica que o aumento do índice de vazios e a redução da umidade situando as sucções atuantes nos corpos de prova na zona de microporosidade contribuíram para a piora do comportamento mecânico das misturas após um ano de cura em campo. Outro fator que não deve ser descartado é a provável deterioração das fibras com o tempo.

● SP ▲ 0,25% raque ◆ 0,25% barba ■ 0,25% pena completa ▲ 0,50% raque ◆ 0,50% barba ■ 0,50% pena completa ▲ 0,75% raque ◆ 0,75% barba ■ 0,75% pena completa; preenchidos = condição inicial; sem preencher = condição final

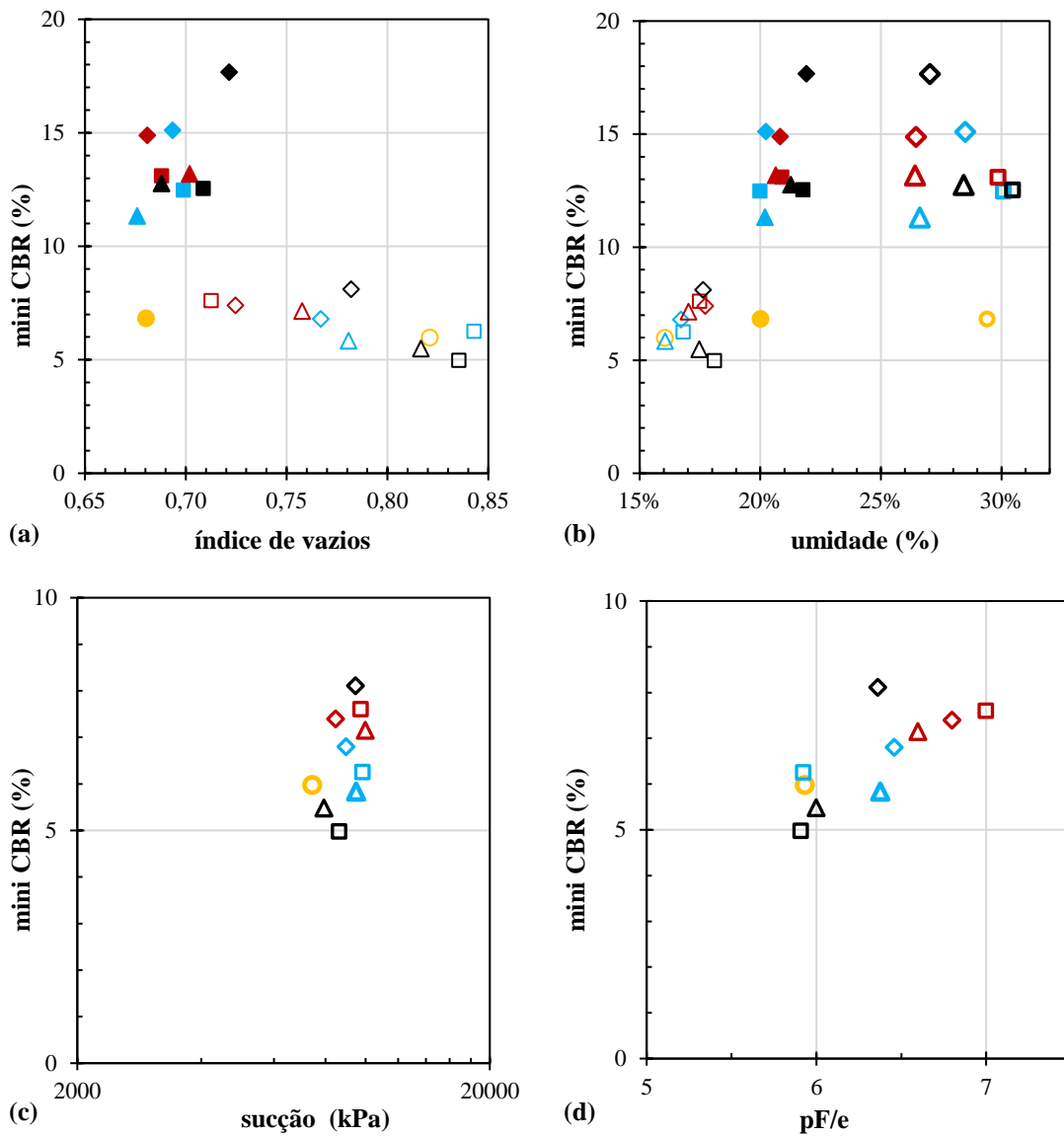


Figura 5-55 – Mini CBR das misturas solo-fibra em função: (a) do índice de vazios; (b) da umidade; (c) da sucção; (d) de pF/e

A Figura 5-56 reproduz os resultados da Figura 5-55 (d) separando-os, no entanto por tipo de fibra. Nesta figura se observa que o tipo de fibra não foi um fator relevante na distinção entre os resultados obtidos.

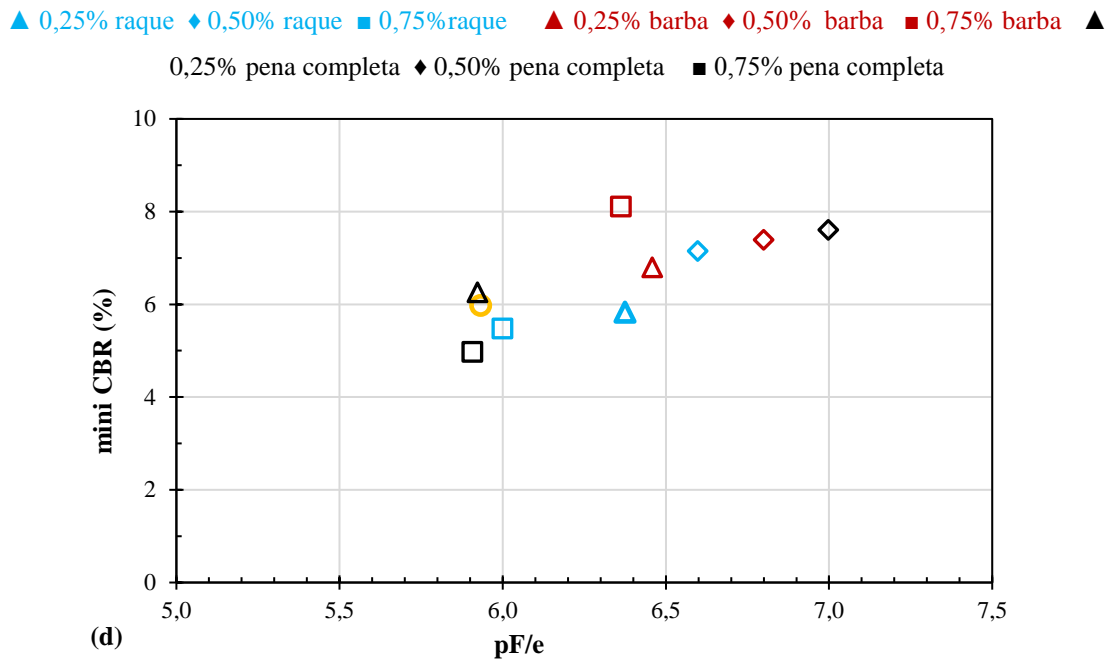


Figura 5-56 – Mini CBR das misturas solo-fibra em função: (a) do índice de vazios; (b) da umidade; (c) da sucção; (d) de pF/e

A Figura 5-57 apresenta os resultados de mini CBR obtidos para as misturas solo – cal CH-I e CH-III no estado inicial (in) e final (fin). No estado inicial os valores obtidos variam linearmente e de forma proporcional ao teor de cal com coeficiente de correlação próximo a 1 para a cal CH-I e 0,99 para a cal CH-III. Após 1 ano de cura, no entanto, os valores de mini - CBR diminuiram até alcançar uma média próxima dos resultados obtidos nos casos do solo puro e das misturas de solo – fibra, ou seja, quase desapareceu o efeito da cal sendo o ganho de resistência com sua incorporação muito pequeno.

As mudanças identificadas entre os resultados obtidos logo após compactação e após um ano de cura indicam de forma clara a importância de se definir as condições de cura dos ensaios uma vez que a mesma pode, a depender do solo, influenciar diretamente nos resultados. No presente caso sobressai como relevante a provável ação desagregadora da cal sobre o solo, efeito que se amplia com o tempo de cura. As análises granulométricas realizadas e já apresentadas no item 5.2 apontam nesta direção.

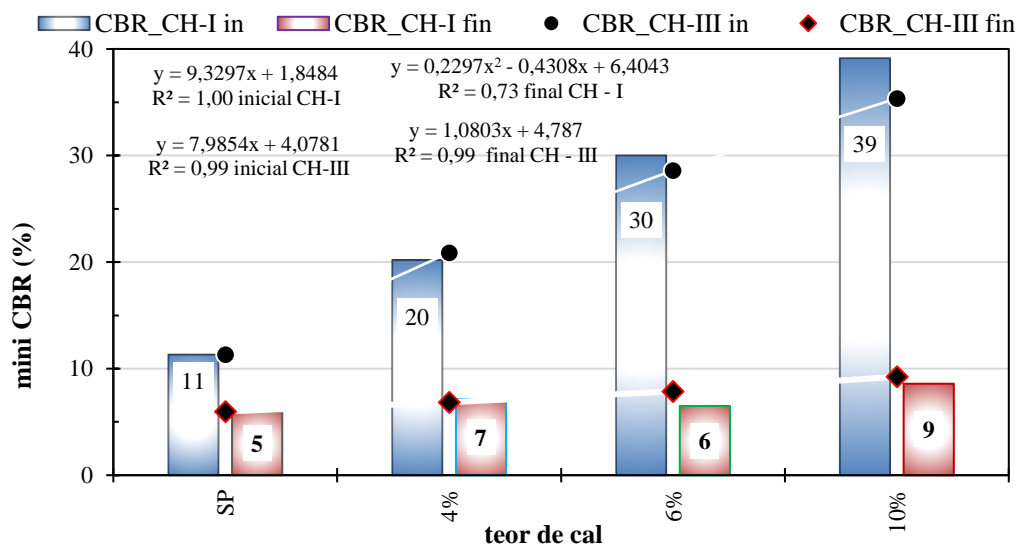


Figura 5-57 - Variação do mini CBR inicial e final nas misturas solo - cal

A Figura 5-58 apresenta os resultados de mini CBR obtidos para as misturas solo cal CH-I e CH-III em função (a) do índice de vazios, (b) da umidade, (c) da sucção e (d) da sucção em pF normalizada em relação aos índices de vazios dos corpos de prova. As Figura 5-58 (a) e (b) incluem nos resultados os valores iniciais obtidos após inundação dos corpos de prova e as Figura 5-58 (c) e (d) apresentam apenas os resultados obtidos após um ano de cura pois os resultados iniciais foram obtidos após inundação dos corpos de prova desaparecendo assim o efeito da sucção.

Os resultados de mini CBR em função do índice de vazios e da umidade, respectivamente Figura 5-58 (a) e (b), são aparentemente contraditórios com o esperado, no entanto, eles mostram que o ganho de resistência é devido ao aumento do teor de cal. Após um ano de cura a influência da cal é pequena, mas a variação do mini CBR com o teor de cal registrada para a cal CH-III merece destaque, pois o índice de vazios e o mini CBR diminui com o aumento do teor de cal o que aponta da direção da instabilização dos agregados presentes no solo pela cal.

Tendência semelhante é observada na Figura 5-58 (d) onde para ambas as cales, mas de modo mais pronunciado e definido para a cal CH-III os valores de mini CBR diminuem com o aumento de pF/e e com o aumento do teor de cal. O fato das misturas solo-cal apresentarem para um ano de cura valores superiores aos obtidos para o solo puro,

indicam que se por um lado a cal instabiliza os agregados diminuindo o mini CBR por outro ela age interpartículas, melhorando, mesmo que pouco, a resistência do solo.

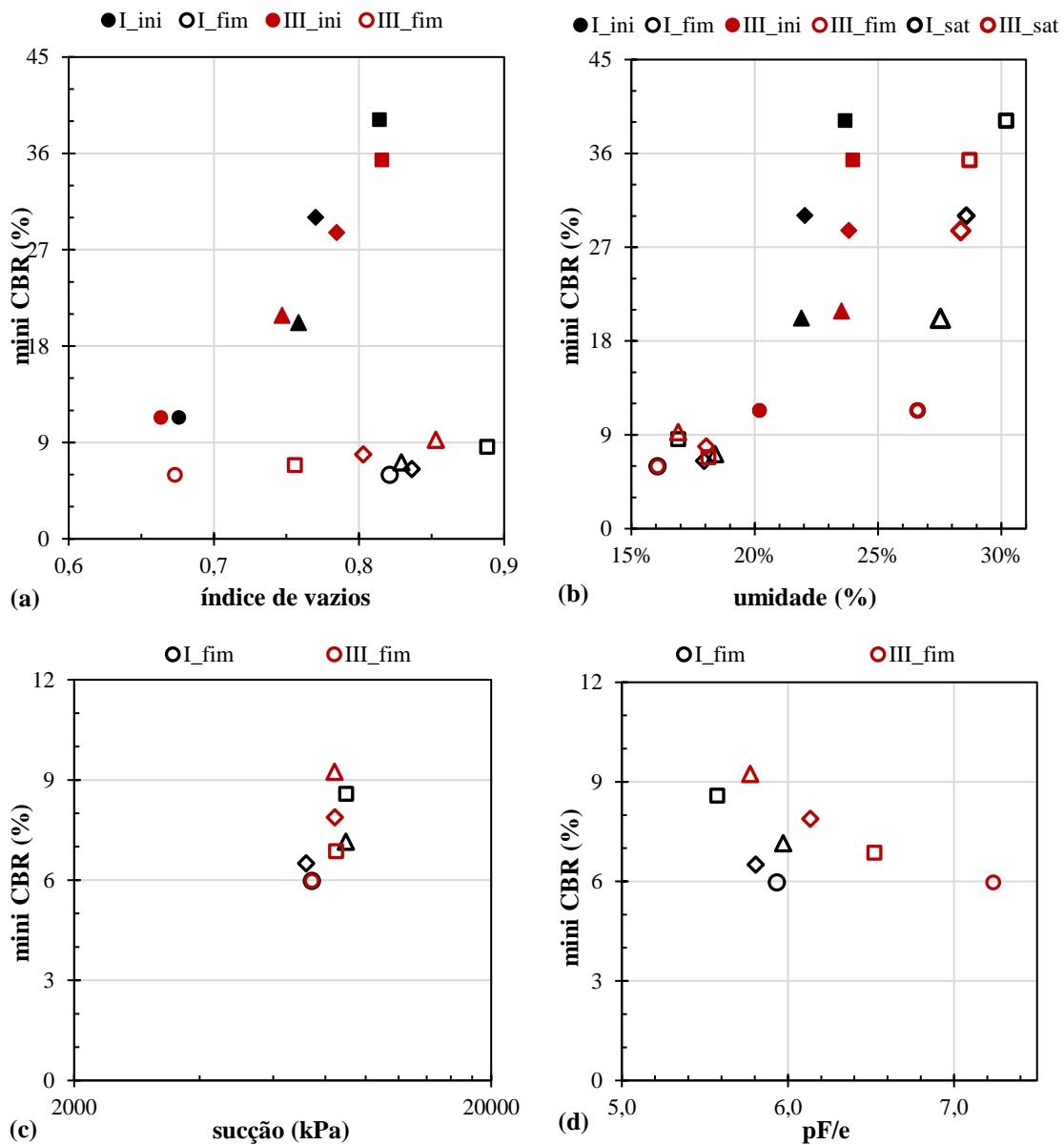


Figura 5-58 – Mini CBR em função: (a) do índice de vazios; (b) da umidade; (c) da sucção; (d) de pF/e

A Figura 5-59, Figura 5-60 e Figura 5-61 apresentam respectivamente os resultados dos ensaios de mini CBR das misturas solo – 4%, 6% e 10% de cal – fibras, sendo que os resultados correspondem aos dois tipos de cal usados, cal CH-I e cal CH-III.

Analisando-se comparativamente estas três figuras se observa que na condição inicial, ou seja, para os resultados obtidos com imersão seguida do ensaio de mini CBR, os valores



de mini CBR aumentaram com o aumento do teor de cal tendendo os resultados obtidos para as misturas usando a cal CH-III serem superiores aos obtidos com a cal CH-I. Após um ano de cura esta tendência da influência do tipo de cal se mantém para os três teores de cal utilizados. Como tendência geral se observa nos resultados obtidos após compactação, em especial quando se amplia o teor de cal, que a presença e o aumento do teor de fibras nas misturas solo – cal pioram o resultado independentemente do tipo de fibras.

A variabilidade nos resultados não permite concluir sobre a influência do tipo de fibra no comportamento das misturas solo - cal – fibras. Após um ano de cura não se percebe diferenças significativas entre os resultados obtidos para os dois tipos de cal, nem para os três teores de cal e de fibra e nem mesmo entre os tipos de fibras o que motiva análises mais detalhadas de modo a se avaliar os impactos dos fatores índice de vazios, umidade e sucção no comportamento das misturas.

Estas análises abordam inicialmente a influência do peso específico aparente seco e da umidade no comportamento das misturas. Em seguida são analisadas a influência da sucção e do índice de vazios considerados de modo associados por meio da relação pF/e sobre os resultados obtidos.

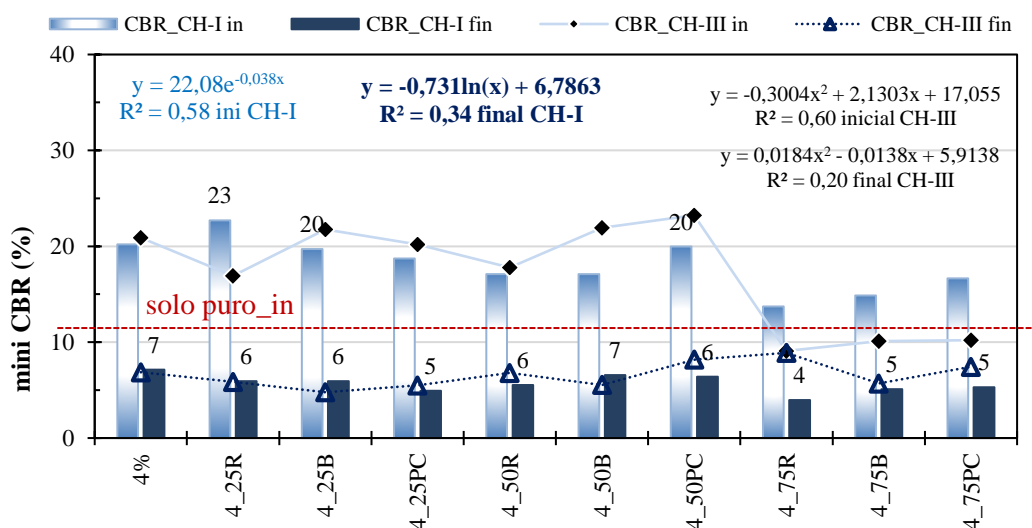


Figura 5-59 – Mini CBR inicial (in) e final (fin) de misturas solo – cal 4% – fibras raque (R), barba (B) e pena completa (PC)

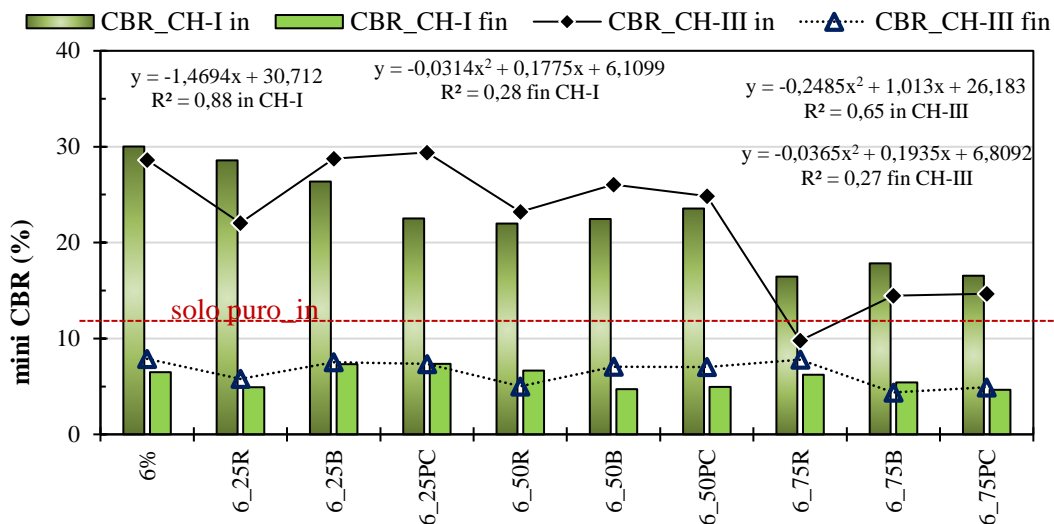


Figura 5-60 - Mini CBR inicial (in) e final (fin) de misturas solo – cal 6% – fibras raque (R), barba (B) e pena completa (PC)

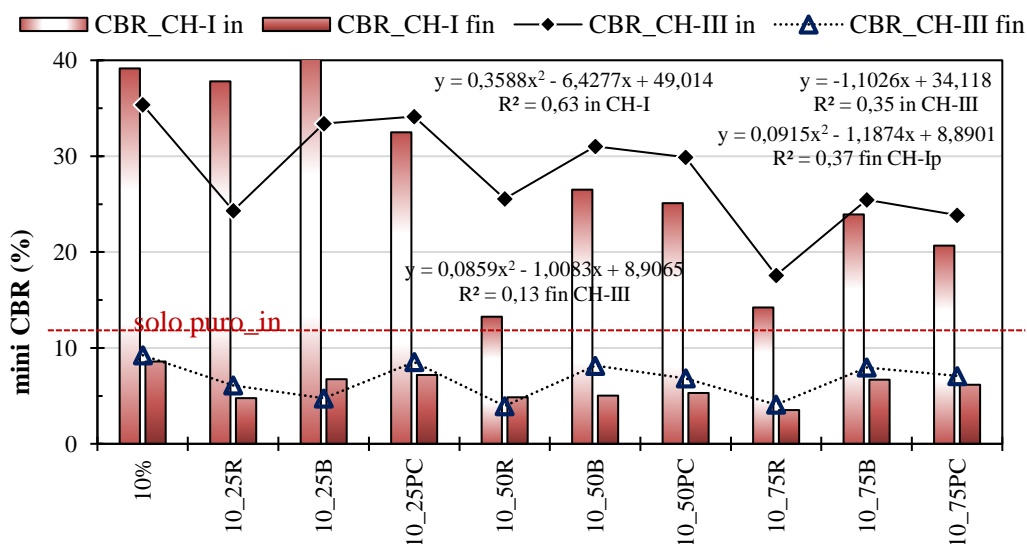
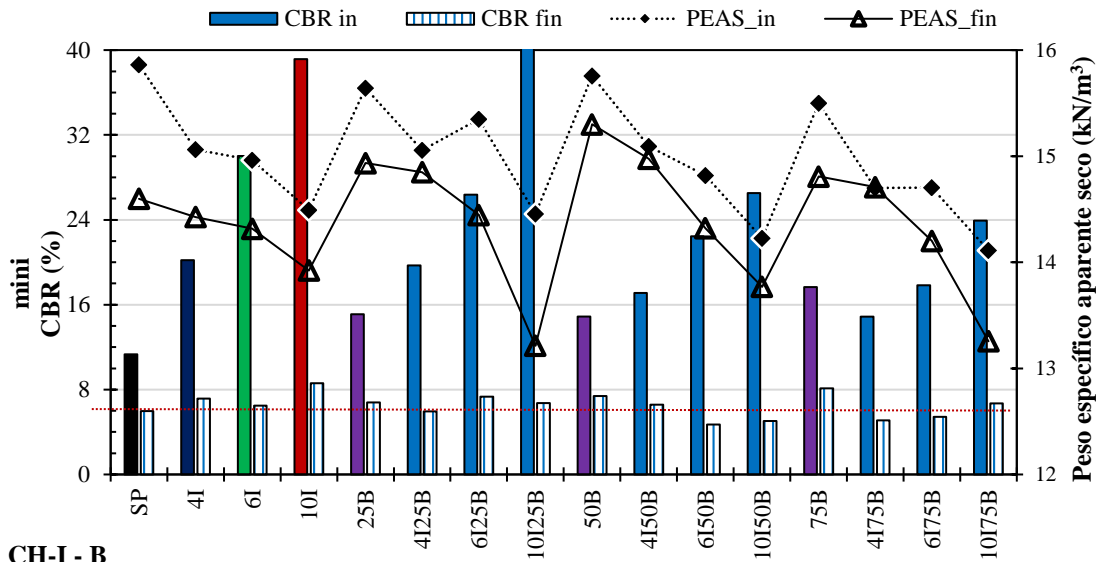


Figura 5-61 - Mini CBR inicial (in) e final (fin) de misturas solo – cal 10% – fibras raque (R), barba (B) e pena completa (PC)

Considerando-se os diferentes teores de fibra e de cal a Figura 5-62, Figura 5-63, Figura 5-64, Figura 5-65, Figura 5-66 y Figura 5-67 apresentam respectivamente as relações entre os valores de mini CBR e o peso específico aparente seco máximo de cada mistura. As relações entre os valores de mini CBR obtidos e a umidade ótima e de ensaio de cada mistura são apresentadas respectivamente nas Figura 5-68, Figura 5-69, Figura 5-70, Figura 5-71, Figura 5-72 y Figura 5-73. Analisando-se estas figuras observa-se:

- 1) Em relação ao solo puro tanto a cal como as misturas cal - fibra proporcionaram a diminuição do peso específico aparente seco máximo em relação ao solo puro, no entanto, as misturas contendo apenas fibra apesar de uma pequena redução nos pesos específicos aparentes secos máximos praticamente não afetaram os valores de mini CBR;
- 2) No estado inicial os valores de mini CBR aumentaram com o teor de cal em todas as misturas, não sendo esse efeito, no entanto, claro após um ano de cura;
- 3) O peso específico aparente seco após um ano de cura tenderam a guardar um certo paralelismo com os valores iniciais apontando para origem da expansão fenômenos puramente físicos como a descompressão;
- 4) Para a cal CH-I a incorporação das fibras às misturas solo-cal tende a manter o peso específico aparente seco máximo, a gerar uma redução nos valores de mini CBR, sendo o impacto, no entanto, pequeno quando da incorporação de 0,25% de fibra. Para a cal CH-III apenas para 10% de cal a incorporação de fibras gera uma redução significativa no mini CBR;
- 5) Em relação à umidade ótima de compactação, observa-se que ela aumenta com o teor de cal o que guarda coerência com a diminuição do peso específico aparente seco máximo obtido das curvas de compactação.
- 6) Após um ano de cura as umidades tenderam a diminuir com o aumento do teor de cal o que também guarda coerência com os resultados obtidos para os pesos específicos aparentes secos, pois um mesmo solo em estado mais poroso requer menos umidade para entrar em equilíbrio com o meio que um solo menos poroso. Isso se dá porque a sucção aumenta com a diminuição da umidade e do índice de vazios e diminui quando ocorre o contrário e para o equilíbrio no meio as variações verificadas são, então, coerentes com o esperado;
- 7) A incorporação de fibras em especial, 0,50% e 0,75% tendeu a fazer com que as umidades de equilíbrio após um ano de cura fossem similares para os três teores

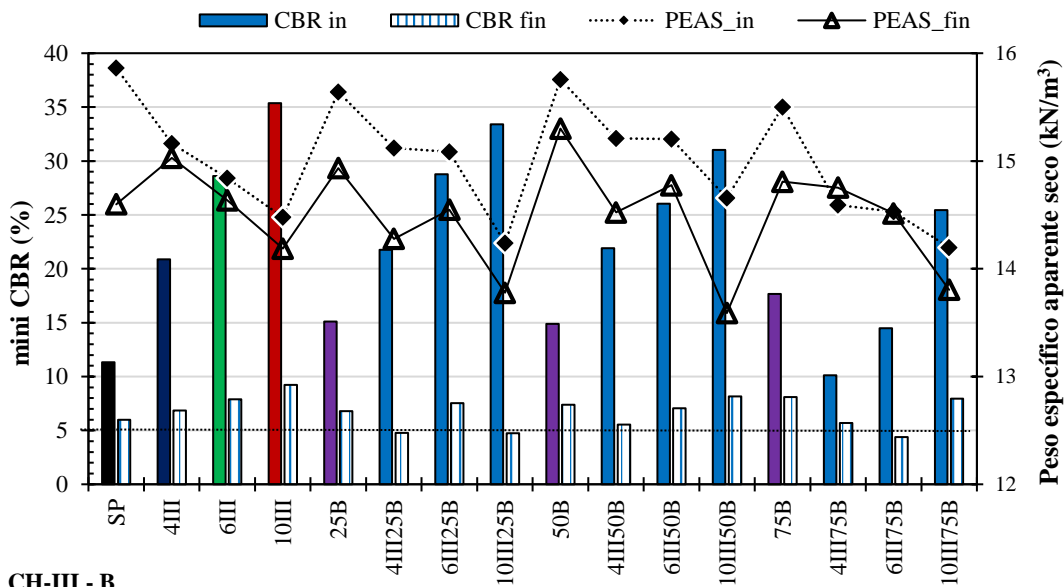
de cal levando à hipótese de atuação das fibras em fatores como a expansão, cabendo destacar que o impacto das fibras sobre os valores de mini CBR não foram claros, certamente devido a influência de outros fatores como do próprio peso específico aparente seco.



**CH-I - B**

I = cal tipo CH-I; B = barba; 25, 50 e 75 = 0,25%, 0,50% e 0,75% de fibra em peso; 4, 6 e 10 = percentual de cal em peso; in = estado inicial; fin = estado final

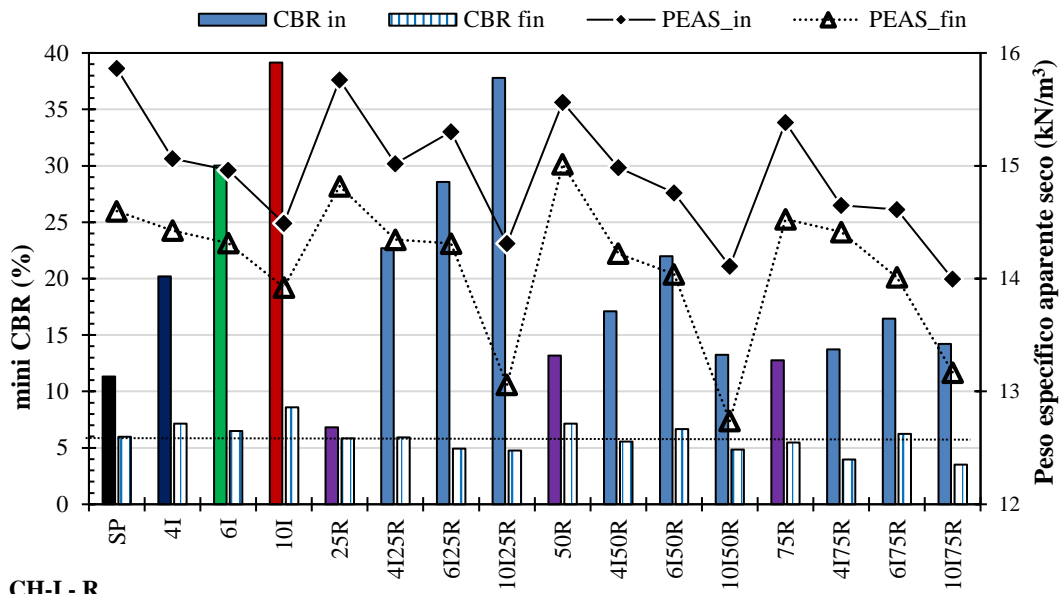
Figura 5-62 – Influência da fibra barba no peso específico aparente seco e mini CBR de misturas solo - cal CH-I – fibra barba



**CH-III - B**

SP = solo puro; III = cal tipo CH-III; B = barba, R = raque, PC = pena completa; 25, 50 e 75 = 0,25%, 0,50% e 0,75% de fibra em peso; 4, 6 e 10 = percentual de cal em peso; in = estado inicial; fin = estado final

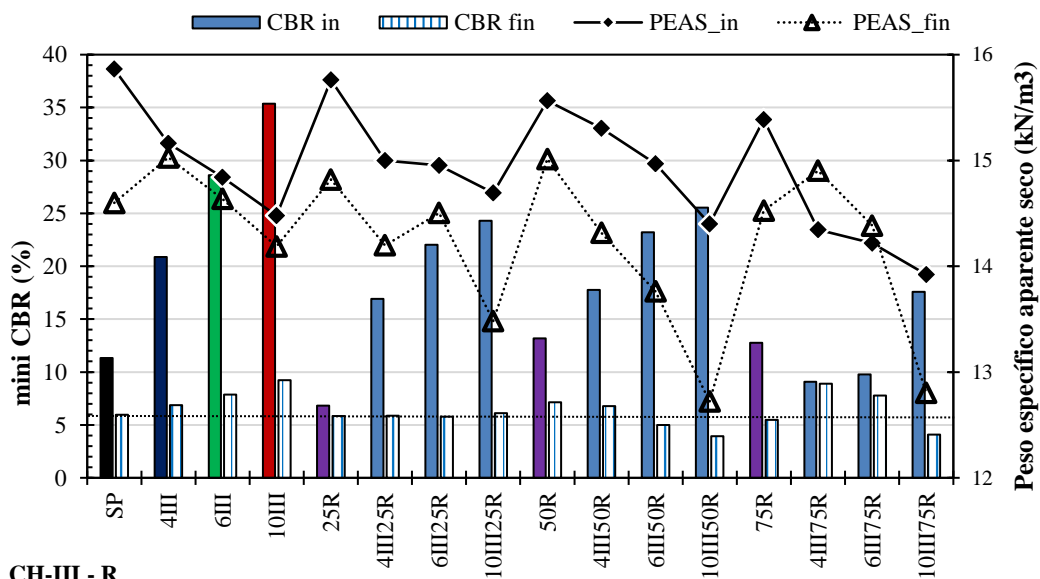
Figura 5-63 – Influência da fibra barba no peso específico aparente seco e no mini CBR de misturas solo -cal CH-III fibra barba



**CH-I - R**

SP = solo puro; I = cal tipo CH-I; B = barba, R = raque, PC = pena completa; 25, 50 e 75 = 0,25%, 0,50% e 0,75% de fibra em peso; 4, 6 e 10 = percentual de cal em peso; in = estado inicial; fin = estado final

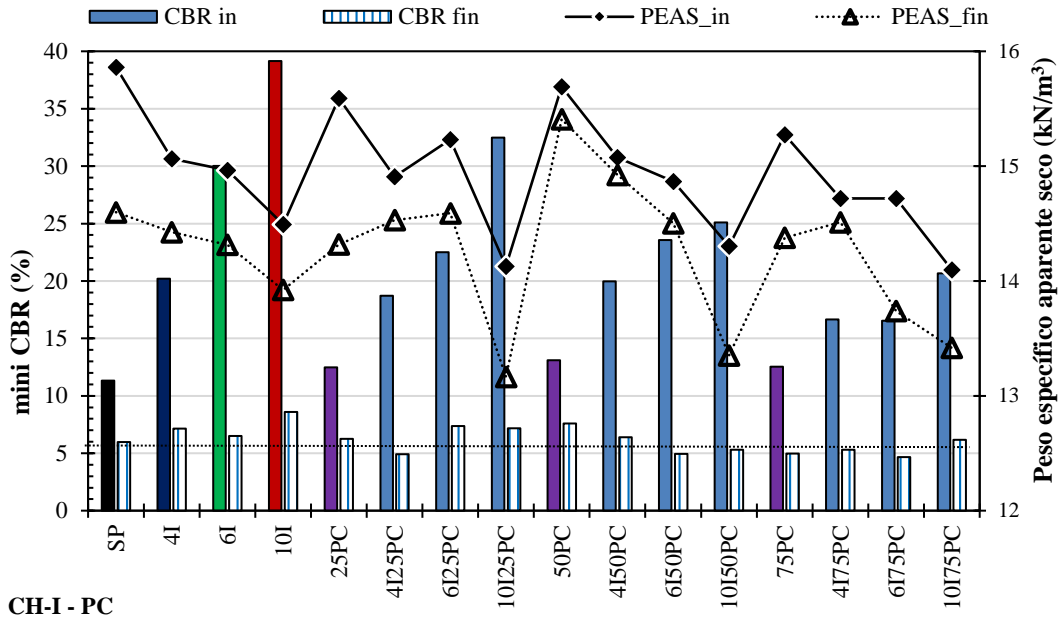
Figura 5-64 – Influência da raque no peso específico aparente seco e no valores de mini CBR de misturas solo - cal CH-I – fibra raque



**CH-III - R**

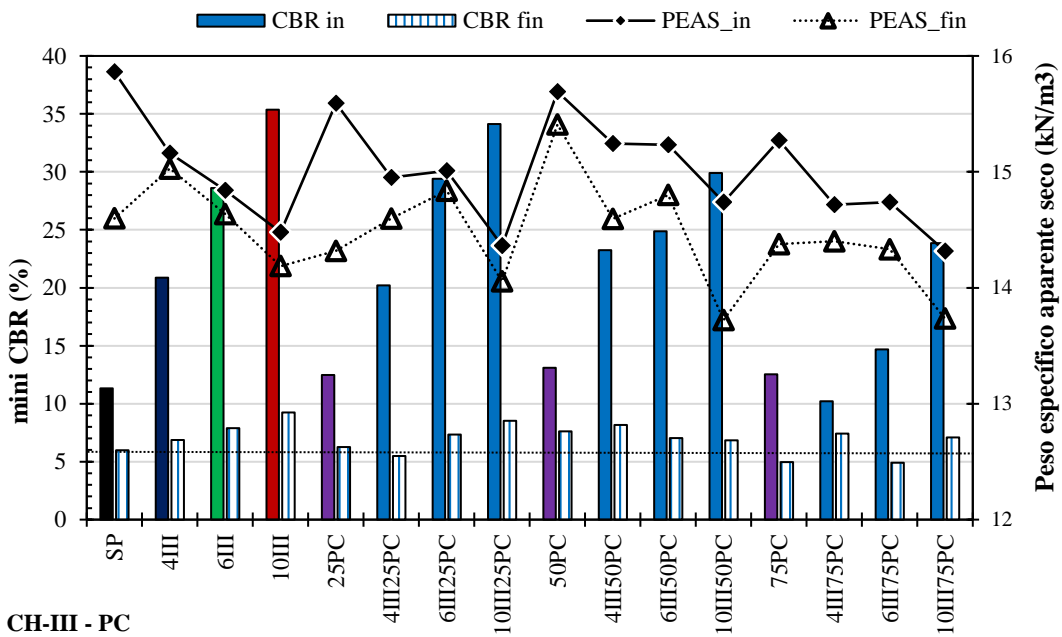
SP = solo puro; III = cal tipo CH-III; B = barba, R = raque, PC = pena completa; 25, 50 e 75 = 0,25%, 0,50% e 0,75% de fibra em peso; 4, 6 e 10 = percentual de cal em peso; in = estado inicial; fin = estado final

Figura 5-65 – Influência da raque no peso específico aparente seco e no valores de mini CBR de misturas solo - cal CH-III – fibra raque



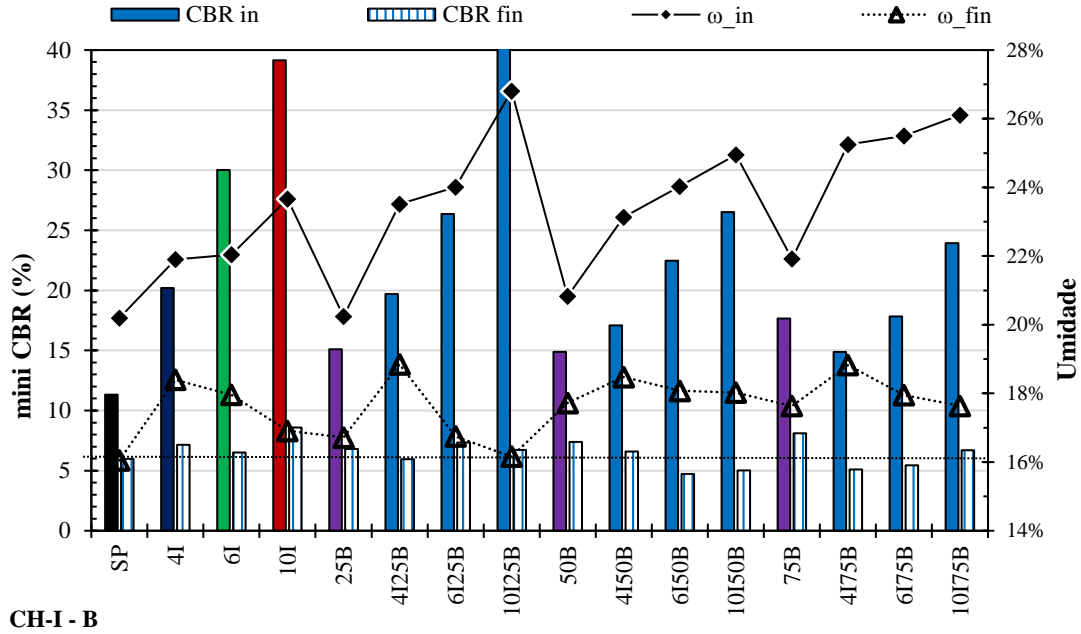
SP = solo puro; I = cal tipo CH-I; B = barba, R = raque, PC = pena completa; 25, 50 e 75 = 0,25%, 0,50% e 0,75% de fibra em peso; 4, 6 e 10 = percentual de cal em peso; in = estado inicial; fin = estado final

Figura 5-66 – Influência da pena completa no peso específico aparente seco e nos valores de mini CBR de misturas solo - cal CH-I – fibra pena completa



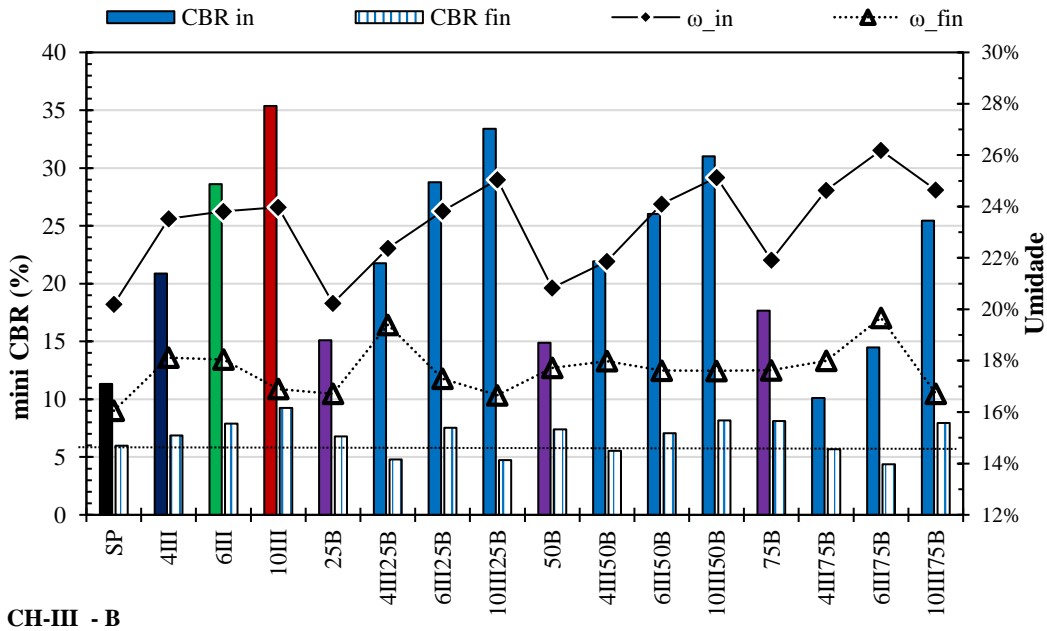
SP = solo puro; III = cal tipo CH-III; B = barba, R = raque, PC = pena completa; 25, 50 e 75 = 0,25%, 0,50% e 0,75% de fibra em peso; 4, 6 e 10 = percentual de cal em peso; in = estado inicial; fin = estado final

Figura 5-67 – Influência da pena completa no peso específico aparente seco e nos valores de mini CBR de misturas solo - cal CH-III – fibra pena completa



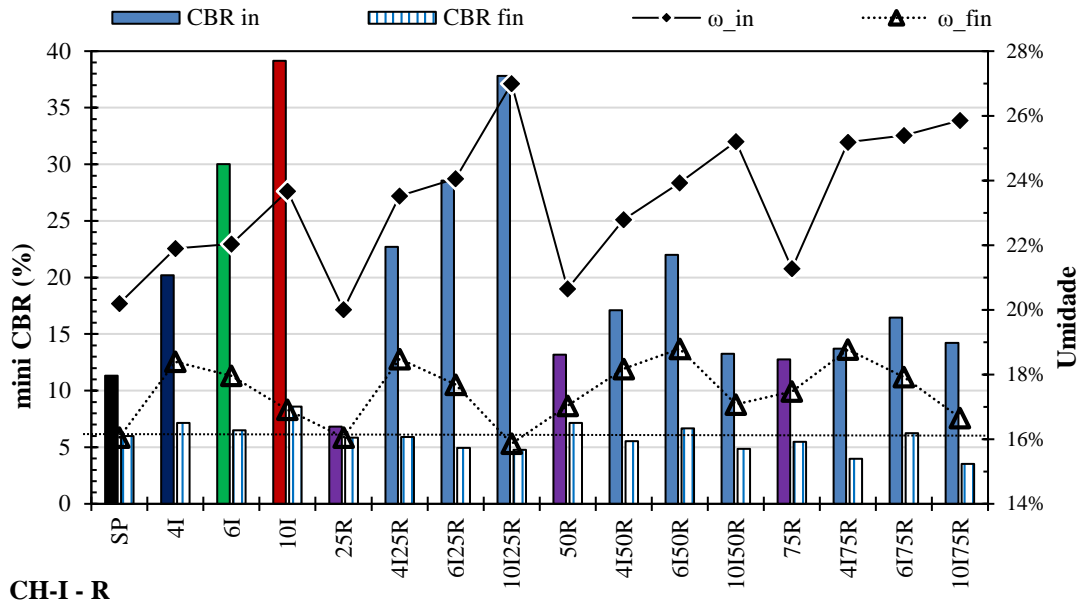
SP = solo puro; I = cal tipo CH-I; B = barba, R = raque, PC = pena completa; 25, 50 e 75 = 0,25%, 0,50% e 0,75% de fibra em peso; 4, 6 e 10 = percentual de cal em peso; in = estado inicial; fin = estado final

Figura 5-68 – Influência barba na umidade ótima de compactação, na umidade após um ano de cura e nos valores de mini CBR de misturas solo- cal CH-I - fibra barba



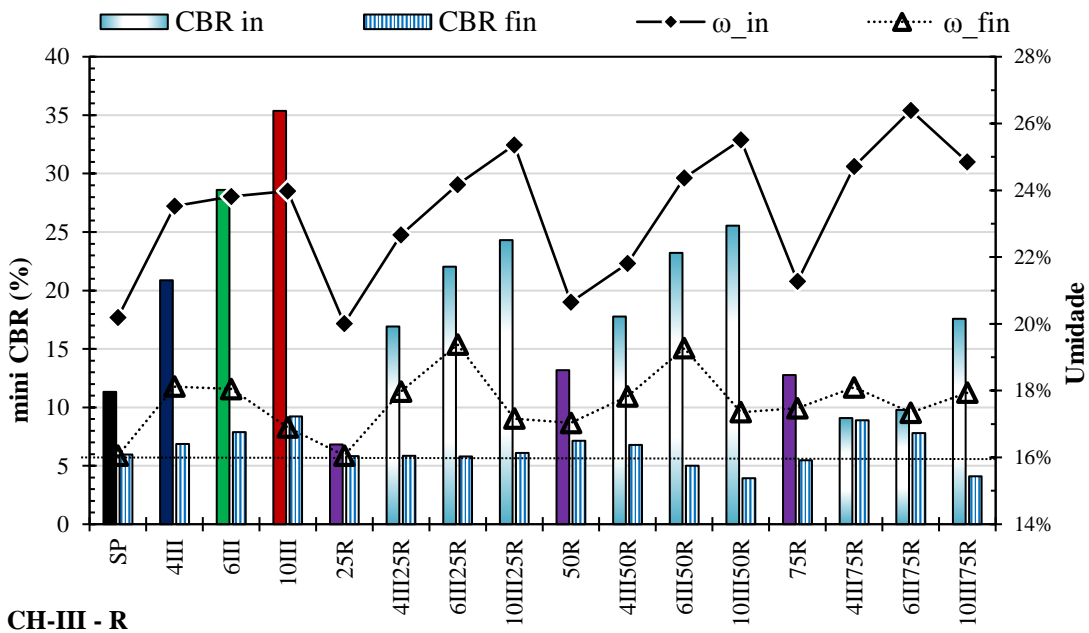
SP = solo puro; III = cal tipo CH-III; B = barba, R = raque, PC = pena completa; 25, 50 e 75 = 0,25%, 0,50% e 0,75% de fibra em peso; 4, 6 e 10 = percentual de cal em peso; in = estado inicial; fin = estado final

Figura 5-69 – Influência barba na umidade ótima de compactação, na umidade após um ano de cura e nos valores de mini CBR de misturas solo- cal CH-III - fibra barba



SP = solo puro; I = cal tipo CH-I; B = barba, R = raque, PC = pena completa; 25, 50 e 75 = 0,25%, 0,50% e 0,75% de fibra em peso; 4, 6 e 10 = porcentual de cal em peso; in = estado inicial; fin = estado final

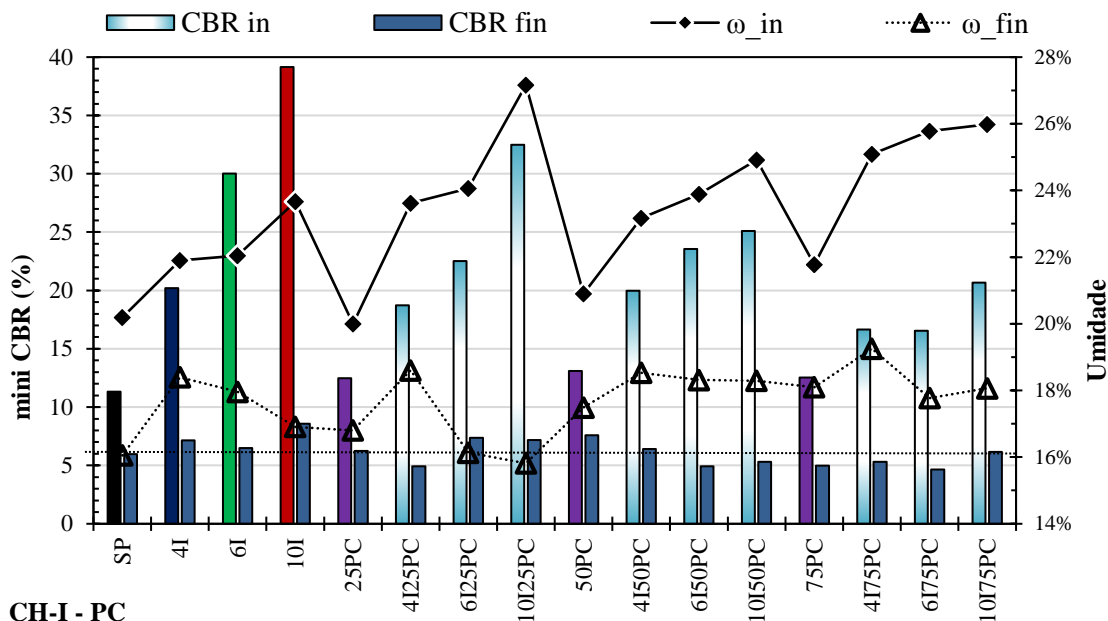
Figura 5-70 – Influência da raque na umidade ótima de compactação, na umidade após um ano de cura e nos valores de mini CBR de misturas solo- cal CH-I - fibra raque



SP = solo puro; III = cal tipo CH-III; B = barba, R = raque, PC = pena completa; 25, 50 e 75 = 0,25%, 0,50% e 0,75% de fibra em peso; 4, 6 e 10 = porcentual de cal em peso; in = estado inicial; fin = estado final

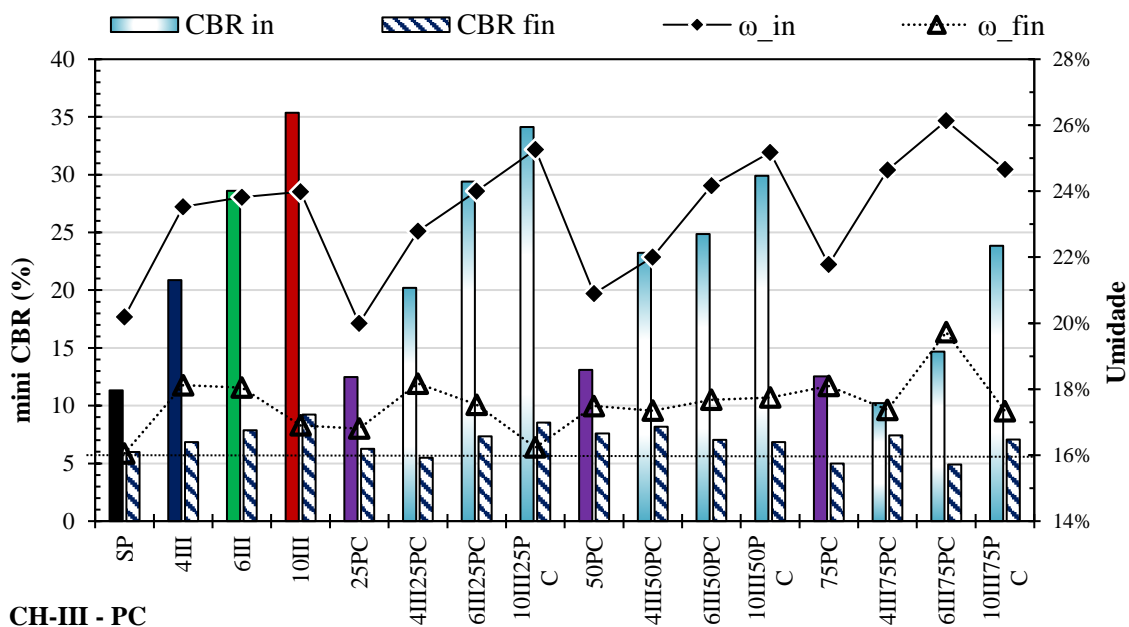
Figura 5-71 – Influência da raque na umidade ótima de compactação, na umidade após um ano de cura e nos valores de mini CBR de misturas solo- cal CH-III - fibra raque





SP = solo puro; I = cal tipo CH-I; B = barba, R = raque, PC = pena completa; 25, 50 e 75 = 0,25%, 0,50% e 0,75% de fibra em peso; 4, 6 e 10 = percentual de cal em peso; in = estado inicial; fin = estado final

Figura 5-72 – Influência da penas completa na umidade ótima de compactação, na umidade após um ano de cura e nos valores de mini CBR de misturas solo - cal CH-I - fibra pena completa



SP = solo puro; III = cal tipo CH-III; B = barba, R = raque, PC = pena completa; 25, 50 e 75 = 0,25%, 0,50% e 0,75% de fibra em peso; 4, 6 e 10 = percentual de cal em peso; in = estado inicial; fin = estado final

Figura 5-73 – Influência da penas completa na umidade ótima de compactação, na umidade após um ano de cura e nos valores de mini CBR de misturas solo - cal CH-III - fibra pena completa

A Figura 5-74 apresenta os resultados de mini CBR em função de pF/e obtidos para a pena completa considerando-se a incorporação de 4% (a), 6% (b) e 10% (c) dos dois tipos de cal utilizados na pesquisa, cal CH-I e cal CH-III. Os resultados obtidos para a raque e barba estão apresentados no Apêndice C. Observa-se nesta figura que o teor de fibra não exerce uma influência clara sobre o comportamento verificado para os três teores de cal utilizados, 4%, 6% e 10%. Também não sobressai a influência do tipo de cal sobre os resultados de mini CBR. Os resultados mostram que o mini CBR aumento com a sucção e com a diminuição do índice de vazios.

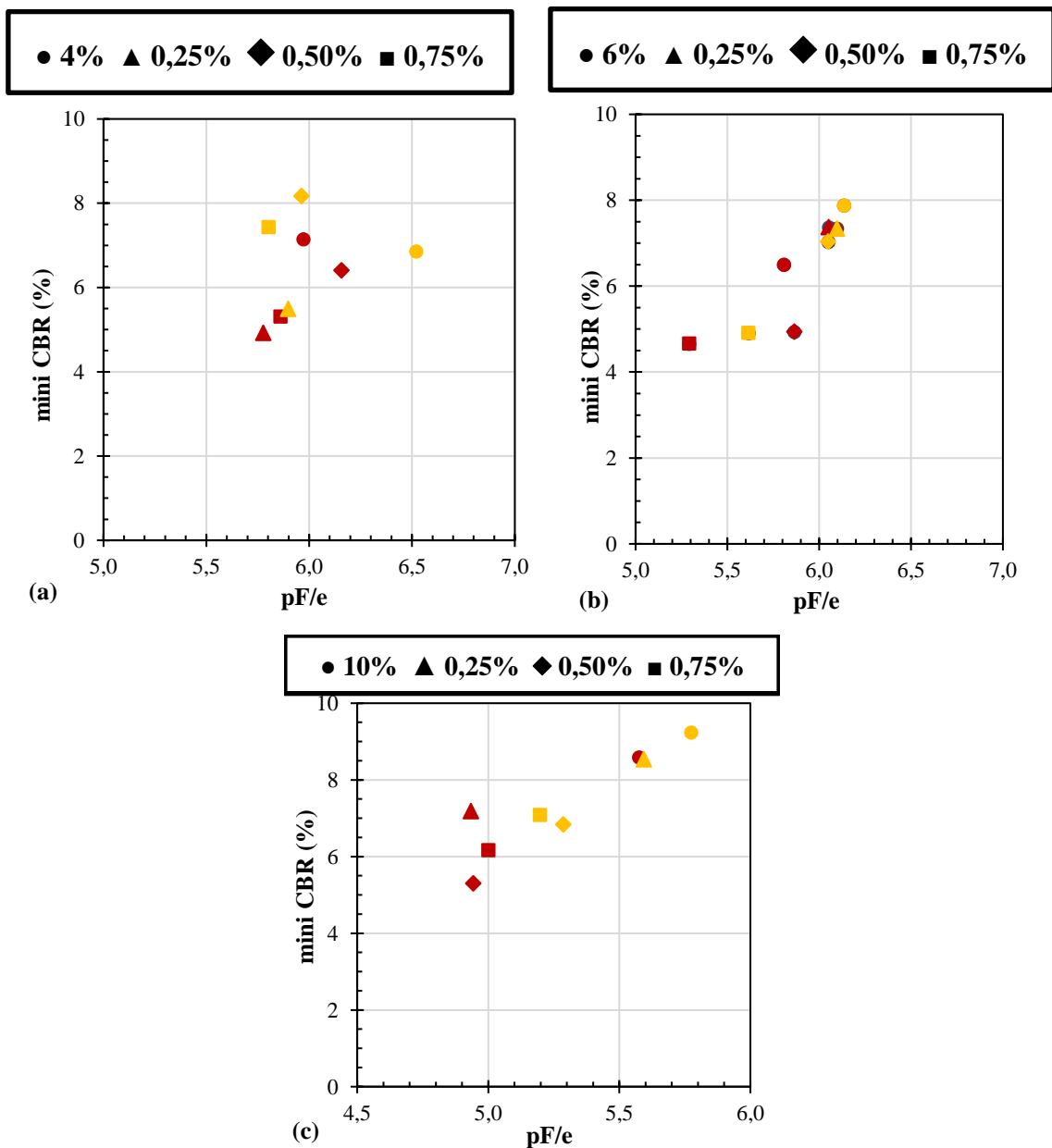


Figura 5-74 – Resultados de mini CBR em função de pF/e obtidos para a fibra pena completa em misturas contendo 4% (a), 6% (b) e 10% (c) de cal CH-I e CH-III

A Figura 5-75 apresenta a comparação entre os valores de mini CBR obtidos para as fibras barba (a), raque (b) e pena completa (c) considerando-se 10% dos dois tipos de cal usadas (CH-I e CH-III) na pesquisa. Inseriu-se nos gráficos os resultados obtidos para o solo puro e para a mistura sol - cal. Os resultados mostrados nesta figura não fazem sobressair a influência do tipo de fibra e de cal sobre o comportamento das misturas continuando, no entanto, clara a influência da sucção e do índice vazios sobre o comportamento delas.

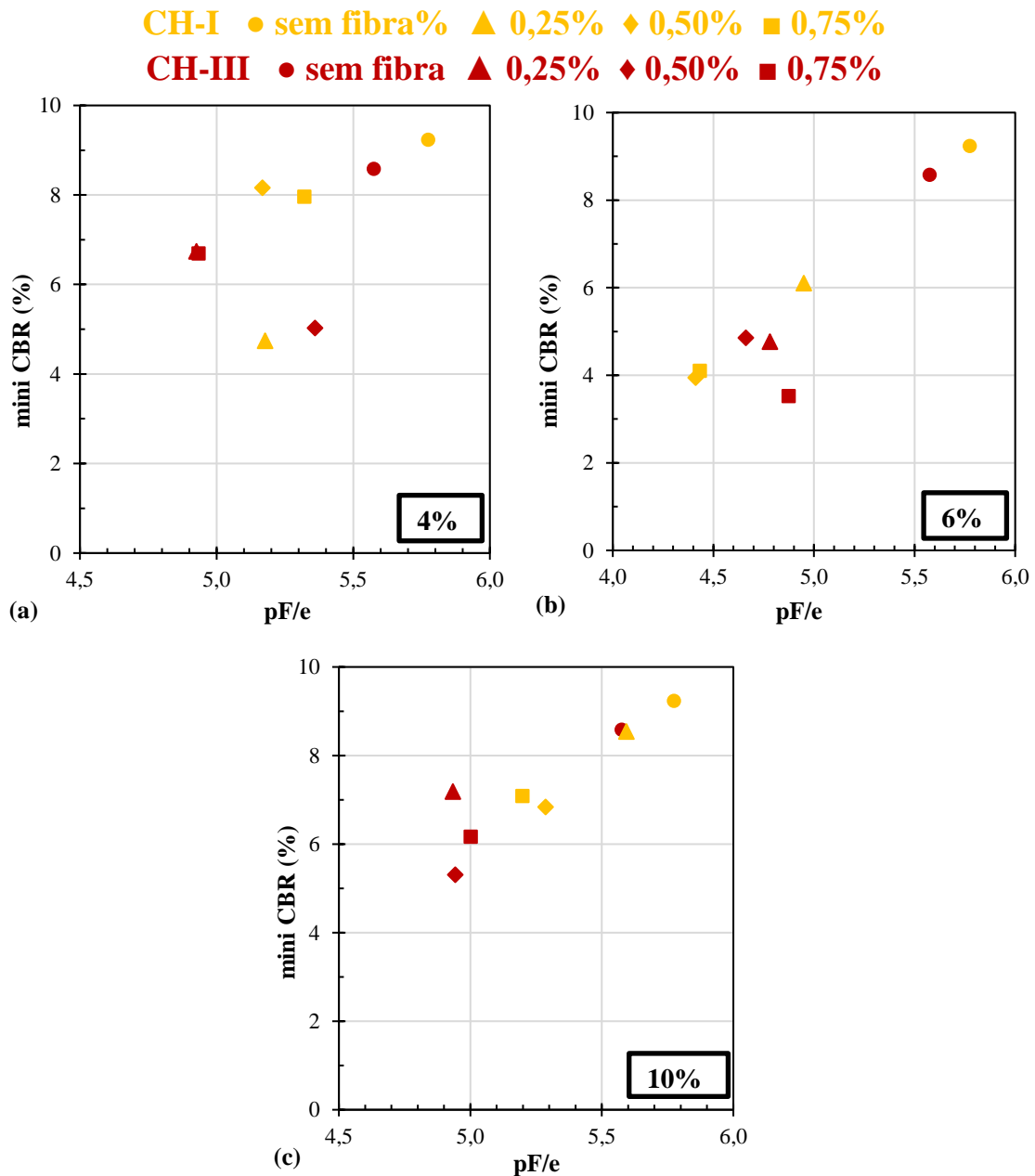


Figura 5-75 – Resultados de mini CBR em função de pF/e obtidos para as fibras barba (a), raque (b) e pena completa (c) em misturas contendo 10% de cal CH-I e CH-III

A Figura 5-76 apresenta para as cales CH-I (a) e CH-III (b) os resultados obtidos para o mini CBR em função de pF/e para os três teores de cal (4%, 6% e 10%) e os três teores de fibra barba, raque e pena completa (0,25%, 0,50% e 0,75%) utilizados. Inseriu-se nos gráficos os resultados obtidos para o solo puro e para as misturas sol - cal.

Os resultados mostrados nestas figuras mostram que o mini CBR tende a aumentar com o teor de cal não sobressaindo, no entanto, a influência do teor de fibras. Comparando-se as duas figuras não fica clara a influência do tipo de cal sobre os resultados.

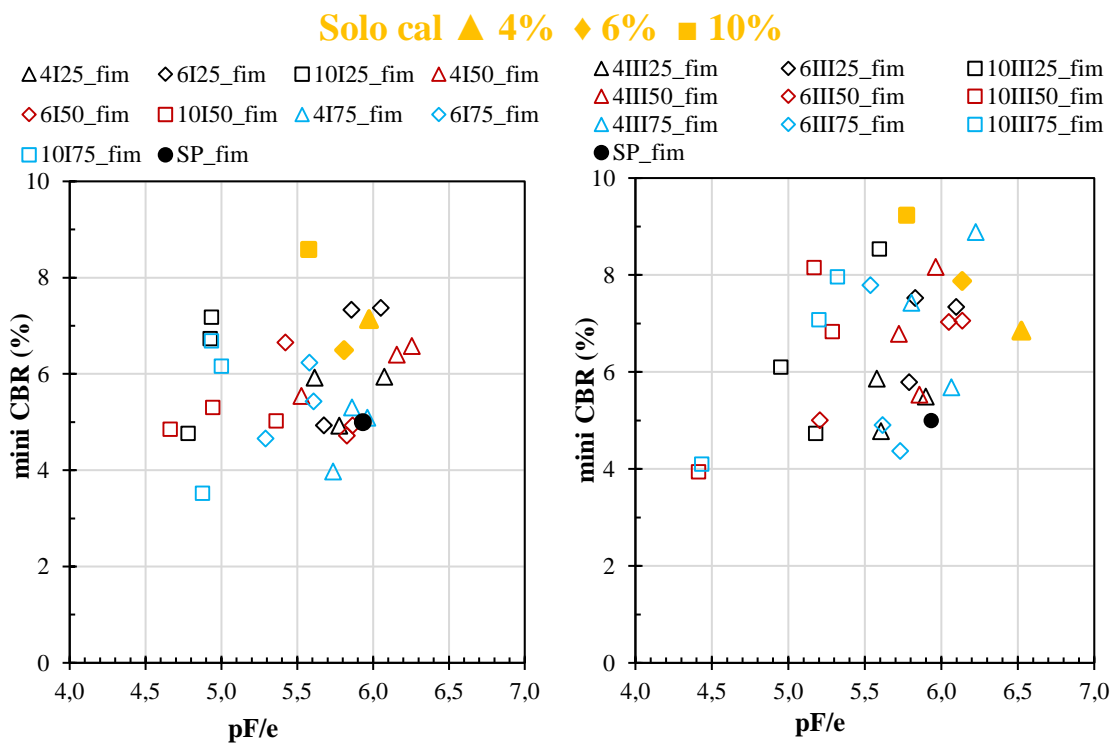


Figura 5-76 – Resultados de mini CBR em função de pF/e obtidos para as fibras barba, raque e pena completa nas misturas com as cales CH-I (a) e CH-III (b)

### 5.13 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

Neste ensaio, dois métodos de cura foram analisados, o intuito dessa análise é verificar a variação do comportamento entre as condições de cura de campo e de laboratório.

### 5.13.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DO SOLO PURO

A Figura 5-77 apresenta os resultados iniciais do ensaio de resistência à compressão simples, RCS, do solo puro (SP) obtidos para dois corpos de prova ensaiados, a média do valor obtido foi 98 kPa para as umidades ótimas de 18,66% e 18,53%, peso específico aparente seco máximo igual a 15,99 kN/m<sup>3</sup>, grau de saturação médio de 74,1%, índice de vazios médio 0,68 (0,67 e 0,69) e sucção matricial média de 906,6 kPa.

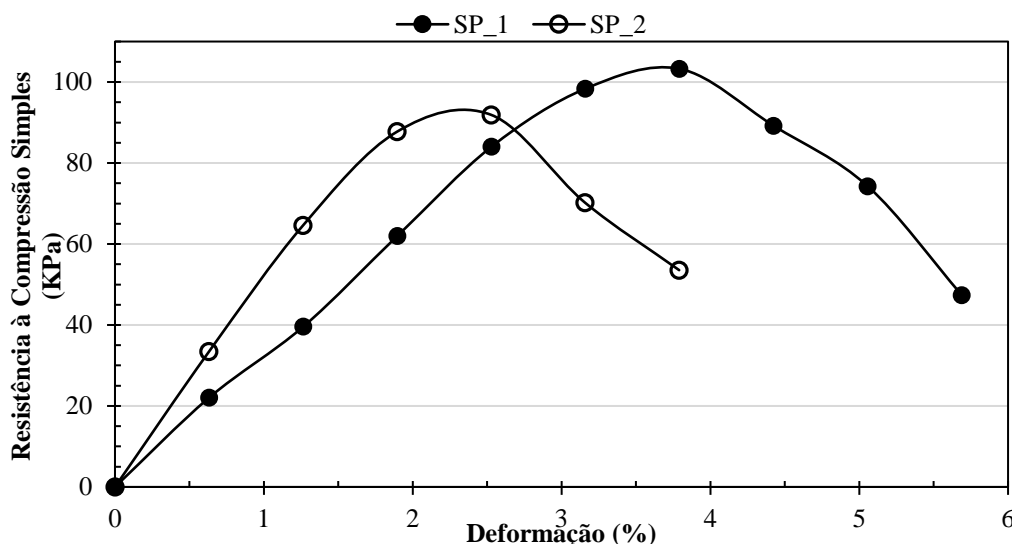


Figura 5-77 - Curvas de resistência à compressão simples do solo puro

Os valores encontram-se próximos entre eles, a variação de umidade e índice de vazios influenciaram nos resultados de forma pouco relevante em função do fato de serem próximos.

### 5.13.2 VARIAÇÃO TEMPORAL DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES RCS DAS MISTURAS

Foram comparados os resultados em dois tempos e duas formas de cura para se avaliar o efeito do tempo e do tipo de cura na resistência a compressão simples. Se considerou no estudo os tempos de cura 60 (1) e 90 (2) dias e as formas de cura, em câmara úmida (C) e enterrados em campo (V).

Os resultados obtidos foram comparados à situação padrão de 30 dias de cura em câmara úmida. Cabe destacar que o principal fator controlado em câmara úmida foi a temperatura,

pois a umidade relativa, apesar de mantida constante, não tinha contado com os corpos de prova que eram mantidos hermeticamente isolados do ambiente externo a eles.

A Figura 5-78 apresenta a variação da RCS das misturas de solo fibra, observando-se que os corpos de prova com cura em câmara úmida apontaram para um ganho de resistência alcançando até quatro vezes a resistência inicial medida aos 30 dias de cura. Os corpos de prova com cura em campo apresentaram de um modo geral uma piora nos resultados em relação aos 30 dias de cura. Na grande maioria dos casos, tento em termos de métodos como tempos de cura, a fibra raque demonstrou o pior desempenho, sendo que em alguns casos esse comportamento da raque se aproximou do da pena completa.

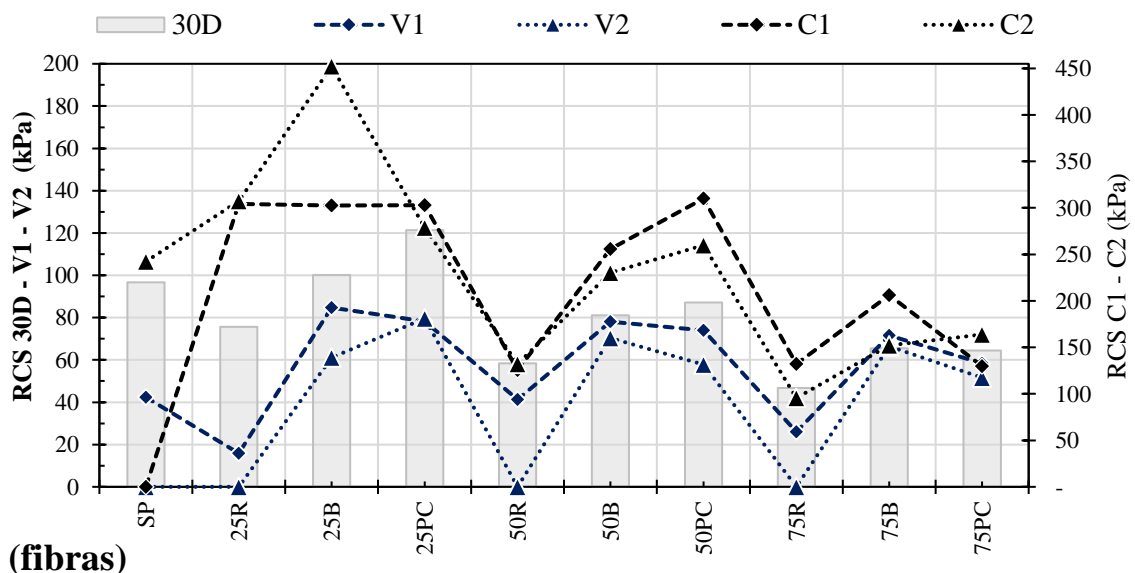


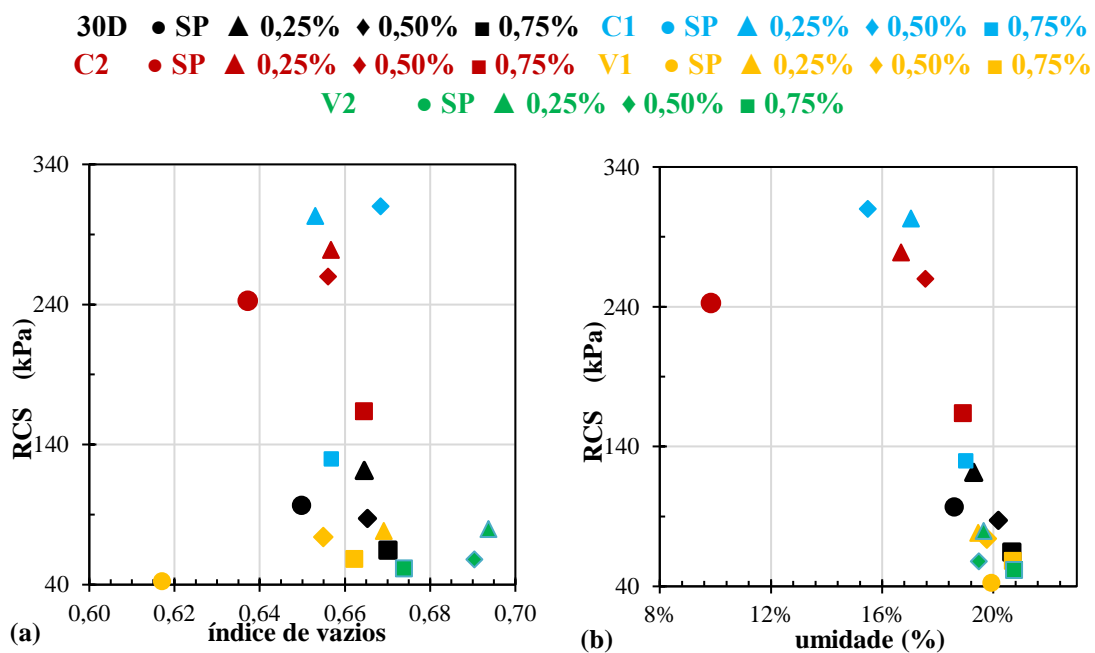
Figura 5-78 - Índice da variação de RCS por tempo e método de cura em misturas de solo fibra

Os resultados mostrados na Figura 5-78 apontam para a necessidade de maiores análises quanto aos efeitos dos fatores índice de vazios, umidade e sucção assim como integrando os fatores índice de vazios à sucção por meio da relação  $pF/e$  no comportamento das misturas solo-fibra. A Figura 5-79 apresenta como ilustração para a análise os resultados obtidos para a pena completa sendo que os resultados obtidos para a barba e para a raque estão apresentados nos Apêndice D, respectivamente Figuras D1 e D2. Observa-se nesta figura, como esperado, que a RCS diminui com o aumento do índice de vazios (a) e da umidade (b) e com a redução da sucção mátrica (c) e da relação  $pF/e$  (d) não se evidenciando uma clara influência do tempo e tipo de cura.

Como as fibras pena não apresentam, em princípio, uma ação química sobre o solo, o tempo e tipo de cura poderia eventualmente afetar os resultados ao interferir na deterioração das fibras ou na interação destas com o solo. No entanto, outro fenômeno pode ainda ocorrer na interação solo – fibras pena, o da penetração de umidade proveniente do solo nas penas, o que geraria um aumento da sucção na zona externa às penas ampliando a resistência das misturas. Nesse sentido, o gráfico (a) da Figura 5-79 corrobora com esse entendimento, pois nele se observa uma redução do índice de vazios e aumento da RCS com o aumento do tempo de cura em laboratório.

Se observado atentamente as variações de RCS em função da umidade (b), percebe-se que esses mesmo pontos tendem a se colocar em tendência acima dos demais, ou seja, se considerada a mesma umidade global a RCS desses pontos é superior à das demais, e isso porque, parte dessa umidade está dentro da pena e a que efetivamente contribui para a resistência é menor implicando em maior sucção atuante.

O fenômeno não é observado em campo, pois lá, existe todo o meio para alimentar o umedecimento das penas. Observa-se ainda nesta figura que em função dos demais fatores eles indicam que é a umidade, a sucção e o conjunto sucção e índice de vazios que são definidores do comportamento das misturas e não o tempo e tipo de cura nem o teor de fibras, ou seja, as fibras não estariam, enquanto fibras interferindo na RCS.



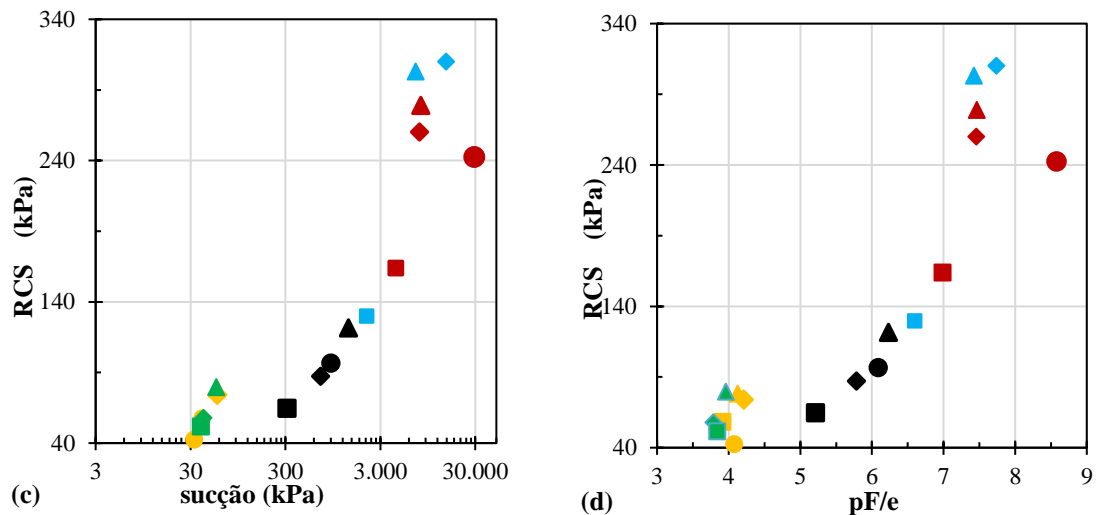


Figura 5-79 - Influência do tempo e tipo de cura na RCS da pena completa

É importante observar ainda na Figura 5-79 (b) que a umidade do solo natural é igual a 10% e o ponto encontra-se deslocado da tendência geral. Se observadas as curvas características apresentadas nas Figuras 5-5 e 5-6 verifica-se que esta umidade se encontra na região de microporos e como os microporos se encontram na grande maioria no interior dos agregados e micro agregados (Camapum de Carvalho *et al.*, 2002) a sucção neles atuantes, embora elevada (Figura 5-79 (c)) termina contribuindo pouco para o comportamento do solo como um todo.

A Figura 5-80 apresenta o conjunto de resultados obtidos em função da umidade (a) e da relação pF/e para os três tipos de fibra utilizados no estudo (barba, raque e pena completa) considerando-se o tempo e tipo de cura. Esses resultados mostram que as fibras, barba e pena completa dão resultados similares e a fibra raque tende a diminuir a RCS em relação à tendência observada para as demais fibras. Em amarelo, o solo puro em diferentes tempos e método de cura.



• 30D\_R ♦ C1\_R ■ C2\_R ♦ V1R ■ V2\_R • 30D\_B ♦ C1\_B ■ C2\_B ♦ V1\_B ■ V2\_B • 30D\_PC ♦  
 C1\_PC ■ C2\_PC ♦ V1\_PC ■ V2\_PC o\_SP\_30D X\_SP\_C1 \* \_SP\_C2 ♦ V1R

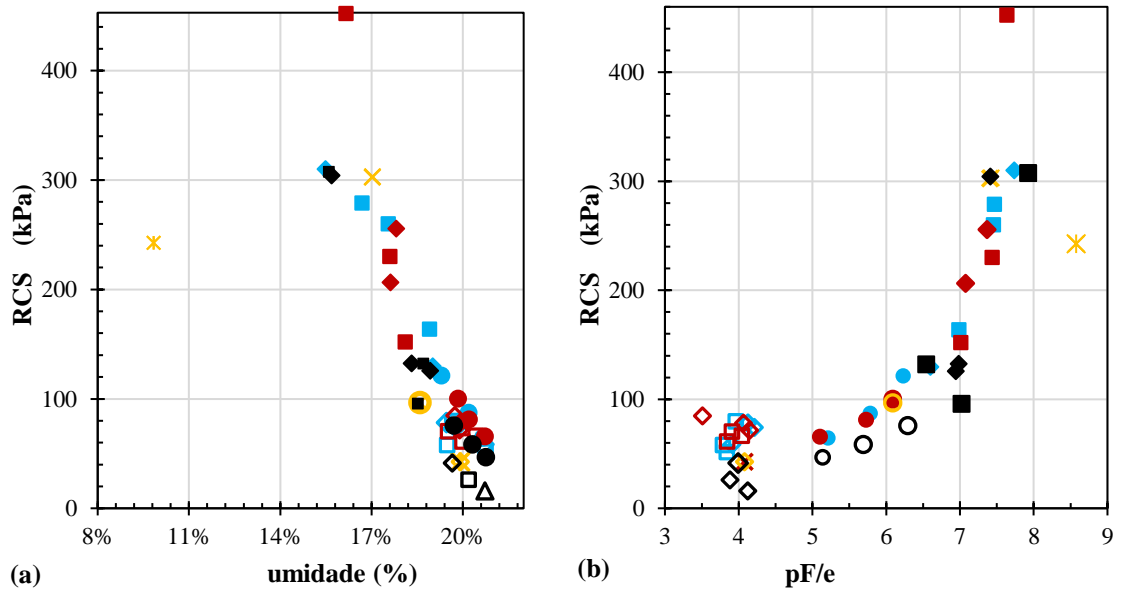


Figura 5-80 - Influência do tipo de fibra na RCS

Na Figura 5-81, estão apresentadas as sínteses dos resultados obtidos quando da estabilização com 4%, 6% e 10% de cal CH-I. Observa-se no conjunto de resultados que a ampliação do tempo de cura está resultando em uma diminuição da RCS das misturas solo-cal.

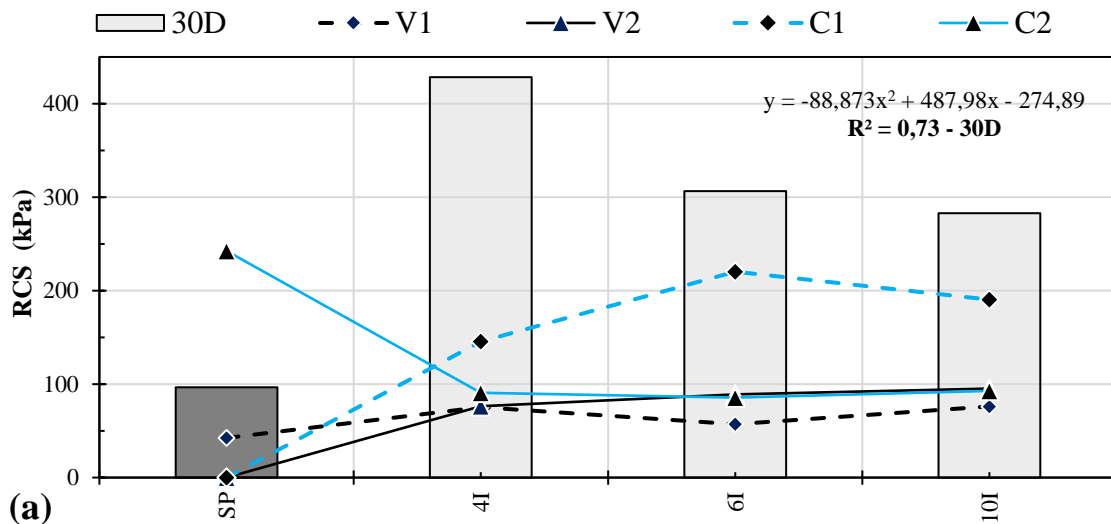
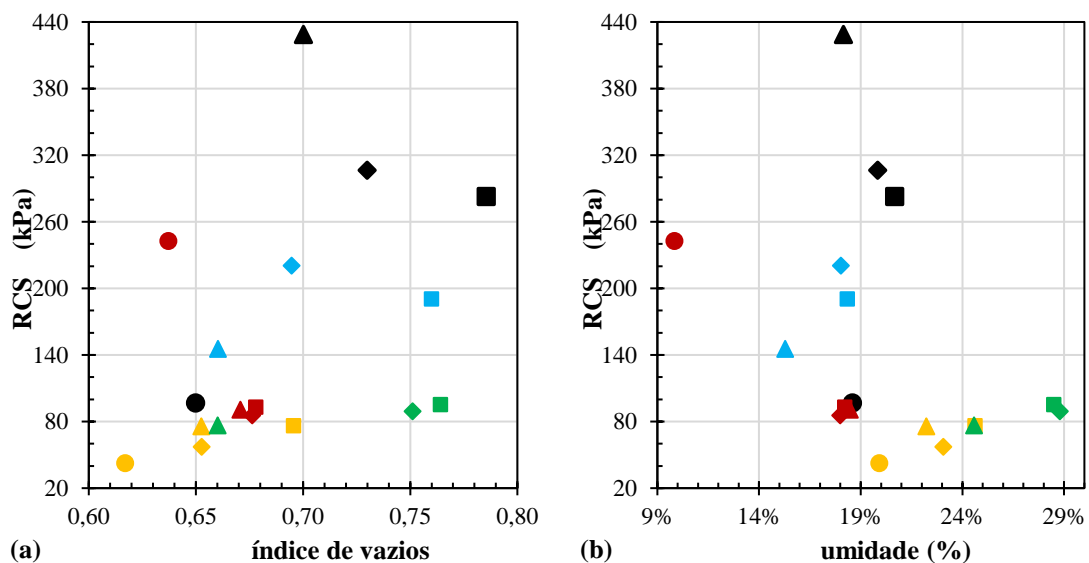


Figura 5-81 - Índice da variação de RCS por tempo e método de cura em misturas de solo cal

A Figura 5-82 apresenta a RCS das misturas solo-cal em função dos fatores índice de vazios (a), umidade (b), sucção (c) e pF/e (d) considerando-se a cura por 30 dias em câmara úmida (30D), 60 dias (1) e 90 dias (2) em câmara úmida (C) e campo (V). Observa-se em todos os gráficos que os resultados obtidos após 30 dias de cura em laboratório são superiores aos obtidos para 60 e 90 dias seja em campo, seja em laboratório. Observa-se ainda, se comparados os resultados desta figura com os da Figura 5-79, que eles apresentam maior dispersão.

Considerando-se as análises feitas a respeito da degradação dos agregados com a cura em campo sob influência da presença de cal em corpos de prova depende-se que a cal estaria fragilizando os agregados com o tempo de cura e assim intervindo na RCS. A maior dispersão observada para estes resultados corrobora com esse entendimento, uma vez que a ação da cal sobre a estabilidade dos agregados presentes no solo não é controlada, assim como não se dispõe de um controle relativo da estabilidade dos agregados entre os corpos de prova. Esta constatação é importante, pois aponta para a necessidade de maiores controles e análises nas estabilizações de solos tropicais com cal e cimento.

**30D** ● SP ▲ 4% ◆ 6% ■ 10%    **C1** ● SP ▲ 4% ◆ 6% ■ 10%  
**C2** ● SP ▲ 4% ◆ 6% ■ 10%    **V1** ● SP ▲ 4% ◆ 6% ■ 10%  
**V2** ● SP ▲ 4% ◆ 6% ■ 10%



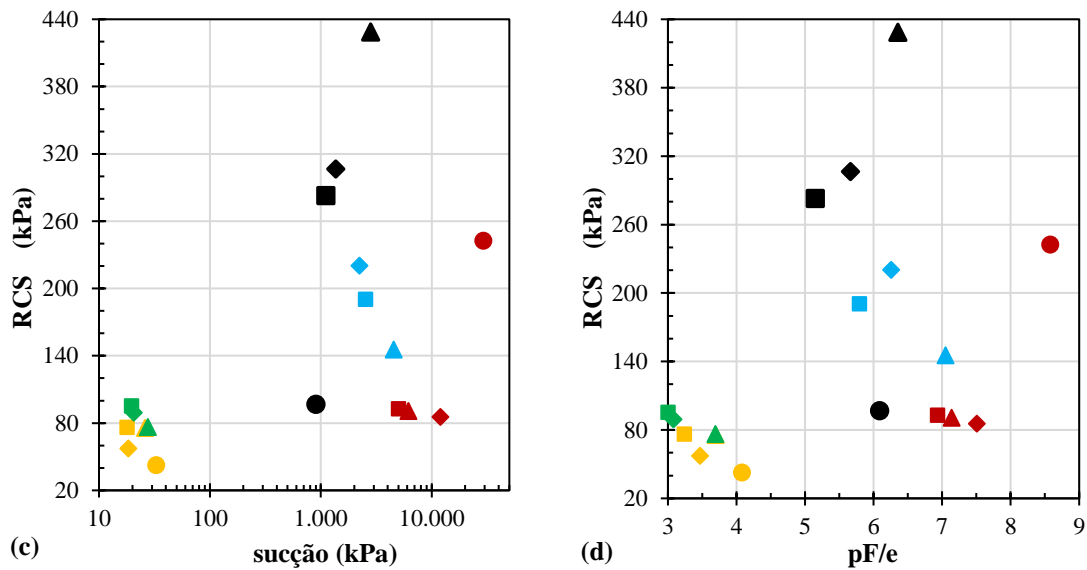


Figura 5-82 - Influência da Cal CH-I na RCS

Se consideradas as análises e resultados apresentados por Teixeira *et al.*, (2019), Oliveira *et al.*, (2019) e Pereira *et al.*, (2018) e os resultados aqui analisados, conclui-se pela impossibilidade de generalizações de resultados oriundos da estabilização química de solos tropicais, em especial os profundamente intemperizados como é o caso do aqui estudado.

As Figura 5-83, Figura 5-84 e Figura 5-85 sintetizam os resultados de resistência a compressão simples (RCS) obtidos respectivamente para as misturas de solo - fibra com 4%, 6% e 10% de cal. Nestas figuras foram consideradas a cura convencional por 30 dias em câmara úmida, curas por 60 e 90 dias em câmara úmida e curas em campo por 60 e 90 dias.

De um modo geral destacam-se para os três teores de cal dois comportamentos bem definidos em relação aos 30 dias de cura em laboratório: resistências mais elevadas em corpos de prova com cura em câmara úmida por 60 e 90 dias e resistências menores em corpos submetidos ao método de cura em campo por 60 e 90 dias.

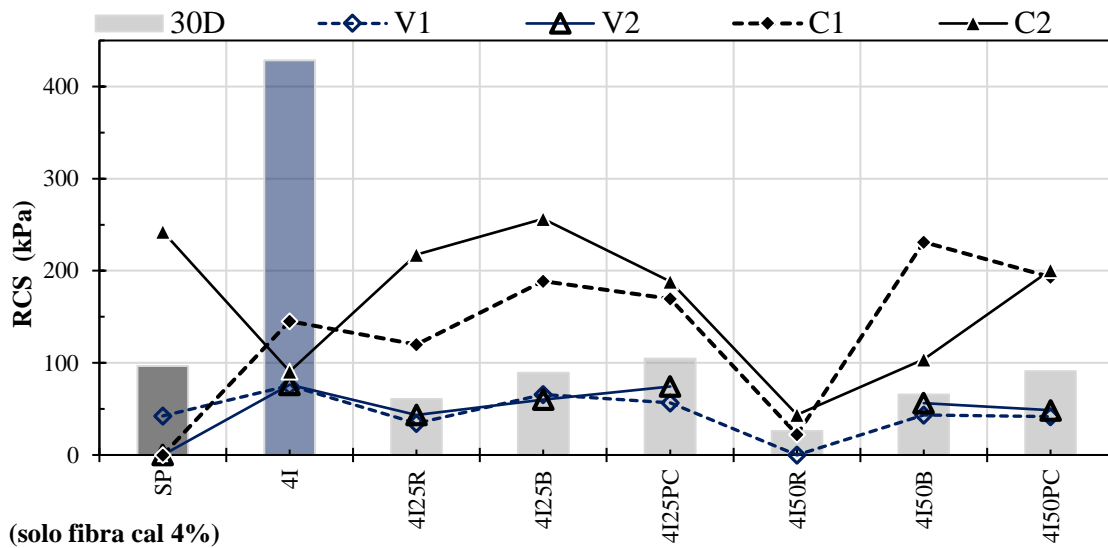


Figura 5-83 - Variação de RCS por tempo e método de cura em misturas de solo cal 4% fibra

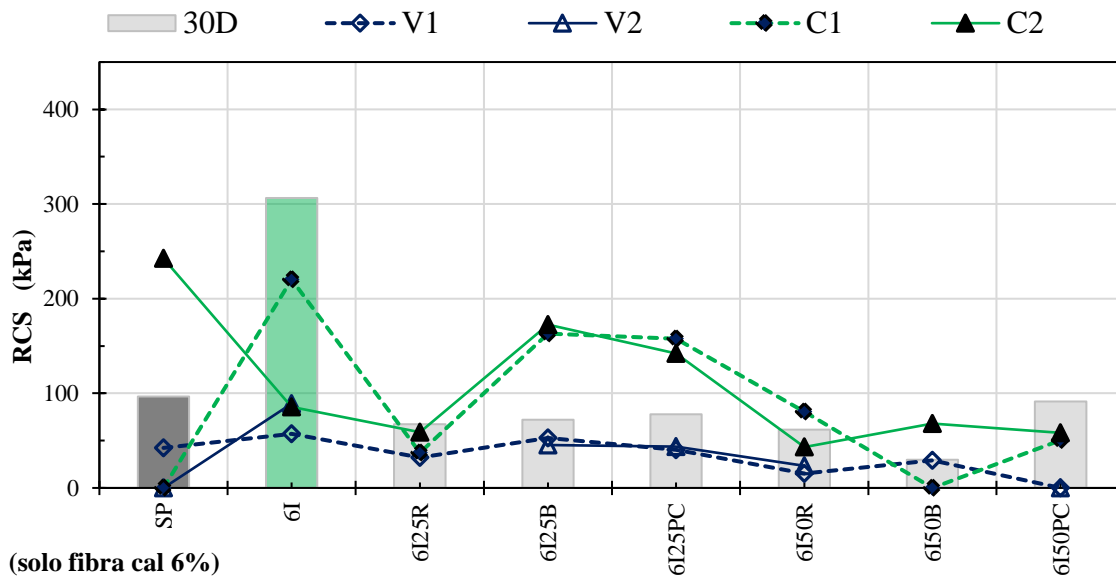


Figura 5-84 - Variação de RCS por tempo e método de cura em misturas de solo cal 6% fibra

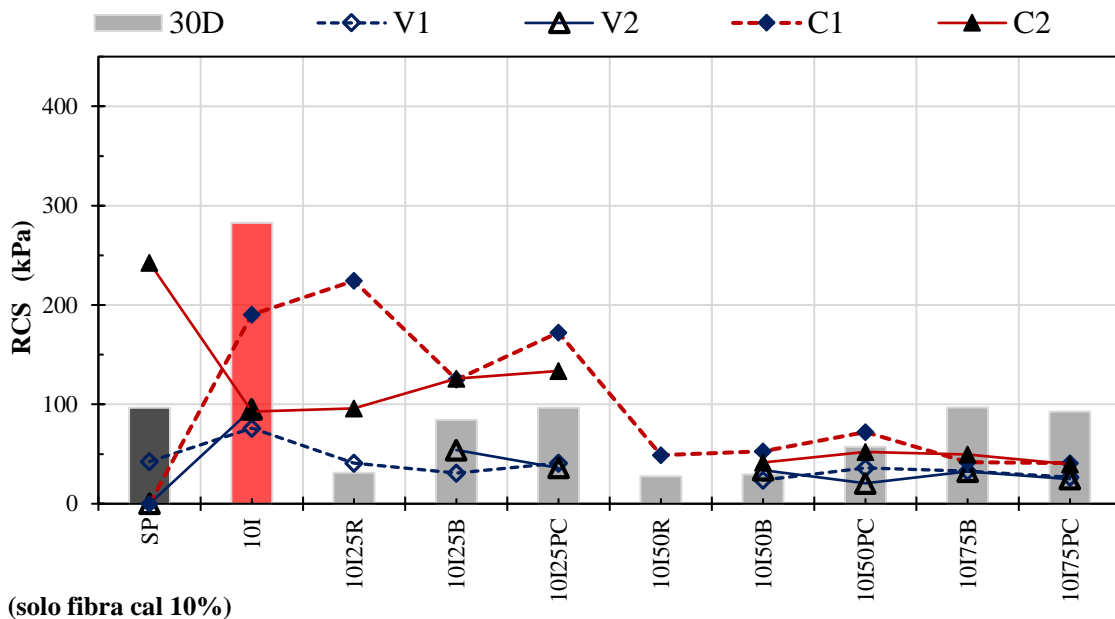


Figura 5-85 - Variação de RCS por tempo e método de cura em misturas de solo cal 10% fibra

Como já indicado o comportamento mecânico dos solos depende dentre outros do índice de vazios, da umidade e da sucção. Além de fatores internos como a composição químico-mineralógica e estrutura interpartículas dos solos interferem neste comportamento fatores de ordem física e química. No presente estudo as fibras podem interferir de modo predominante fisicamente e a cal quimicamente.

A título de ilustração no âmbito do estudo realizado são apresentados na Figura 5-86 considerando-se cura em câmara úmida por 30, 60 e 90 dias e em campo por 60 e 90 dias os gráficos de RCS em função do índice de vazios (a), da umidade (b), da sucção (c) e da sucção em pF normalizada em relação ao índice de vazios considerando-se no que tange ao fator físico a fibra pena completa nos teores em peso em relação ao solo seco de 0,25%, 0,50% e 0,75% e no que tange ao fator químico foram consideradas as misturas com 4% de cal hidratada do tipo CH-I.

No Apêndice E são apresentados para estas mesmas condições de cura os resultados obtidos para barba (Figura E1) e raque (Figura E2) em 4% de cal, pena completa (Figura E3), barba (Figura E4), raque (Figura E5) em 6% de cal, pena completa (Figura E6), barba (Figura E7), raque (Figura E8) em 10% de cal.

**30D** ● 4% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **C1** ● 4% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**C2** ● 4% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **V1** ● 4% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**V2** ● 4% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%

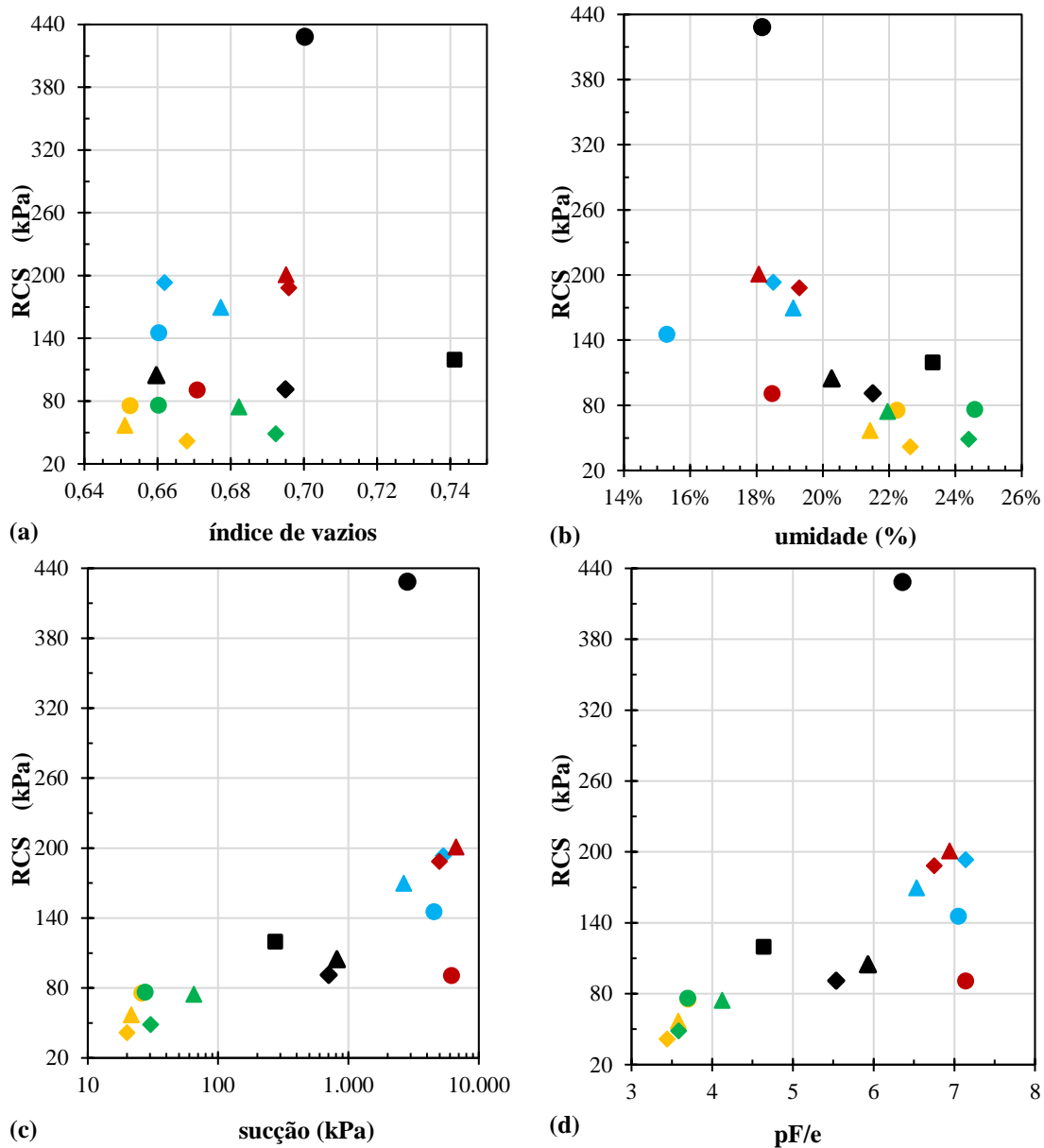


Figura 5-86 - RCS das misturas solo – pena completa – 4 % de cal CH-I

Os resultados apresentados nesta Figura 5-86 mostram que em relação às misturas solo – fibra pena completa, embora as tendências de variação com o índice de vazios, com a umidade, com a sucção e com pF/e sejam semelhantes, ocorre uma ampliação nas dispersões dos resultados, dispersões que são, no entanto, menores que as verificadas para as misturas solo – cal cujos resultados estão apresentados na Figura 5-82, ou seja, a cal

está gerando dispersão e a fibra pena completa a está limitando. Quanto a influência do teor de fibra, embora não tenham sido determinados os resultados para 0,75% de fibra e curas por 60 e 90 dias em câmara úmida e em campo os resultados obtidos apontam considerando-se os teores 0,25% e 0,50% de fibra e incluindo o teor 0,75% de fibra para cura de 30 dias, que a influência do teor de fibra não é marcante no comportamento.

Buscando um entendimento mais amplo sobre a influência do teor de fibra e de cal CH-I no comportamento das misturas a Figura 5-87 apresenta a totalidade dos resultados de RCS obtidos para misturas solo - fibra (Pena completa, barba e raque nos teores 0,25%, 0,50% e 0,75%) – cal CH-I (4%, 6% e 10%) em função do teor de umidade (a) e de pF/e (b). Nesta figura são considerados: azul = 4% de cal; vermelho = 6% de cal; preto = 10% de cal; esfera = 30 dias (D) de cura em câmara úmida; losango preenchido = cura em câmara úmida 60D; quadrado preenchido = cura em câmara úmida 90D; losango sem preencher = cura em campo 60D; quadrado sem preencher = cura em campo 90D. Como o teor de fibras não apresentou influência relevante nos resultados, não foi feita distinção entre eles nesta figura.

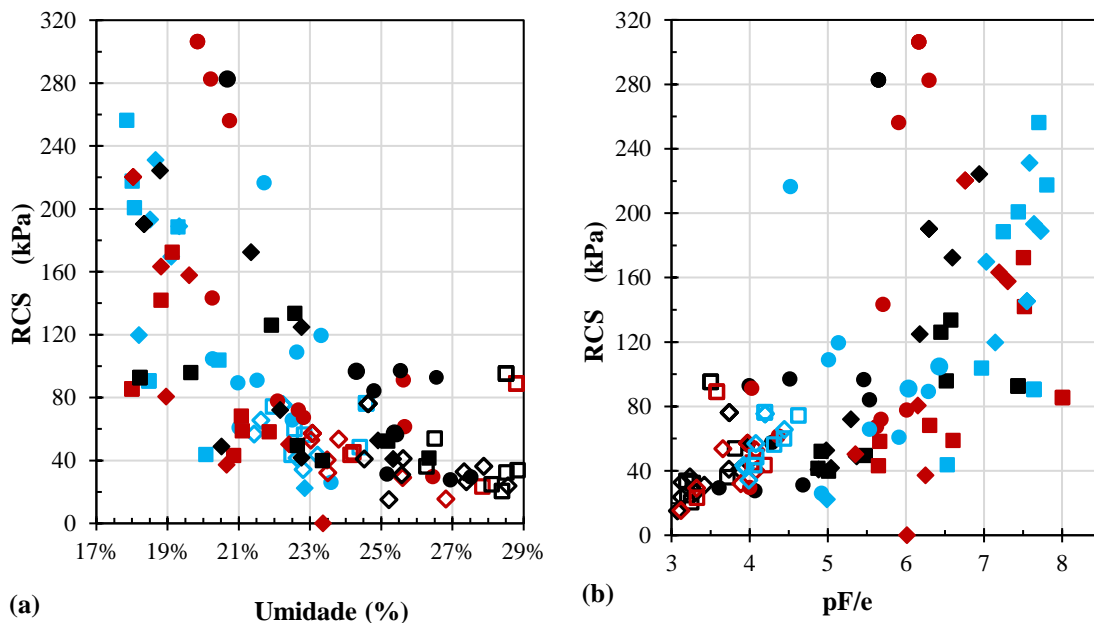


Figura 5-87 - RCS em função da umidade e de pF/e para as misturas solo-fibra-cal .

Apesar da dispersão, observa-se nestes gráficos (a) e (b) da Figura 5-87 a tendência dos valores obtidos para 30 dias de cura em câmara úmida serem superiores aos demais e os

obtidos para 90 dias de cura em câmara úmida serem os menores. Para umidades elevadas e pF/e menores os resultados de campo e laboratório mesmo incluindo o tempo de cura 30 dias são semelhantes. Destas observações se conclui que efetivamente com o tempo a cal ataca a estabilidade dos agregados e micro agregados do solo estudado e que para umidades elevadas e pF/e pequenos, como, em princípio, predomina a sucção na macro porosidade o tipo e tempo de cura praticamente não interferiu na RCS.

### **5.13.3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS FIBRAS E DA CAL NO MÓDULO TANGENTE DETERMINADO A PARTIR DOS GRÁFICOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES – RCS DAS MISTURAS**

A partir do ensaio de resistência a compressão simples RCS, foram calculados os módulos tangentes iniciais a partir das curvas de Resistência a Compressão Simples obtidas. Os resultados apresentados foram obtidos para corpos de prova com cura em laboratório e em campo.

As Figura 5-88 (a) e (b) apresentam respectivamente os resultados de módulo tangente em função do teor de umidade e de pF/e considerando-se os diferentes tipos e teores de fibra e os diferentes tempos e condições de cura. Nestas figuras, a cor amarela representa o solo puro, a cor azul a pena completa, a cor vermelha a barba e a cor preta a raque. Os círculos, o losango e o quadrado cheios representam respectivamente as curas em laboratório por 30, 60, e 90 dias e os losangos e quadrados vazios representam respectivamente as curas em campo por 60 e 90 dias.

Observa-se na Figura 5-88 (a) que os valores de módulo tangente em função dos teores de umidade considerando-se os tipos de fibra melhoram na seguinte ordem: raque, barba e pena completa. A mesma tendência para a variação do módulo tangente em função do tipo de fibra é verificada na Figura 5-88 (b) quando se analisa os resultados em função da sucção em pF normalizado pelo índice de vazios (e).



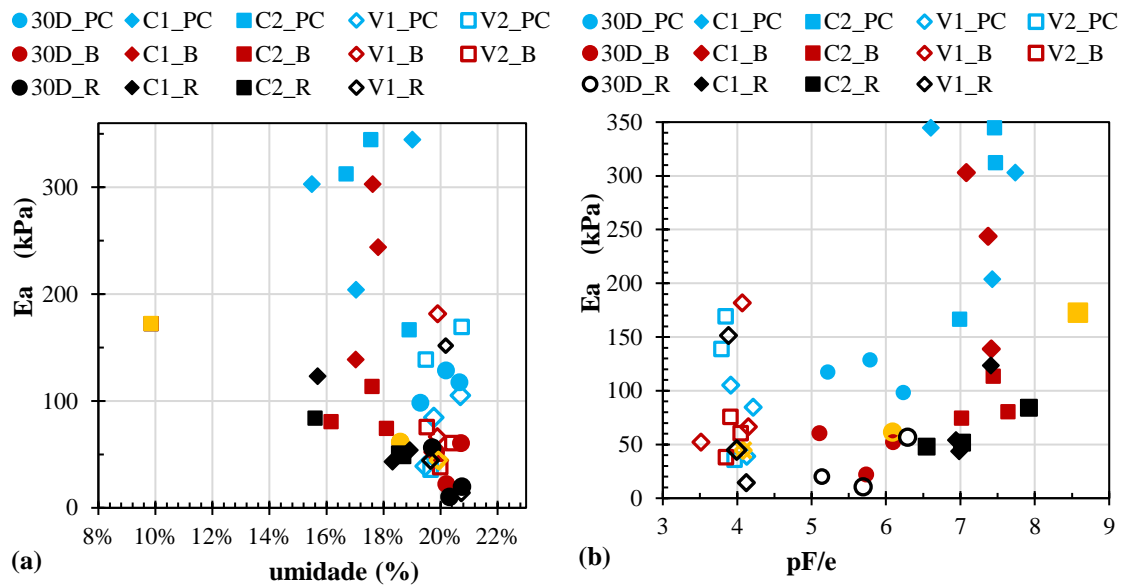


Figura 5-88 – Módulo tangente em função do teor de umidade (a) e de pF/e (b)

A Figura 5-89 (a), (b), (c) apresenta respectivamente considerando-se 4%, 6% e 10% de cal os resultados obtidos para as misturas solo - fibra - cal em comparação com as misturas solo – fibra para a fibra pena completa tendo em vista ter sido ela a que apresentou melhor desempenho nas misturas solo – fibra. Observa-se na Figura 5-89 (a) obtida considerando as misturas solo – fibra e solo – fibra – 4% de cal que a cal tendeu a piorar o comportamento das misturas em relação às misturas solo – fibra e isso deve ter ocorrido por dois motivos: 1) a cal atua instabilizando os agregados; 2) a cal ataca as fibras deteriorando-as como foi anteriormente mostrado no item 5.10.

Na Figura 5-89 (b) obtida quando da incorporação de 6% de cal às misturas solo -fibra pena completa não se percebe uma melhoria ou comprometimento do comportamento das misturas solo -fibra, ou seja, os problemas gerados com a possível instabilização dos agregados e com o ataque às fibras seriam compensados pela geração de ligações cimentícias pela cal.

Na Figura 5-89 (c) se observa a tendência ao comportamento se inverter em relação às misturas contendo 4% de cal, ou seja, as misturas solo – fibra – 10% de cal tendem a apresentar melhor comportamento que as misturas solo – fibra pena completa. Neste caso, portanto, as ligações cimentícias geradas pela cal estariam a superar os efeitos degradadores dos agregados e das fibras. O conjunto de resultados apresentados na Figura

5-89, mostra, no que tange ao módulo tangente, não ser recomendada a incorporação de cal às misturas solo – fibra, e que mesmo sem a incorporação de fibras ao solo a estabilização com cal de solos tropicais profundamente intemperizados requerem análises envolvendo tempos de cura mais prolongados, pois a cal pode proporcionar a instabilização de agregados presentes no solo ampliando assim a sua deformabilidade.

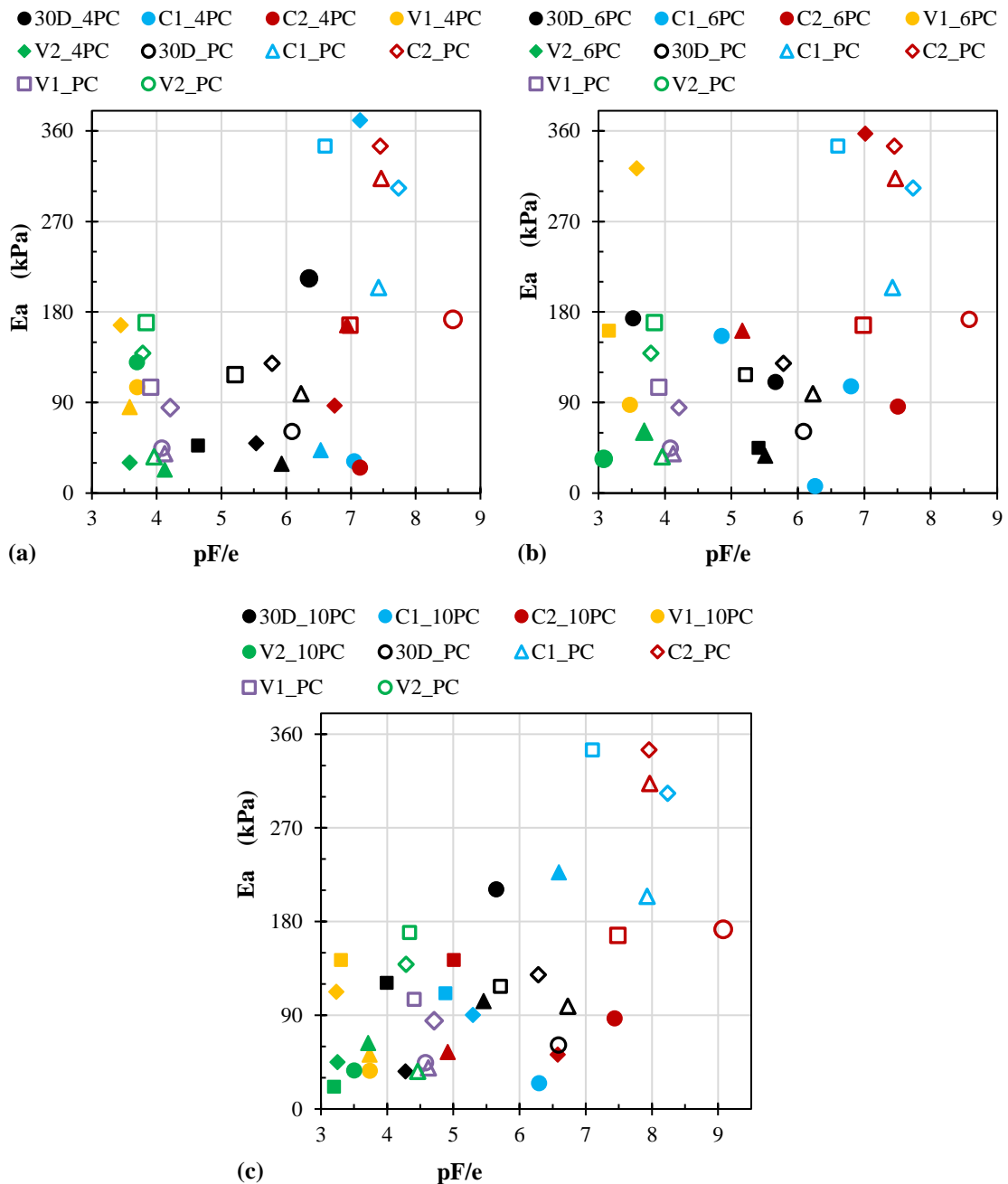


Figura 5-89 – Módulo tangente em função de  $pF/e$  considerando-se a adição de 4% (a), 6% (b) e 10% de cal (c) às misturas solo- fibras

## 5.14 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RTCD)

Embora a influência das fibras em outros parâmetros do comportamento mecânico dos solos tenha sido avaliada, as fibras são geralmente incorporadas aos solos objetivando a melhoria de sua resistência a tração. Ao interagir com o solo, ela tende a afetar a própria compactação podendo gerar a piora de outros parâmetros mecânicos em consequência desta interferência.

### 5.14.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DO SOLO PURO:

A Figura 5-90 apresenta as curvas de resistência à tração por compressão diametral (RTCD) do solo puro após compactado na condição ótima. A resistência à tração por compressão diametral média do solo obtida foi 39 kPa na umidade ótima sem o uso de imersão. O valor obtido corresponde ao geralmente obtido para solos argilo-siltosos e se aproxima do valor encontrado em Budny (2018).

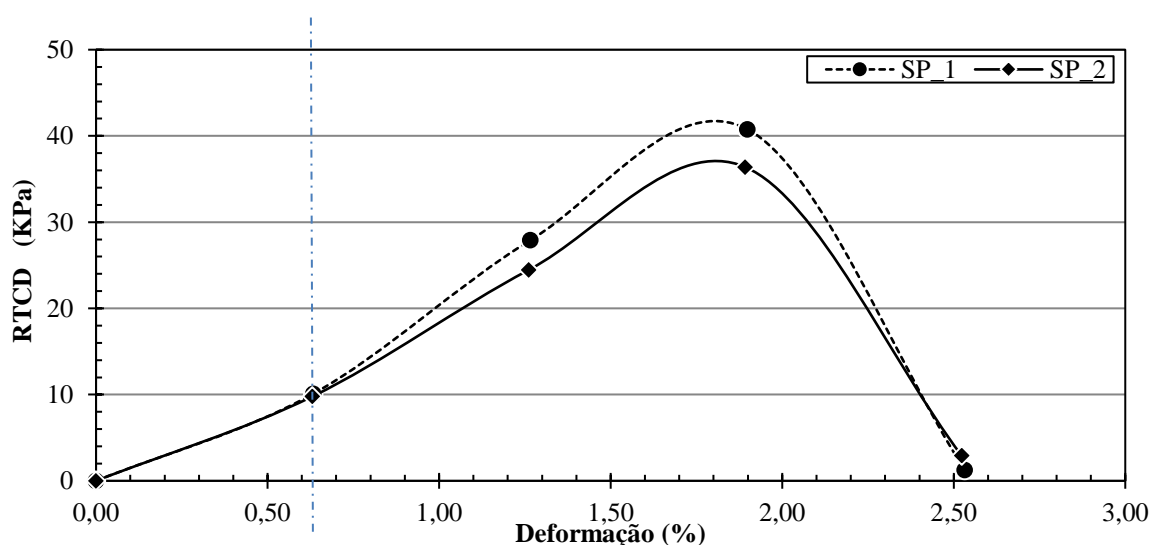


Figura 5-90 – Curvas de resistência à tração por compressão diametral do solo puro

### 5.14.2 VARIAÇÃO TEMPORAL DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DAS MISTURAS SOLO - FIBRA

A Figura 5-91 apresenta a variação da resistência a tração por compressão diametral RTCD de misturas solo - fibra em quatro tempos de cura sendo 1 e 30 dias em laboratório

e 60 e 90 dias em campo. Os ensaios foram realizados nas condições de umidade e porosidade em que se encontravam os corpos de prova após o tempo de cura. Cabe destacar que a referência a 1 dia de cura está atrelada ao período em que as fibras ficaram misturadas ao solo antes da compactação, sendo que após compactação, os corpos de prova foram ensaiados no mesmo dia. A linha segmentada em azul representa o valor do RTCD obtido para o solo puro sem submersão. Segundo esta figura, em alguns casos a fibra tende a melhorar RTCD e em outros não.

Observa-se no conjunto de resultados uma significativa dispersão dos resultados com o tempo de cura e tipo de fibra o que aponta para a necessidade de se analisar os resultados em função dos principais fatores intervenientes no comportamento das misturas (Figura 5-91), quais sejam: índice de vazios (a), teor de umidade (b) e sucção (c). Complementarmente é feita a análise em função de  $pF/e$  (d), integrando assim a influência da sucção fortemente dependente da umidade ao índice de vazios.

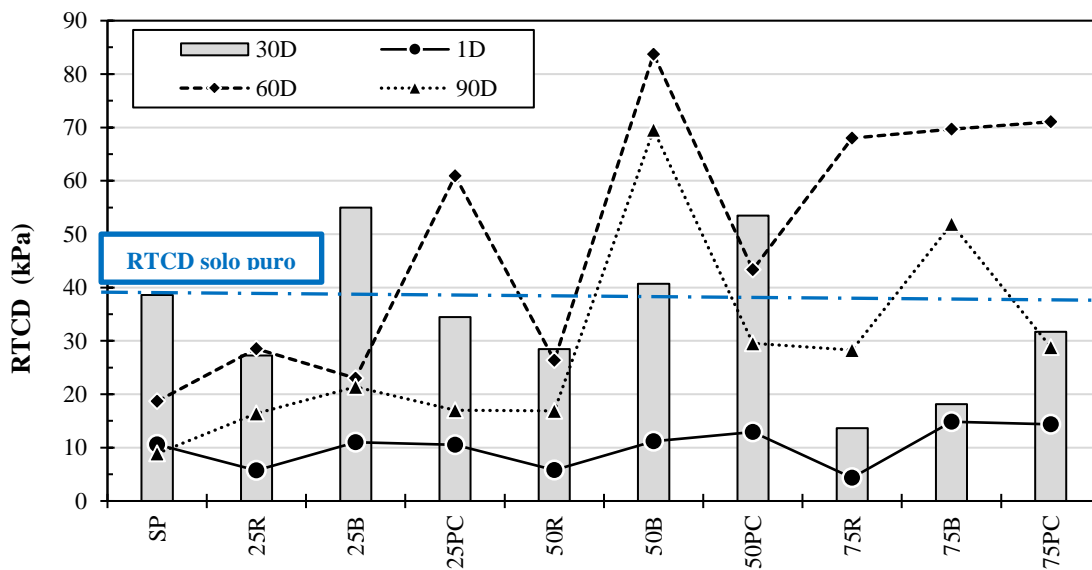


Figura 5-91 – Variação da RTCD misturas de solo – fibra

A Figura 5-92 apresentada a seguir se refere às misturas solo – fibra pena completa sendo que nela foram incluídos os resultados obtidos para o solo puro. Os resultados obtidos para as misturas solo – fibra barba e solo – fibra raque estão apresentados no Apêndice F, respectivamente nas Figura F1 e F2.

**30D** ● SP ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **1D** ● SP ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**V1** ● SP ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **V2** ● SP ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%

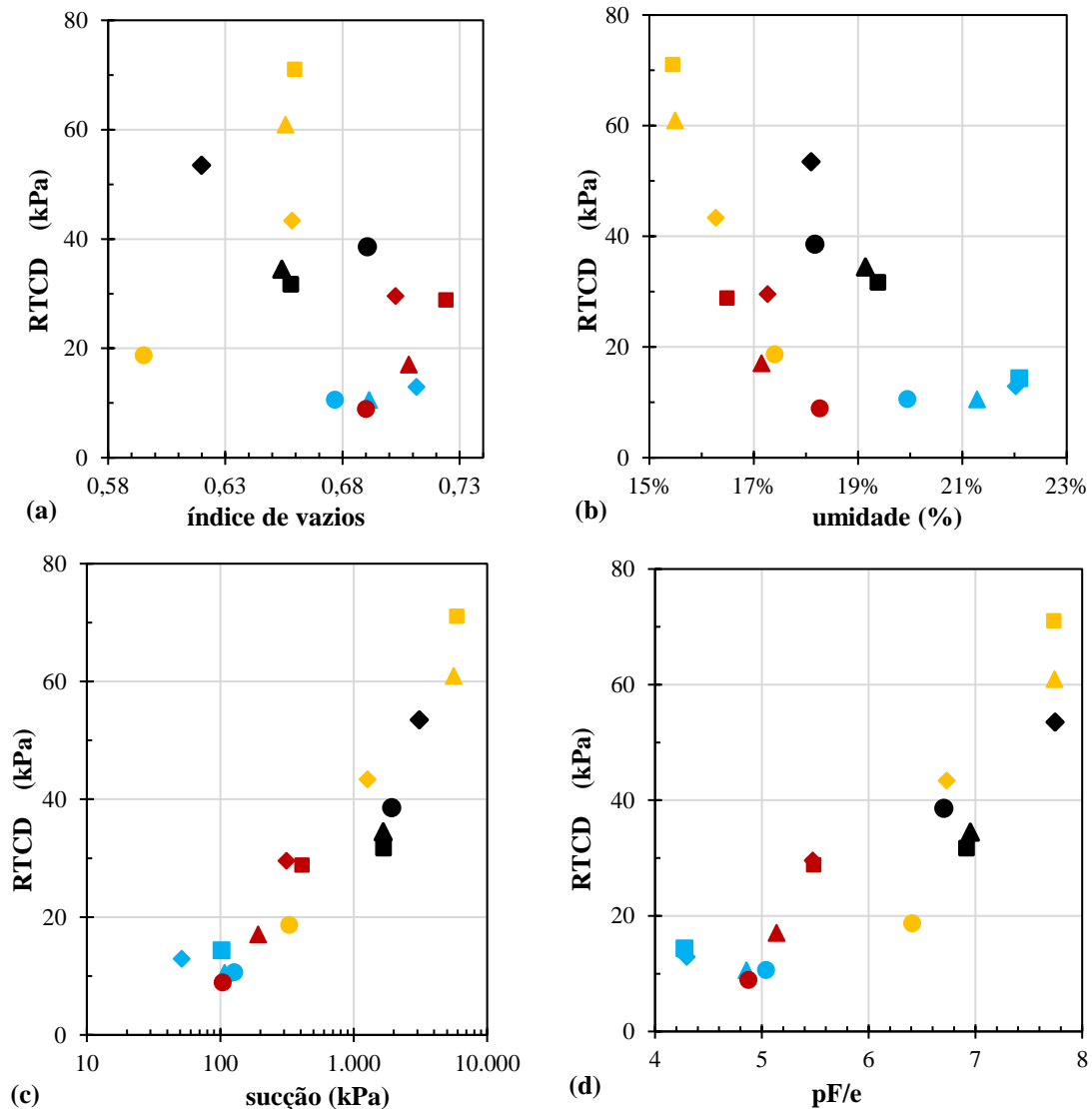


Figura 5-92 - RTCD das misturas solo – fibra pena completa

É possível observar na Figura 5-92 uma significativa dispersão dos resultados de RTCD em função do índice de vazios (a) e do teor de umidade (b). A dispersão se torna menor quando estes resultados são analisados em função da sucção (c) e de pF/e (d). No entanto, não se destaca em nenhum dos gráficos, (a), (b), (c) e (d), uma clara influência do tempo e tipo de cura assim como da incorporação e teor de fibras sobre a RTCD.

Na Figura 5-93 estão apresentados respectivamente em função do teor de umidade (a) e de pF/e (b) os resultados de RTCD obtidos considerando-se os quatro teores de fibra (0%, 0,25%, 0,50% e 0,75%), os três tipos de fibra (raque, barba e pena completa) e os quatro tempos de cura (1, 30, 60 e 90 dias). Nesta figura os símbolos não preenchidos correspondem ao solo puro, ou seja, sem a presença de fibras.

A dispersão apresentada na Figura 5-93 (a) mostra que embora a umidade influencie nos resultados outros fatores como porosidade e sucção estão a influenciá-los. Apesar da discrepância de alguns pontos obtidos para a raque com um dia de cura, a Figura 5-93 (b) mostra que a RTCD tende a aumentar com o tempo de cura sem que, no entanto, se mostre relevante a presença das fibras. A tendência de ampliação da resistência com o tempo de cura das misturas solo-fibra pode estar atrelada à melhoria da estabilidade estrutural com o tempo.

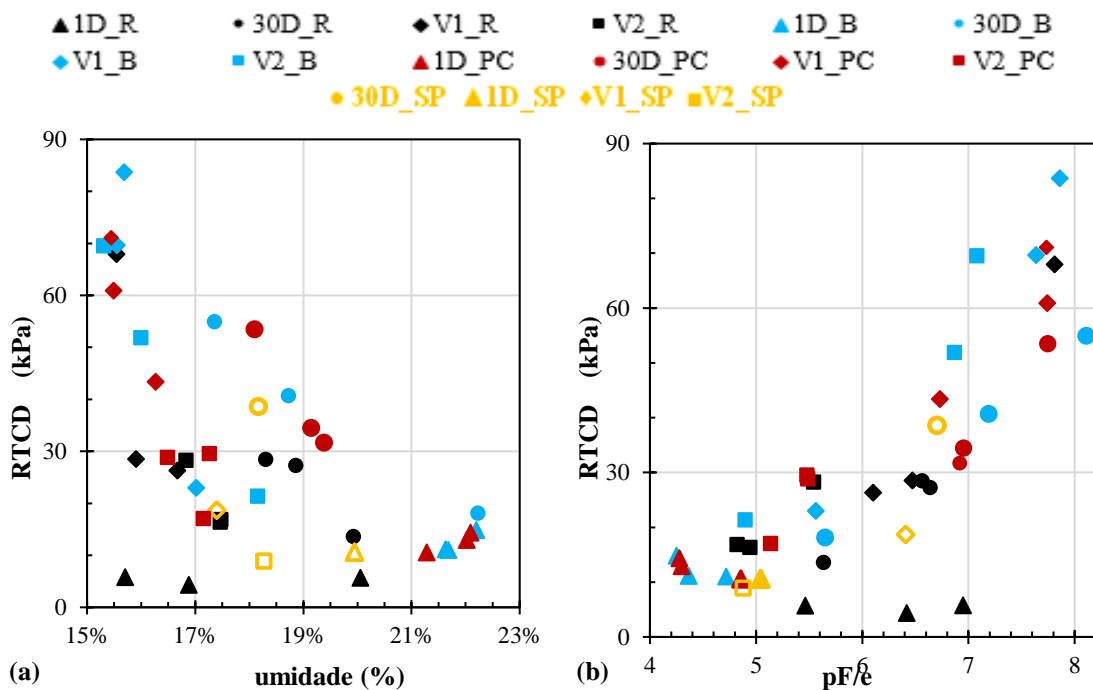


Figura 5-93 - RTCD em função do teor de umidade e de pF/e para as misturas solo-fibra

A Figura 5-94 mostra, no entanto, que considerando-se o mesmo índice de vazios, apesar da dispersão dos resultados, a RTCD tende a aumentar com a ampliação do teor de fibras.

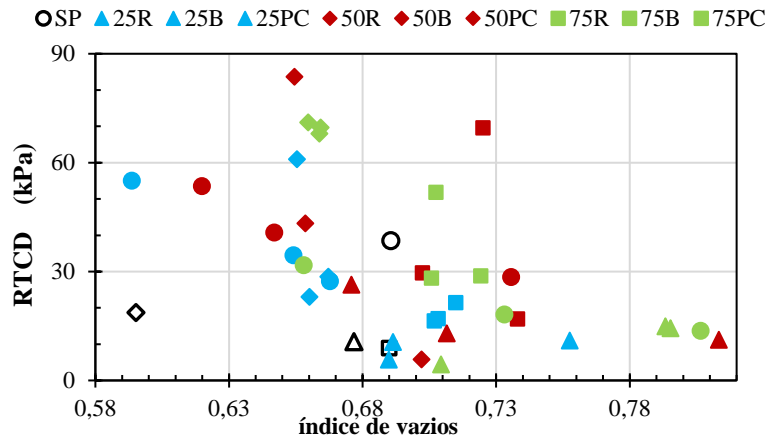


Figura 5-94 - Influência do teor de fibras na RTCD

De modo a melhor se avaliar se o tipo de cura, laboratório e campo, afetaria os resultados a Figura 5-95 apresenta os resultados de RTCD em função do teor de umidade (a) e de pF/e (b) considerando a cura em laboratório por 1 e 30 dias (cor preta) e a cura em campo por 60 e 90 dias (cor vermelha). Os símbolos não preenchidos correspondem ao solo puro, os símbolos vermelhos à cura em laboratório e os símbolos pretos à cura em campo. Embora os resultados de RTCD apresentados em função do teor de umidade (a) não apontem claramente para a influência do tipo de cura nos resultados, as análises realizadas em função de pF/e (b) indicam que a cura em campo tendeu a melhorar o comportamento mecânico em termos de RTCD.

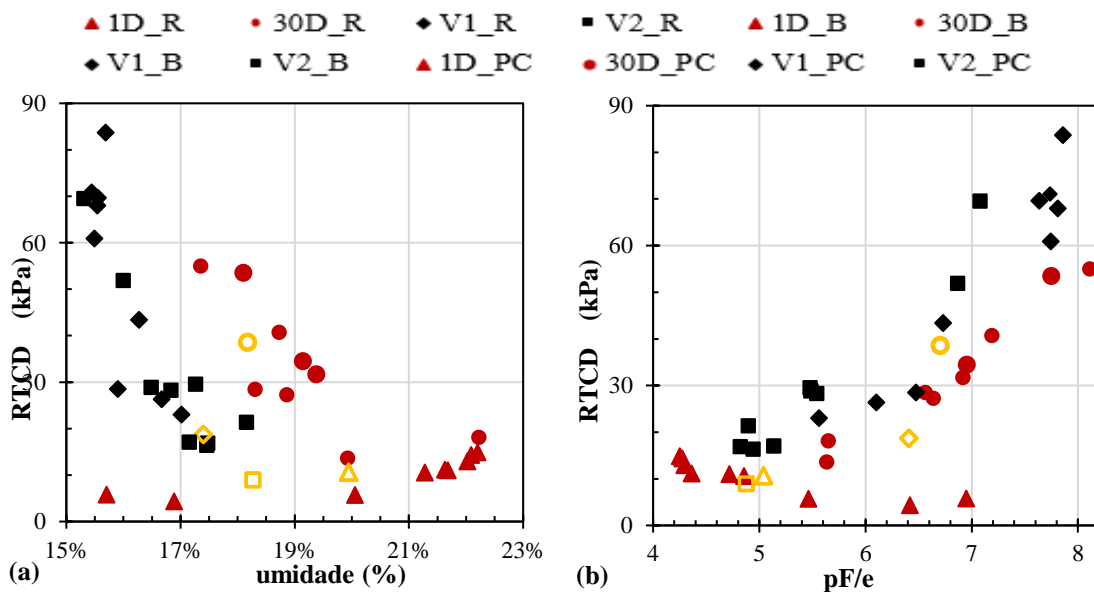


Figura 5-95 - RTCD em função do teor de umidade e de pF/e para as misturas solo-fibra

A Figura 5-96 aponta para o fato de que o tempo de cura por si só não define o comportamento em termos de RTCD das misturas solo – cal sendo necessário avaliar o comportamento em função dos fatores intervenientes no comportamento mecânico quais sejam, índice de vazios, teor de umidade e sucção. Também não fica clara nesta figura a influência do teor de cal sobre o comportamento das misturas.

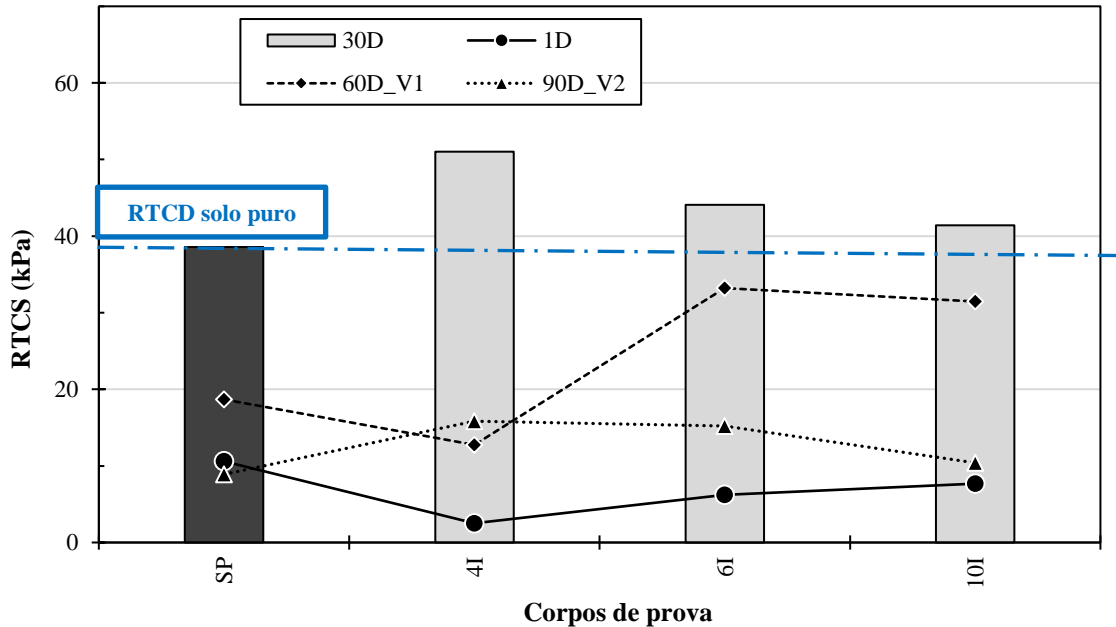


Figura 5-96 - Variação da RTCD misturas de solo – cal

A Figura 5-97 apresenta em função do índice de vazios (a), da umidade (b), da sucção (c) e da relação pF/e (d) os resultados de RTCD obtidos para o solo puro (0%) e misturas solo-cal (4%, 6% e 10%) para os tempos de cura 1 e 30 dias em laboratório e 60 e 90 dias em campo. Em função do índice de vazios (a) e do teor de umidade (b) os resultados apresentam uma significativa dispersão, no entanto, em função da sucção (c) e de pF/e (d), apesar de ainda apresentarem dispersão, os resultados apontam para a influência destes dois fatores, sucção e pF/e, na RTCD não sobressaindo, porém, influência do teor de cal e do tipo e tempo de cura nos resultados, pois apesar das diferenças de valores eles se encontram dentro das mesmas tendências.

Os resultados permitem, no entanto, concluir que a cal tende a aumentar a RTCD em relação ao solo puro tendendo este aumento a ser mais relevante quando da incorporação de 10% de cal. As dispersões observadas estão provavelmente atreladas aos níveis de



estabilidade dos agregados e microagregados, pois esta, como observado nas análises granulométricas, é afetada pela presença da cal.

Dado o baixo impacto do teor de cal nos resultados de RTCD obtidos é possível estabelecer o entendimento de que as variações estão se dando em especial em função das trocas catiônicas e como ela é baixa no solo estudado a influência da cal termina sendo pequena.

**30D**   ● SP   ▲ 4%   ◆ 6%   ■ 10%      **1D**   ● SP   ▲ 4%   ◆ 6%   ■ 10%  
**V1**   ● SP   ▲ 4%   ◆ 6%   ■ 10%      **V2**   ● SP   ▲ 4%   ◆ 6%   ■ 10%

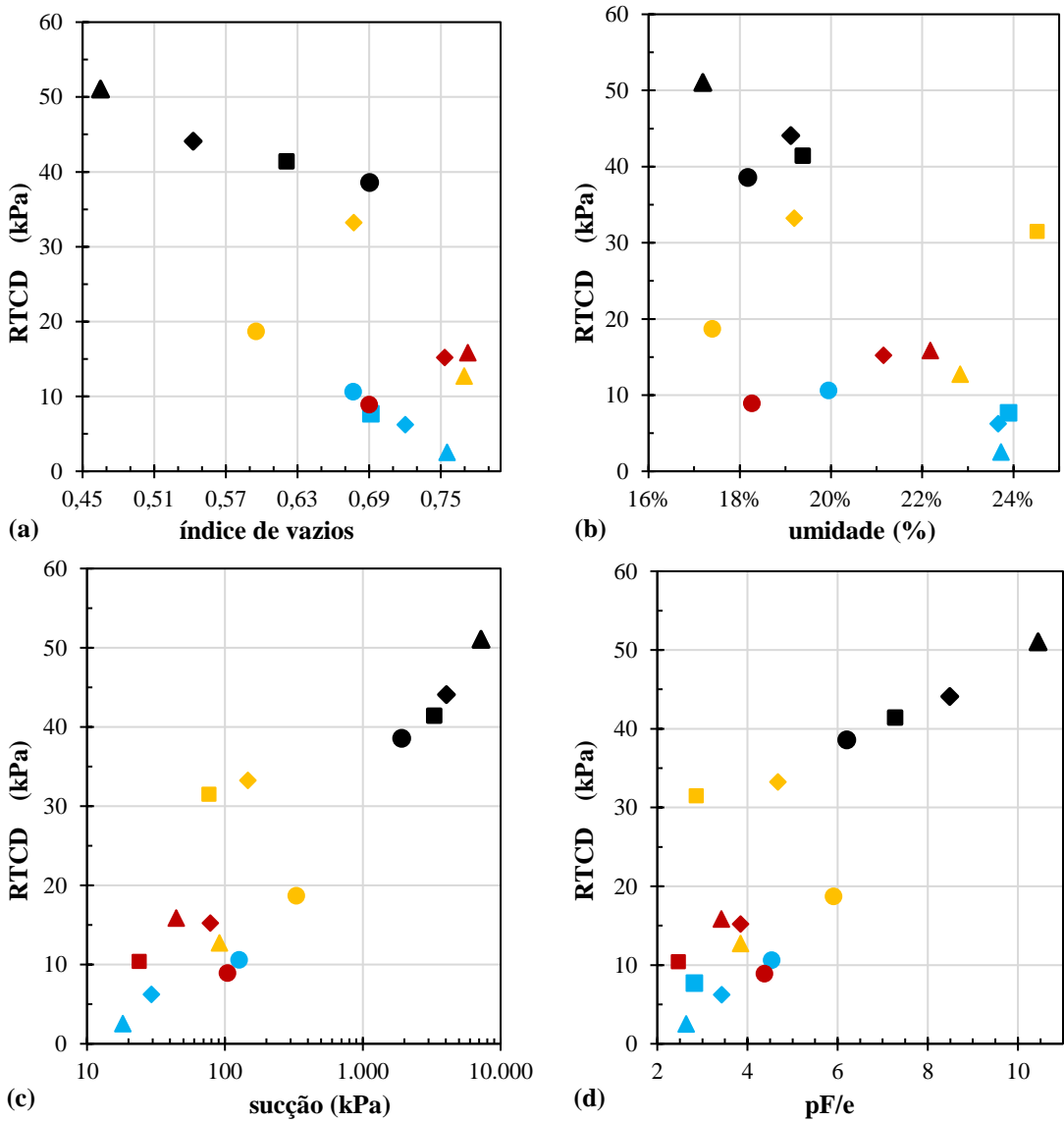


Figura 5-97 - RTCD para misturas solo – cal

A Figura 5-98 apresenta a variação da resistência à tração por compressão diametral (RTCD), em misturas solo – 4% cal – fibra. Dada a semelhança dos resultados obtidos, as combinações de solo - fibra - cal para os teores 6% e 10% de cal estão apresentados no APÊNDICE F-3.

A significativa variação da RTCD observada nesta figura com o tipo e teor de fibras assim como com o tempo de cura torna-se recomendável a realização das análises considerando-se os fatores índice de vazios, umidade e sucção.

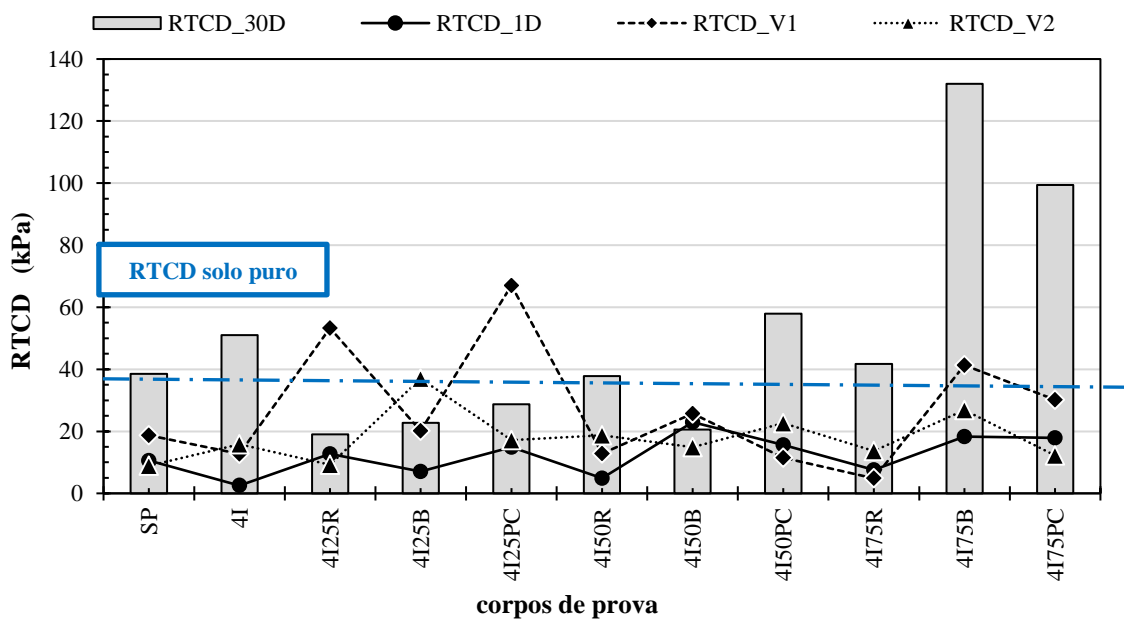


Figura 5-98 - Variação da RTCD de misturas solo – cal (4%) – fibras raque (R), barba (B) e pena completa (PC)

A Figura 5-99 apresenta em função do índice de vazios (a), da umidade (b), da sucção (c) e da relação pF/e (d) os resultados de RTCD obtidos para a fibra pena completa considerando-se o solo puro (0%) e misturas solo - cal 4% - fibra (0,25%, 0,50% e 0,75%) para os tempos de cura 1 e 30 dias em laboratório e 60 e 90 dias em campo.

Em função de todos os fatores analisados a dispersão é significativa apontando para o fato de que além de contribuir para a instabilização de micro agregados e agregados presentes no solo a cal pode estar agredindo as fibras pena completa.

A Figura 5-99 (d) na qual se incorpora o efeito da sucção em pF ao índice de vazios sobre a RTCD, se observa que a maioria dos pontos tendem a se enquadrar em uma determinada tendência na qual não sobressai a influência do teor de fibras nem do tempo e condições de cura, o que corrobora com o entendimento de que a cal e as fibras estão intervindo pouco no comportamento das misturas estudadas.

**30D** ● 4% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75% **D1** ● 4% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**V1** ● 4% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75% **V2** ● 4% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%

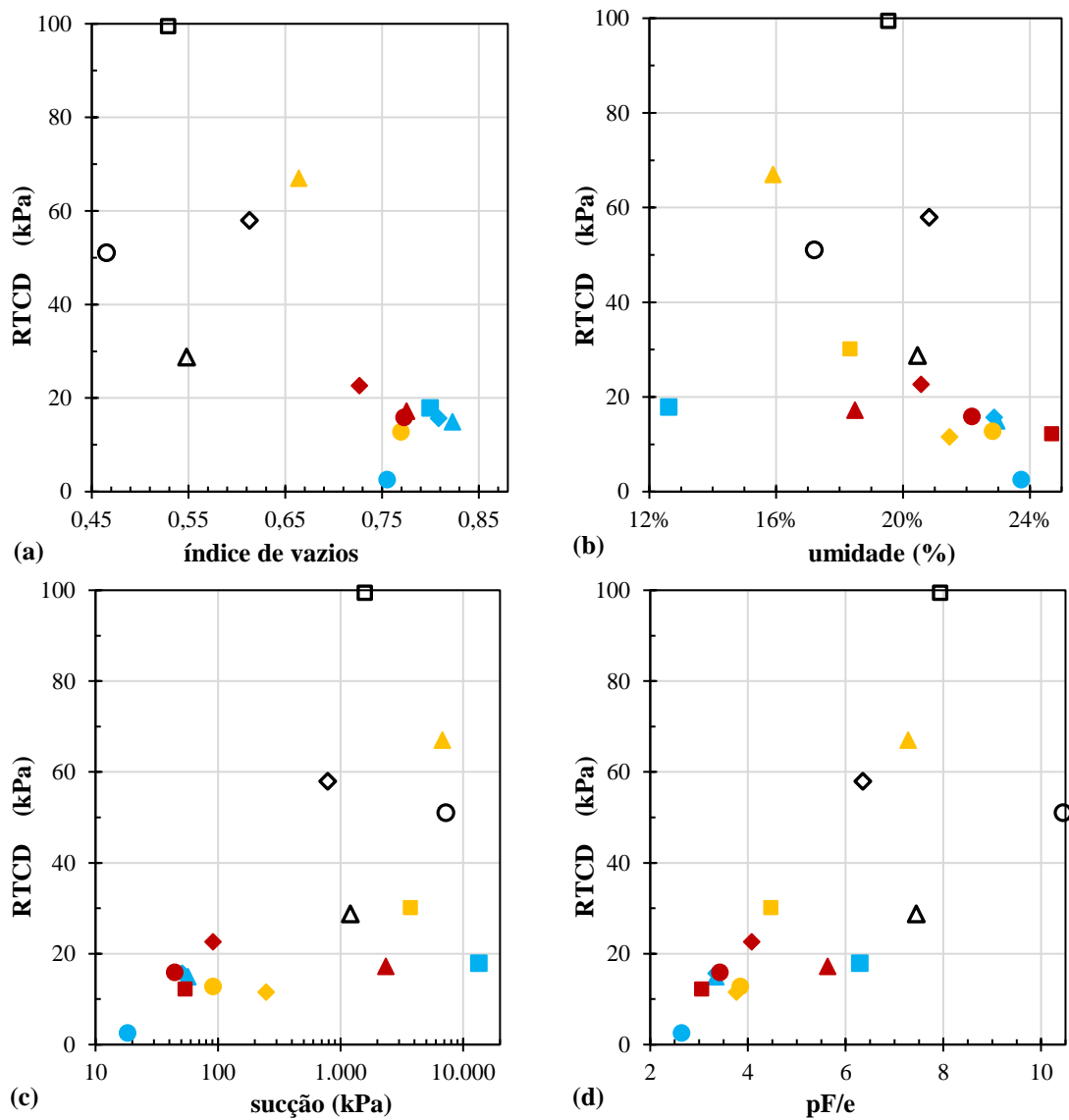


Figura 5-99 - RTCD para misturas solo – cal 4% – fibra pena completa

A Figura 5-100 apresenta o conjunto de resultados de RTCD obtidos para a pena completa misturada a 4%, 6% e 10% de cal CH-I em função da umidade (a) e de pF/e (b). Os resultados contidos nesta figura englobam os tempos de cura 1 e 30 dias em laboratório e 60 (V1) e 90 (V2) dias de cura em campo. Na Figura 5-100 a cor amarela corresponde ao solo puro.

Em função da umidade (a) se observa a tendência de redução da RTCD com o aumento da umidade não se destacando no entanto a influência do teor de cal. Em função de pF/e (b) verifica-se menor dispersão nos resultados e a tendência da RTCD praticamente não variar entre 4% e 6% de cal tendendo, no entanto, a aumentar quando se passa para o teor 10% de cal.

Tal comportamento aponta para o fato de que para 4% e 6% de cal as reações estariam mais atreladas a trocas catiônicas enquanto ao se passar para 10% de cal passaria a ocorrer também reações de cimentação. A tendência de aumento da RTCD com o tempo de cura para a incorporação de 10% de cal corrobora com este entendimento.

- 30D\_10PC ▲ V1\_10PC ◆ V2\_10PC ■ 1D\_10PC ● 30D\_6PC ▲ V1\_6PC ◆ V2\_6PC ■ 1D\_6PC
- 30D\_4PC ▲ V1\_4PC ◆ V2\_4PC ■ 1D\_4PC

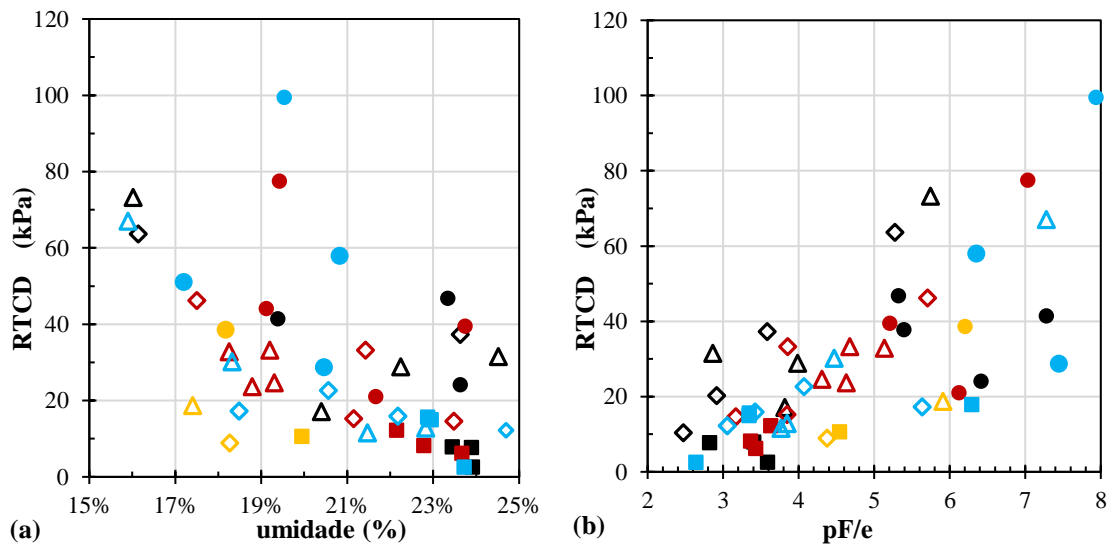


Figura 5-100 - RTCD para misturas solo – cal (4%, 6% e 10%) – fibra pena completa.

De modo a se visualizar o comportamento das misturas solo – fibra - cal como um todo são apresentados nas Figura 5-101 (a), (b), (c) e (d) a totalidade dos resultados de RTCD

em função de pF/e obtidos para as misturas solo – cal CH-I (4%, 6% e 10%) – fibras (pena completa, barba e raque nos teores 0,25%, 0,50% e 0,75%), sendo que na Figura 5-101 (a) considerou-se o teor de fibras, na Figura 5-101 (b) fez-se a distinção dos pontos considerando-se o tipo de fibra, na Figura 5-101 (c) fez-se a distinção do pontos considerando-se o teor de cal e na Figura 5-101 (d) simplesmente separou-se os resultados considerando-se a cura em campo e a cura em laboratório.

Na Figura 5-101 (a) foram incluídos os resultados obtidos para as misturas solo-cal curadas em laboratório (símbolos na cor amarela) e no campo (símbolos na cor verde). Os símbolos na cor preta, vermelha e azul correspondem respectivamente aos resultados obtidos para as misturas contendo 0,25%, 0,50% e 0,75% de fibras sem que se faça distinção entre raque, barba e pena completa.

Neste gráfico não sobressai a influência do teor de fibras na RTCD das misturas solo – cal – fibras e os resultados obtidos para as misturas solo - cal se enquadram entre as misturas contendo fibras indicando, que em princípio, as fibras não estão intervindo na RTCD das misturas contendo cal.

A Figura 5-101 (b) apresenta os resultados de RTCD considerando-se o tipo de fibra sendo a raque representada pela cor azul, a barba pela cor preta e a pena completa pela cor vermelha. Não se identifica nesta figura a influência clara do tipo de fibra no comportamento das misturas contendo cal independentemente do tempo e condições de cura.

A Figura 5-101 (c) apresenta os resultados de RTCD das misturas solo – cal – fibras considerando-se para os teores de cal 4% a cor azul, 6% a cor vermelha e 10% a cor preta. Apesar da dispersão observa-se nesta figura a tendência dos valores obtidos para as misturas contendo 10% de cal serem superiores aos demais.

A Figura 5-101 (d) apresenta os resultados de RTCD das misturas solo – cal – fibras considerando-se a curas em laboratório por 1 dia e 30 dias (cor preta) e a cura em campo por 60 e 90 dias (cor vermelha). Sobressai nesta figura que os resultados de RTCD obtidos

para a cura em campo foram superiores aos obtidos para a cura em laboratório, no entanto, é provável que a grande influência seja o tempo de cura e não exatamente o tipo de cura.

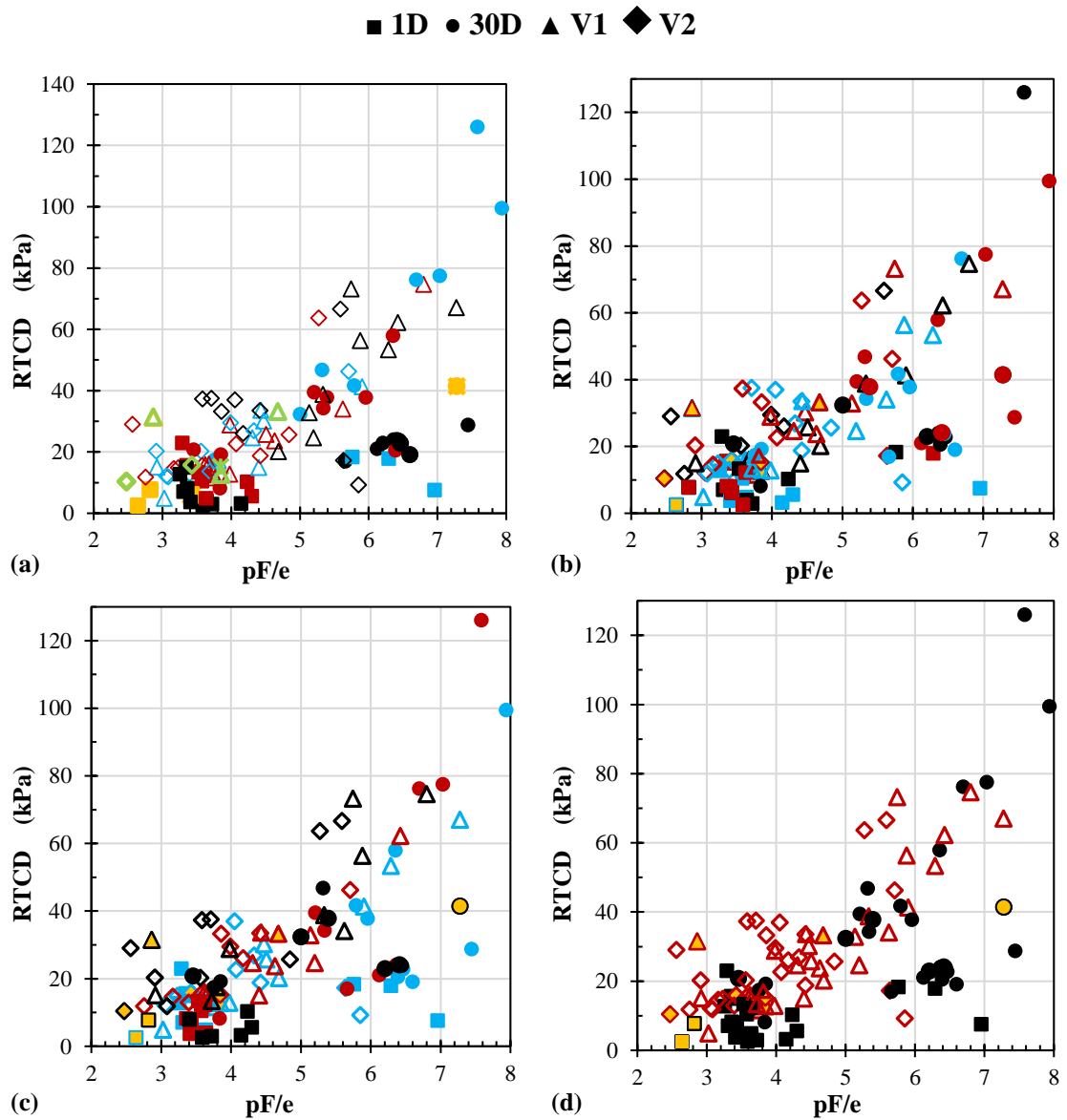


Figura 5-101 - RTCD em função de pF/e para as misturas solo – cal – fibras

Em síntese, com fundamento na Figura 5-100 é possível admitir que a cal praticamente não afetou de modo perceptível e claro o comportamento das misturas solo – fibras, sobressaindo apenas uma pequena melhoria ao se adicionar 10% de cal. Também não se observou nos resultados das misturas contendo cal melhorias em função do tipo e teor de fibras. Quanto a influência do método de cura o mais provável é que as diferenças de comportamento estejam atreladas ao tempo e não ao tipo de cura.

Os resultados obtidos para as misturas contendo 4% de cal CH-I e as fibras raque e barba assim como os resultados obtidos para 6% e 10 % de cal CH-I adicionados às fibras pena completa, barba e raque estão apresentados no Apêndice G.

#### **5.14.3 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL RESIDUAL-5% RTCD DE MISTURAS**

Na maioria dos casos analisados, não se evidenciou uma contribuição de destaque para as fibras na absorção das tensões de tração por compressão diametral aplicadas ao solo. Considerando-se o fato do solo estudado ser predominantemente argiloso, mesmo na composição dos agregados, isso torna as fibras menos eficientes na mobilização da resistência à tração. Sales (2011) estudou solo proveniente do mesmo local, porém, fazendo a incorporação de 25%, 50% e 75% de areia quartzosa. Essa autora mostrou que existe um teor de material granular ideal, pois em excesso termina prejudicando a coesão real.

No estudo usando a fibra cabelo humano sobressai com clareza que a fibra contribui para a ampliação da RTCD assim como da deformação de ruptura (Sales, 2011). Com base nesse segundo aspecto optou-se por complementar as análises da RTCD apresentadas nesta tese com a avaliação da resistência residual considerando-se 5% de deformação diametral dos corpos de prova durante os ensaios.

A Figura 5-102 exemplifica o caso de ruptura à tração por compressão diametral obtida para misturas solo – cal CH-I 4% considerando-se 1 dia e 60 dias de cura, ou seja, respectivamente levando-se em consideração apenas as trocas catiônicas e as trocas catiônicas e eventuais cimentações formadas a partir da composição química da cal.

Nestas imagens os planos de ruptura são bem definidos e compostos das cunhas nos contatos seguido de um plano de ruptura único. Cabe salientar que nas misturas solo-cal analisadas a seguir apenas um corpo de prova contendo 4% de cal e curado em campo por 90 dias apresentou resistência residual aos 5% de deformação.

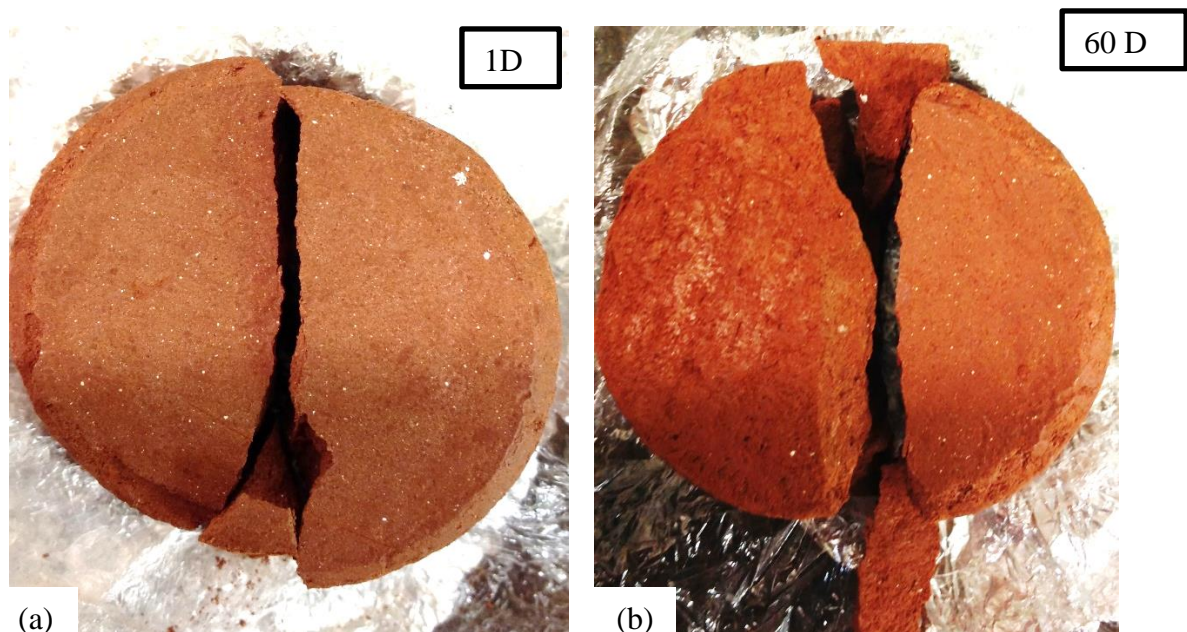


Figura 5-102 - Corpos de prova solo – cal CH-I 4% após ruptura por compressão diametral: (a) 1 dia e (b) 60 dias de cura

A Figura 5-103 apresenta imagens obtidas para misturas solo-barba (a) e solo-raque (b). Nestas imagens a primeira observação que se faz é quanto à formação das cunhas de ruptura nos pontos de apoio que aparecem claramente nas misturas solo cal (Figura 5-101) e não aparecem nas misturas com fibras. Verifica-se ainda que as fibras tendem a distribuir os esforços de tração no corpo de prova o que não é verificado na mistura solo-cal.

É possível perceber ainda na Figura 5-103 (a) a presença de fibras preservadas no interior da fratura apontando para dois aspectos, as fibras suportaram aos esforços de tração que atuaram no plano e o contato solo-fibra não foi eficiente permitindo assim o seu deslizamento problema que poderia ser resolvido ou pelo menos minimizado por meio da incorporação de material granular ao solo a exemplo do que fez Sales (2011).



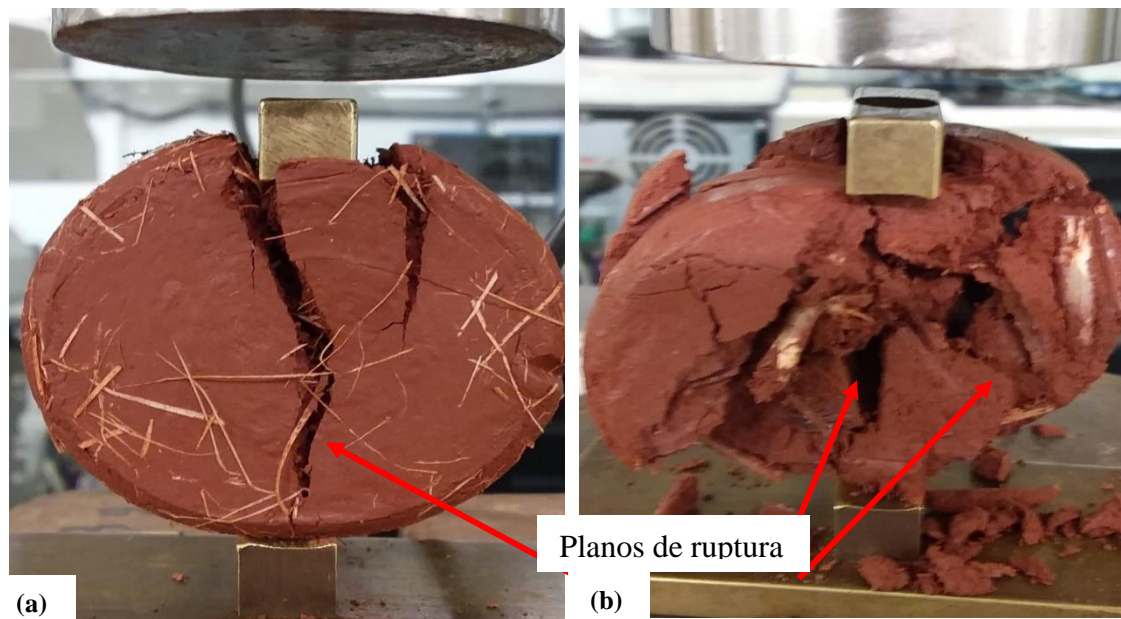


Figura 5-103 - Ruptura por compressão diametral após trinta dias de cura em laboratório de corpos de prova compostos por misturas solo - fibra: (a) solo - barba e (b) solo - raque

Na Figura 5-104 são apresentadas as curvas de resistência à tração por compressão diametral (RTCD) obtidas para as misturas solo – 0,25% fibras raque (R), barba (B) e pena completa (PC). A partir destas curvas foi identificado que a ruptura da mistura acontecia em deformações próximas a 2% valor este semelhante ao registrado para o solo puro (Figura 5-90).

A partir destas curvas de resistência à tração foi também identificado em alguns casos uma recuperação de resistência entre 4% a 6% de deformação, essa taxa se amplia conforme se incrementava o teor de fibras, no entanto, sendo o desempenho da mistura no presente estudo condicionado a teores de fibra menores que 0,75% é possível identificar a taxa de recuperação de resistência na faixa supracitada.

Dessa forma, a taxa de deformação 5% foi escolhida como deformação de análise da resistência residual.

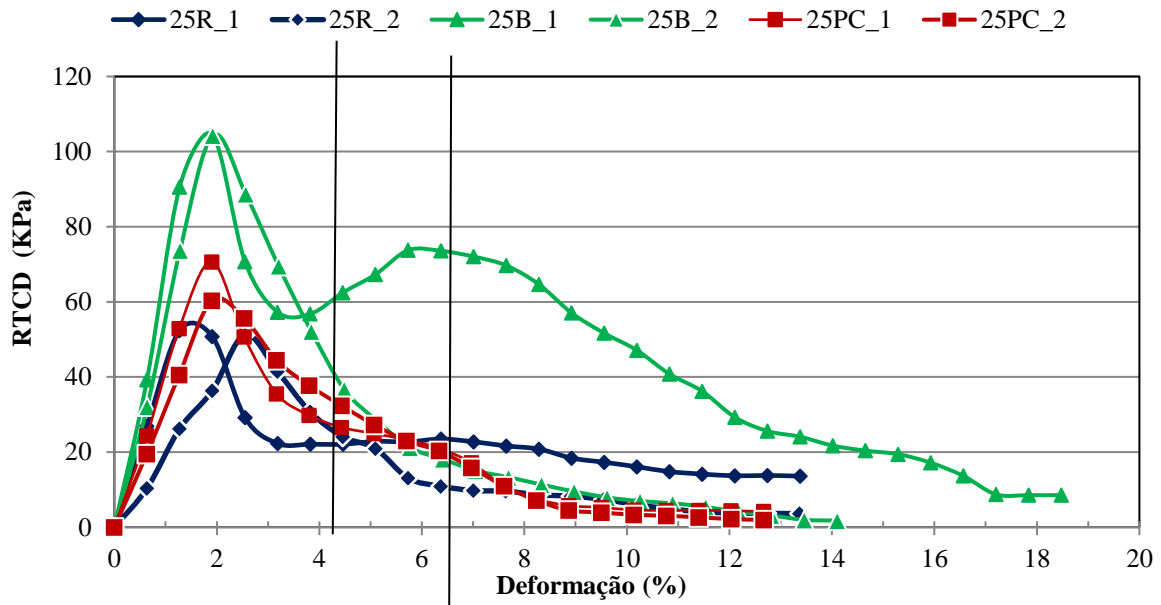


Figura 5-104 – Influência da deformação na RTCD de misturas solo – 0,25% fibra

Na Figura 5-105 apresenta-se a análise da resistência residual (a) comparada à resistência à tração máxima (b) obtida por compressão diametral (RTCD) em função de  $pF/e$  para as misturas solo-fibra considerando-se o teor de fibras. Nestes gráficos, a cor preta corresponde a 0,25% de fibras, a cor vermelha a 0,50% e a cor preta a 0,75%. Os resultados em função do tipo de fibra são apresentados na Figura 5-105 (c) em termos de resistência residual e na Figura 5-105 (d) em termos de resistência máxima. Nestes gráficos a cor azul corresponde à raque (R), a cor preta à barba (B) e a cor vermelha à pena completa (PC).

Observando-se as Figura 5-105 (a) e (b) verifica-se que embora a influência do teor de fibras não seja evidenciado com clareza para os valores máximos de RTCD (b), para os valores residuais (a) se observa que os valores obtidos para 0,50% e 0,75% de fibras são superiores aos obtidos para 0,25% de fibras não se percebendo diferenças perceptíveis entre 0,50% e 0,75% de fibras. De modo semelhante não se percebe diferenças significativas entre as RTCD máximas obtidas para a raque (R), barba (B) e pena completa (PC) (d), enquanto para as resistências residuais observa-se a tendência dos valores aumentarem ao passar da raque para a barba e desta para a pena completa. Cabe destacar que os símbolos preenchidos com amarelo correspondem as misturas solo – cal

sendo que apenas a mistura com 4% de cura apresentou resistência residual aos 90 dias de cura em campo.

Comparando-se os resultados de RTCD residuais ((a) e (c)) com os máximos obtidos ((b) e (d)), percebe-se ainda, uma maior dispersão nos resultados residuais. Tal constatação se por um lado aponta para heterogeneidades ligadas ao teor, orientação e distribuição das fibras nas zonas de mobilização por outro coloca em evidência que as fibras atuam propiciando certa resistência a tração residual.

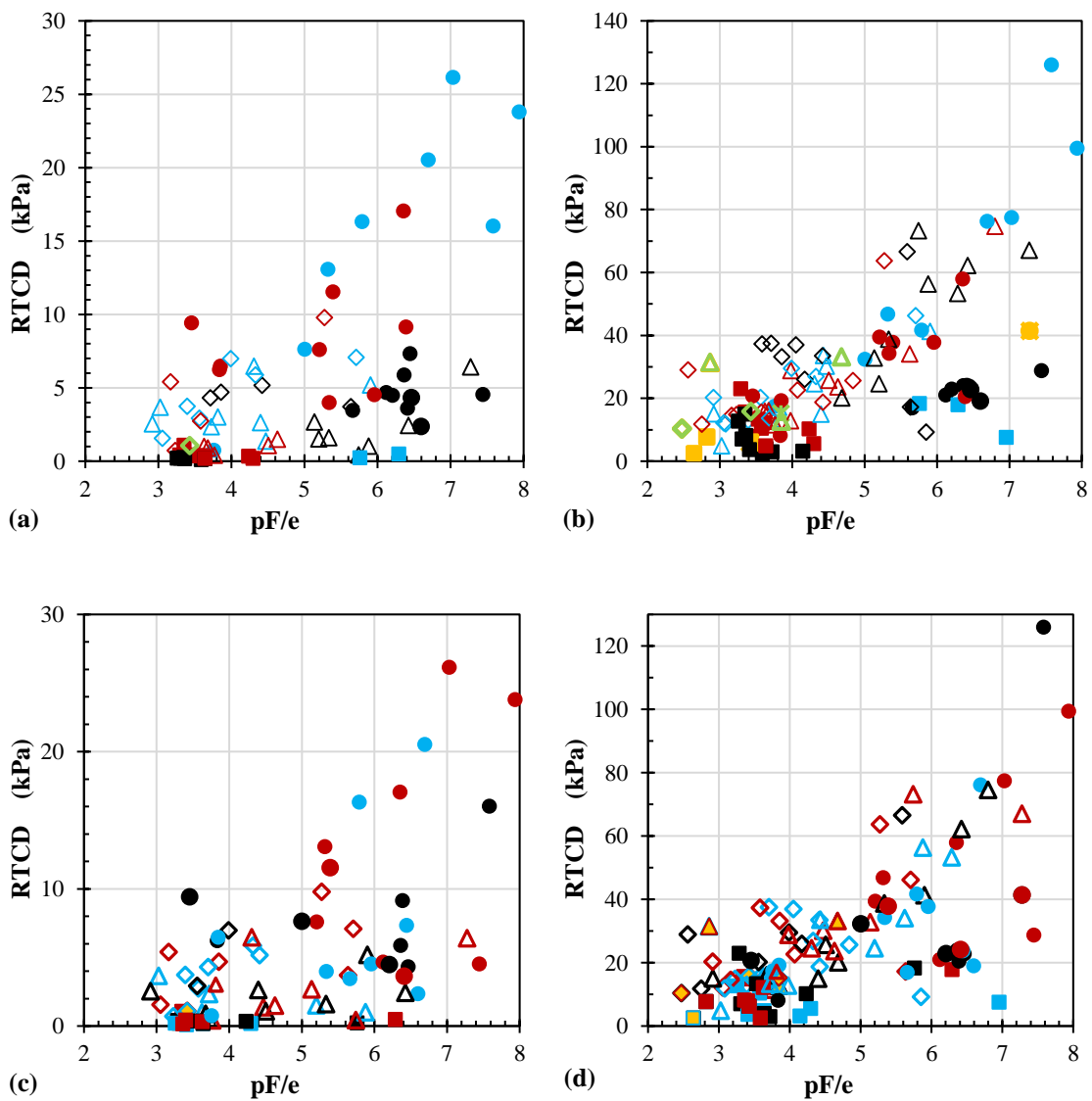


Figura 5-105 - Influência do teor (a) e (b) e do tipo de fibra (c) e (d) na RTCD

As Figura 5-106 (a) e (b) apresentam respectivamente os resultados de RTCD residuais em função de pF/e considerando-se deformações de 5% para as misturas de solo – cal CH-I (4%, 6%, 10%) – fibras (0,25%, 0,50% e 0,75% das fibras raque, barba e pena completa) em função do teor de cal (azul – 4%, vermelho – 6%, preto – 10%) e do tipo de cura (preto – cura em laboratório, vermelho – cura em campo). Nestes gráficos não fica clara a influência do teor de cal sobre a resistência residual (a) e os resultados obtidos para a cura em campo (b) tendem a serem superiores aos obtidos para a cura em laboratório.

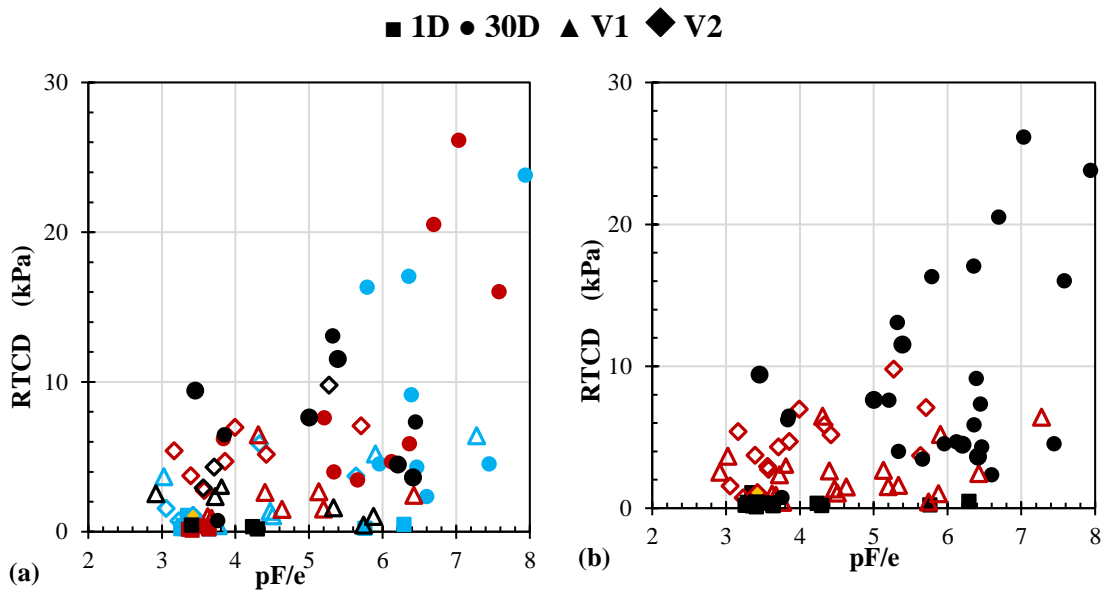


Figura 5-106 - RTCD residual em função de pF/e: (a) em função do teor de cal CH-I; (b) em função do tipo de cura

#### 5.14.4 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL COM CONSIDERAÇÃO MULTIPARAMÉTRICA

Os resultados apresentados neste item 5.14 apontam para a necessidade de se integrar os diferentes fatores (teor de fibras, teor de cal, sucção, porosidade e umidade) nas análises dos resultados, pois nas análises destes fatores de modo independente os demais fatores interferem nos resultados e prejudicam as análises.

Esta análise complementar é iniciada por meio da plotagem dos resultados de e.pF versus o grau de saturação de modo a se verificar a variabilidade dos resultados no conjunto de

ensaios (Figura 5-107). Cabe lembrar que nesta análise “e” é o índice de vazios, pF é logarítmico da sucção em centímetros de coluna de água e Sr o grau de saturação.

Cabe destacar que Camapum de Carvalho e Leroueil (2004) mostraram que solos apresentando diferentes índices de vazios e distribuição de poros similar tendem a se agruparem em uma mesma tendência. Esta figura mostra que o conjunto de resultados se enquadram em quatro tendências distintas apontando para diferenças nas distribuições de poros. Considerando-se todos os pontos (80) com a exclusão de seis deles que destoavam em demasia da tendência geral mas que estão indicados na figura, observa-se uma correlação satisfatória entre e.pF e o grau de saturação (Sr).

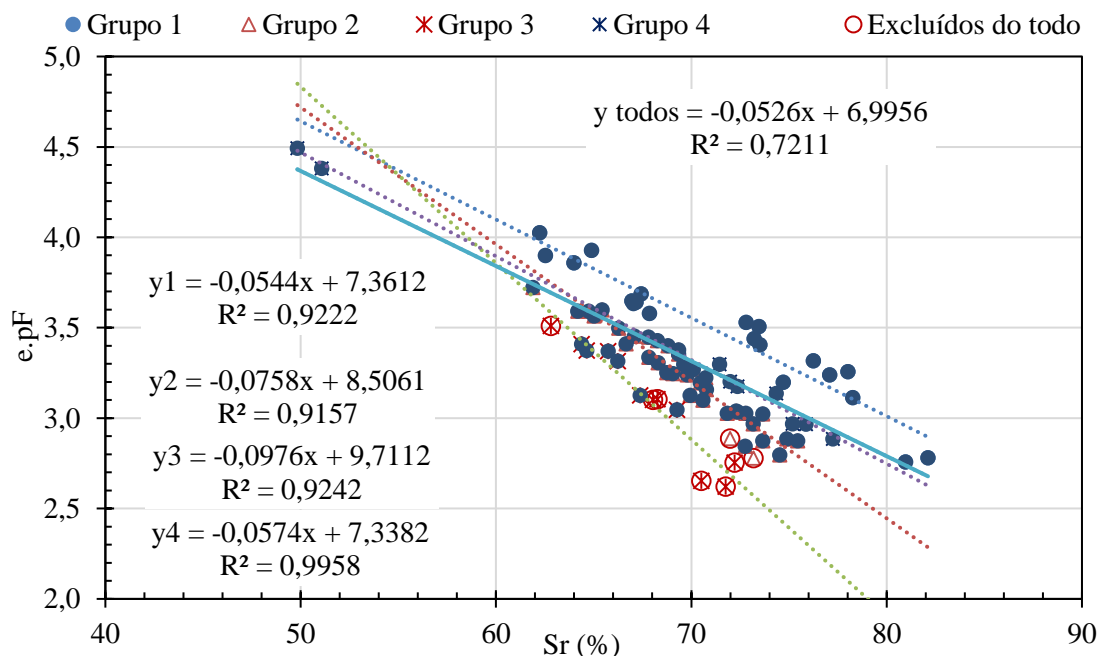


Figura 5-107 – Relação e.pF x Grau de saturação (%)

Considerando-se que a cal poderia estar interferindo na distribuição de poros do solo optou-se por analisar os resultados introduzindo uma correção de pF proporcional ao teor de cal. Esta correção foi realizada deduzindo-se de e.pF o valor de pF multiplicado pelo teor de cal dividido por 100, ou seja, 0,04, 0,06 e 0,1.

Os resultados obtidos mantendo-se a mesma exclusão de pontos da Figura 5-107 indicaram uma melhoria significativa na correlação com o grau de saturação considerando-se a globalidade dos pontos (Figura 5-108) o que indica a necessidade de

se considerar esse efeito da cal na sucção que intervém no comportamento mecânico do solo.

Certamente as fibras também devem exercer alguma influência da distribuição de poros das misturas, mas a análise deste efeito requer um maior número de resultados e análises microestruturais mais detalhadas, o que é evidente, não seria dispensável no caso da cal.

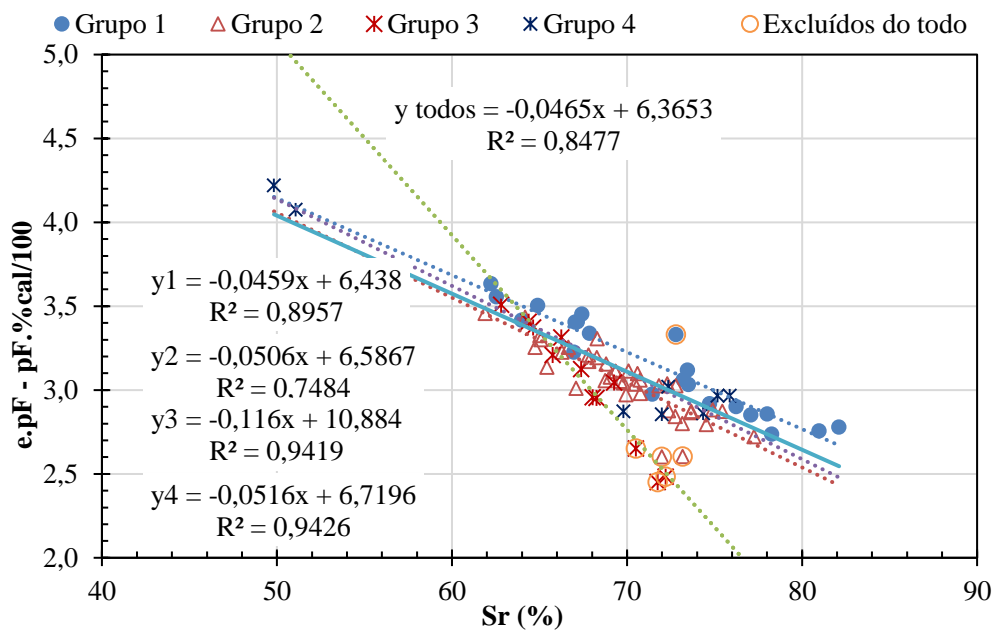


Figura 5-108 – análise (e.pF – pF.%cal/100) x Grau de saturação (%)

Considerando-se a relação existente entre e.pF e o grau de saturação para o conjunto de resultados assim como a interferência da cal nos mesmos optou-se por analisar o conjunto de resultados de RTCD considerando-se a sucção, o índice de vazios, o teor de fibras, o teor de cal e o teor de umidade.

A Figura 5-109 apresenta a RTCD em função de  $(pF \cdot (1 + \%F/10) \cdot (1 + \%cal/100)) / (e \cdot w)$ . Nesta equação “pF” é logaritmo da sucção em centímetros de coluna de água, “F” é o teor de fibras em porcentagem, “e” o índice de vazios e “w” o teor de umidade em porcentagem.

Observa-se nesta figura que os resultados se agruparam em duas tendências, uma para os três teores de cal e teores de fibra 0,5% e 0,75% e outra para o solo puro, misturas solo-fibra e misturas solo-fibra-cal considerando-se os três teores de cal e 0,25% de fibras.

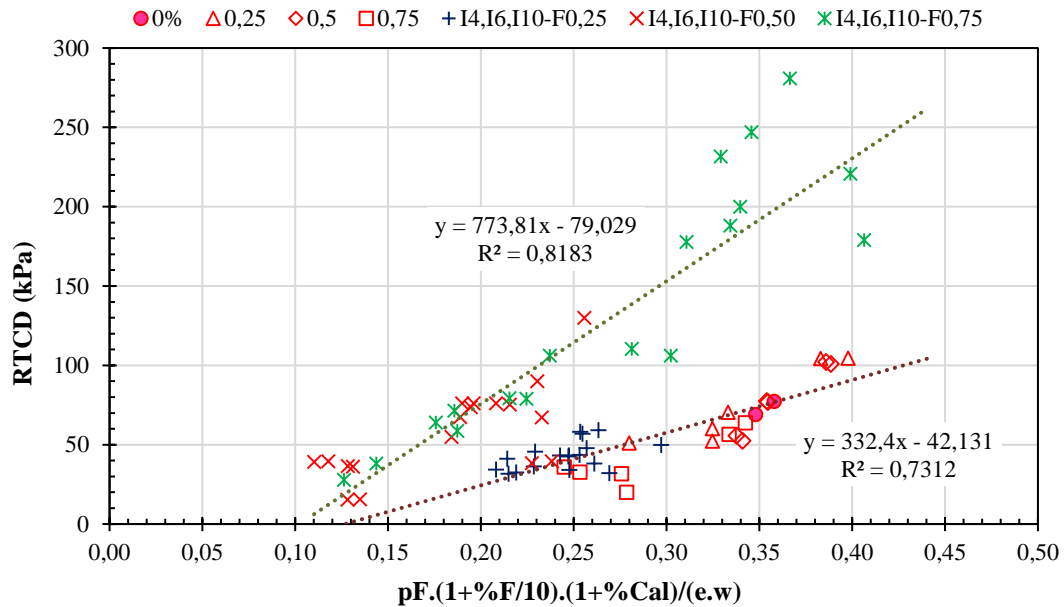


Figura 5-109 – RTCD x pF.(1+%F/10).(1+%cal/100)/(e.w)

Com base nas Figura 5-108 e Figura 5-109 estimou-se os valores de RTCD considerando-se o impacto da influência do teor de fibra (Figura 5-110), do teor de cal (Figura 5-111), da sucção matricial (Figura 5-112), do índice de vazios (Figura 5-113), do teor de umidade (Figura 5-114) e do grau de saturação (Figura 5-115) na RTCD.

Considerou-se nos cálculos das estimativas:

- (a) Para o teor de fibra –  $e = 0,7$ ;  $w = 18\%$ ; teor de cal 0, 4%, 6% e 10%;
- (b) Para o teor de cal –  $e = 0,6$  e  $0,7$ ;  $w = 20\%$ ; teor de fibras = 0, 0,25%, 0,50% e 0,75%
- (c) Para a sucção matricial ( $u_a - u_w$ ) –  $e = 0,7$ ;  $w = 16\%$ , 18%, 20%, 22% e 24%; teor de fibras = 0,25% e 0,50%
- (d) Para o índice de vazios ( $e$ ) –  $w = 18\%$ ; teor de fibras = 0,25% e 0,50%; teor de cal = 0, 4%, 6% e 10%
- (e) Para o teor de umidade ( $w$ ) –  $e = 0,7$ ; teor de fibras = 0,25% e 0,50%; teor de cal = 0, 4%, 6% e 10%
- (f) Para o grau de saturação ( $S_r$ ) –  $e = 0,7$ ;  $w = 16\%$ , 18%, 20%, 22% e 24%; teor de fibras = 0,25% e 0,50%

A partir das estimativas apresentadas nas Figuras (a), (b), (c), (d), (e) e (f) observa-se respectivamente:

- 1) Ocorre uma diferença significativa na RTCD ao se passar de 0,25% de fibra para 0,50% de fibra. Os resultados mostram ainda que a RTCD aumenta com o teor de cal (a);
- 2) Ocorre uma diferença significativa na RTCD ao se passar de 0,25% de fibra para 0,50% de fibra e a RTCD aumenta progressivamente com o teor de cal (b);
- 3) Persiste a diferença significativa na RTCD ao se passar de 0,25% de fibra para 0,50% de fibra e a RTCD aumenta progressivamente com o aumento da sucção (c);
- 4) Ocorre uma diferença significativa na RTCD ao se passar de 0,25% de fibra para 0,50% de fibra e as variações da RTCD com o índice de vazios se ampliam com a elevação do teor de cal (d);
- 5) Ocorre uma diferença significativa na RTCD ao se passar de 0,25% de fibra para 0,50% de fibra e ela diminui progressivamente com o aumento do teor de umidade e de modo mais significativo para 0,50% de fibra (e);
- 6) Ocorre uma diferença significativa na RTCD ao se passar de 0,25% de fibra para 0,50% de fibra e as variações da RTCD com o aumento do grau de saturação é similar as observadas em função das variações do teor de umidade (f).

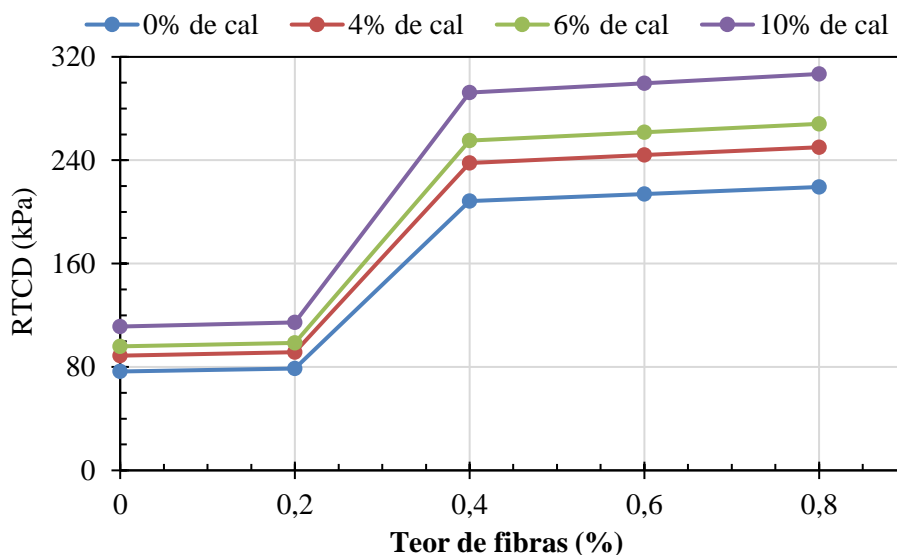


Figura 5-110 – Estimativa da RCTD sob influência do teor de fibras (a)



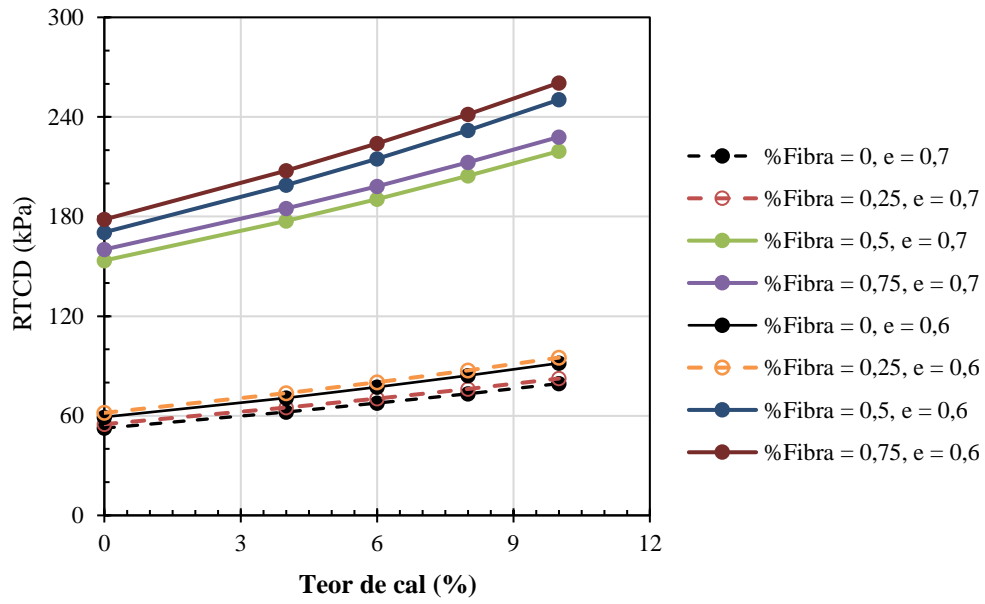


Figura 5-111 – Estimativa da RCTD sob influência do teor de cal (b)

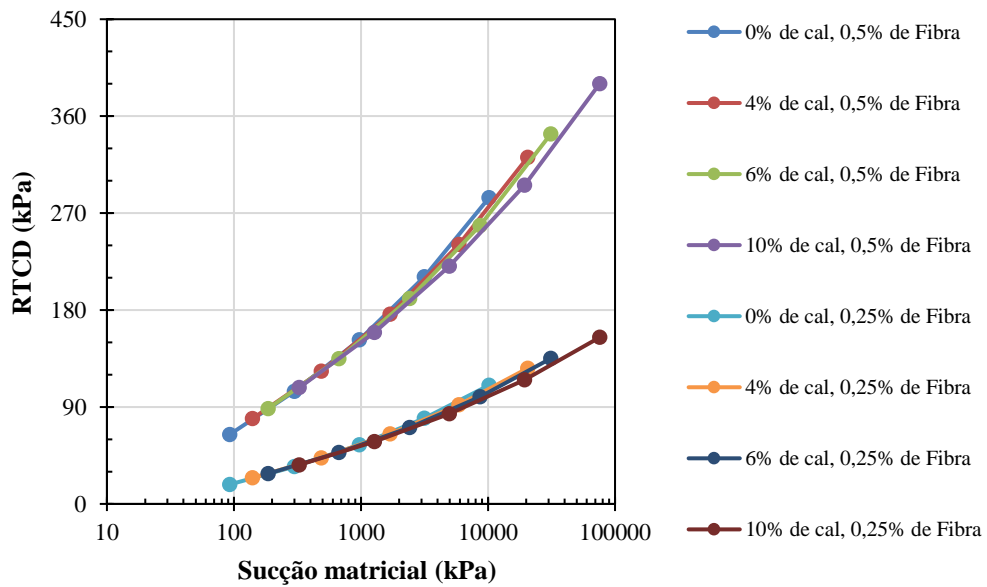


Figura 5-112 – Estimativa da RCTD sob influência da sucção (c)

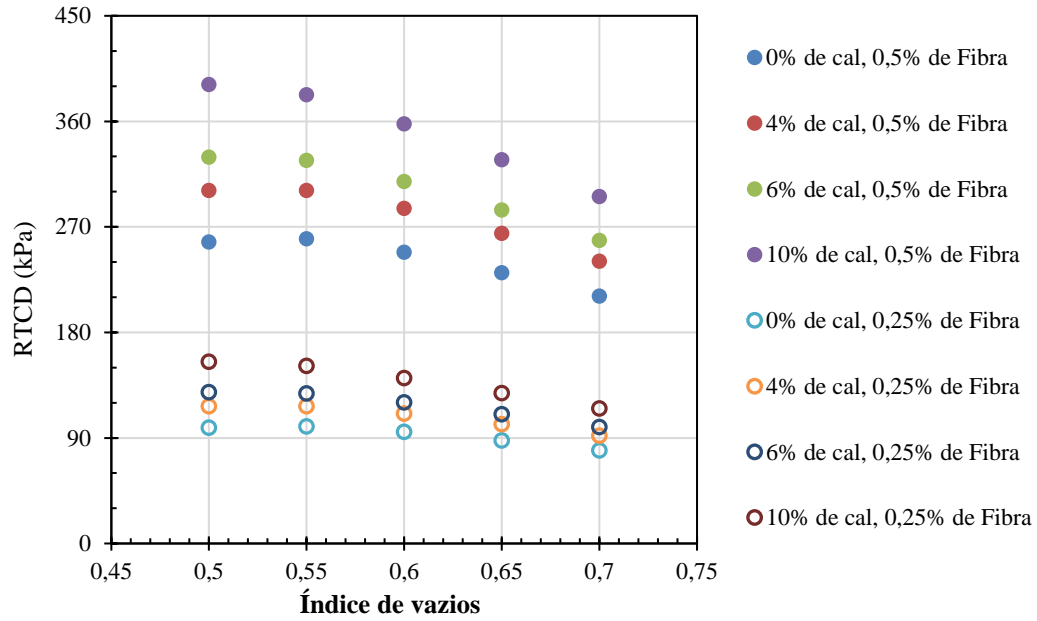


Figura 5-113 – Estimativa da RCTD sob influência do índice de vazios (d)

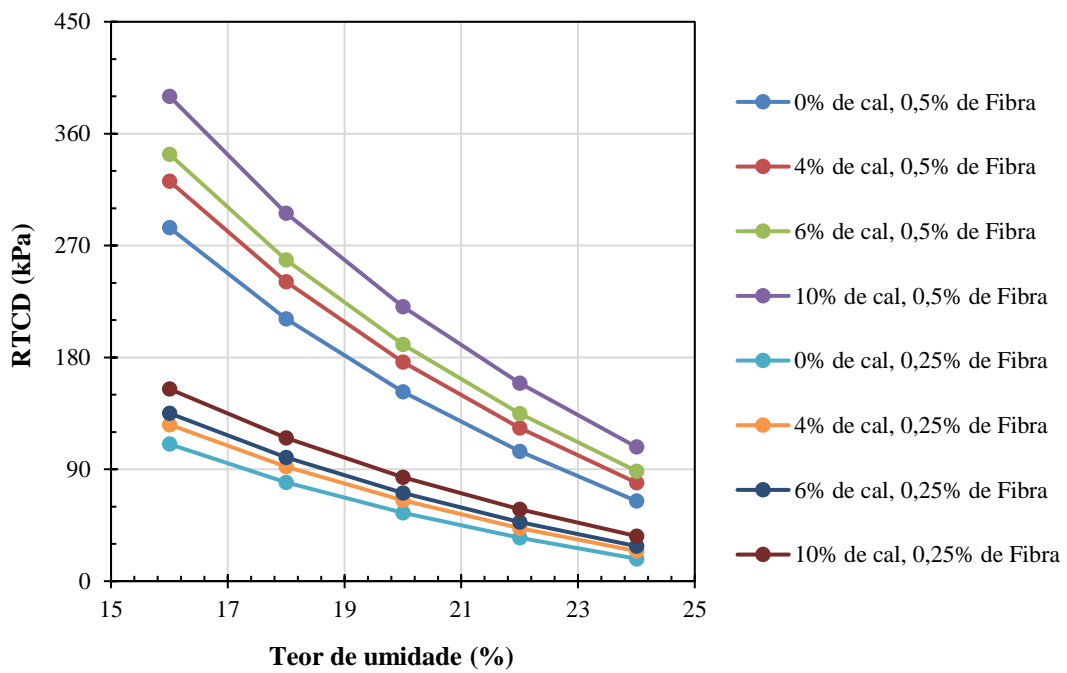


Figura 5-114 – Estimativa da RCTD sob influência do teor de umidade (e)

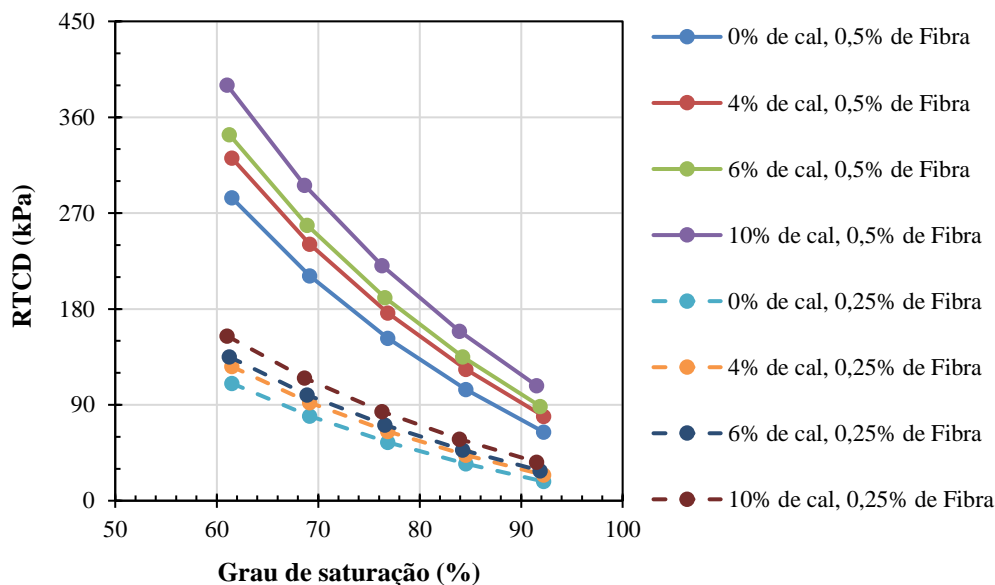


Figura 5-115 – Estimativa da RCTD sob influência do grau de saturação (f)

## 5.15 ANÁLISE DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA DAS MISTURAS ESTUDADAS

### 5.15.1 AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA FRENTE A ALGUNS MODELOS DE ANÁLISE

Para análise dos modelos comportamentais do módulo de resiliência, foram escolhidos sete casos de melhor desempenho. As características de compactação das misturas ensaiadas encontram-se na Tabela 5-7. Observa-se nos resultados apresentados nesta tabela que a incorporação da cal, da fibra e da cal mais fibra levaram as misturas a valores mais elevados de índice de vazios em relação ao solo natural, apresentando, porém, graus de saturação similares.

Nas misturas contendo cal o aumento do índice de vazios está provavelmente atrelado à contribuição da sucção osmótica proporcionada pela cal para a resistência do solo ao processo de compactação. Também no sentido de aumentar a resistência ao processo de compactação estão a atuarem as fibras proporcionando um aumento no índice de vazios.

Tabela 5-7 - Parâmetros característicos das amostras selecionadas para análise de módulo de resiliência  
– condição inicial

<b>Corpo de prova</b>	<b><math>\gamma_{d\text{máx}}</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\omega</math> (%)</b>	<b>e</b>	<b>Sr (%)</b>
SP	16,37	19,9%	0,64	85,1%
25PC	15,89	21,9%	0,68	84,0%
50PC	15,93	22,0%	0,69	84,2%
4I	15,85	21,0%	0,69	85,0%
6I	15,64	22,0%	0,69	85,1%
10I	14,91	23,4%	0,70	83,2%
4I25PC	15,69	22,2%	0,71	85,1%

SP = solo puro; 25PC; 50 PC = solo pena completa 0,25% e 0,50%; 4I, 6I e 10I = solo-cal com teores de cal 4%, 6% e 10% e 4I25PC = solo - cal 4% – pena completa 0,25%;  $\gamma_{d\text{máx}}$  = peso específico aparente seco? máximo;  $\omega$  = umidade ótima e S = grau de saturação.

Os resultados obtidos dos três corpos de prova no ensaio triaxial à cargas repetidas, foram avaliados segundo os quatro modelos clássicos conhecidos na literatura geotécnica. Os resultados estão apresentados nas Tabela 5-8 e Tabela 5-9.

O parâmetro de validação dos modelos foi o coeficiente de regressão  $R^2$ , sendo que valores menores que 0,70 foram descartados, situação em que se enquadraram os resultados do modelo “simples” dependente diretamente da tensão confinante e tensão desvio e que foram considerados como não representativos dos materiais analisados.

Destaca-se que o ideal seriam valores de  $R^2$  maiores que 0,90 que indicam pouca dispersão dos dados.

Tabela 5-8 – Constantes experimentais das amostras calculadas para análise dos modelos clássicos de Módulo de Resiliência, tensão confinante e tensão desvio

Mistura	Modelo					
	Mr = f( $\sigma_3$ )			Mr = f( $\sigma_D$ )		
	Em função da Tensão confinante?			Em função da Tensão desvio?		
	k <sub>2</sub>	k <sub>1</sub>	R <sup>2</sup>	k <sub>2</sub>	k <sub>1</sub>	R <sup>2</sup>
SP	0,22	42,06	0,48	0,26	32,04	0,66
25PC	0,38	33,69	0,61	0,20	63,84	0,17
50PC	0,20	33,38	0,56	0,21	28,46	0,67
4I	0,33	55,17	0,76	0,22	77,49	0,35
6I	0,18	50,27	0,41	0,22	38,54	0,62
10I	0,21	41,99	0,39	0,27	29,53	0,63
4I25PC	0,26	29,29	0,58	0,26	27,01	0,55

Mr = módulo de resiliência;  $\sigma_3$ =tensão confinante;  $\sigma_D$  = tensão desvio; SP = solo puro; 25PC e 50PC= solo 0,25% e 0,50% fibra (pena completa); 4I, 6I e 10I = solo 4%, 6% e 10% cal; 4I25PC = solo 4% cal 0,25% fibra (pena completa); k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub> e k<sub>3</sub> = constantes de regressão; R<sup>2</sup> = coeficiente de correlação

Os modelos composto e universal, cujos resultados são apresentados na Tabela 5-9, apresentaram os coeficientes de regressão maiores que 0,60, no entanto, não alcançaram 0,90. Analisando os modelos composto e universal foram selecionados como representativos aqueles que apresentaram maiores valores de R<sup>2</sup>.

Tabela 5-9 – Constantes experimentais das amostras calculadas para análise dos modelos clássicos composto e universal de Módulo de Resiliência das misturas

modelo	Mr = f( $\sigma_3, \sigma_D$ )				Mr = f( $\theta, \tau_{oct}$ )				
	Código	k <sub>3</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>1</sub>	R <sup>2</sup>	k <sub>3</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>1</sub>	R <sup>2</sup>
SP		0,21	0,06	30,95	0,67	0,97	0,00	0,68	0,84
25PC		-0,20	0,53	44,37	0,68	-1,55	0,77	1,34	0,74
50PC		0,15	0,08	26,93	0,71	0,59	0,07	0,54	0,81
4I		-0,06	0,37	59,96	0,77	-0,49	0,46	1,59	0,73
6I		0,20	0,03	37,87	0,63	0,93	-0,03	0,73	0,81
10I		0,26	0,02	29,09	0,63	1,21	-0,06	0,65	0,83
4I25PC		0,13	0,16	24,27	0,65	0,65	0,12	0,58	0,73

Mr = módulo de resiliência;  $\sigma_3$ =tensão confinante;  $\sigma_D$  = tensão desvio;  $\theta$  = primeira invariante;  $\tau_{oct}$  = tensão octaédrica; SP = solo puro; 25PC e 50PC= solo 0,25% e 0,50% fibra (pena completa); 4I, 6I e 10I = solo

4%, 6% e 10% cal; 4I25PC = solo 4% cal 0,25% fibra (pena completa);  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  = constantes de regressão;  $R^2$  = coeficiente de correlação

Os modelos identificados na Tabela 5-10 oriundos da Tabela 5-9, correspondem a coeficientes de correlação entre 0,73 e 0,84, esses valores representam a melhor condição das misturas representando os materiais analisados, no entanto, o coeficiente de regressão não alcança 0,90 em nenhum dos casos, identificando-se assim possíveis outros fatores influentes nessa dispersão, por exemplo: baixa estabilidade dos agregados compondo o solo, ação da cal sobre a estabilidade dos agregados, ataque da cal às fibras, heterogeneidade na distribuição das fibras no solo, cisalhamento nos contatos fibra - solo.

As misturas, na maioria dos casos, foram melhor representadas pelo Modelo Universal proposto por Uzan e Witczak (1988), mediante o uso das invariantes do tensor de esforços: primeiro invariante de tensão ou tensão *bulk* ( $\theta$ ) e octaédrico ( $\tau_{oct}$ ).

Os resultados diferem dos indicados em Medina e Motta, (2015) que indicaram o modelo composto como mais representativo dos materiais arenosos e argilosos, de igual forma, difere dos resultados obtidos por Silva, *et al.*, (2016) que identificam o modelo simples dependente da tensão desvio como representativo deste tipo de solo.

Com base no apresentado e discutido estima-se que os modelos matemáticos dependam de fatores como nível de intemperismo sofrido pelo solo e que está associado dentre outros à profundidade de coleta do material e implica nas características estruturais e texturais dos solos, tornando com isso necessários mais estudos e ensaios para determinar os modelos representativos desses materiais compostos.

Destaca-se, por exemplo, que as dispersões acentuadas nos resultados podem estar atreladas a modificações de sucção e estrutura durante os ensaios, assim como à presença de agregados com baixa estabilidade frente a sollicitação e meios agressivos como mostrou ser a cal, requerendo assim, mais estudos.

Tabela 5-10 – Constantes experimentais das amostras calculadas para os modelos mais representativos das misturas

Mistura	$k_3$	$k_2$	$k_1$	$R^2$	Modelo
SP	0,97	0,00	0,68	0,84	universal
25PC	-1,55	0,77	1,34	0,74	universal
50PC	0,59	0,07	0,54	0,81	universal
4I	-0,06	0,37	59,96	0,77	composto
6I	0,93	-0,03	0,73	0,81	universal
10I	1,21	-0,06	0,65	0,83	universal
4I25PC	0,65	0,12	0,58	0,73	universal

SP = solo puro; 25PC e 50PC = solo 0,25% e 0,50% fibra (pena completa); 4I, 6I e 10I = solo 4%, 6% e 10% cal; 4I25PC = solo 4% cal 0,25% fibra (pena completa);  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  = constantes de regressão;  $R^2$  = coeficiente de correlação

A título de ilustração, as Figura 5-116, Figura 5-117, Figura 5-118 e Figura 5-119 apresentam respectivamente a dispersão dos pontos obtidos na modelagem das misturas solo puro (Modelo Universal), solo – 0,25% de pena completa (Modelo Universal), solo – 4% de cal CH-I (Modelo Composto) e solo – 4% de cal CH-I – 0,25% de pena completa. O tempo de cura para todos os casos foi de 24 horas.

A Figura 5-116 apresenta a dispersão de pontos do solo puro modelado com os parâmetros do modelo universal. Se identifica nesta figura que, na aplicação de solicitações menores (1º e 2º estágio), tanto a tensão desvio quanto a tensão confinante influenciaram de forma proporcional, no entanto, a grandes solicitações (3º estágio) destaca-se o predomínio da tensão desvio sobre a confinante apontando ser esse fator a causa de grandes deformações no material.

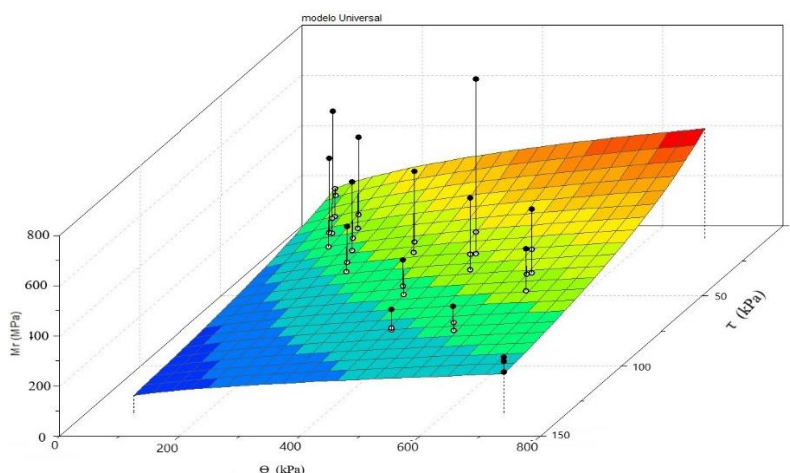


Figura 5-116 – Dispersão de pontos na modelo universal do módulo de resiliência do solo puro

No caso das misturas solo - fibra, Figura 5-117, a variação dos pontos em relação à figura anterior obtida para o solo puro indica que a fibra influencia de forma favorável no módulo de resiliência quando aplicadas solicitações menores e para cargas maiores tende a maiores dispersões.

O módulo resiliente tende a diminuir conforme se incrementa a tensão desvio sendo a influência da tensão confinante menor. O comportamento está aparentemente relacionado com a estrutura pouco rígida da pena que estaria trabalhando na dissipação de tensões.

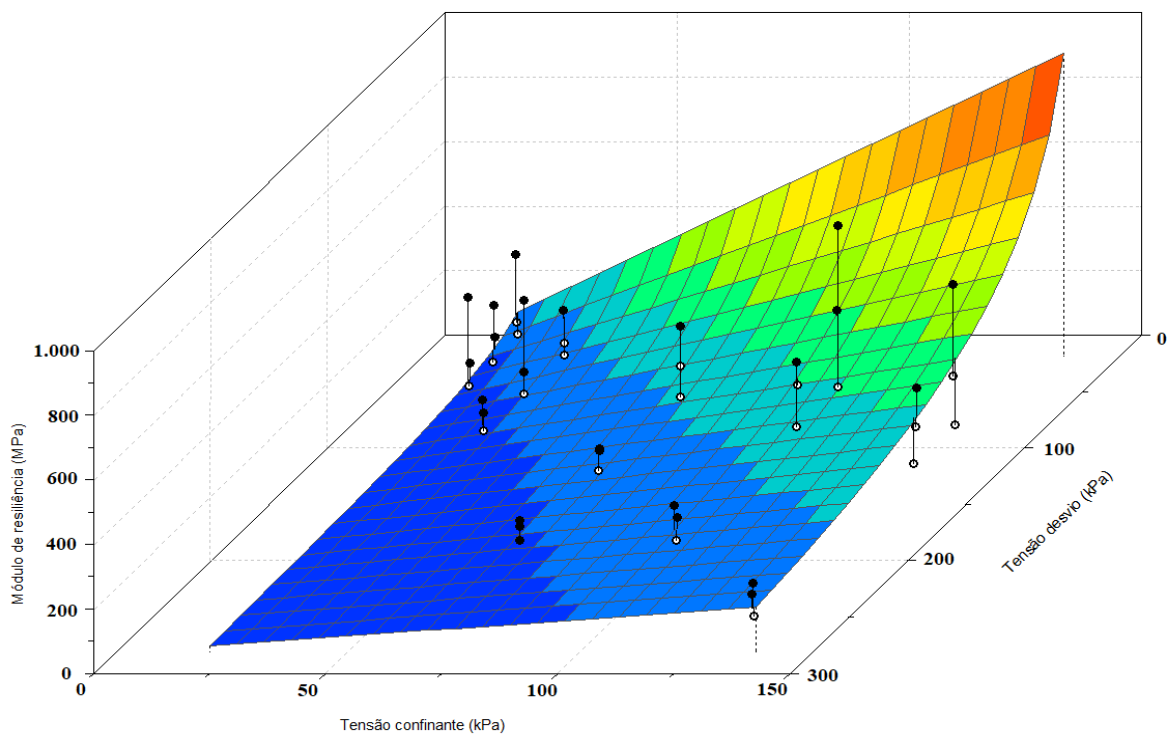


Figura 5-117 – Dispersão de pontos tensões aplicadas ensaio triaxial dinâmico solo - 0,25% pena completa

Considerando-se o modelo composto analisado com 0,74 de  $R^2$  apresenta-se na Figura 5-118 a análise das misturas solo – cal na qual se evidencia maior estabilidade da mistura mesmo para maiores solicitações o que provavelmente se deve ao fato da cal contribuir para o incremento da rigidez da estrutura. O valor inicial elevado do módulo de resiliência ante cargas menores da tensão desvio poderia estar relacionado com a estabilidade estrutural da mistura frente às mesmas no início do ensaio.



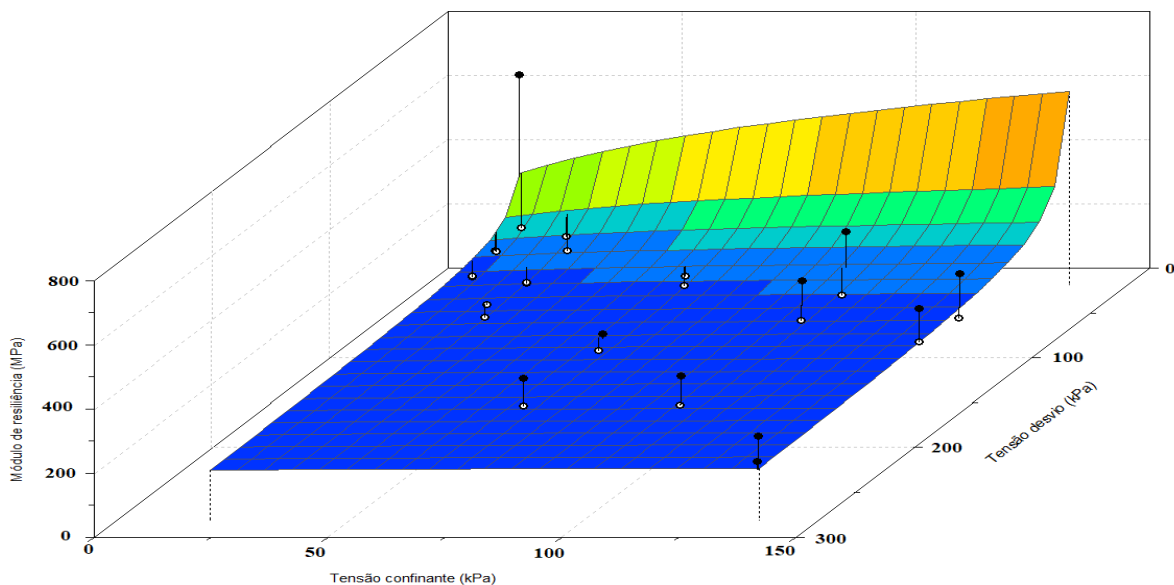


Figura 5-118 – Dispersão de pontos tensões aplicadas ensaio triaxial dinâmico solo – 4% cal

Nas misturas solo – fibra - cal (Figura 5-119), a fibra tende a quebrar a rigidez adquirida devido à adição de cal à estrutura fazendo com que o modelo se aproxime ao do solo puro. Se observa maior influência da tensão em relação ao incremento do módulo resiliente comparado com a tensão confinante, o comportamento é semelhante das misturas solo fibra.

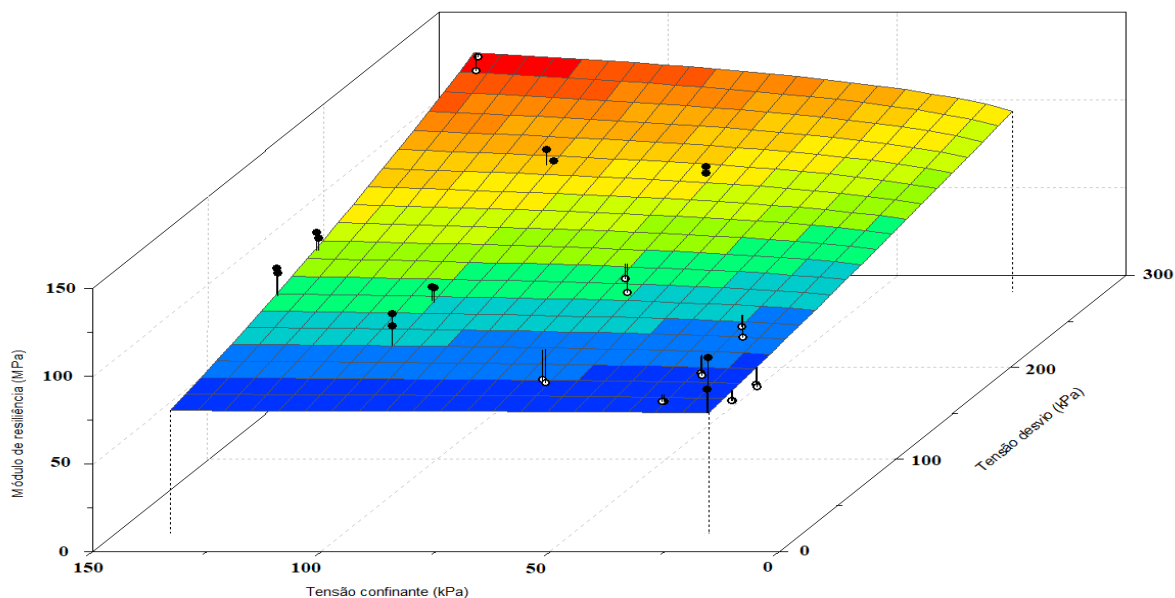
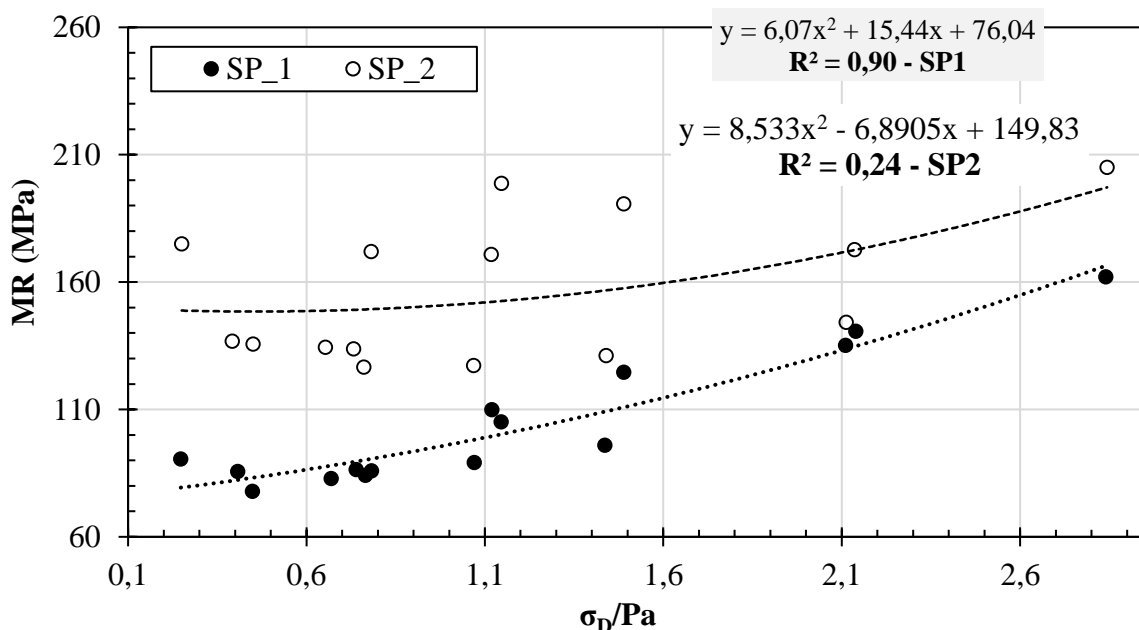


Figura 5-119 – Dispersão de pontos tensões aplicadas ensaio triaxial dinâmico solo – 4% cal – 0,25%  
pena completa

### 5.15.2 INFLUÊNCIA DA TENSÃO DESVIO E CONFINANTE NO MÓDULO DE RESILIÊNCIA DO SOLO

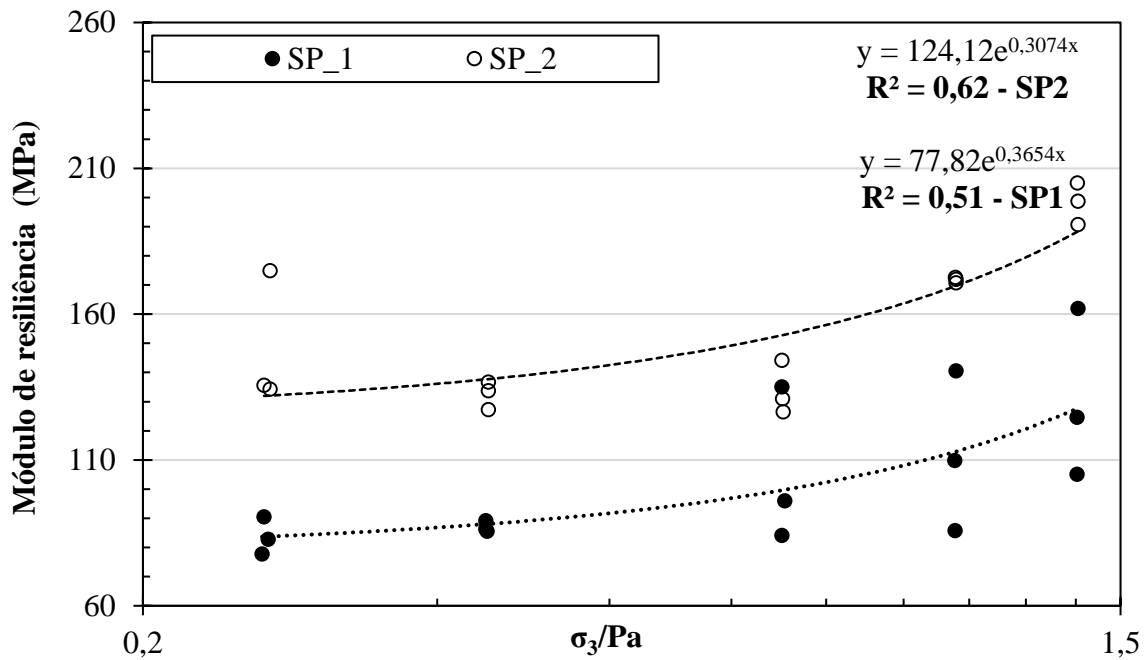
A Figura 5-120 e Figura 5-121 apresentam respectivamente os resultados dos ensaios triaxiais de carga repetida para determinação do Módulo de Resiliência em função da tensão desvio e da tensão confinante. Os resultados foram obtidos para dois corpos de prova preparados com o solo puro, sendo os mesmos preparados nas mesmas condições de compactação e armazenados em uma câmara climatizada até a realização dos ensaios. Apesar destes cuidados ambas as figuras apontam para diferenças de comportamento entre os dois corpos de prova ensaiados. Embora se tenha procurado eliminar a influência de fatores externos no comportamento pequenas diferenças estruturais entre os corpos de prova ou mesmo de temperatura durante os ensaios podem ter gerado tais diferenças.

Percebe-se, por exemplo, na Figura 5-120 que a variabilidade dos resultados obtidos para o corpo de prova SP2 ( $R^2 = 0,24$ ) em função da tensão desvio foi bem maior que a registrada para o corpo de prova SP1 ( $R^2 = 0,90$ ). Embora menor a diferença registrada entre os dois corpos de prova ela persiste na análise dos resultados de módulo de resiliência em função da tensão confinante (Figura 5-121).



SP = solo puro,  $\sigma_D/P_a$  = relação tensão desvio/pressão atmosférica; MR = módulo de resiliência

Figura 5-120 – Influência da tensão desvio na variação do Módulo de Resiliência do solo puro



SP = solo puro e  $\sigma_3/P_a$  = relação tensão confinante/pressão atmosférica

Figura 5-121 – Influência da tensão confinante na variação do Módulo de Resiliência do solo puro

Considerando-se a existência de tal variabilidade de comportamento registrada para o solo puro optou-se por calcular as discrepâncias de resultados com base em três ensaios. As discrepâncias relativas entre os resultados dos ensaios realizados sobre três corpos de prova, foram então calculadas a partir da diferença entre o maior valor de MR e o menor valor de MR dividida pela média dos três resultados conforme apresentado por Cunto, (1998).

A Tabela 5-11 apresenta valores de discrepância determinados para algumas misturas analisadas incluindo-se o solo puro. Verifica-se nestes resultados que a discrepância não guarda uma relação direta com os componentes das misturas, assim, por exemplo, no solo puro ela foi de 40,85% e no solo contendo 0,25% de fibra pena completa ela foi de 49,01% o que poderia levar a pensar que o solo por si só apresenta muita discrepância e a fibra a incrementa. No entanto, na mesma mistura solo – fibra contendo 4% de cal a discrepância cai para 1,23% o que poderia indicar que a cal diminui tal discrepância, porém, na mistura solo – 4% de cal ela passa a 13,28% e na mistura solo – 6% de cal ela atinge 36,11% mostrando assim que a discrepância é certamente função de outros fatores que não são a

simples composição das misturas. No geral é possível admitir que tanto a cal como as fibras contribuem para a redução das discrepâncias.

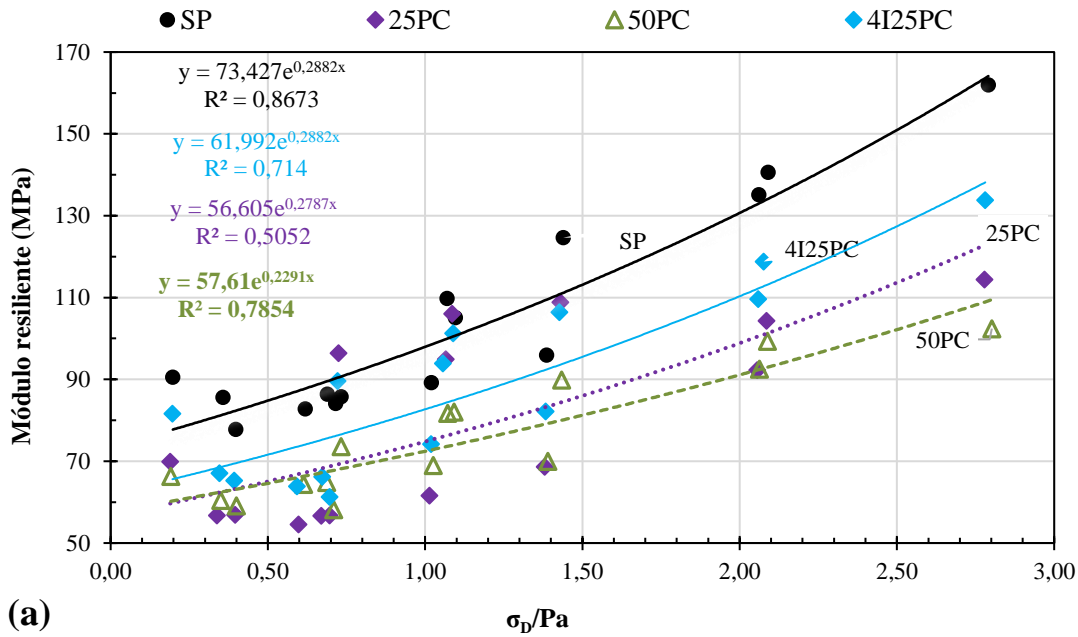
Tabela 5-11 – Discrepância calculada a partir dos corpos de prova dos modelos de Módulo de Resiliência das misturas

<b>Código</b>	<b>Discrepância relativa</b>
SP	40,85%
25PC	49,01%
50PC	9,32%
4I	13,28%
6I	36,11%
10I	4,83%
4I25PC	1,23%

### **5.15.3 ANÁLISE DA RELAÇÃO TENSÃO DESVIO/PRESSÃO ATMOSFÉRICA COM O MÓDULO DE RESILIÊNCIA APLICADO ÀS MISTURAS SELECIONADAS – ESTADO INICIAL**

Na busca de melhor entendimento de como a variação das tensões aplicadas aos corpos de prova influencia o Módulo de Resiliência do solo e misturas analisadas foram elaboradas as Figura 5-122 e Figura 5-123 respectivamente para misturas solo – fibras pena completa (PC) e solo – 0, 25% de fibra PC – 4% de cal e solo – cal apresentando a influência da relação tensão desvio/pressão atmosférica ( $\sigma_D/Pa$ ) no módulo de resiliência. Em ambas as figuras foram adicionados os resultados obtidos para o solo puro.

A Figura 5-122 apresenta em relação ao solo puro a influência das fibras e das fibras mais cal no módulo de resiliência obtido em função da relação tensão desvio/pressão atmosférica ( $\sigma_D/Pa$ ). Os valores de módulo de resiliência obtidos para o solo puro forma superiores aos obtidos para as misturas sendo que nesta figura sobressai que a incorporação e o aumento do teor de fibras tendem a piorar o comportamento e a incorporação de 4% de cal tendeu a minimizar a perda.

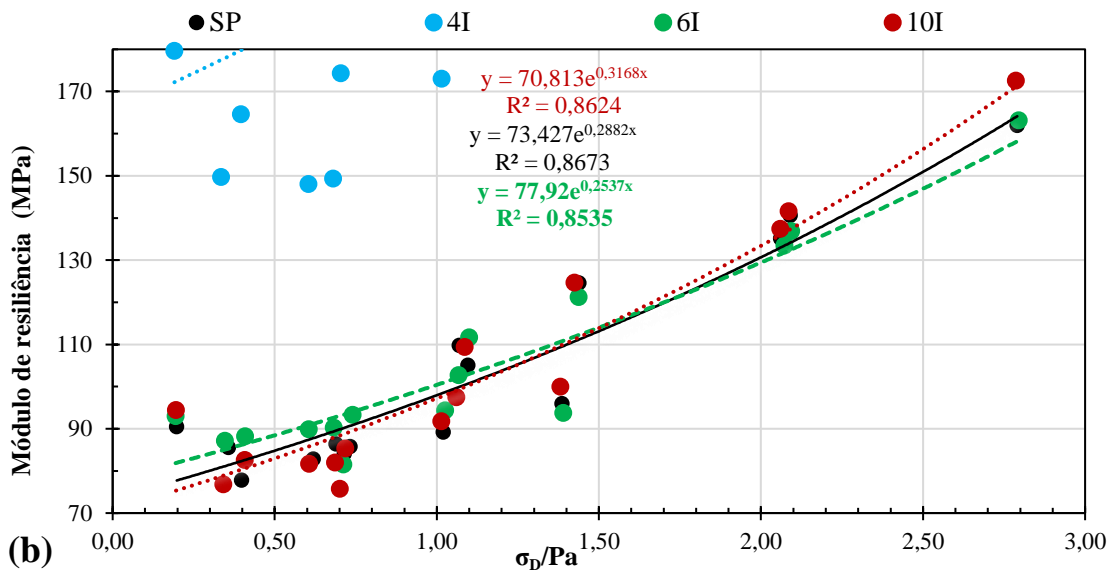


SP = solo puro, 25PC e 50PC = solo pena completa nos teores de 0,25% e 0,50%, I = cal tipo CH – I, 4 o teor de cal em porcentagem

Figura 5-122 – Influência da tensão desvio no MR misturas solo fibra e solo fibra cal

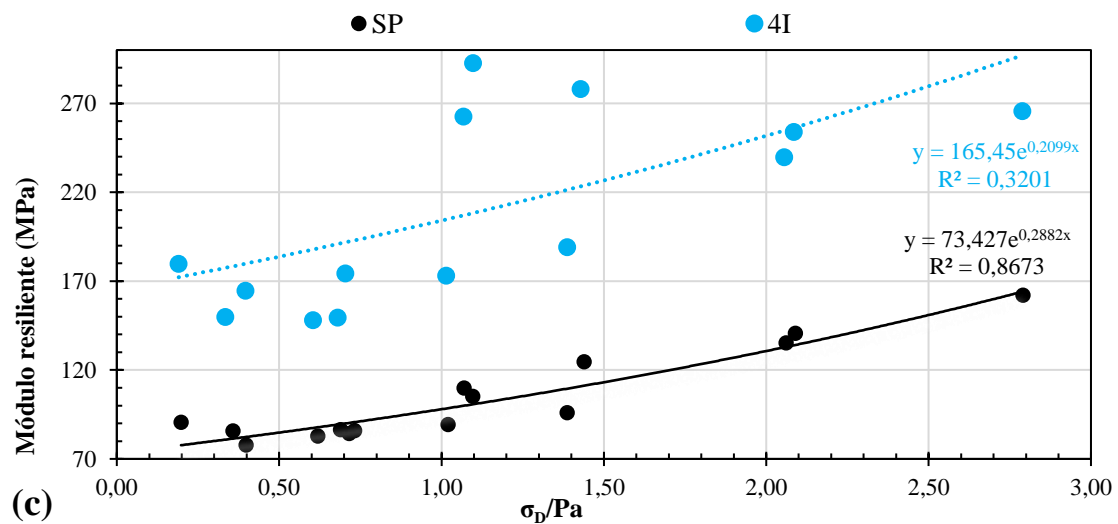
Ao se analisar a influência da cal no comportamento das misturas solo cal em relação ao solo puro a Figura 5-123 mostra que o Módulo de Resiliência do solo praticamente não é afetado com a incorporação de 6% e 10% de cal, ampliando-se, no entanto, ao se incorporar 4% de cal o que corrobora com a melhoria de comportamento verificada na Figura 5-122 quando se incorporou 4% de cal à mistura solo – 0,25% de fibras.

Destaca-se que estes resultados foram obtidos logo após as misturas e neste caso a cal participa quimicamente das trocas catiônicas e das alterações de pH e enquanto as trocas catiônicas geradas para 4% de cal podem estarem sendo no curto prazo favoráveis à melhoria de comportamento o incremento no pH gerado quando da incorporação de 6% e 10% de cal podem estar agindo na instabilização de agregados e piora do comportamento.



SP = solo puro, I = cal tipo CH – I, 4, 6 e 10 os teores de cal em porcentagem.

Figura 5-123 – Influência da tensão desvio no MR misturas solos – cal



SP = solo puro, 25PC e 50PC = solo – pena completa nos teores de 0,25% e 0,50%, I = cal tipo CH – I, 4, 6 e 10 os teores de cal em porcentagem.

Figura 5-124 – Influência da tensão desvio no MR misturas de solo – cal 4%

#### 5.15.4 ANÁLISE DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA PARA O SOLO PURO E MAIS OITO MISTURAS CONTENDO FIBRAS, CAL E CAL E FIBRAS

A análise de resultados de módulo de resiliência apresentada neste item limitou-se ao solo puro e mais oito misturas: solo – 0,25%, 0,50% e 0,75% da fibra pena completa; solo – 4%, 6% e 8% de cal; solo – 4% e 10% de cal – 0,25% de fibra pena completa. Esta opção

se deu devido ao fato de que estas misturas foram as que apresentaram melhor preservação e resistência à compressão dos corpos de prova durante a cura em campo, por se tratar das melhores situações de permanência em campo.

As Figura 5-125, Figura 5-126 e Figura 5-127 apresentam respectivamente para as misturas solo – fibra pena completa (PC), solo – cal CH-I e solo – fibra PC – cal CH-I os módulos de resiliência obtidos logo após homogeneização e compactação do solo puro e das misturas, após 30 dias de cura em laboratório e após 60 e 90 dias de cura em laboratório e no campo permitindo assim a avaliação do tempo e condição de cura no comportamento das misturas. Nas três figuras foram incluídos os resultados obtidos para o solo puro no diferentes tempos e condições de cura que possíveis as determinações.

O valor do módulo de resiliência do solo puro obtido em laboratório foi de 130 MPa após um dia de compactado e 143 MPa com 30 dias de cura em laboratório, apontando para pequena alteração provavelmente devida a recuperação tixotrópica ou pequenas diferenças no estado do solo em termos de umidade e índice de vazios. Estes valores são característicos dos solos da região (Preussler 2007). Os resultados se aproximaram dos obtidos por Preussler (2007) para outros solos tropicais, destacando variações entre laboratório e campo.

No caso das misturas solo - fibra, a Figura 5-125 aponta para o melhor desempenho das misturas do solo com 0,50% da fibra pena completa (PC). Apesar das condições de cura terem sido similares e não se dispor, *a priori*, de compostos químicos alteráveis entre os períodos de tempo de cura considerados, as diferenças de comportamento poderiam eventualmente estarem atreladas a fatores como umidade, e porosidade, no entanto, considerando o fato de que nas diferentes situações as misturas solo – 0,50% fibra PC foram as que apresentaram os melhores resultados apontam para o seu melhor desempenho. A tendência verificada para o solo puro e para as três misturas analisadas nesta figura de apresentarem um pior resultado após a cura em campo pode estar atrelada a influência de outros fatores como variações na umidade. Cabe destacar que para as misturas contendo 0,25% e 0,50% de fibras PC ocorreu uma melhoria do módulo resiliente em relação ao solo puro o que não foi notório nas misturas contendo 0,75% de fibra pena completa.

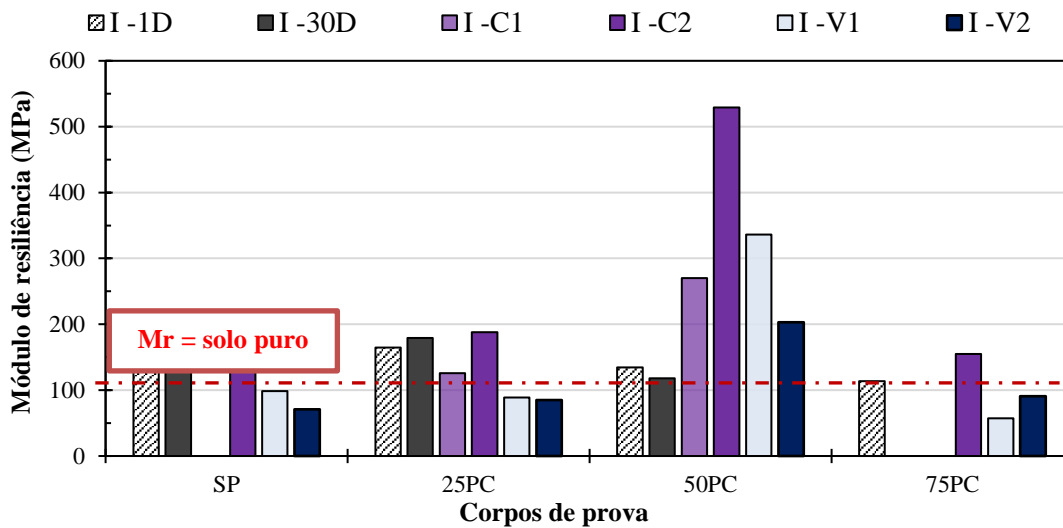


Figura 5-125 - Variação do módulo de resiliência em função do teor de fibras pena completa (PC) e do tempos e métodos de cura de misturas solo - fibra

Analisando-se a Figura 5-126, observa-se que nas misturas solo – cal todos os teores apresentaram um melhor desempenho quanto ao módulo de resiliência que o solo puro, independentemente do tempo e condições de cura. No entanto, a variabilidade dos resultados entre os teores tempo e condições de cura apontam na direção da necessidade de uma avaliação mais ampla considerando-se fatores como a umidade, índice de vazios e sucção.

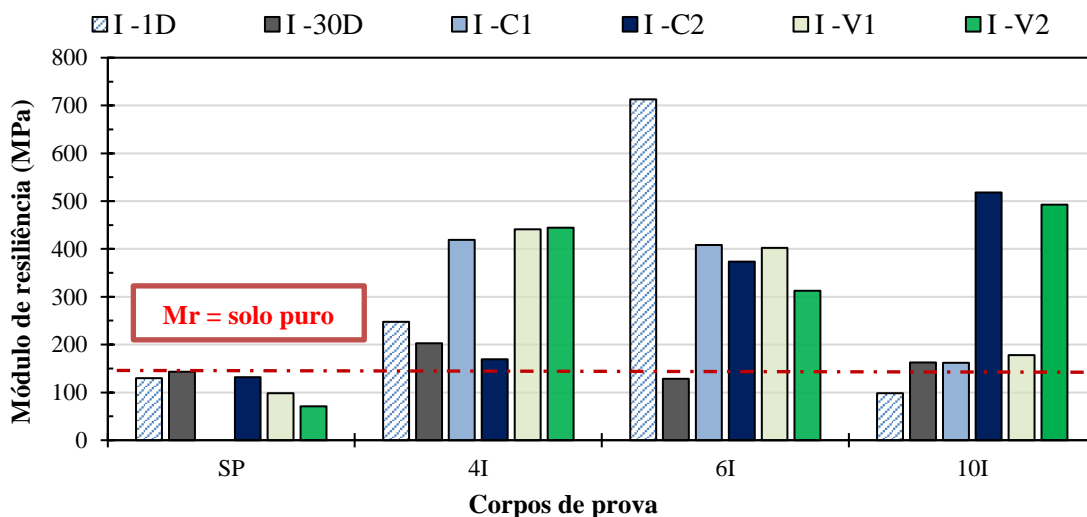


Figura 5-126 - Resultados de módulo de resiliência obtidos para misturas solo - cal

A Figura 5-127 está a indicar que a adição de fibra e cal ao solo apresentou melhoria no módulo de resiliência em relação ao solo natural. No entanto, comparando-se estes



resultados com os apresentados para as misturas solo – cal apresentados na Figura 5-126 verifica-se que os resultados para a mistura solo - 4% de cal – 0,25% de fibra PC são de um modo geral superiores aos obtidos para as misturas solo 4% de cal, enquanto que para o teor 10% de cal tal tendência não é verificada. Em relação às misturas solo – 0,25% de fibras PC apresentados na Figura 5-125 os resultados obtidos com a adição de cal às misturas solo – 0,2% de fibras PC são superiores.

Diante destas análises sobressai como relevante a realização de análises englobando outros fatores como porosidade, umidade e sucção. Nestas análises, como a sucção está diretamente relacionada a umidade, os resultados serão analisados em função do logaritmo da sucção em centímetros de coluna de água (pF) normalizado em relação ao índice de vazios (e).

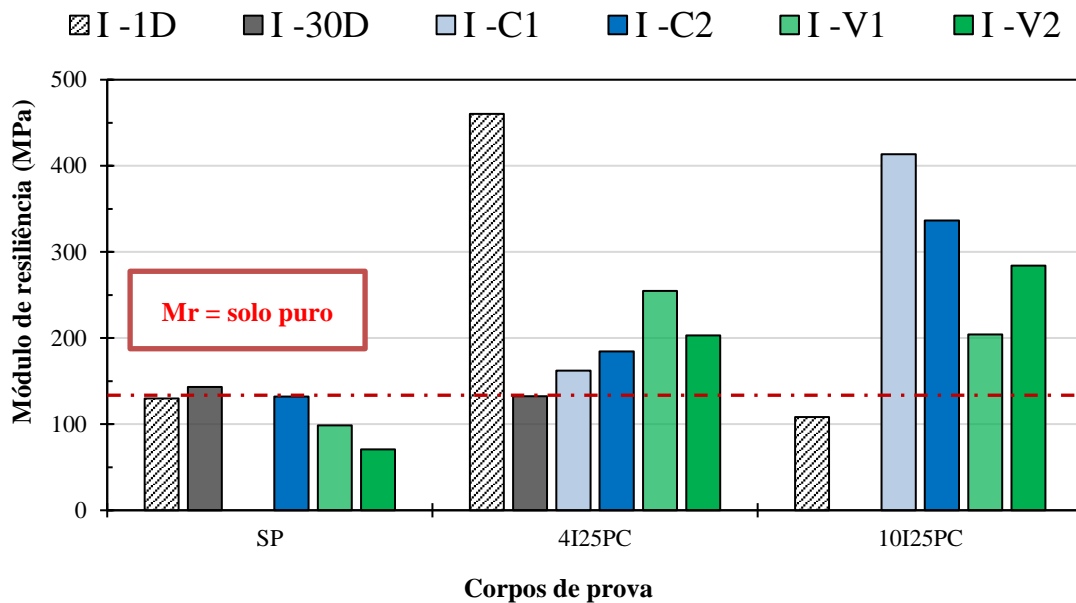


Figura 5-127 - Resultados de módulo de resiliência obtidos para misturas solo – fibra - cal

A avaliação das discrepâncias e dos resultados até aqui apresentados obtidos logo após a compactação das misturas mostra a relevância da análise da influência de fatores como umidade, índice de vazios e sucção na determinação do Módulo de Resiliência para melhor entendimento do comportamento do solo e das misturas quando se considera diferentes tempos e condições de cura.

Outro fator interveniente nos resultados de módulo de resiliência para o solo estudado é a instabilidade dos agregados frente a agentes químicos como é o caso da cal. Tal instabilidade torna os resultados de alguns ensaios, a depender da ação química sobre a estabilidade dos agregados, anômalos em relação aos resultados esperados.

A Figura 5-128 apresenta dois exemplos de curvas de variação do módulo de resiliência em função da tensão desvio normalizada em relação à pressão atmosférica em que os resultados se comportam de modo distinto do esperado quando do tratamento com 4% de cal e cura em campo por 60 dia. Estes resultados são, em termos de comportamento, distintos daqueles apresentados na Figura 5-121 e apontam para a instabilização estrutural do solo.

Com isso, além da influência de fatores como índice de vazios, umidade e sucção nos valores de módulo de resiliência eles podem também, no caso do solo estudado, serem afetados por instabilizações dos agregados o que contribui para a ampliação da dispersão dos resultados e mostra que as estabilizações químicas dos solos tropicais ou o seu uso em situações de risco de contaminação química requerem cuidadosas análises considerando o possível efeito do tempo.

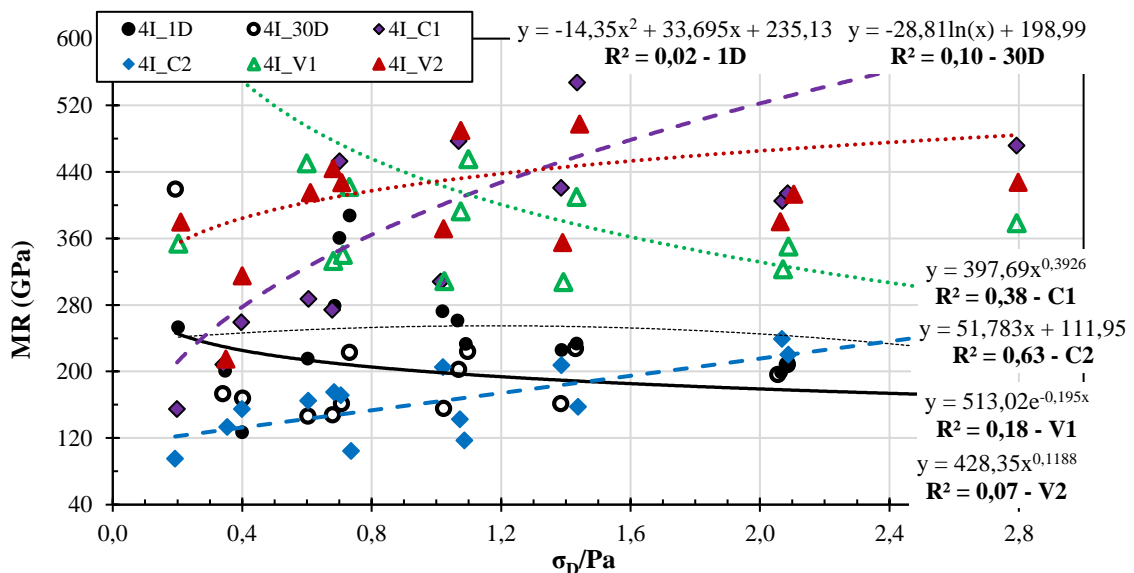


Figura 5-128 - Variação de módulo de resiliência em relação à variações da tensão desvio/pressão atmosférica de misturas solo – cal 4%

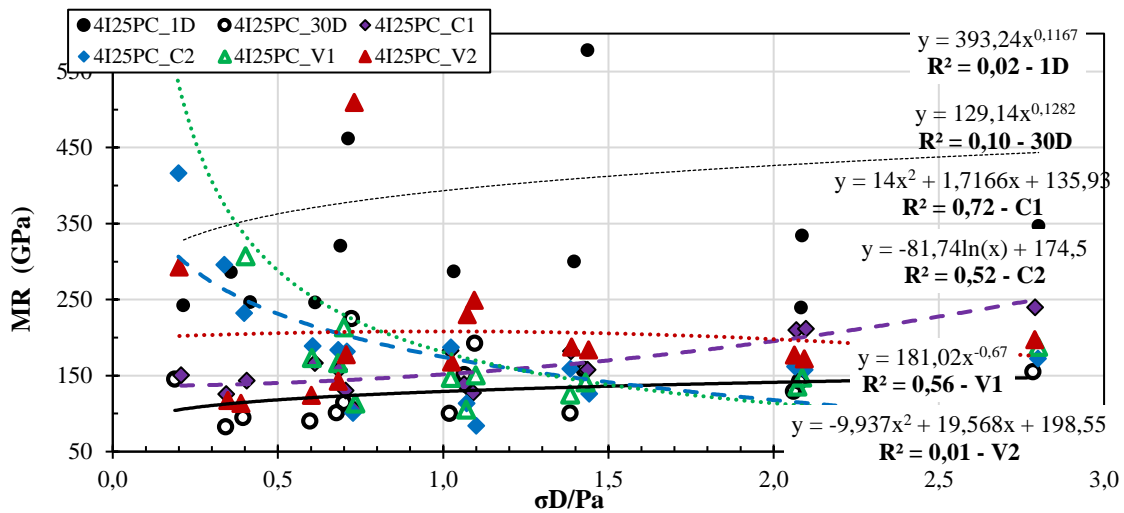


Figura 5-129 - Variação de módulo de resiliência em relação à variações da tensão desvio/pressão atmosférica de misturas solo – cal 4%

### 5.15.5 INFLUÊNCIA DO ÍNDICE DE VAZIOS, DA UMIDADE E DA SUCCÃO SOBRE O MÓDULO DE RESILIÊNCIA

As Figura 5-130 (a), (b), (c) e (d) apresentam respectivamente os resultados obtidos para as misturas solo – fibra pena completa (PC) em função do índice de vazios (a), do teor de umidade (c), da sucção (c) e da sucção em pF normalizada pelo índice de vazios (d). Nestas figuras foram incluídos os resultados obtidos para o solo puro nos diferentes tempos e condições de cura.

Nelas os símbolos em preto com preenchimento correspondem ao período de cura de 30 dias em laboratório, em azul com preenchimento correspondem à cura em laboratório por 60 dias e em vermelho preenchidos a cura em laboratório por 90 dias. Os símbolos nas mesmas cores sem preenchimento correspondem à cura em campo no mesmo período, destacando-se que não foram feitas curas em campo por 30 dias. Destaca-se que as sucções foram determinadas em laboratório pela técnica do papel filtro após decorridos os períodos de cura, ou seja, para os períodos de cura indicados devem ser acrescidos 15 dias correspondentes ao tempo de ensaio de sucção.

As Figura 5-130 (a) e (b) mostram respectivamente, que apesar da dispersão, os resultados obtidos apontam para o comportamento esperado em que o módulo de resiliência diminui com o aumento do índice de vazios e do teor de umidade. Estas figuras indicam a tendência de melhor comportamento quando da adição de 0,50% da fibra pena completa.

As Figura 5-130 (c) e (d) indicam tendências de comportamento melhor definidas quando da análise respectivamente em função da sucção e de  $pF/e$ , mostrando ser a sucção um fator importante na definição do comportamento do solo e das misturas solo - fibra pena completa. Estas figuras confirmam a tendência de melhor comportamento das misturas contendo 0,50% da fibra pena completa. Do ponto de vista prático, estas duas figuras são importantes, pois colocam em evidência a relevância tanto para o solo puro como para as misturas solo – fibra de se ter um eficiente controle das condições de compactação e de se conhecer a dinâmica hídrica-climática da área tendo em vista o seu impacto direto na sucção matricial atuante no solo.

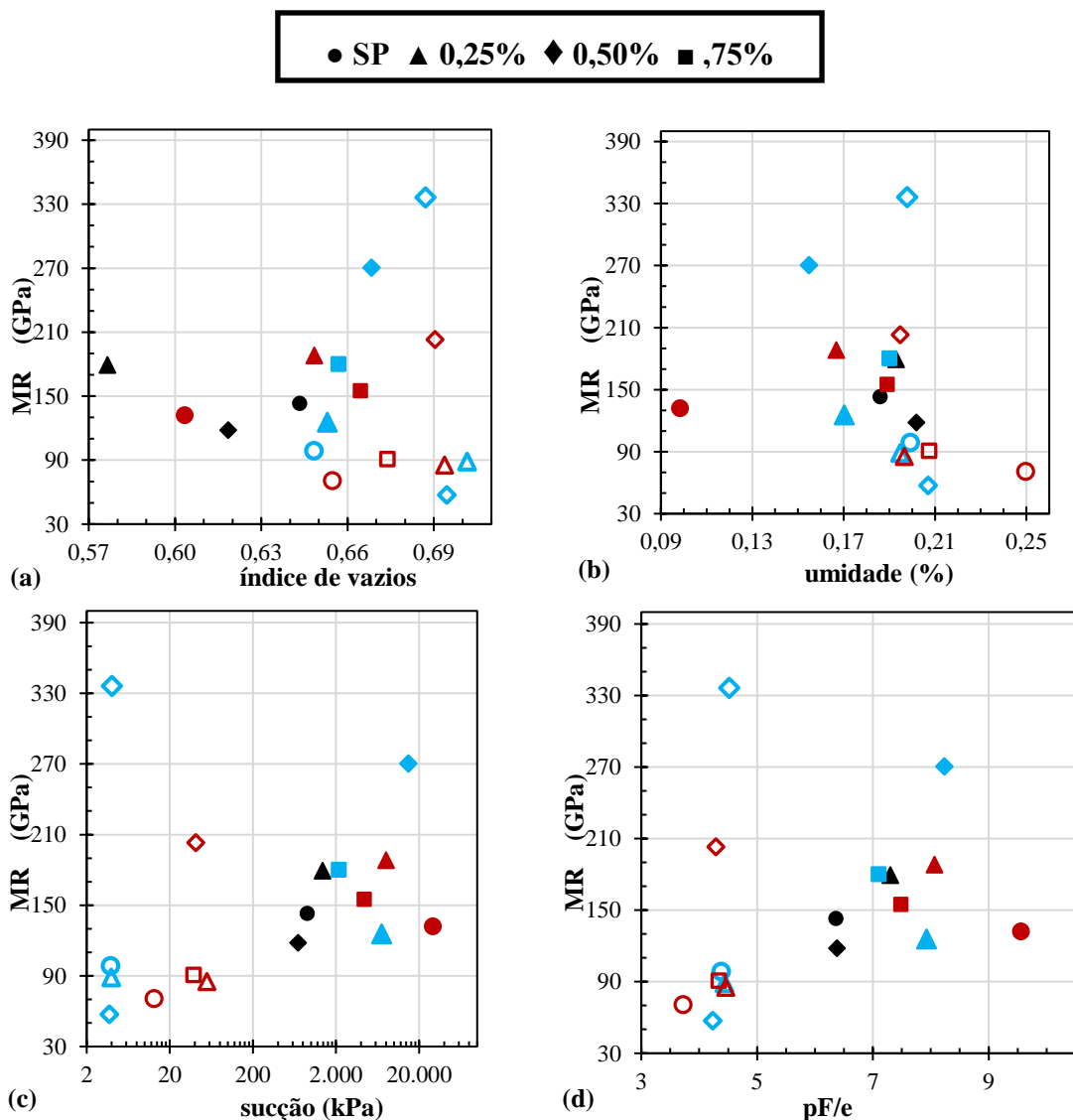


Figura 5-130 – Módulo de resiliência em função do índice de vazios (a), da umidade (b), da sucção (c) e de  $pF/e$  (d) para misturas solo – fibra pena completa (PC) e solo puro

As Figura 5-131 (a), (b), (c) e (d) apresentam respectivamente os resultados obtidos para as misturas solo – cal tipo CH-I em função do índice de vazios (a), do teor de umidade (c), da sucção (c) e da sucção em pF normalizada pelo índice de vazios (d). Nestas figuras foram incluídos os resultados obtidos para o solo puro nos diferentes tempos e condições de cura. Nelas os símbolos em preto com preenchimento correspondem ao período de cura de 30 dias em laboratório, em azul com preenchimento correspondem à cura em laboratório por 60 dias e em vermelho preenchidos a cura em laboratório por 90 dias. Os símbolos nas mesmas cores sem preenchimento correspondem à cura em campo pelos mesmos períodos, destacando-se que não foram feitas curas em campo por 30 dias.

As Figura 5-131 (a) e (b) mostram respectivamente, uma maior dispersão dos resultados em relação as Figura 5-130 (a) e (b), quando analisados os resultados obtidos para os módulos de resiliência (MR) em função do índice de vazios e do teor de umidade não sendo possível estabelecer com clareza tendências de comportamento. No entanto, considerando-se que o MR diminui com o aumento do índice de vazios e da umidade conforme observado respectivamente nas Figura 5-130 (a) e (b) e imaginando tendências de comportamento considerando-se as curas em laboratório e em campo sobressai a tendência de melhor comportamento para a cura em campo. Tendência similar é indicada nas Figura 5-131 (c) e (d) nas quais o módulo de resiliência é apresentado respectivamente em função da sucção e de pF/e.

Do ponto de vista prático, a grande dispersão dos resultados nas quatro figuras aponta para a significativa sensibilidade do solo estudado à presença da cal não sendo inclusive possível definir de modo claro a influência do teor de cal no comportamento das misturas solo - cal. A tendência de melhor comportamento para as misturas curadas em campo pode estar atrelada a migração química de compostos da cal a circunvizinhança conforme constatado em análises anteriores (item 5.9.1).

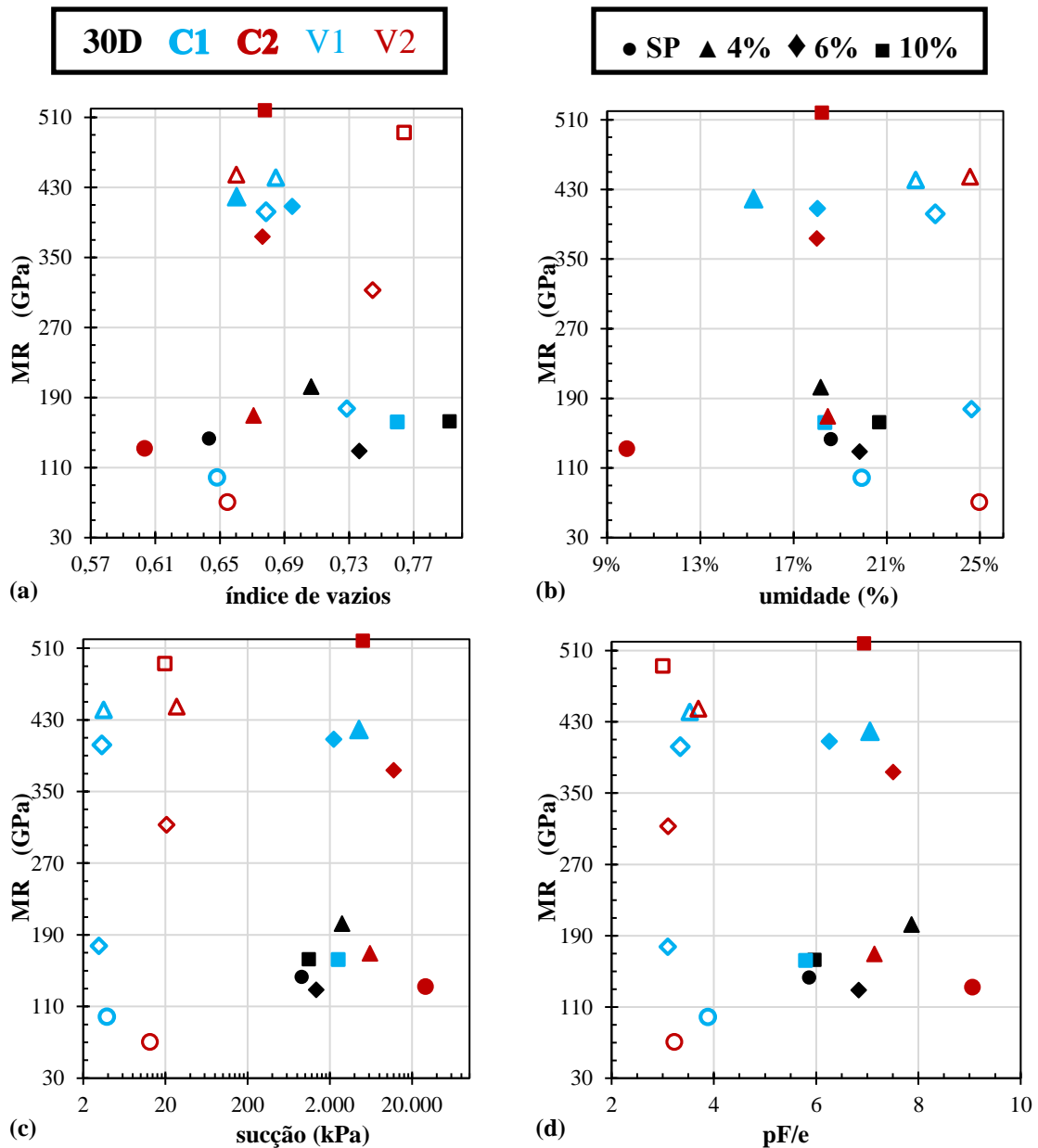


Figura 5-131 – Módulo de resiliência em função do índice de vazios (a), da umidade (b), da sucção (c) e de pF/e (d) para misturas solo - cal e solo puro

As Figura 5-132 (a), (b), (c) e (d) apresentam respectivamente os resultados obtidos para as misturas solo – cal tipo CH-I – fibra pena completa (PC) em função do índice de vazios (a), do teor de umidade (c), da sucção (c) e da sucção em pF normalizada pelo índice de vazios (d). Nestas figuras foram incluídos os resultados obtidos para o solo puro, misturas de solo - fibra PC e misturas solo – cal tipo CH-I nos diferentes tempos e condições de cura. Nelas os símbolos em preto com preenchimento correspondem ao período de cura de 30 dias em laboratório, em azul com preenchimento correspondem à cura em laboratório por 60 dias e em vermelho preenchidos a cura em laboratório por 90 dias.

Os símbolos nas mesmas cores sem preenchimento correspondem à cura em campo pelos mesmos períodos, destacando-se que não foram feitas curas em campo por 30 dias. Os símbolos na cor azul correspondem as misturas solo fibras PC nas mesmas condições e tempo de cura. Tanto para as misturas solo -cal (círculos) como para as misturas solo – fibras o tamanho crescente sinaliza os aumentos de teores de cal (4%, 6% e 10%) e de fibras PC (0,25%, 0,50% e 0,75%). Nestas figuras o X está indicando o solo puro.

As Figura 5-132 (a) e (b) repetem respectivamente, a maior dispersão dos resultados obtidos para as misturas solo – cal em relação as Figura 5-131 (a) e (b), quando analisados os resultados obtidos para os módulos de resiliência (MR) em função do índice de vazios e do teor de umidade, não sendo possível estabelecer com clareza tendências de comportamento. No entanto, considerando-se que o MR diminui com o aumento do índice de vazios e da umidade conforme observado respectivamente nas Figura 5-130 (a) e (b) e imaginando tendências de comportamento considerando-se as curas em laboratório e em campo sobressai mais uma vez a tendência de melhor comportamento para a cura em campo.

Tendência similar é indicada nas Figura 5-132 (c) e (d) nas quais o módulo de resiliência é apresentado respectivamente em função da sucção e de pF/e. Comparando-se os resultados com os obtidos para as misturas solo – fibras PC (Figura 5-130) verifica-se uma tendência de melhoria do comportamento quando da incorporação de cal, no entanto, se comparados os resultados com as misturas solo – cal verifica-se uma piora no comportamento com a incorporação das fibras, sinalizando que a cal pode estar provocando a deterioração da fibra conforme indicado no item 5.10.

Do ponto de vista prático, a grande dispersão dos resultados nas quatro figuras corroboram com o entendimento já firmado neste item que apontam para a significativa sensibilidade do solo acrescida aqui da sensibilidade das fibras estudadas à presença da cal não sendo inclusive possível definir de modo claro a influência do teor de cal e nem das fibras no comportamento das misturas solo – cal - fibras.

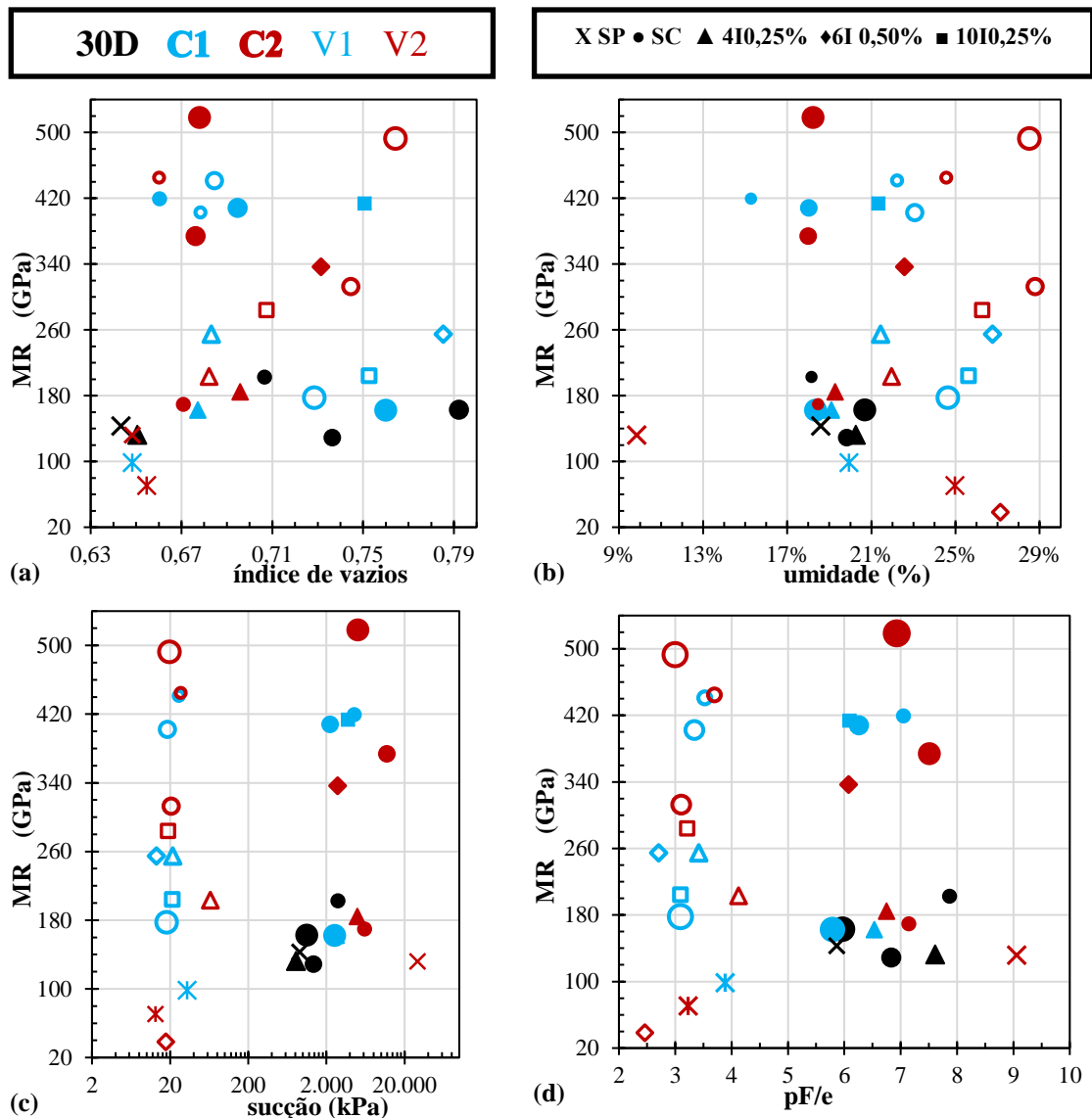


Figura 5-132 – Módulo de resiliência em função do índice de vazios (a), da umidade (b), da sucção (c) e de pF/e (d) para misturas solo - cal e solo puro

### 5.15.6 ANÁLISE DE DEFORMABILIDADE ACUMULADA NOS ENSAIOS DE MÓDULO RESILIENTE DAS MISTURAS ANALISADAS

A deformação permanente é um problema típico das rodovias e é geralmente devido à excessos de cargas aplicadas pelo trânsito de veículos pesados. Medina e Motta, (2015), apresentaram o modelo proposto por Guimarães, (2009) que modifica a teoria de Munismith, e recomenda a realização de um ensaio próprio para determinar os modelos de deformabilidade, em que se incremente o número de ciclos ao solo, mantendo carga constante, dessa forma se identificou em esses ensaios, um parâmetro conhecido como teoria de *Shakedown* ou limite de acomodamento de partículas.



Lima, (2016) indicou que a quantidade de finos é um parâmetro muito importante na determinação do modelo de deformação. No presente estudo o foco não é encontrar modelos de deformação das misturas, mas sim, fazendo uso dos resultados dos ensaios módulo de resiliência conhecer as tendências de deformação e compará-las entre os tipos de misturas utilizados.

Assim, a Figura 5-133 e Figura 5-134, apresentam as deformações permanentes produzidas pela variação das tensões desvio aplicadas aos corpos de prova para obtenção do Módulo de Resiliência, em que, SP corresponde ao solo puro, 25PC e 50PC ao solo misturado à 0,25% e 0,50% da fibra pena completa, I corresponde ao tipo cal tipo CH – I e 4, 6 e 10 corresponde às porcentagens de cal incorporadas às misturas. A Figura 5-133 apresenta a influência da fibra nas deformações permanentes no solo. Para baixas cargas o comportamento é próximo do solo puro e não é relevante o teor de fibra, no entanto, para cargas elevadas triplicam o valor das deformações permanente, não se recomendando, apesar da importância ambiental, o uso deste tipo de fibras para a construção de rodovias com tráfego pesado.

Em misturas solo fibra cal a deformação permanente é menor que a registrada para o solo puro e para as misturas solo fibras. Nesse caso a cal estaria atuando na ampliação da rigidez da mistura solo - fibra e reduzindo as deformações permanentes tornando-as mínimas até N igual 900 repetições.

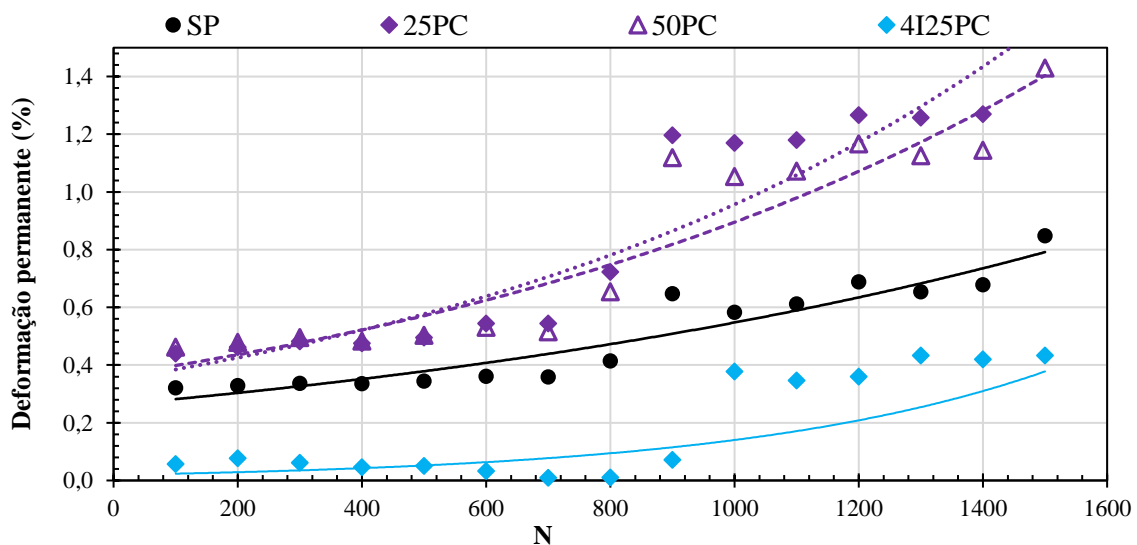


Figura 5-133 – Deformações permanentes devido a cargas aplicadas no MR misturas solo fibra e solo fibra cal

A Figura 5-134 apresenta claramente a influência da cal nas deformações permanentes no solo. Em todos os casos as deformações permanentes são menores que as do solo puro, o melhor caso é em misturas de solo – cal 4%. Considerando resultados de ensaios anteriores, é possível confirmar a influência do teor de cal na construção de rodovias.

A cal tem por objetivo melhorar a resistência mecânica do solo, controlando a umidade, ela diminui a plasticidade das misturas, no entanto, como se identifica na figura analisada, misturas com teores acima de 4% apresentaram comportamentos próximo do solo puro, sendo a mistura com 4% que apresentou deformações permanentes inferiores. Identificando-se como teor ótimo para este tipo de solo.

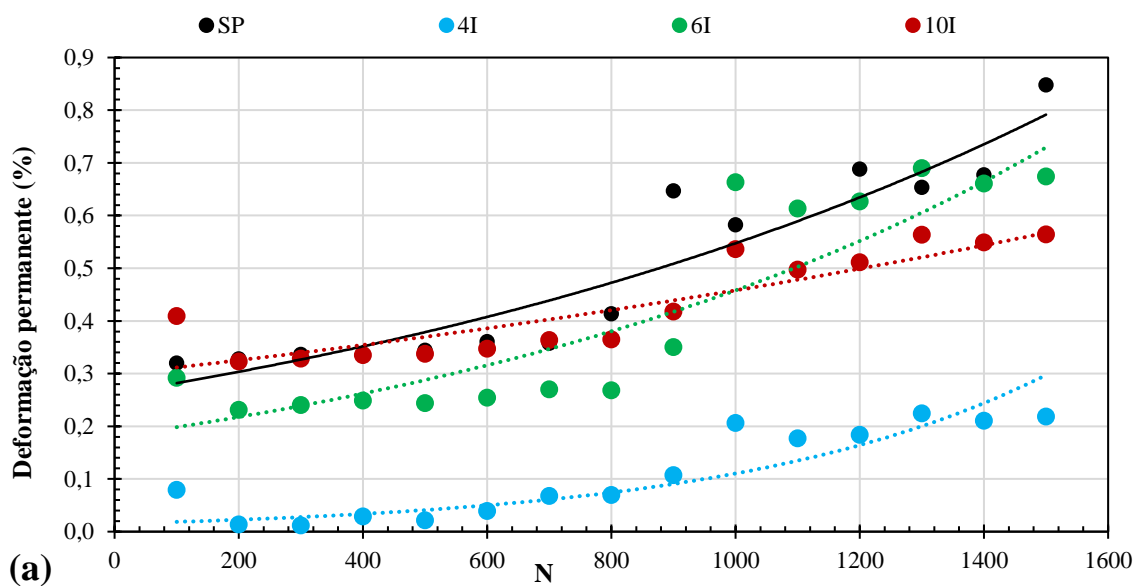


Figura 5-134 – Deformações permanentes devido a cargas aplicadas no MR misturas de solo – cal

## 5.16 TÓPICOS CONCLUSIVOS

Foram analisados os resultados de todos os ensaios de caracterização em duas etapas, sob condições de laboratório, denominadas etapa inicial, e após tempo de cura em campo, denominado etapa final.

- Caracterização, as misturas de solo – cal apresentaram uma um grau de desagregação moderada na etapa inicial se incrementando a etapa final, devido a modificações na estrutura interna das misturas;

- A presença da cal no solo modificou a classificação dele, mesmo tendo pouca variação nos limites de consistência;
- A consequência da vala comum, as misturas de solo e solo fibra foram contaminadas devido à lixiviação de finos das misturas solo – cal;
- Comportamento mecânico, o mini CBR das misturas na condição final diminuiu face a mudanças da estrutura interna das misturas;
- A resistência a compressão diminuiu a consequência dessas mudanças, no entanto inicialmente, a fibra demonstrou melhor comportamento em misturas sem cal. O tempo e método de cura influenciou de forma crítica, fatores como umidade e sucção foram relevantes no comportamento;
- O grande potencial das fibras foi demonstrado na RCTD das misturas principalmente na condição inicial, o comportamento final da RCTD identificou o fator tempo como relevante na avaliação do desempenho dos corpos de prova, a diminuição de resistência pode inferir em uma certa degradação da fibra ao longo do tempo;
- Se identificou o potencial da fibra no aumento do módulo de resiliência em misturas de solo cal, no entanto, o material não permite homogeneidade da mistura e esse fator influencia diretamente na determinação do MR, a fibra demonstrou –se favorável ante carregamentos menores não assim a grandes carregamentos, levando a grandes deformações;

Por fim a fibra é recomendada na construção de rodovias de baixo tráfego, desde que sejam realizados tratamentos que diminuam o grau de deterioro dela.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na presente pesquisa analisou-se o potencial de uso da pena de frango como fibra natural no reforço de solos para construção de rodovias de baixo custo.

Tendo em vista tratar-se de fibra natural, a pena de frango, o estudo buscou não só analisar o comportamento mecânico imediato das misturas solo – fibra como sua degradabilidade frente ao tempo e à presença de meio alcalino. Para propiciar o meio alcalino utilizou-se a cal hidratada, estabilizante químico com possibilidade de uso conjunto com a fibra pena na melhoria do comportamento do solo.

As análises dos resultados permitiram as seguintes observações e conclusões:

- Avaliando-se os resultados de granulometria do solo e de misturas solo – cal, com tempos de cura inicial e final, obtidos sem o uso de defloculante químico, concluiu-se que as curvas granulométricas correspondentes ao estado inicial do solo puro, apresentaram alteração aumentando o teor de finos quando da incorporação dos 3 teores de cal utilizados sendo esta alteração mais pronunciada após um ano de cura em campo. Esta constatação leva a concluir que os solos profundamente intemperizados podem, como foi o caso do solo estudado, serem sensíveis a ações químicas como a da cal, que atuou comprometendo a estabilidade estrutural dos agregados e microagregados ao longo do tempo e podendo assim prejudicar o desempenho mecânico da estrutura de pavimento como um todo;
- Em relação ao  $G_s$ , a diferença das misturas solo – cal em relação ao solo natural não foi significativa;
- Em relação aos limites de consistência, inicialmente não se verificou alterações significativas;
- Com relação à classificação dos solos oriundos dos corpos de prova, cabe destaque o fato do solo puro ensaiado sem o uso de defloculante (SD) após a cura em campo por um ano em vala comum com corpos de prova estabilizados quimicamente com cal, teve sua

classificação alterada de modo semelhante às misturas solo-cal, em consequência da contaminação química oriunda das misturas solo-cal;

- Embora não se possa generalizar os resultados obtidos para os solos lateríticos como um todo, no presente caso as cales utilizadas levaram a uma pior classificação do solo estudado, devido ao efeito desagregador da cal ao longo do tempo;

- Tanto a cal como as fibras exercem influência pouco relevante na curva característica de retenção de água;

- No que tange à mineralogia é importante destacar a diminuição do teor de gibbsita, hematita e goethita presente no solo após ser mantido um ano enterrado. Isso se deve provavelmente à solubilização e lixiviação desses compostos ao longo do tempo de cura, o que assume caráter preocupante na estabilização dos solos lateríticos com cal, pois tal ocorrência é susceptível de propiciar a fragilização e mesmo a desagregação desses solos, inclusive aqueles que se encontram sob camadas de solo estabilizadas quimicamente. Outro aspecto relevante, é o aumento, mesmo que pequeno, da intensidade de pico da caulinita e diminuição da intensidade do pico de quartzo e da gibbsita sinalizando assim para um processo de caulinitização, pois o fenômeno pode estar atrelado à junção da Gibbsita solubilizada com o Quartzo existente no solo gerando Caulinita e diminuindo o teor de Quartzo;

- Parte do processo de troca catiônica nas misturas solo-cal levou à formação de um novo mineral, a gipsita, elemento cimentício do cimento cuja característica é a retardação do tempo de pega;

- Após um ano de cura verificou-se nas amostras solo-cal a presença de calcita enquanto a gipsita deixa de manifestar-se presente. Dessa forma, a longo prazo, a gipsita sofre dissolução total nas misturas solo-cal, sendo essa afirmação validada ao se observar a diminuição no teor de enxofre nas amostras após um ano de cura. Destaca-se que o enxofre é componente importante da gipsita e a identificação desse elemento químico no solo puro e nas misturas solo - fibra confirmaram o fenômeno da lixiviação nas misturas solo – cal;

- Em relação à compactação, a cal influencia nos resultados diminuindo o peso específico aparente seco máximo e aumentando a umidade ótima. A adição da fibra também influencia nesses parâmetros de compactação, mas de modo menos significativo. As alterações geradas pela cal estão certamente atreladas ao seu efeito desagregados e às trocas iônicas. Já no caso das fibras tem-se por um lado a ampliação da resistência do solo e por outro, a sua característica de menor densidade. Tem-se ainda que no caso da cal as curvas de compactação apresentaram o ramo seco menos íngreme sendo que este comportamento também foi verificado para o ramo úmido no caso da cal CH-III. Com esse comportamento gerado pelas cales a faixa de trabalhabilidade em torno da umidade ótima se amplia, permitindo melhor trabalhabilidade nas misturas em campo;

- Analisando o mini CBR, identificou-se inicialmente um ganho de resistência nas misturas com adição da fibra barba conforme incrementa sua quantidade, no entanto, misturas com pena completa tendem a manter o valor de mini CBR independentemente da quantidade de fibra no solo. Misturas com adição de raque apresentaram o pior comportamento por não seguir uma tendência definida provavelmente devido à sua superfície lisa e dura que contribui para diminuir o atrito e adesão entre o solo e a fibra.

- Na condição final, após um ano de cura em campo, o mini CBR das misturas apresentou uma diminuição em mais de 50%, alcançando uma média de 6% para todos os casos, associando-se a este comportamento as mudanças estruturais que se identificaram na avaliação física das misturas. Estas mudanças estruturais foram consideradas oriundas da ação degradadora da cal sobre as fibras e sobre o próprio solo. Com isso sobressai como sendo importante considerar tempos de cura maiores e seu acompanhamento periódico para verificar o grau de influência da cal em solos profundamente intemperizados;

- Em relação à resistência a compressão simples (RCS), observou-se que as fibras praticamente não a afetou sendo as variações verificadas função de variação de fatores como umidade, índice de vazios e sucção. Como as fibras praticamente não afetaram a RCS o tempo e tipo de cura não a afetaram. No caso das misturas solo – cal verificou-se dispersão importante nos resultados obtidos sem uma definição clara das influências do teor de cal e do tempo e tipo de cura. Apesar da dispersão ainda acentuada os resultados indicaram uma redução da mesma com a incorporação das fibras. A dispersão dos

resultados nas misturas contendo cal certamente está atrelada a sua ação desagregadora sobre o solo;

- Verificou-se nas análises dos módulos tangentes determinados a partir dos resultados de RCS comportamento similar ao observado para a própria RCS, sobressaindo, no entanto, que a incorporação de 10% de cal tendeu a aumentar o módulo tangente, provavelmente devido a ligações cimentícias geradas para este teor de cal;

- Em relação à resistência à tração por compressão diametral (RTCD), as fibras ampliaram em relação ao solo puro e mesmo em relação a misturas solo cal tendendo esta ampliação a aumentar com o teor de fibras, sendo os melhores desempenhos aqueles com adição de pena completa e barba, e o pior o da raque. Em misturas de solo-fibra-cal, a resistência mecânica piora levemente, podendo-se atribuir o resultado a um certo grau de degradação da fibra com a ampliação do tempo de cura. Também em termos de RTCD a cal tendeu a ampliar a dispersão dos resultados e a incorporação de 10% de cal levou ao seu aumento certamente devido a ocorrência de cimentações. Cabe ainda destacar que a presença das fibras conduziu o solo a apresentar uma significativa resistência residual, resistência esta não verificada no caso do solo puro. Portanto, as fibras podem ter um papel relevante na contenção da propagação dos danos por trinca em estruturas de pavimento;

- Em termos de módulo de resiliência, as fibras favorecem o seu incremento, no entanto, embora melhorem o desempenho das misturas, não se identificaram tendências de melhoria relevantes. Avaliando os modelos matemáticos, os corpos de prova seguem uma tendência próxima ao modelo Universal, apenas as misturas de solo – 4% de cal se aproximaram do modelo composto. Em todos os casos houve uma grande dispersão de dados verificando-se um  $R^2$  menor a 0,90 o que aponta para a necessidade de avaliar os modelos a partir de um número maior de resultados. Em relação às deformações permanentes, os resultados evidenciaram tendências marcadas para cargas de tráfego menores destacando-se pouca variação dos dados de deformações permanentes, já para cargas maiores, foi identificada uma grande dispersão de dados, recomendando-se o uso da fibra em construção de rodovias de baixo tráfego;

- Em todos os casos o teor de umidade associado ao índice de vazios a sucção são fatores relevantes na determinação do módulo de resiliência sofrendo os mesmos interferências predominantemente físicas por parte das fibras e química por parte da cal. A análise dos resultados considerando-se a influência do estado físico do solo e da sucção indicaram que o módulo de resiliência aumentou em relação ao solo puro quando da incorporação de cal e de cal e fibras, sendo pequena a influência quando da incorporação apenas das fibras;

- Em todos os casos, os ensaios realizados sobre amostras curadas em condições de laboratório e de campo mostram que, para o solo estudado, os métodos de cura influenciam diretamente no comportamento mecânico, pois em laboratório fica impedido o fluxo químico que naturalmente é passível de ocorrer em campo indicando assim a importância da cura *in situ* na avaliação do comportamento mecânico dos solos estabilizados quimicamente.

#### SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se para pesquisas futuras:

- Estudar as alterações das curvas características de retenção de água de misturas solo-cal, solo-fibra e solo-cal-fibra considerando-se em maior detalhe a estrutura dos compostos e as alterações físico-químicas que se processam ao longo do tempo.

- Testar impermeabilizantes de proteção das fibras para prolongar o seu tempo de vida útil em misturas com solo puro e em misturas com aditivos químicos como a cal e o cimento.

- Avaliar as alterações de umidade das fibras quando em misturas com os solos não saturados, pois a captação de água pelas fibras interfere na sucção atuante na matriz de solo.

- Realizar estudos concentrando-se os parâmetros analisados, mas ampliando-se os seus teores e condições de uso. Por exemplo realizar estudos com a pena completa, variando não só o seu teor, como as suas dimensões, peso específico e umidade de compactação e pós compactação.

- Estudar a influência da incorporação de areia no comportamento de misturas solo -fibras quando do uso de solos argilosos como o no presente estudo.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abhisekh, S., Yamsani, S., S, B. & Sreedeeep, S. (2016a). Comparative study between experimental and estimated swcc parameters with varying plasticity. 19° Southeast Asian Geotechnical Conference & 2and AGSSEA conference, 1–6.
- Abhisekh, S., Yamsani, S.K. & Sreedeeep, S. (2016b). Effect of soil plasticity and presence of fine particles on swcc. Indian Geotech. Conf., (December): 15–17.
- ABNT. (1984). NBR 7181- análise granulométrica. Assoc. Bras. Normas Técnicas. ABNT, Rio Janeiro, RJ, 2: 13p.
- ABNT. (1992). NBR 12770 solo coesivo - determinação da resistência à compressão não confinada. Associação Brasileira de Normas Técnicas, . ABNT, Rio de Janeiro. RJ, 4.
- ABNT. (2004). ISO-14001-2004 - sistemas de gestão ambiental requisitos com orientações para uso. Associação Brasileira de Normas Técnicas, . NBR ISO 14001:2004, Brasil, 27p.
- ABNT. (2016a). NBR-6459-solo-determinacao-do-limite-de-liquidez. Assoc. Bras. Normas Técnicas - ABNT. Rio Janeiro, RJ, 2: 9p.
- ABNT. (2016b). NBR 7180- solo - determinação do limite de plasticidade. Assoc. Bras. Normas Técnicas - ABNT. Rio Janeiro, RJ., 2: 7p.
- ABPA. (2018). Relatório anual. Associação Brasileira de Proteína Animal, . Associação Brasileira de Proteína Animal, Brasília, 176 p.
- Alonso, R.S. (2013). Penas de Frango: Estudo das Características Físicas das Fibras Têxteis. Dissertação de Mestrado. Escola de Artes, Ciências e Humanidades. Universidade de São Paulo. 97p.
- Alrubaye, A.J., Hasan, M. & Fattah, M.Y. (2016). Engineering properties of clayey soil stabilized with lime. ARPN J. Eng. Appl. Sci., 11(4): 2434–2441.
- Amadi, A.A. & Okeiyi, A. (2017). Use of quick and hydrated lime in stabilization of lateritic soil: comparative analysis of laboratory data. Int. J. Geo-Engineering, 8(1): 3.
- Arruda, M.N. de. (2010). Extração, Caracterização e Modificação Química da Queratina Extraída das Penas de Frango. Universidade de São Paulo. Faculdade de Ciências Farmacêuticas.
- Assi, A.L. (2016). Avícolas: o abate informal de aves e o contexto sanitário no município

- de São Paulo. Universidade de São Paulo.
- ASTM. (2003). D5298-standard test method for measurement of soil potential ( suction ) using filter paper. ASTM, (November 1994): 4–11.
- ASTM D6276. (2006). Standard test method for using ph to estimate the soil-lime proportion requirement for soil stabilization. ASTM Int., 14(02): 1–4.
- Barone, J.R. (2005). Polyethylene/keratin fiber composites with varying polyethylene crystallinity. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 36(11): 1518–1524.
- Barone, J.R. & Arikian, O. (2007). Composting and biodegradation of thermally processed feather keratin polymer. *Polym. Degrad. Stab.*, 92(5): 859–867.
- Barone, J.R. & Schmidt, W.F. (2012). Polyethylene matrix composites reinforced with keratin fibers obtained from waste chicken feathers. *J. Biobased Mater. Bioenergy*, 6(4): 355–360.
- Barone, J.R., Schmidt, W.F. & Gregoire, N.T. (2006a). Extrusion of feather keratin. *J. Appl. Polym. Sci.*, 100(2): 11 p.
- Barone, J.R., Schmidt, W.F. & Gregoire, N.T. (2006b). Extrusion of feather keratin. *J. Appl. Polym. Sci.*, 100(2): 1432–1442.
- Barone, J.R., Schmidt, W.F. & Liebner, C.F.E. (2005). Compounding and molding of polyethylene composites reinforced with keratin feather fiber. *Compos. Sci. Technol.*, 65(3–4): 683–692.
- Basso, R.V., Ferras, R.L., Belincanta, A. & Ramos, F. dos S. (2003). Aplicação do método físico-químico de dosagem de misturas de solo-cimento aos solos típicos do noroeste do paraná. *Encontro tecnológico da Eng. Civ. e Arquitetura*, : 348–357.
- Borges, C.R., Gitirana, G. de F.N., Vargas, C.A.L. & Guimarães, R.C. (2010). Uso de um papel filtro de baixo custo na determinação de curvas características. *COBRAMSEG 2010: Engenharia geotécnica para o desenvolvimento, inovação e sustentabilidade*, . Gramado, RS, 1–8.
- Brahmachary, T.K. & Rokonzaman, M. (2018). Investigation of random inclusion of bamboo fiber on ordinary soil and its effect cbr value. *Int. J. Geo-Engineering*, 9(1): 11 p.
- Brebu, M. & Spiridon, I. (2011). Thermal degradation of keratin waste. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 91(2): 288–295.
- Bustillos, Ma.Belén; Espinosa, Carolina; Feijoó, T.P.D. (2010). Aislamiento, Selección, Producción de Biomasa y Preservación de Cepas Queratinolíticas de Bacillus SPP.

- para la Degradación de Plumas de Pollo.
- Butt, W.A., Mir, B.A. & Jha, J.N. (2016). Strength behavior of clayey soil reinforced with human hair as a natural fibre. *Geotech. Geol. Eng.*, 34(1): 411–417.
- Cabala, G.V.E. (2007). Estudo do Comportamento Mecânico de Estruturas de Solo-Cimento Reforçado com Fibras de Coco e Hastes de Bambu. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Camapum de Carvalho, J. & Leroueil, S. (2004). Curva característica de sucção transformada transformed soil-water characteristic curve. *Soils and Rocks*, 3: 20.
- Camapum, J. de C., Gitirana, G. de F.N., Machado, S.L., Mascarenha, M.M. dos A. & Chagas, F. da S. (2015). Solos não saturados no contexto geotécnico. 1º.
- Cardoso, R.A. (2010). Cadastro geotécnico dos solos finos lateríticos para fins de pavimentação no município de Goiânia - GO. Universidade Federal de Goiás.
- Carvalho de Oliveira, J., Michele da Costa Mota, J., Carneiro Oliveira, J., de Nazaré Amorim Silva, L. & Bentes dos Santos Filho, M. (2018). Diagnóstico Ambiental dos Resíduos Resultantes da Produção de Frango de Corte: Um Estudo de Caso. 1º Congr. Sul - Am. Resíduos Sólidos e Sustentabilidade,.
- Cassiano de Sousa, A.C.R., Mascarenha, M.M. dos A., Santos de Jesus, A. & Da Silva, M.R. (2016). Influência da sucção na estabilidade estrutural de solos tropicais não saturados no município de silvânia-go. *Anais do VII Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens*, . COBRAMSEG 2016, Belo Horizonte/MG, XVIII: , 8 p.
- CNT. (2019). Pesquisa de rodovias. Relatório Gerencial. Confederação Nacional de Transportes. 238 p., Brasília.
- Conciani, W., Campelo, N. de S., Carneiro, B.J.I., Souza, P.R. de; & Barbiero, N. (2017). Monitoramento da pressão de sucção em um perfil de solo da região do médio solimões , na construção do gasoduto coari- manaus. COBRAMSEG, . COBRAMSEG 2016, 1432–1439.
- Consoli, N.C., Coop, M.R. & Casagrande, M.D.T. (2007). Performance of a fibre-reinforced sand at large shear strains. *Géotechnique*, 57(9): 751–756.
- Corte, M.B. (2013). Misturas Solo-Cal-Fibra: Comportamento Mecânico à Compressão e Tração. Trabalho de Diplomação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia.

- Cunto, F.J.C. (1998). Determinação Do Módulo De Resiliência Através De Ensaios Triaxiais Dinâmicos Easuaestimativa Apartir De Ensaios De Compressão Simples: Estudo De Três Solos Do Nordeste Brasileiro. Universidade de São Paulo.
- DNER. (1994a). DNER-me-258-solos compactados em equipamento miniatura - mini-mcv. Dep. Nac. Estrad. Rodagem. DNER/DrDTc, 1: 14p.
- DNER. (1994b). DNER-me228-94 solos - compactação em equipamento miniatura. Dep. Nac. Estrad. Rodagem DNER/DrDTc, 1: 14.
- DNER. (1994c). ME - 181 solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada - determinação da resistência à tração por compressão diametral. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER, . DNER/DrDTc (IPR), Rio de Janeiro. RJ, 7p.
- DNER. (1996). DNER-cla259-classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura. Dep. Nac. Estrad. Rodagem DNER/DrDTc, 1: 6p.
- DNER. (1997). DNER-me-254 - solos compactados em equipamento miniatura mini CBR e expansão - cbr. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER, . DNER/D, 1: , 14.
- DNIT-IPR. (2018). ME - 138 pavimentação asfáltica-misturas asfálticas-determinação da resistência à tração por compressão diametral-método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, . DNIT, Rio de Janeiro. RJ, 6.
- DNIT-ME419. (2019). Pavimentação – solo-cal – estimativa do teor mínimo de cal para estabilização química de solo – método de ensaio. IPR-DNIT, 1: 8.
- DNIT. (2003). Manual de Custos Rodoviários. Volume 4. Tomo 1. Departamento Nacional de Infra estrutura de Transportes, Brasília.
- DNIT. (2006). Manual de pavimentação. 3°. IPR. Publ.,719, Rio de Janeiro - Brasil.
- DNIT. (2018a). Custos médios gerenciais. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasília.
- DNIT. (2018b). ME - 134 pavimentação-solos-determinação do módulo de resiliência-método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT, . IPR - DNIT, Rio de Janeiro. RJ, 18p.
- DNIT. (2018c). ME - 181 pavimentação-material estabilizado quimicamente-determinação do módulo de resiliência-método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT, . DNIT, Rio de Janeiro. RJ, 16p.

- Dutra, S. & Vale, C. (2016). The use of lateritic soils as road pavement material. *Geotecnia*, 136: 13p.
- Dutra, S.V.M. (2014). Estado da arte sobre a utilização de solos lateríticos em pavimentos rodoviários. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. 104p.
- Elsharief, A.M., Elhassan, A.A.M. & Mohamed, A.E.M. (2013). Lime stabilization of tropical soils from sudan for road construction. *Int. J. Geomate*, 4(2): 6 p.
- EMBRAPA. (2000). Simpósio sobre resíduos da produção avícola. Anais, Santa Catarina, pp. 84.
- EMBRAPA. (2017). Manual de Métodos de Análise de Solo. EMBRAPA SOLOS,. 3rd edn. Brasília-DF, 3.
- FEAM. (2010). Diagnóstico Ambiental das Indústrias de Abate no Estado de Minas Gerais Atualização. 1st edn. Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM, Belo Horizonte/MG.
- Feistel, J.C. (2011). Tratamento e destinação de resíduos e efluentes de matadouros e abatedouros. . Coord. Inspeção Sanit. dos Prod. Origem Anim., Universidade Federal de Goiás, Coord. Inspeção Sanit. dos Prod. Origem Anim.,.
- Felten, D. (2005). Estudos sobre Solos Arenosos Finos Lateríticos da Planície Costeira Sul do RS para Emprego em Pavimentação Econômica. Universidade Federal do Rio Grande.
- Ferreira, I.V.L., Wiecheteck, G., Deluqui, K.K. & Adriani, M.S. (2002). Impactos ambientais de abatedouros e medidas mitigadoras. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, . Asociación Internacional de Ingeniería Sanitaria AIDS, Cancun, México, 4p.
- Ferroli, P.C.M., Fiod Neto, M., Casarotto Filho, N. & Castro, J.E.E. (2001). Fábricas de subprodutos de origem animal: a importância do balanceamento das cargas dos digestores de vísceras. *Produção*, 10(2): 05–20.
- Festugato, L. (2008). Análise do comportamento mecânico de um solo micro - reforçado com fibras de distintos índices de aspecto. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia.
- Feuerharmel, M.R. (2000). Comportamento de Solos Reforçados com Fibras de Polipropileno. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em

- Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia.
- Galán-Marín, C., Rivera-Gómez, C. & Petric, J. (2010). Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre. *Constr. Build. Mater.*, 24(8): 1462–1468.
- Gallardo, M., Montaña Monsalve, M. & Valladolid, M. (2015). Dos procedimientos para el estudio de las plumas en microscopía óptica. *Boletín la Real Soc. Española Hist. Nat. Sección biológica*, (109): 65–69.
- Garrett, R.H. & Grisham, C.M. (2010). *Biochemistry*. 4<sup>o</sup> ed. Brooks/Cole, Cengage Learning, Virginia.
- Gaw, B. & Zamora, S. (2003). *Soil Reinforcement with Natural Fibers for Low-Income Housing Communities*. Worcester Polytechnic Institute.
- Gedoz, L. (2014a). Gerenciamento de resíduos sólidos gerados em uma propriedade de criação de aves para abate. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- Gedoz, L. (2014b). Gerenciamento de resíduos sólidos gerados em uma propriedade de criação de aves para abate. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- Georgetti, G.B. (2014). *Deformabilidade E Resistência De Um Solo Laterítico Não Saturado*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Gerscovich, D.M.S. & Sayão, A.S.F.J. (2002). Evaluation of the soil-water characteristic curve equations for soils from Brazil. *Third International Conference on Unsaturated Soils - UNSAT2002*, A.A. Balkema, 6.
- Gowthaman, S., Nakashima, K. & Kawasaki, S. (2018). A state-of-the-art review on soil reinforcement technology using natural plant fiber materials: past findings, present trends and future directions. *Materials (Basel)*, 11(4): 23 p.
- Heidemann, M., Bressani, L.A., Gehling, W.Y.Y., Flores, J.A.A. & Porto, M.S. (2016). Influence of structure in the soil-water characteristic curves of two residual soils of granite. *E3S Web Conf.*, 9: 6.
- Joaquim, A.G. (2017). *Estudo de Dois Solos Tropicais Melhorados com Cimento ou Cal para Emprego em Camadas Superiores de Estradas não Pavimentadas*. Universidade Estadual de Campinas.
- Kafodya, I. & Okonta, F. (2018). Effect of fibre surface coating on the mechanical properties of natural fibre-reinforced soil. *Int. J. Geotech. Eng.*, 00(00): 1–11.
- Kalita, D.M., Mili, I., Baruah, H. & Islam, I. (2016). Comparative study of soil reinforced with natural fiber, synthetic fiber and waste material. *Int. J. Latest Trends Eng.*

- Technol., 6(4): 7.
- Kamtchueng, B.T., Onana, V.L., Fantong, W.Y., Ueda, A., Ntoulala, R.F., Wongolo, M.H., Ndongo, G.B., Ze, A.N., Kamgang, V.K. & Ondo, J.M. (2015). Geotechnical, chemical and mineralogical evaluation of lateritic soils in humid tropical area (mfou, central-cameroon): implications for road construction. *Int. J. Geo-Engineering*, 6(1): 1.
- Klinsky, L.M.G., Faria, V.C. & Leal, A.D. (2014). Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Estabilizados com Cal Hidratada. Agência Nac. Transp. Terr.,
- Kock, J.W. (2006). Physical and Mechanical Properties of Chicken. School of Civil and Environmental Engineering. Georgia Institute of Technology.
- Leite, R., Cardoso, R., Cardoso, C., Cavalcante, E. & Freitas, O. De. (2016). Lime stabilization of expansive soil from sergipe - brazil. *E3S Web Conf.*, 9: 1–6.
- Leucádio, G.A.S. (2005). Reforço de Solo Laterítico com Fibras de Sisal de Distribuição Aleatória, Tratadas Superficialmente com EPS Reciclado. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT. Universidade Federal de Ouro Preto.
- Leucádio, G.A.S. (2012). Estudo do Comportamento Mecânico de Compósitos Solo-Fibras Vegetais Impermeabilizadas com Solução de Poliestireno Expandido (EPS) e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT. Universidade Federal de Ouro Preto.
- Lima, C.D.A. (2016). Estudo da Deformação Permanente de Duas Britas Graduas para Uso em Camadas de Pavimentos. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Lima, G.F. (2013). Avaliação da Eficácia da Proposta de Classificação Universal para Solos Lateríticos Aplicada a Três Solos do Nordeste Brasileiro. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande.
- LIME. (2006). Manual de Estabilización de Suelo Tratado con Cal. Estabilización y Modificación con Cal. Natl. Lime Assoc.,, Naciona Lime Association.
- Llanque, R.J.A. (2014). Reforço de solos com fibra natural , uma alternativa ambientalmente sustentável. *Cobramseg*, . COBRAMSEG 2014, Goiania, 8.
- Llanque, R.J.A., Camapum de Carvalho, J. & Martínez-Hernández, A.L. (2018). Análise de misturas de solo – cal a curto prazo. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, . COBRAMSEG 2018, Salvador, Bahia, 9.

- Ma, B., Sun, Q., Yang, J., Wizi, J., Hou, X. & Yang, Y. (2017). Degradation and regeneration of feather keratin in nmmo solution. *Environ. Sci. Pollut. Res.*,
- Machado, S.L. & Vilar, O.M.. (2015). Potenciais da água no solo. Solos não saturados no contexto geotécnico, A. Geotécnica (Ed.), Brasil, pp. 18p.
- Mahmood, K.R. & Kareen, A.H.A. (2018). Nature of soil-water characteristics curves (swcc) for soils from anbar governorate. *Anbar J. Eng. Sci. AJES-2010*, 3(1): 20.
- Manoj, N., Madhusudhanrao, G., Sairam, B. & Hanumantharao, C.H. (2017). Stabilization of soft soil using chicken feathers as biopolymer. *Int. J. Civ. Enginheering Technol.*, 8(4): 2021–2026.
- Marinho, F.A.M. (2005). Nature of soil–water characteristic curve for plastic soils. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, 131(5): 654–661.
- Martelli, S.M. (2005). Obtenção e Caracterização de Filmes de Queratina de Penas de Frango. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Martínez-Hernández, A.L., Velasco-Santos, C., De-Icaza, M. & Castaño, V.M. (2007). Dynamical-mechanical and thermal analysis of polymeric composites reinforced with keratin biofibers from chicken feathers. *Compos. Part B Eng.*, 38(3): 405–410.
- Martins, É. de S., Reatto, A., Abílio de Carvalho, O.J.. & Guimarães, R.F. (2004). *Evolução Geomorfológica do Distrito Federal.* , 100.
- Mathew, J. & Ramesan, K. (2016). Comparative study on effect of soft soil stabilization using coir fibres and polypropylene fibres. *IOSR J. Mech. Civ. Eng.*, : 6 p.
- Medeiros, A.A. de L. (2017). Contribuição ao Estudo da Dosagem de Cal para a Estabilização de um Solo de Comportamento Laterítico e um não Laterítico. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos.
- Medina, J. & Motta, L.M.G. (2015). *Mecânica dos Pavimentos*. 3°. Rio de Janeiro, RJ.
- Miguel, M.G., Teixeira, R.S. & Padilha, A.C.C. (2014). Curvas características de sucção do solo laterítico da região de londrina / pr. *Rev. Ciência Tecnol.*, 12(May): 13.
- Montes-Zarazúa, E., Colín-Cruz, A., De La Luz Pérez-Rea, M., De Icaza, M., Velasco-Santos, C. & Laura Martínez-Hernández, A. (2015a). Effect of keratin structures from chicken feathers on expansive soil remediation. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2015(10.1155/2015/907567): 10 pg.
- Montes-Zarazúa, E., Colín-Cruz, A., Pérez-Rea, M.D.L.L., De Icaza, M., Velasco-Santos, C. & Martínez-Hernández, A.L. (2015b). Effect of keratin structures from chicken



- feathers on expansive soil remediation. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2015.
- Moore, G.R.P., Materlli, S.M., Andreo, P.D., Gandolfo, C. a., Machado, R.F. a., Bolzan, a. & Laurindo, J.B. (2005). Obtenção de biofilmes a partir de queratina de penas de frango. *Rev. Matéria*, 10(1): 8–13.
- Moraes, L. de M. & Paula Junior, D.R. (1999). Gerenciamento de resíduos de abatedouro de aves: alternativas de manejo e tratamento. 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, . ABES, 3618–3627.
- Nascimento, G.A.Z. (2011). Utilização de Resíduos Avícolas para a Produção de Energia e Biofertilizante na Gestão de Propriedades Rurais. Escola de Engenharia Mauá.
- Nogami, J.S. & Villibor, D.F. (1981). Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, . Simposio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, 15p.
- Nogami, J.S. & Villibor, D.F. (1995). Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos. 1º. Vilibor, São Paulo.
- Nunes, G.B. (2017). Estudo da influência das variações sazonais do perfil de sucção no fator de segurança ao deslizamento de uma encosta de solo residual de granito e diabásio. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Oliveira, E. de. (2010). Emprego da Cal na Estabilização de Solos Finos de Baixa Resistência e Alta Expansão: Estudo de Caso no Município de Ribeirão das Neves/MG. .
- Oliveira, L.A. (2003). Caracterização dos latossolos da chapada de araguari: minerais argilosos, granulometria e evolução. *Caminhos Geogr.*, 3: 18.
- Oliveira, V.D.A., Lima, M.D.S. & Farias, T.R.L. (2019). Análise mecânica de um solo areno-argiloso estabilizado com cal para fins de pavimentação. *Conex. - Ciência e Tecnol.*, 13(3): 24.
- Önal, O. (2015). Lime stabilization of soils underlying a salt evaporation pond: a laboratory study. *Mar. Georesources Geotechnol.*, 33(5): 391–402.
- Osinubi, K.J. & Bello, A.A. (2011). Soil-water characteristics curves for reddish brown tropical soil. *Electron. J. Geotech. Eng.*, 16 A: 1–25.
- Pahua-Ramos, M., Hernández-Melchor, D., Camacho-Pérez, B. & Quezada-Cruz, M. (2017). Degradation of chicken feathers: a review. *Biotechnol. An Indian J. Rev.* |, 13(6): 25.
- Passos, M.C.F. (2000). Metodologia MCT aplicada aos solos arenosos finos lateríticos

- do Rio Grande do Sul visando pavimentação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Peranić, J., Arbanas, Ž., Cuomo, S. & Maček, M. (2018). Soil-water characteristic curve of residual soil from a flysch rock mass. *Geofluids*, 2018: 1–15.
- Pereira, R.S., Emmert, F., Miguel, E.P. & Gatto, A. (2018). Soil stabilization with lime for the construction of forest roads. *Floresta e Ambient.*, 25(2).
- Pessoa, F.H.C. (2004). *Análise dos Solos de Urucu para Fins de Uso Rodoviário*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília. 151p.
- Pillai, R.R. & Ramanathan, A. (2012). An innovative technique of improving the soil using human hair fibers an innovative technique of improving the soil using human hair fibers. *Third International Conference on Construction in Developing Countries*, Bangkok, Thailand, 8.
- Pinto, A.R.A.G. (2008). *Fibras de Curauá e Sisal como Reforço em Matrizes de Solo*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação. Departamento de Engenharia Civil. PUC-Rio.
- Pinto, L.A. de M., Mateus, G.A.P., Baptista, A.T.A., Tavares, F. de O., Silva, M.O. & Pinto, M. de M. (2015a). Aspectos ambientais do abate de aves. IX EPCC - Encontro Internacional de Produção Científica UniCesumar, . UniCesumar, Maringá - Paraná, 7–10.
- Pinto, L.A. de M., Pinto, M. de M., Bovo, J., Mateus, G.A.P., Tavres, F. de O., Baptista, A.T.A. & Hirata, A.K. (2015b). Aspectos ambientais do abate de aves: uma revisão. *Rev. UNINGÁ*, 22(3): 44–50.
- Plácido, G.R. (2007). *Extração, Caracterização e Uso da Queratina de Penas de Frango para a Obtenção de Filmes Biodegradáveis*. Tese de Doutorado. Programa Pós-Graduação Química. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Portelinha, F.H.M., Lima, D.C., Fontes, M.P.F. & Carvalho, C.A.B. (2012). Modification of a lateritic soil with lime and cement: an economical alternative for flexible pavement layers. *Soils and Rocks*, 35(1): 51–63.
- Pourjavaheri, F., Mohaddes, F., Shanks, R.A., Czajka, M. & Gupta, A. (2014). Effects of different purification methods on chicken feather keratin. *Adv. Mater. Res.*, 941–944(June): 1184–1187.
- Prasanthi, N., Bhargavi, S., Machiraju, P.V.S. & Professor, A. (2007). Chicken feather

- waste-a threat to the environment. *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.* (An ISO, 3297(9)).
- Prazeres, L.B. (2004). *Ações Mitigadoras dos Impactos Ambientais em um Frigorífico de Aves*. Ciências da Administração. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Preussler, L.A. (2007). *Contribuição ao estudo de deformabilidade de camadas de pavimento*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 80p.
- Quintero-Curvelo, G.A., Huertas-Díaz, W.A. & Ortega-David, E. (2017). *Procesamiento de plumas de pollo para la obtención de queratina*. *UGCiencia*, 23: 7.
- Reddy, N., Chen, L. & Yang, Y. (2013a). *Biothermoplastics from hydrolyzed and citric acid crosslinked chicken feathers*. *Mater. Sci. Eng. C*, 33(3): 6 p.
- Reddy, N., Hu, C., Yan, K. & Yang, Y. (2011). *Thermoplastic films from cyanoethylated chicken feathers*. *Mater. Sci. Eng. C*, 31(8): 1706–1710.
- Reddy, N., Jiang, Q., Jin, E., Shi, Z., Hou, X. & Yang, Y. (2013b). *Bio-thermoplastics from grafted chicken feathers for potential biomedical applications*. *Colloids Surfaces B Biointerfaces*, 110: 8 p.
- Reddy, N. & Yang, Y. (2007). *Structure and properties of chicken feather barbs as natural protein fibers*. *J. Polym. Environ.*, 15(2): 8 p.
- Rezende, L.R. de. (2003). *Estudo de Comportamento de Materiais Alternativos Utilizados em Estruturas de Pavimentos Flexíveis*. Tese de Doutorado em Geotecnia. Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília. 372p.
- Ribeiro, M.M.P. (2013). *Contribuição ao estudo da deformação permanente dos solos de subleito*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 119p.
- Ribeiro, M.M.P., Da Silva, M.F. & Furlan, A.P. (2018). *Estudo de modelos de previsão da deformação permanente para um solo arenoso laterítico*. 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET, Gramado - RS, 11 p.
- Rocha, G.S. (2018). *Efeito Da Cal Na Resposta Mecânica De Um Solo Residual Maduro: Análise Da Resistência À Compressão Não Confinada, Permeabilidade, Compressibilidade E Efeito Da Cura Acelerada Na Resistência Mecânica*. Universidade Federal de Viçosa.
- Rocha, M.F. (2013). *Influência do perfil de sucção em obras de contenção em solos não saturados-II*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Programa de Pós Graduação

- em Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiás. 271p.
- Romaniw, J., Sá de Moraes, J.C., Padilha, A.A., Ramos, F. da S. & Eurich, G. (2014). Impacto do uso de resíduo orgânico de abatedouro de aves e suínos na percolação de nitrato no solo. III Reunião Paranaense de Ciência do Solo, Londrina - PR, 9: , 9–14.
- Saab, A.L. (2016). Influência da sucção nos parâmetros de compressibilidade de um solo não saturado. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”. 125p.
- Sachetti, Á.S. (2012). Solo Reforçado com Cal e Fibras de Polipropileno: Comportamento quando Submetido à Compressão Triaxial. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 85p.
- Sales, K.C. dos S. (2011). Melhoria de Solos por Inclusão de Fibras Naturais. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Brasília. 113p.
- Santana, W.C. & Bernucci, L.L.B. (2016). Caracterização dos solos da ilha de São Luís para fins de pavimentação. Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, . COBRAMSEG 2016, Minas Gerais, 8.
- Santiago, G.A. & Botaro, V.R. (2005). Estabilização de um solo com fibras de sisal impermeabilizadas com eps reciclado. 9º Congr. Bras. Polímeros, : 9 pg.
- Santiago, G.A. & Botaro, V.R. (2009). Fibras de sisal impermeabilizadas com betume para reforço em matrizes de solo argiloso. 10º CBPol Congresso Brasileiro de Polímeros, Foz de Iguaçu, PR, 9.
- Schelestow, K., Troncoso, O.P. & Torres, F.G. (2017). Failure of flight feathers under uniaxial compression. Mater. Sci. Eng. C, 78: 923–931.
- Senaha, S.C.F. (2019). A quartilização em perfis de intemperismo tropical. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília. Brasília, DF. 158p.
- Shaia, H. & Hassan Al-Humeidawi, B. (2016). Improvement of sub-grade soil using natural jute fibre sheet soil improvement view project concrete pavement view project. J. Univ. Kerbala, 14(3): 9.
- Shukla, D., Rajan, S., Saxena, A.K. & Jha, A.K. (2015). Soil stabilization using coconut coir fibre. Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol., 3(9): 5 p.
- Silva, Millena Vasconcelos; Curado, Tallyta da Silva; Rezende, Lilian Ribeiro de; Moura,

- E. de. (2016). Estudo laboratorial de misturas de solo tropical, estabilizantes químicos e fosfogesso anidro. 16° ENACOR, 42°: 13.
- Da Silva, C.C. (2007). Comportamento de Solos Siltosos Quando Reforçados com Fibras e Melhorados com Aditivos Químicos e Orgânicos. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Universidade Federal do Paraná.
- Subramani, T., Sridhar, R.K. & Priyanka, S. (2017). Natural fibre as soil stabilizer for construction. *Int. J. Appl. or Innov. Eng. e Manag.*, 6(5): 11.
- Sunada, N. da S., Orrico, A.C.A., Junior Orrico, M.A.P., Centurion, S.R., Oliveira, A.B. de M., Fernandes, A.R.M., Junior, J. de L. & Seno, L. de O. (2015). Compostagem de resíduo sólido de abatedouro avícola. *Ciência Rural*, 45145(1): 178–183.
- Tao, H., Chen, C., Jiang, P. & Tang, L. (2017). Soil water characteristic curves based on particle analysis. *Procedia Engineering*, . Elsevier Ltd, 174: , 1289–1295.
- Teixeira, W. (2019). Comportamento Mecânico de Misturas Solo, Cal e RCD para uso em pavimentos. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- Teixeira, W., Moreira, E.B., Rissardi, J.L., Andrade, V.C. de & Izzo, R.L. dos S. (2019). Estabilização de um solo silte arenoso da formação guabirotuba com cal para uso em pavimentação. *As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente 2*, . COBRAMSEG, 2018, Salvador, Bahia, 69–79.
- Tenório, E.A.G. (2018). Controle da Expansão dos Solos com Resíduos de Mármore e Cal. . *J. Linguist.*, 10.18041/2382-3240/saber.2010v5n1.2536, Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, *J. Linguist.*,.
- Tesfaye, T., Sithole, B. & Ramjugernath, D. (2017a). Valorisation of chicken feathers: a review on recycling and recovery route—current status and future prospects. *Clean Technol. Environ. Policy*, 19(10): 2363–2378.
- Tesfaye, T., Sithole, B., Ramjugernath, D. & Chuniilall, V. (2017b). Valorisation of chicken feathers: characterisation of physical properties and morphological structure. *J. Clean. Prod.*, 149: 349–365.
- Tesfaye, T., Sithole, B., Ramjugernath, D. & Mokhothu, T. (2018). Valorisation of chicken feathers: characterisation of thermal, mechanical and electrical properties. *Sustain. Chem. Pharm.*, 9: 27–34.
- Thyagaraj, T. & Zodinsanga, S. (2015). Laboratory investigations of in situ stabilization of an expansive soil by lime precipitation technique. *Am. Soc. Civ. Eng.*, 27(7): 1–

8.

- Trindade, T.P. Da, Iasbik, I., Lima, D.C. De, Minette, E., Silva, C.H.D.C., Carvalho, C.A.B. De, Bueno, B.D.S. & Machado, C.C. (2006). Estudos laboratoriais do comportamento de um solo residual arenoso reforçado com fibras de polipropileno, visando à aplicação em estradas florestais. *Rev. Árvore*, 30(2): 215–221.
- Upadhyay, P. & Singh, Y. (2017). Soil stabilization using natural fiber coir. *Int. Res. J. Eng. Technol.*, 04(12): 5.
- Vassoler, G., Chong, W. & Specht, L.P. (2011). Comportamento mecânico de pavimentos flexíveis submetidos a gradientes térmicos. *Acta Sci. Technol.*, 33(3): 265–271.
- Villibor, D.F. & Alves, D.M.L. (2019). *Pavimentação de Baixo Custo Para Regiões Tropicais*. 1°. Tribo da Ilha, Florianópolis.
- Villibor, D.F. & Nogami, J.S. (2009). *Pavimentos Econômicos - Tecnologia do uso dos Solos Finos Lateríticos*. 1°. Arte & Ciência, São Paulo.
- Villibor, D.F., Nogami, J.S., Cincerre, J.R., Serra, P.R.M. & Neto, A.Z. (2009). *Pavimentos de Baixo Custo Para Vias Urbanas*. 2a edn. Arte & Ciência, São Paulo.
- Vincentini, D.L.G. & Oliveira, J.G.R. (2019). Análise da gestão dos resíduos de avicultura e impactos ambientais no município de Leopoldina (pr). *Rev. Geogr. em Atos*, 4: 22.
- Zhan, M. & Wool, R.P. (2011). Mechanical properties of chicken feather fibers. *Polym. Compos.*, 32(6): 8 p.
- Zhang, J., Peng, J., Chen, Y., Li, J. & Li, F. (2018). Estimation of soil-water characteristic curve for cohesive soils with methylene blue value. *Adv. Civ. Eng.*, 2018: 8.

# APÊNDICE A

## CURVAS DE COMPACTAÇÃO DA MISTURA SOLO – 0,50% DE FIBRA – CAL

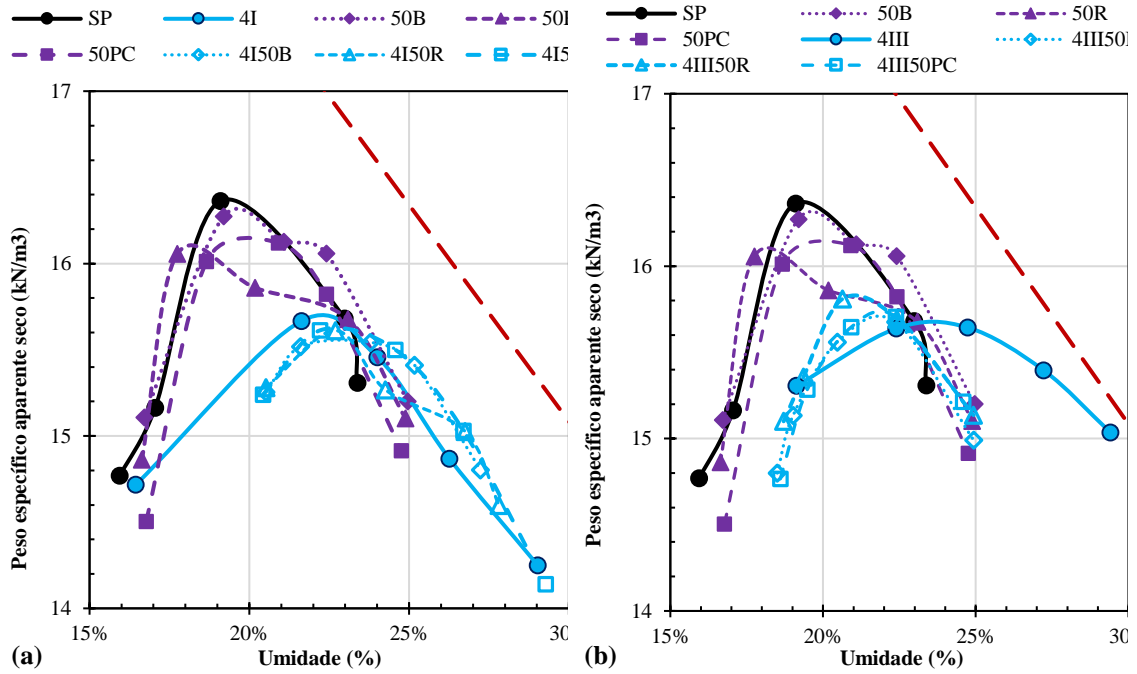


Figura A-1 – Influência de 0,50% de fibras em misturas solo-cal 4%. (a) cal tipo CH-I; (b) cal tipo CH-III

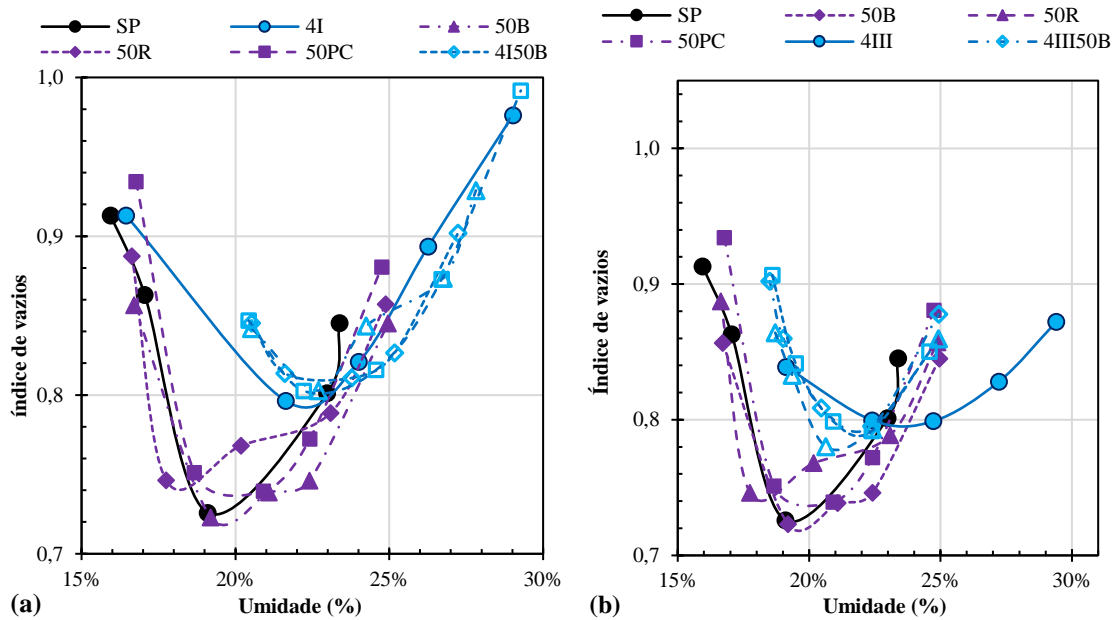


Figura A-2 – Influência de 0,50% de fibra no índice de vazios de misturas solo-cal 4% (a) cal tipo CH-I; (b) cal tipo CH-III

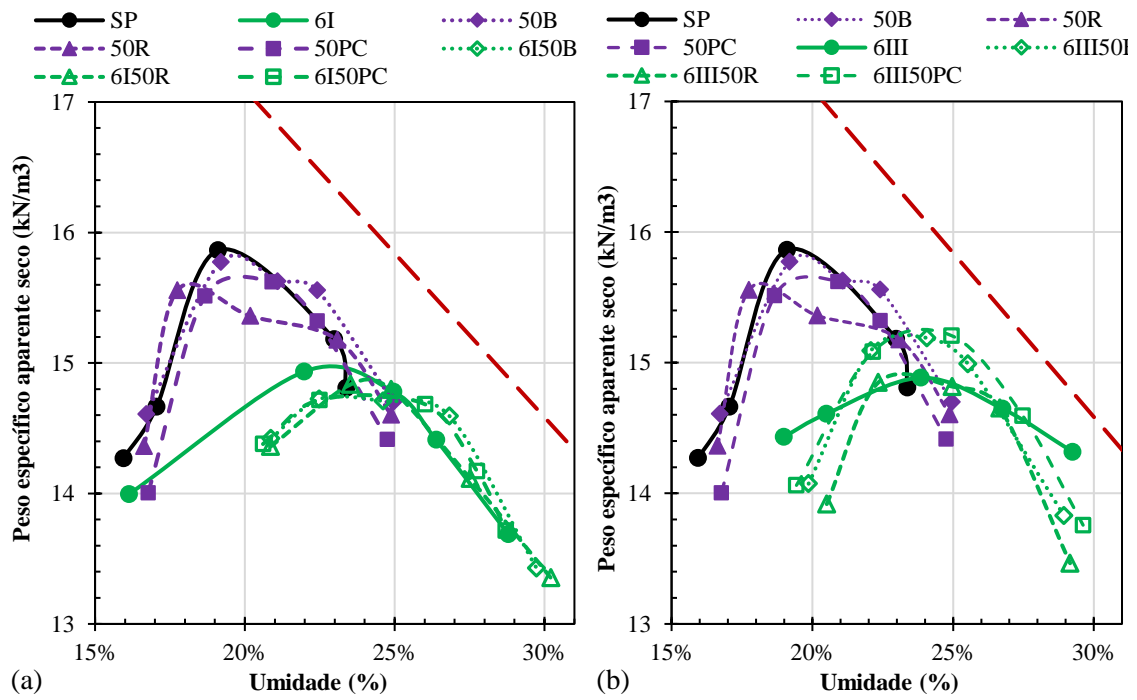


Figura A-3 – Influência de 0,50% de fibras em misturas solo-cal 6%. (a) cal tipo CH-I; (b) cal tipo CH-III

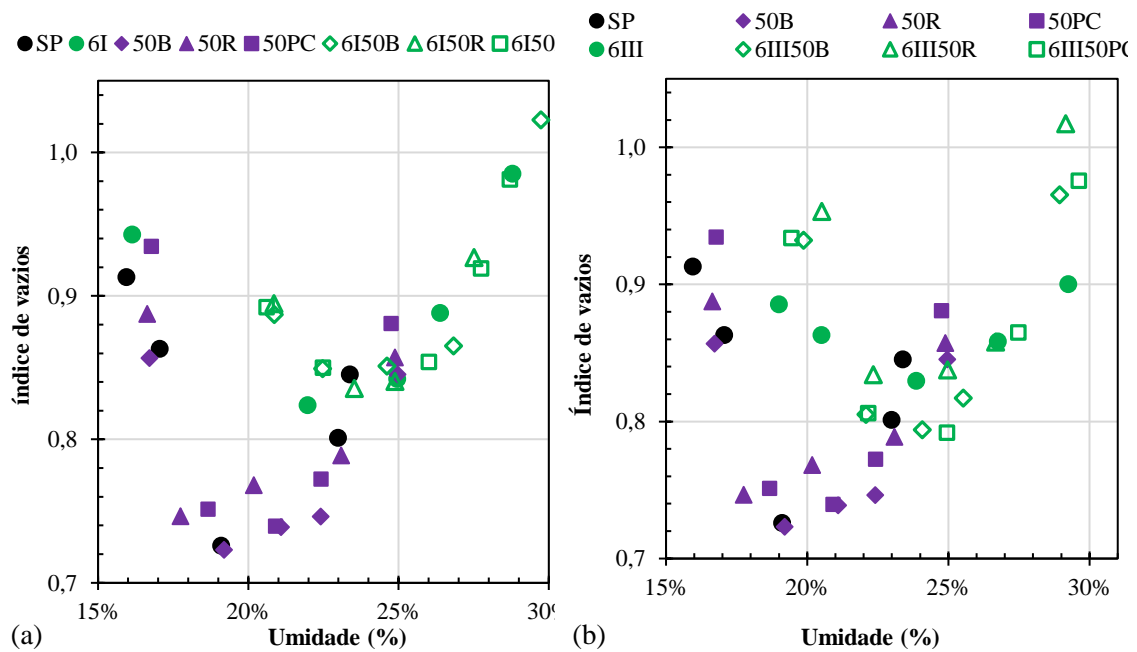


Figura A-4 – Influência de 0,50% de fibra no índice de vazios de misturas solo-cal 6% (a) cal tipo CH-I; (b) cal tipo CH-III



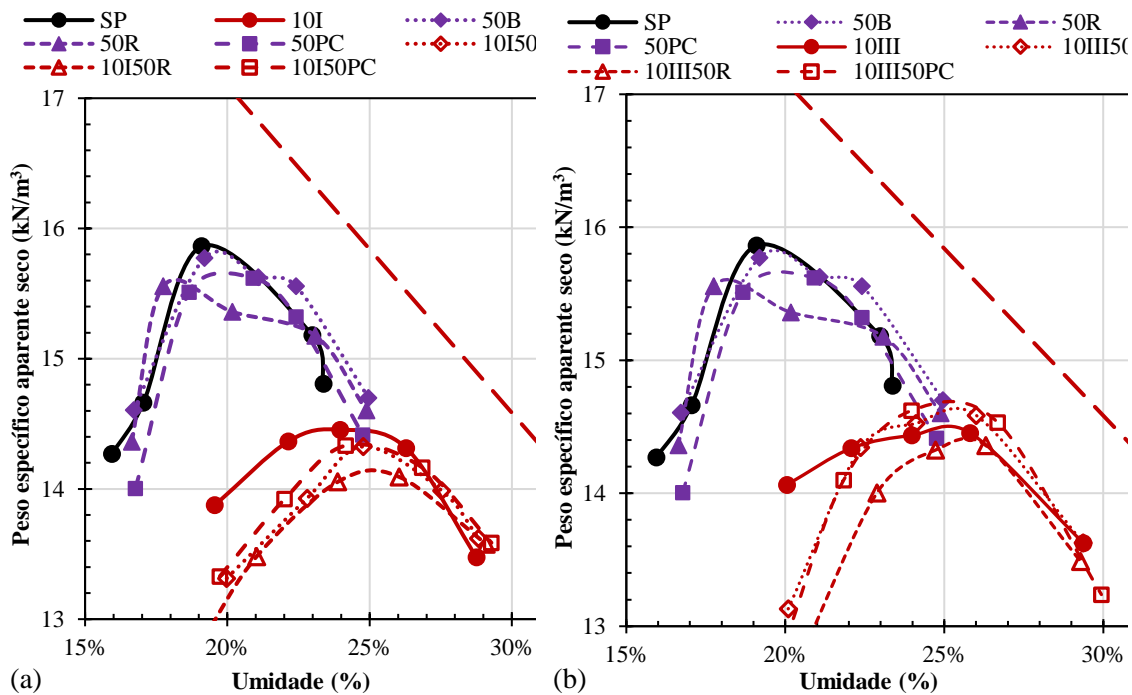


Figura A-5 – Influência de 0,50% de fibras em misturas solo-cal 10%. (a) cal tipo CH-I; (b) cal tipo CH-III

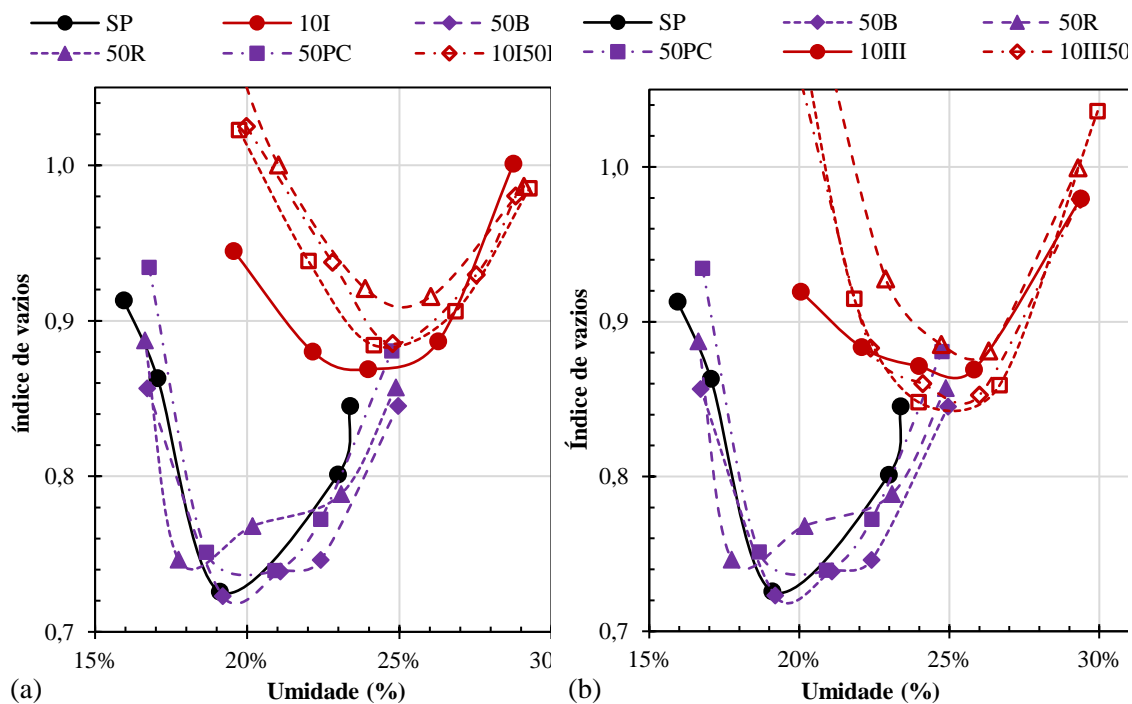


Figura A-6 – Influência de 0,50% de fibra no índice de vazios de misturas solo-cal 10% (a) cal tipo CH-I; (b) cal tipo CH-III

## APÊNDICE B

### CURVAS DE COMPACTAÇÃO DA MISTURA SOLO – 0,75% DE FIBRA – CAL

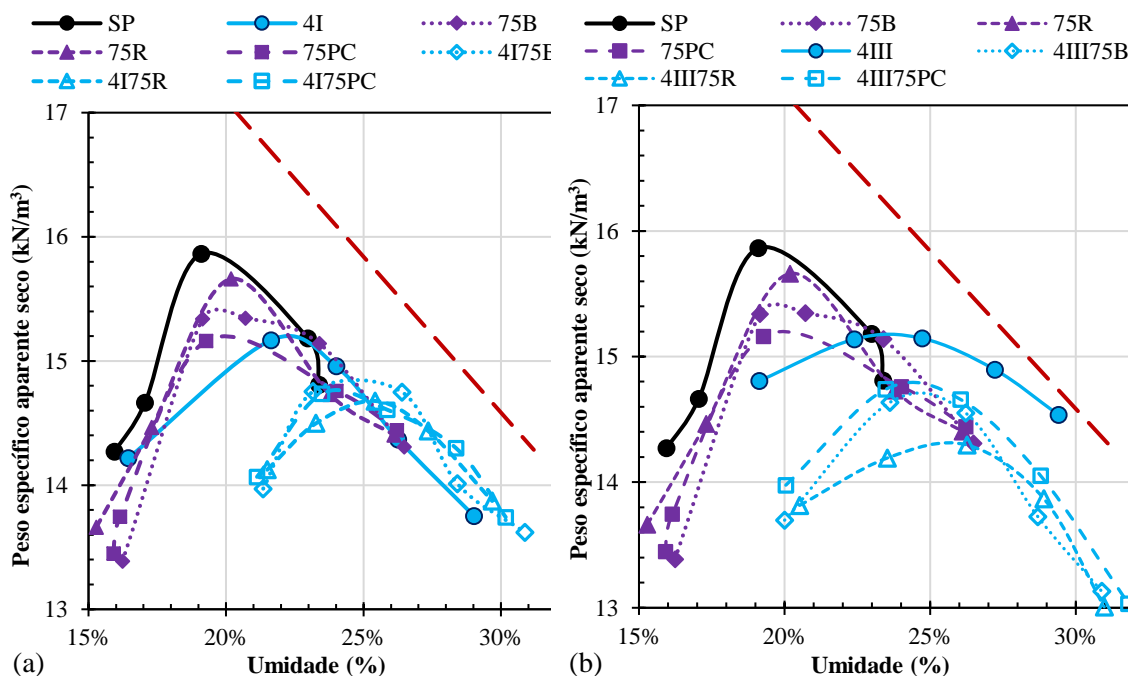


Figura B-1 – Influência de 0,75% de fibras em misturas solo-cal 4%. (a) cal tipo CH-I; (b) cal tipo CH-III

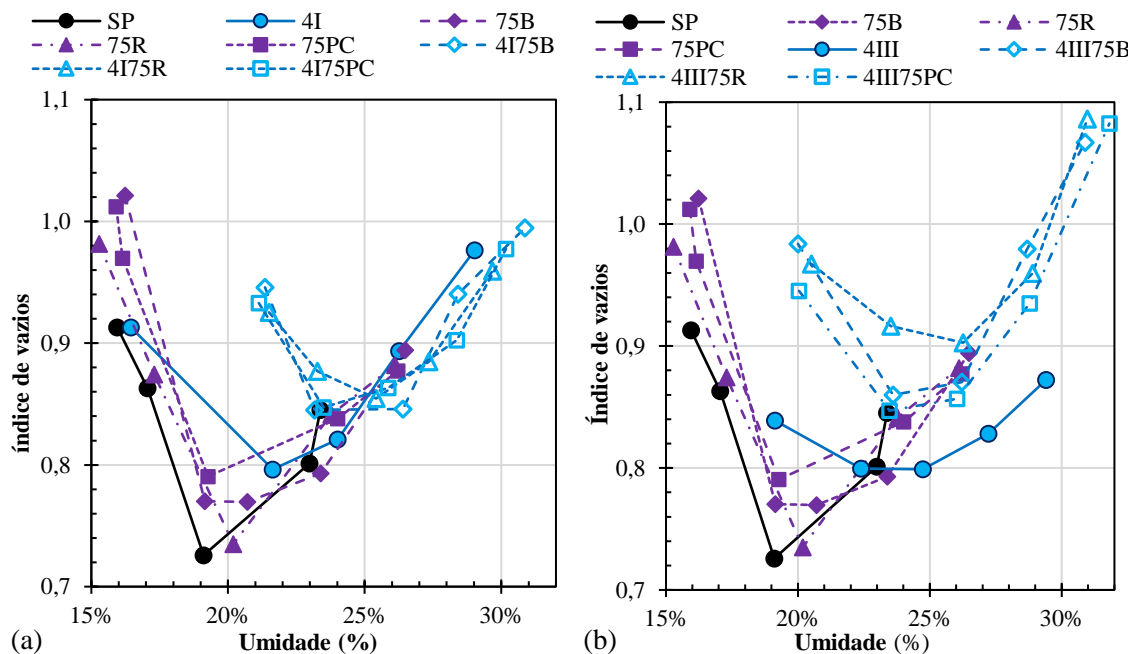


Figura B-2 – Influência de 0,75% de fibra no índice de vazios de misturas solo-cal 4% (a) cal tipo CH-I; (b) cal tipo CH-III

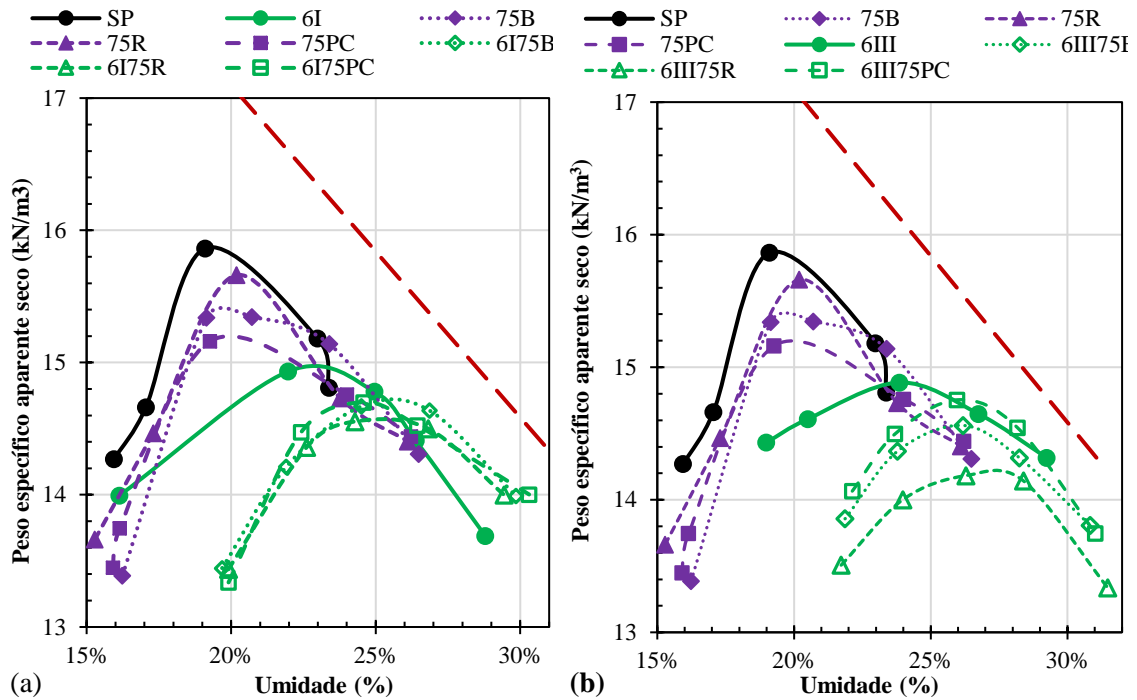


Figura B-3 – Influência de 0,75% de fibras em misturas solo-cal 6%. (a) cal tipo CH-I; (b) cal tipo CH-III

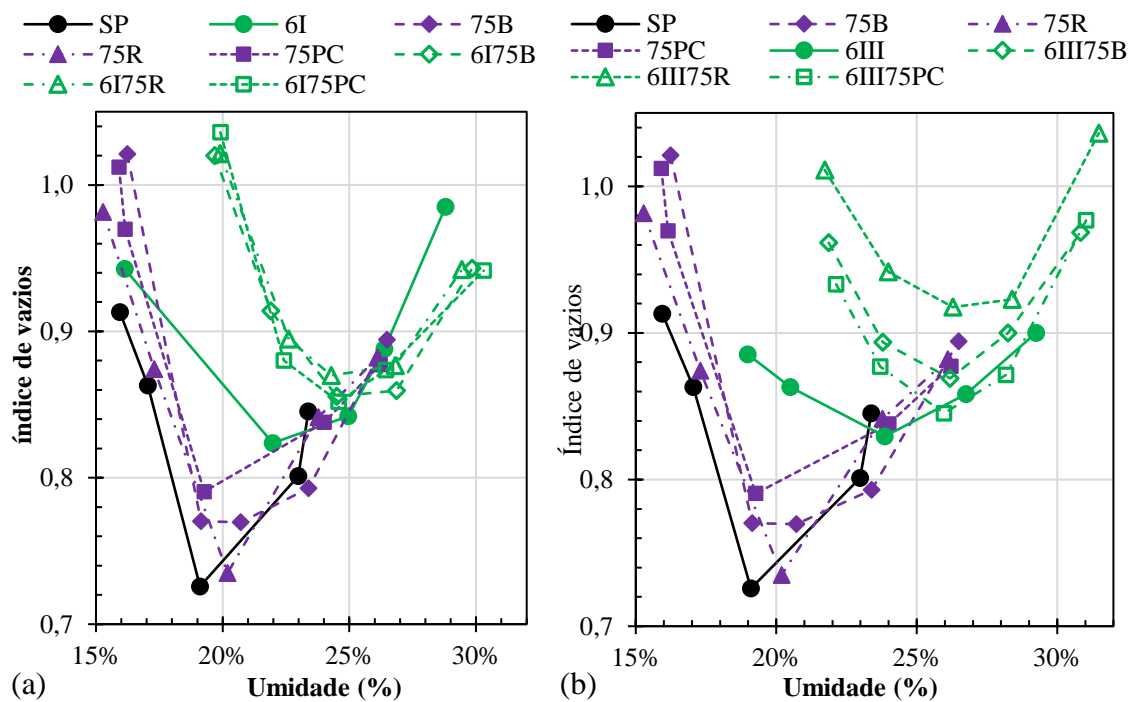


Figura B-4 – Influência de 0,75% de fibra no índice de vazios de misturas solo-cal 6% (a) cal tipo CH-I; (b) cal tipo CH-III

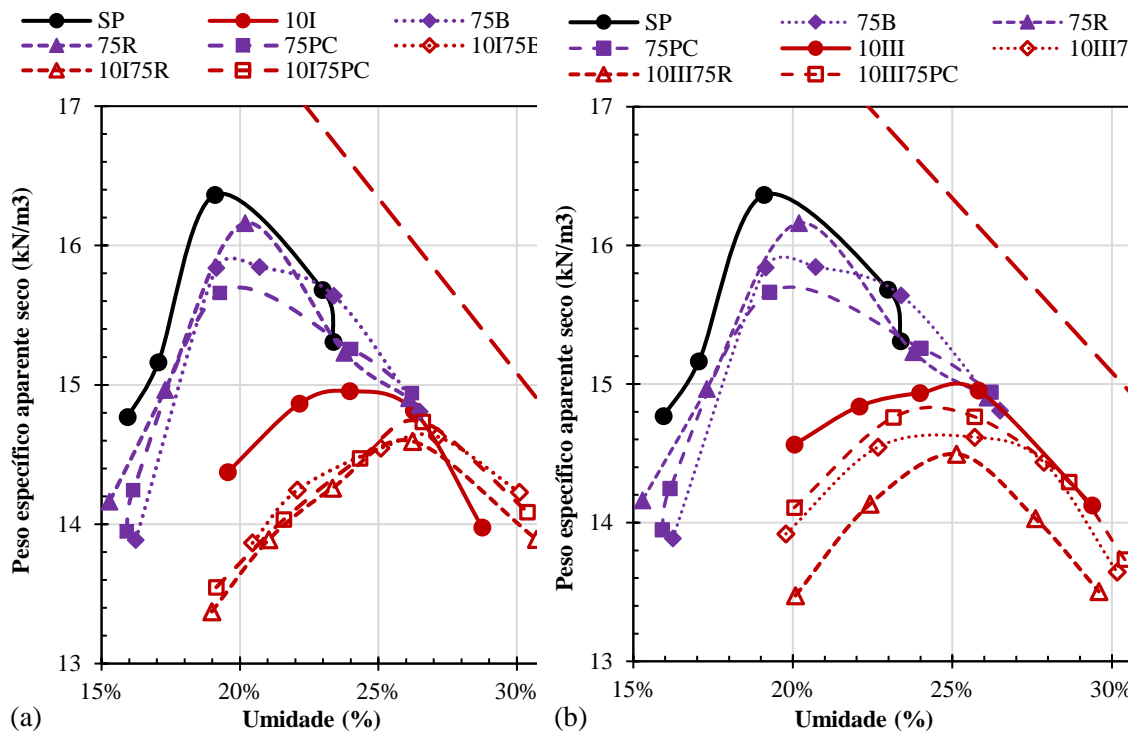


Figura B -5 – Influência de 0,75% de fibras em misturas solo-cal 10%. (a) cal tipo CH-I; (b) cal tipo CH-III

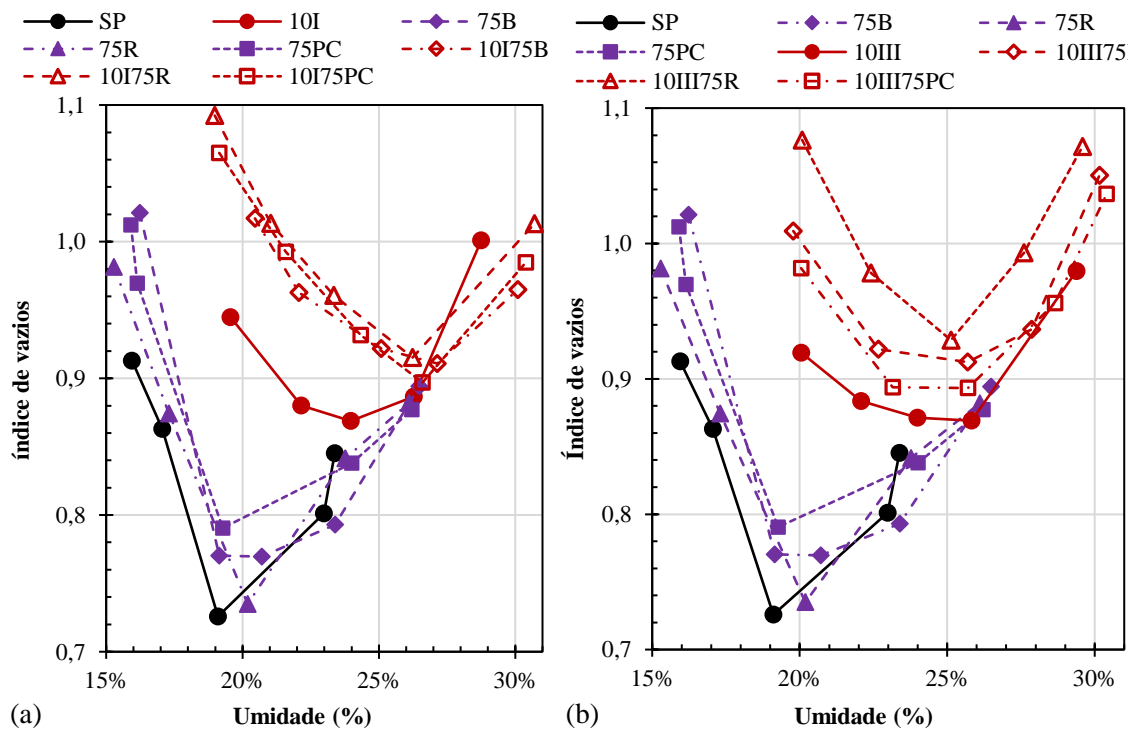


Figura B-6 – Influência de 0,75% de fibra no índice de vazios de misturas solo-cal 10% (a) cal tipo CH-I; (b) cal tipo CH-III

## APÊNDICE C – ANÁLISE TEMPORAL DO MINI CBR

RESULTADOS DE MINI CBR EM FUNÇÃO  $pF/e$  MISTURAS SOLO RAQUE E SOLO BARBA

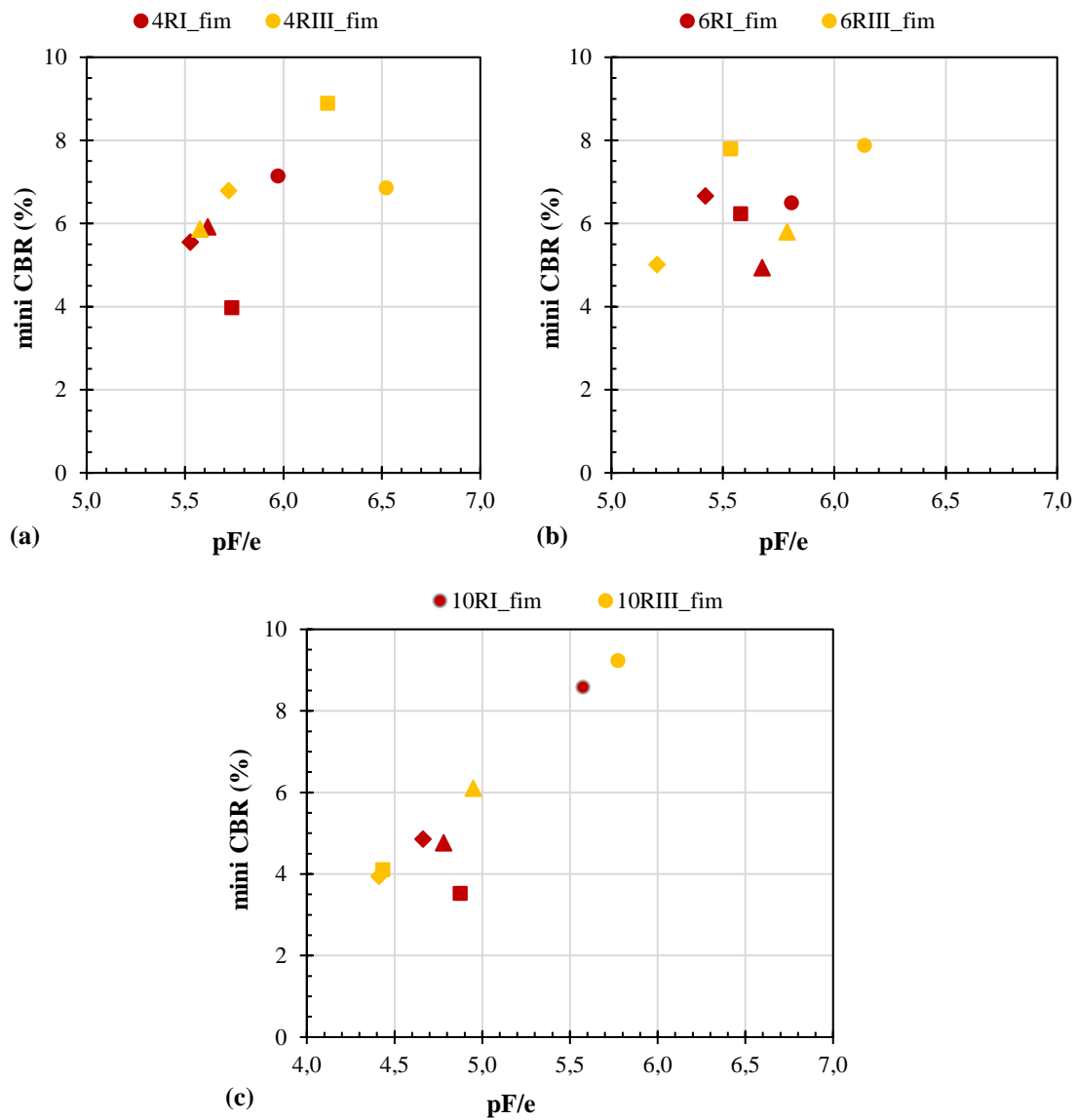


Figura C-1 – Resultados de mini CBR em função de  $pF/e$  obtidos para a fibra raque em misturas contendo 4% (a), 6% (b) e 10% (c) de cal CH-I e CH-III

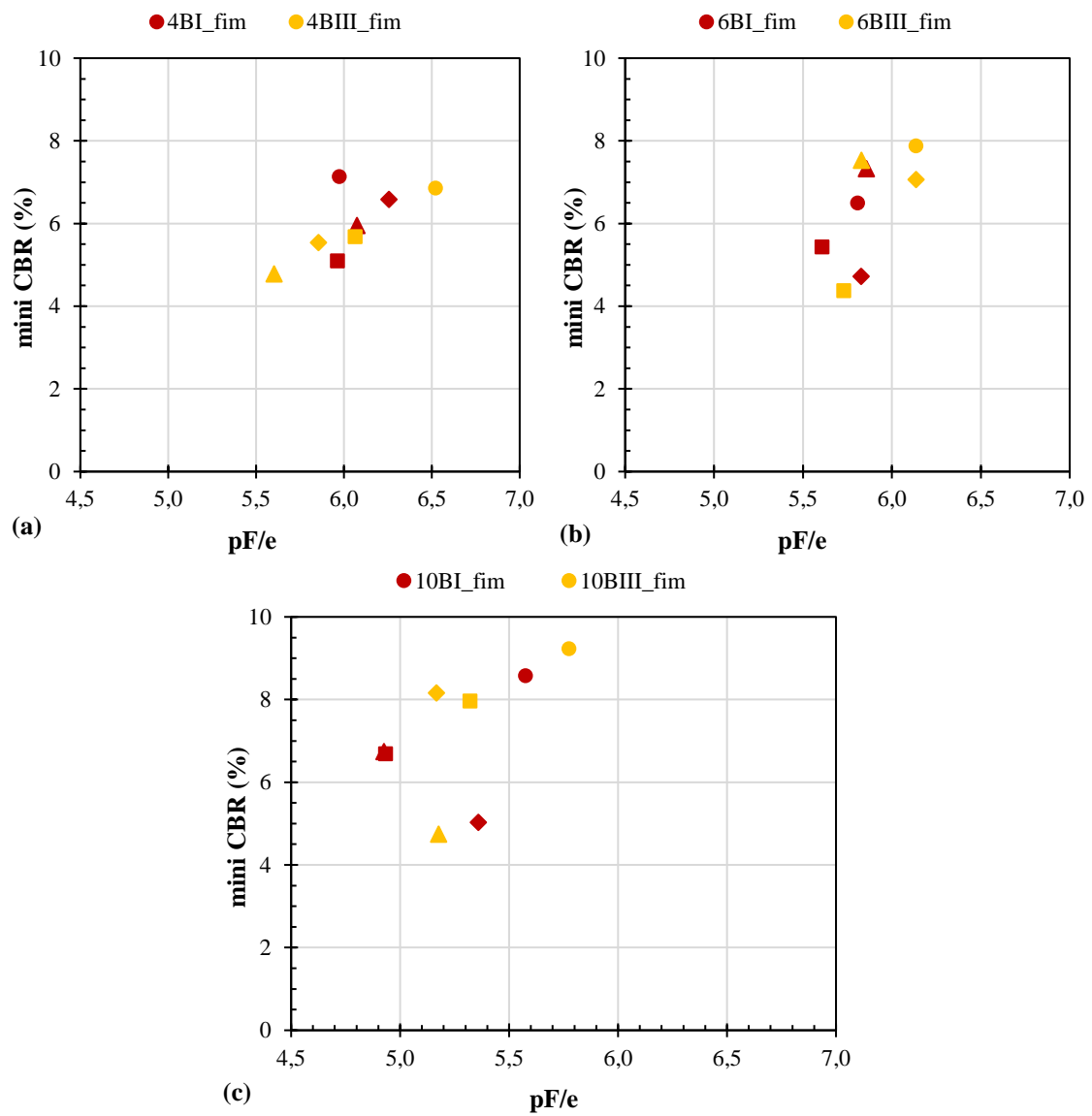


Figura C-2 – Resultados de mini CBR em função de pF/e obtidos para a fibra barba e em misturas contendo 4% (a), 6% (b) e 10% (c) de cal CH-I e CH-III

## APÊNDICE D – ANÁLISE TEMPORAL DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES RCS

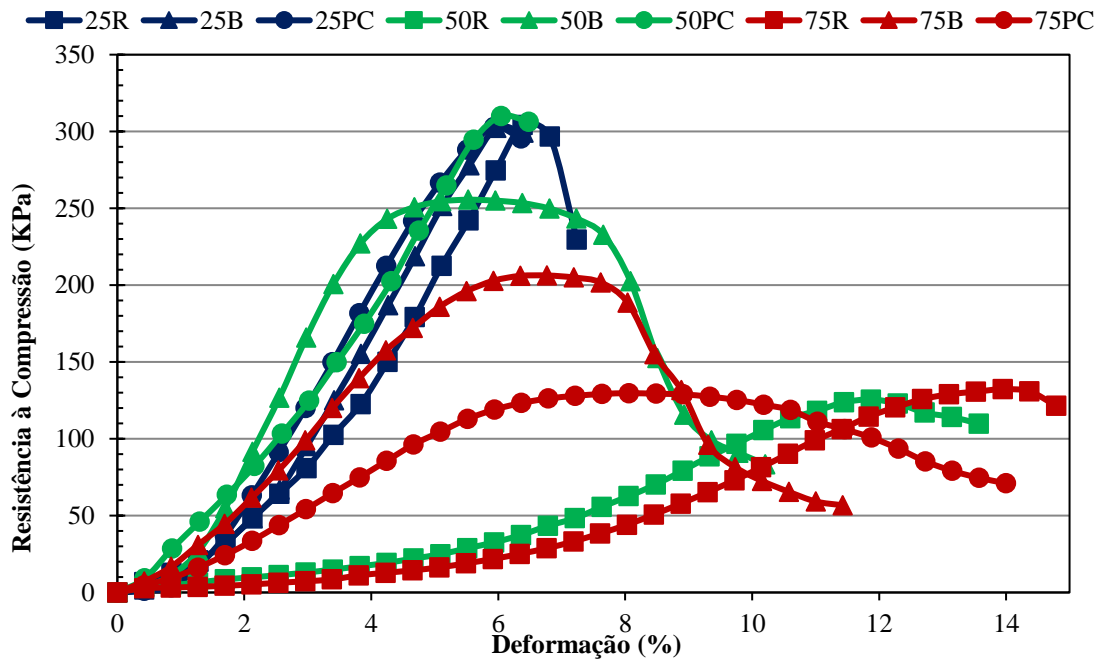


Figura D-1 – Curvas de compressão RCS misturas solo fibra – cura em laboratório

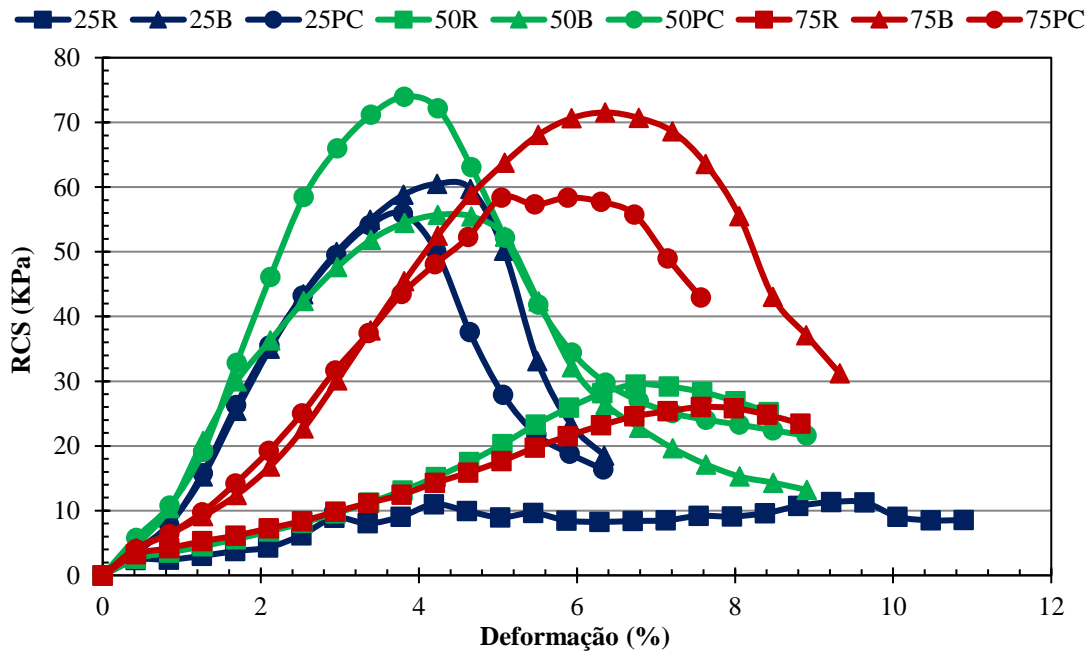


Figura D-2 - Curvas de compressão RCS misturas solo fibra – cura em campo

**APÊNDICE D1 – ANÁLISE TEMPORAL DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO  
SIMPLES RCS – FIBRA RAQUE**

30D ● SP ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75% C1 ● SP ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
C2 ● SP ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75% V1 ● SP ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
V2 ● SP ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%

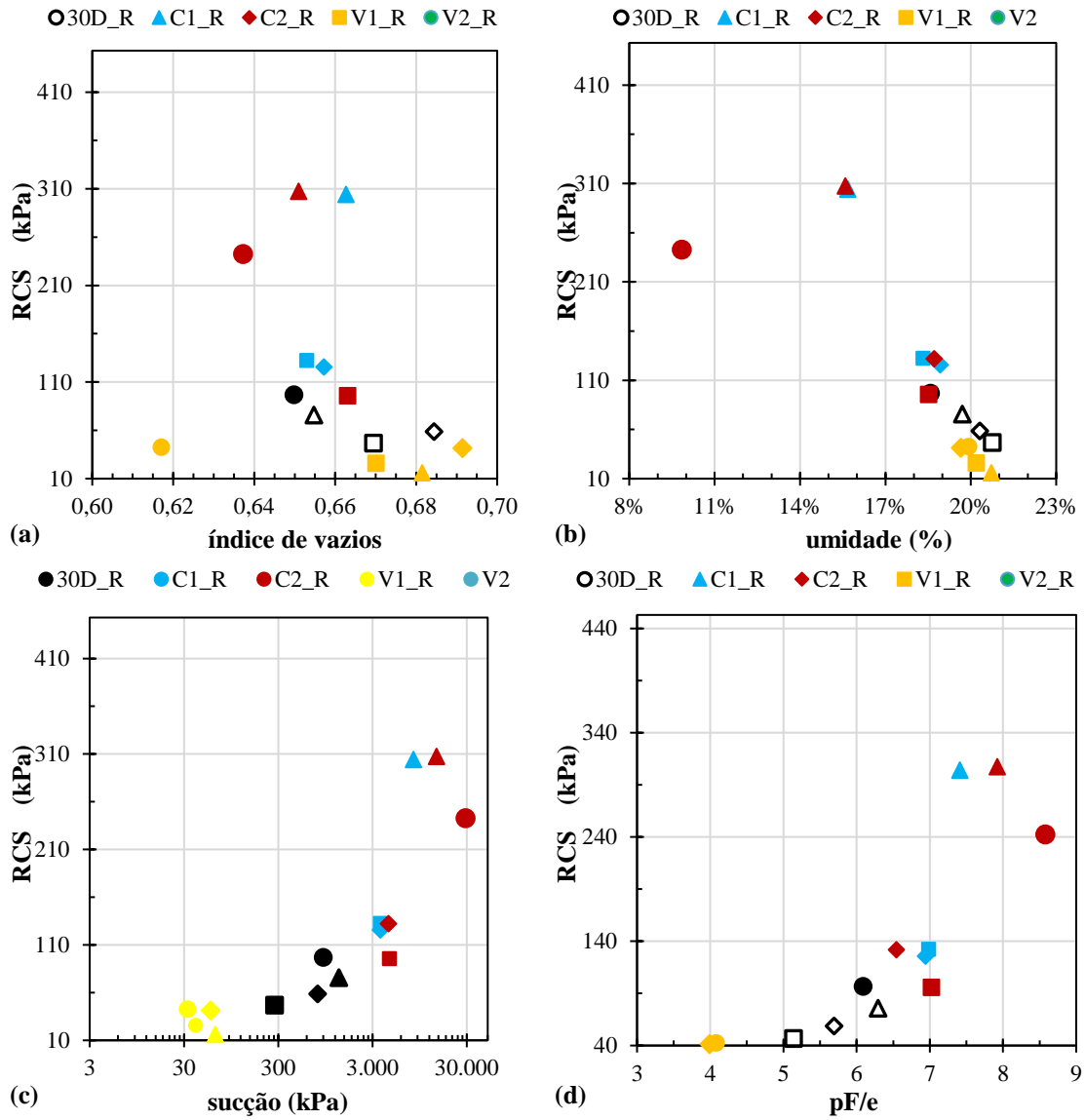


Figura D-3 - Influência do tempo e tipo de cura na RCS da raque



**APÊNDICE D2 – ANÁLISE TEMPORAL DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO  
SIMPLES RCS – FIBRA BARBA**

**30D** ● SP ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75% **C1** ● SP ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**C2** ● SP ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75% **V1** ● SP ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**V2** ● SP ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%

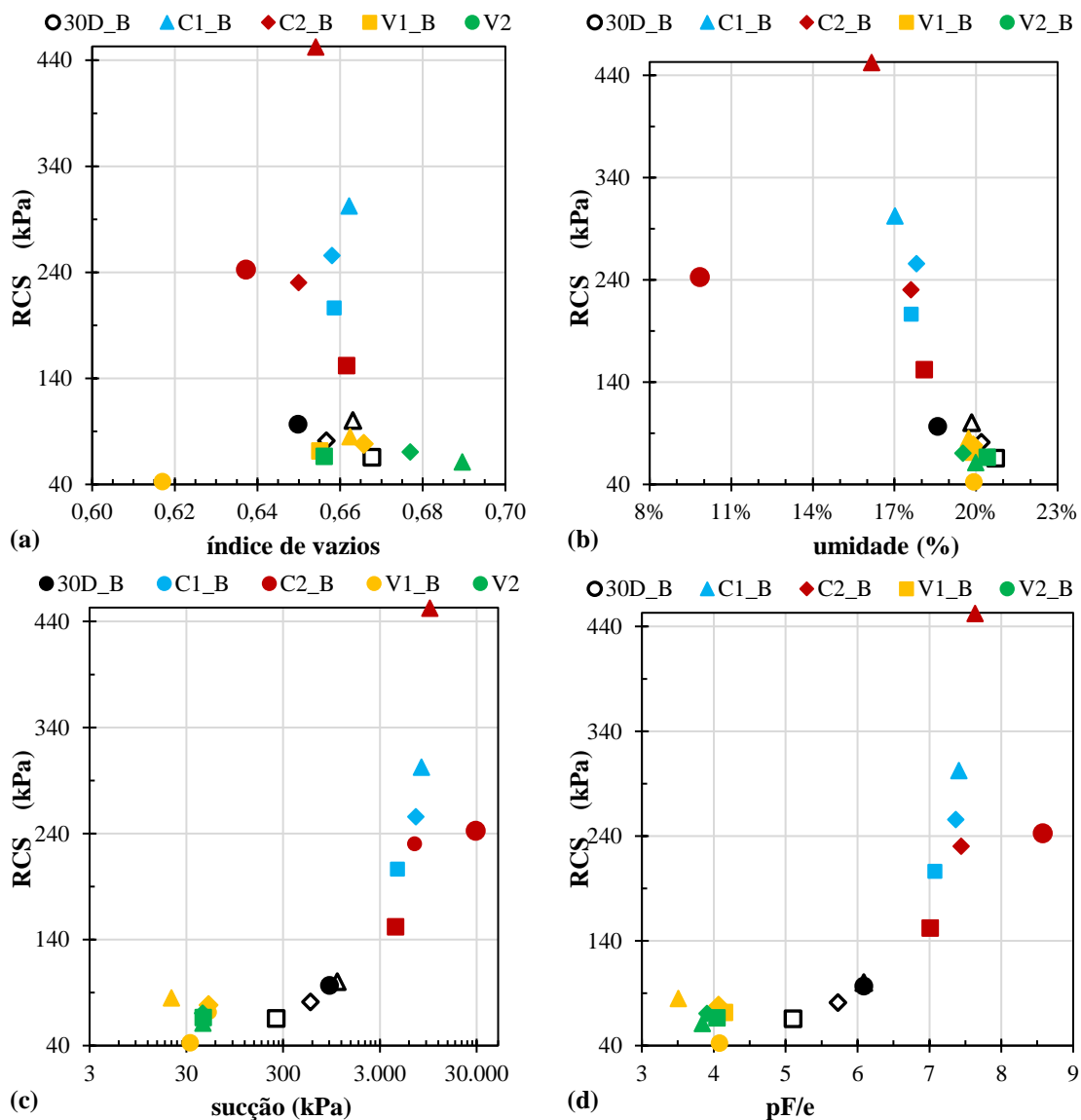


Figura D-4 - Influência do tempo e tipo de cura na RCS da barba

## APÊNDICE E – ANÁLISE TEMPORAL DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES – RCS

**30D** ● 4% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **C1** ● 4% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**C2** ● 4% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **V1** ● 4% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**V2** ● 4% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%

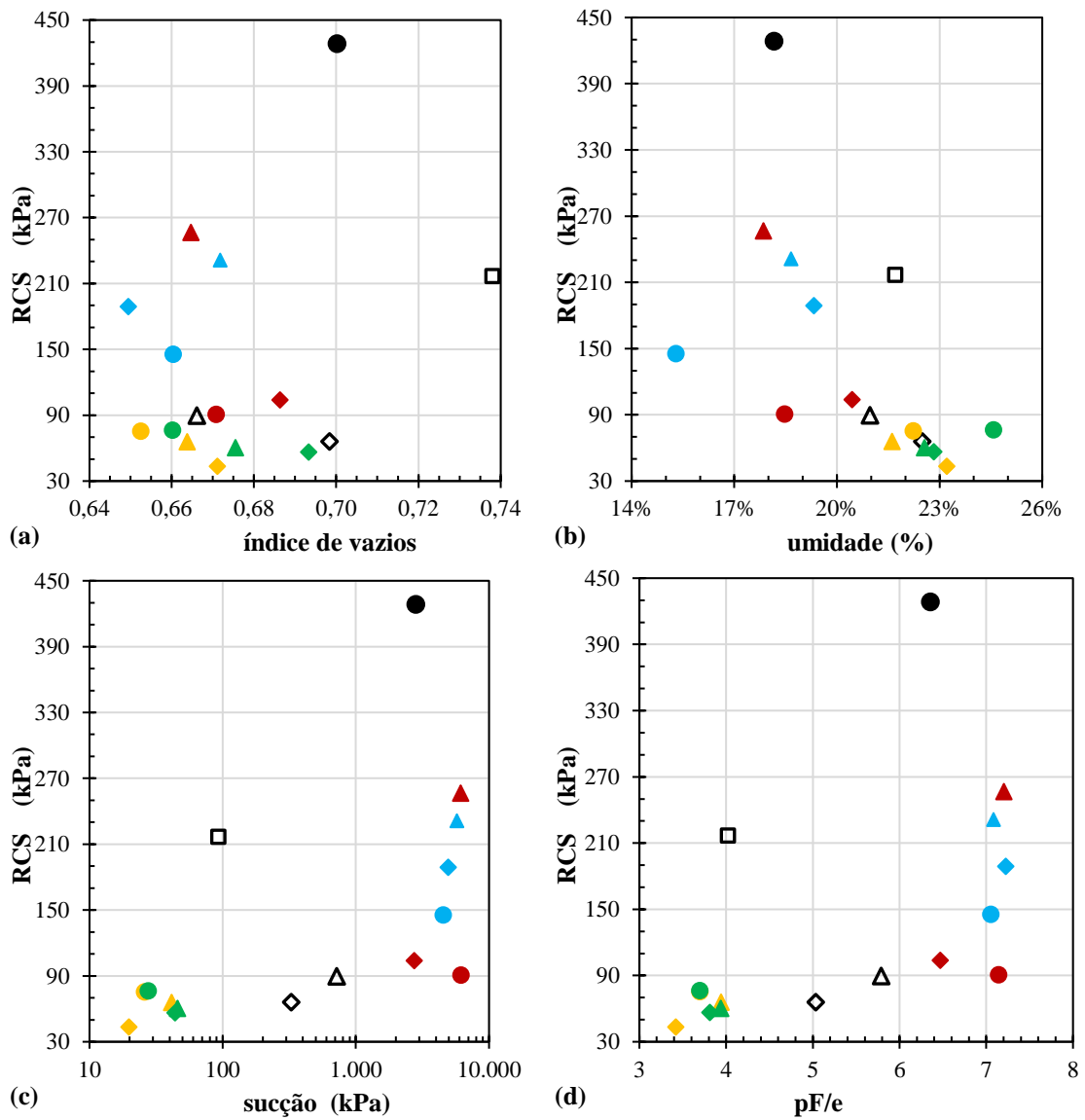


Figura E-1 - RCS das misturas solo – barba – 4 % de cal CH-I

30D ● 4% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75% C1 ● 4% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
 C2 ● 4% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75% V1 ● 4% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%

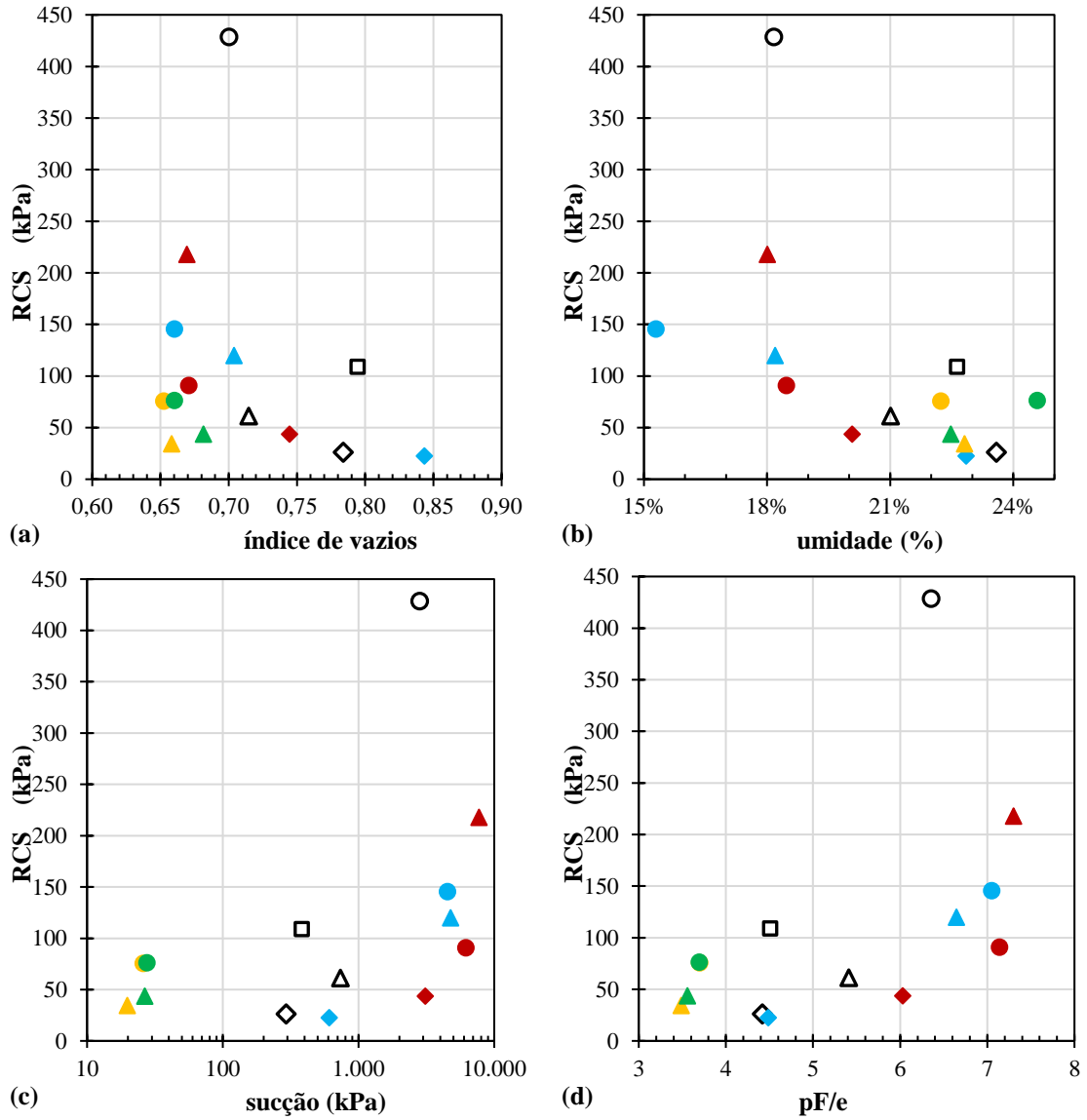


Figura E-2 - RCS das misturas solo – raque – 4 % de cal CH-I

**30D** ● 6% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **C1** ● 6% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**C2** ● 6% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **V1** ● 6% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**V2** ● 6% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%

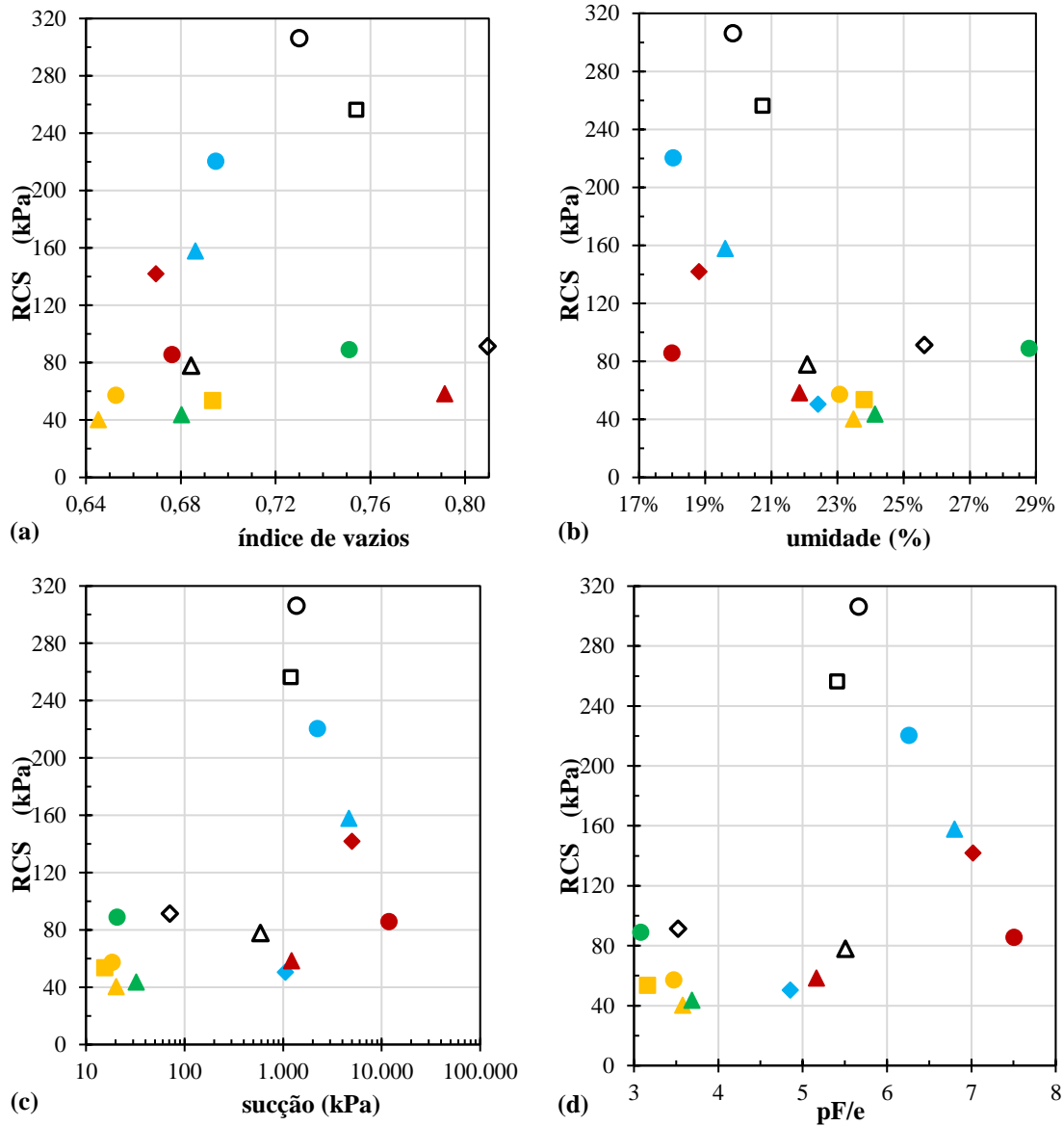


Figura E-3 - RCS das misturas solo – pena completa – 6 % de cal CH-I

**30D** ● 6% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **C1** ● 6% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**C2** ● 6% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **V1** ● 6% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**V2** ● 6% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%

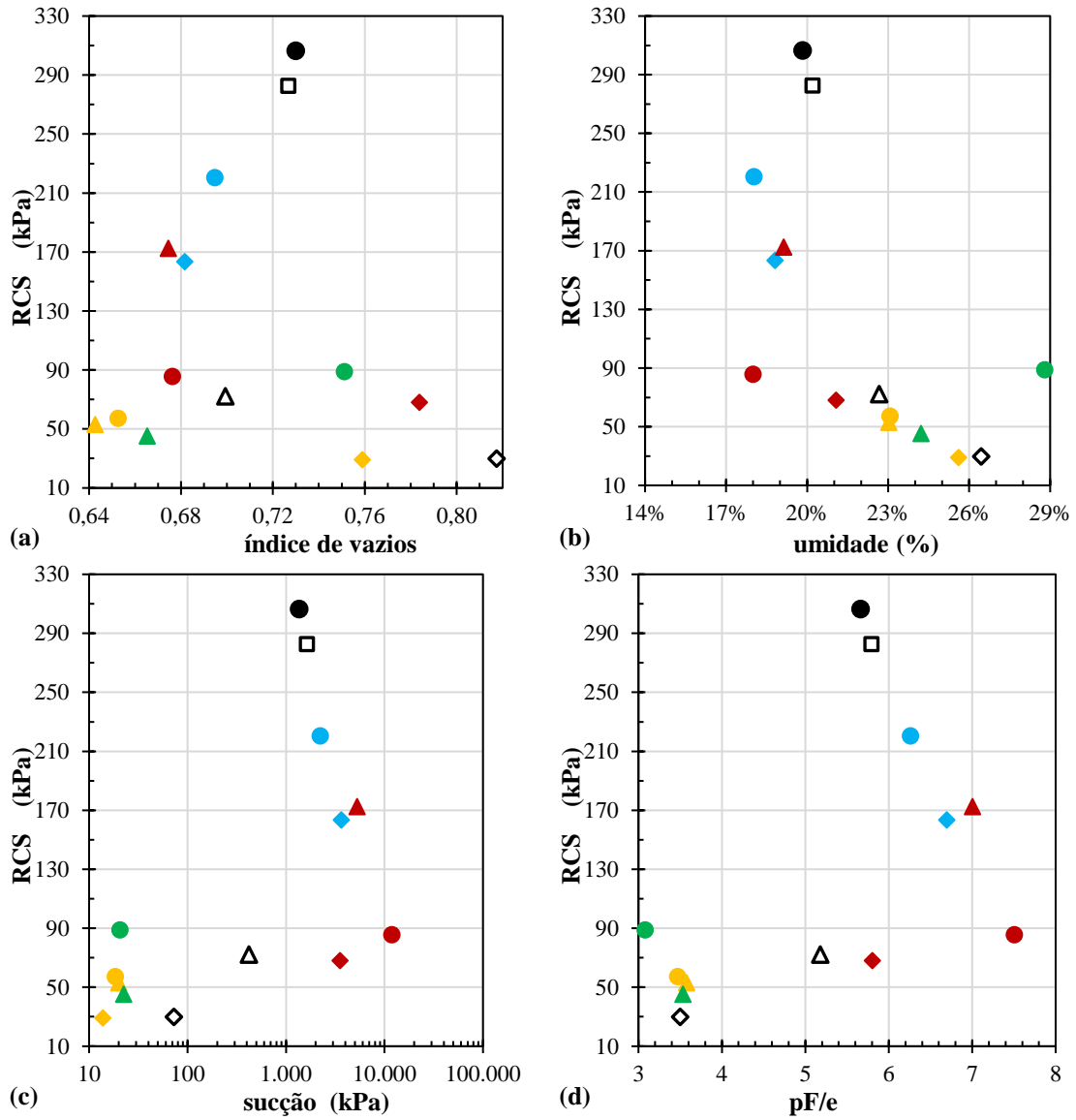


Figura E-4 - RCS das misturas solo – barba – 6 % de cal CH-I

**30D** ● 6% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **C1** ● 6% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**C2** ● 6% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **V1** ● 6% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**V2** ● 6% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%

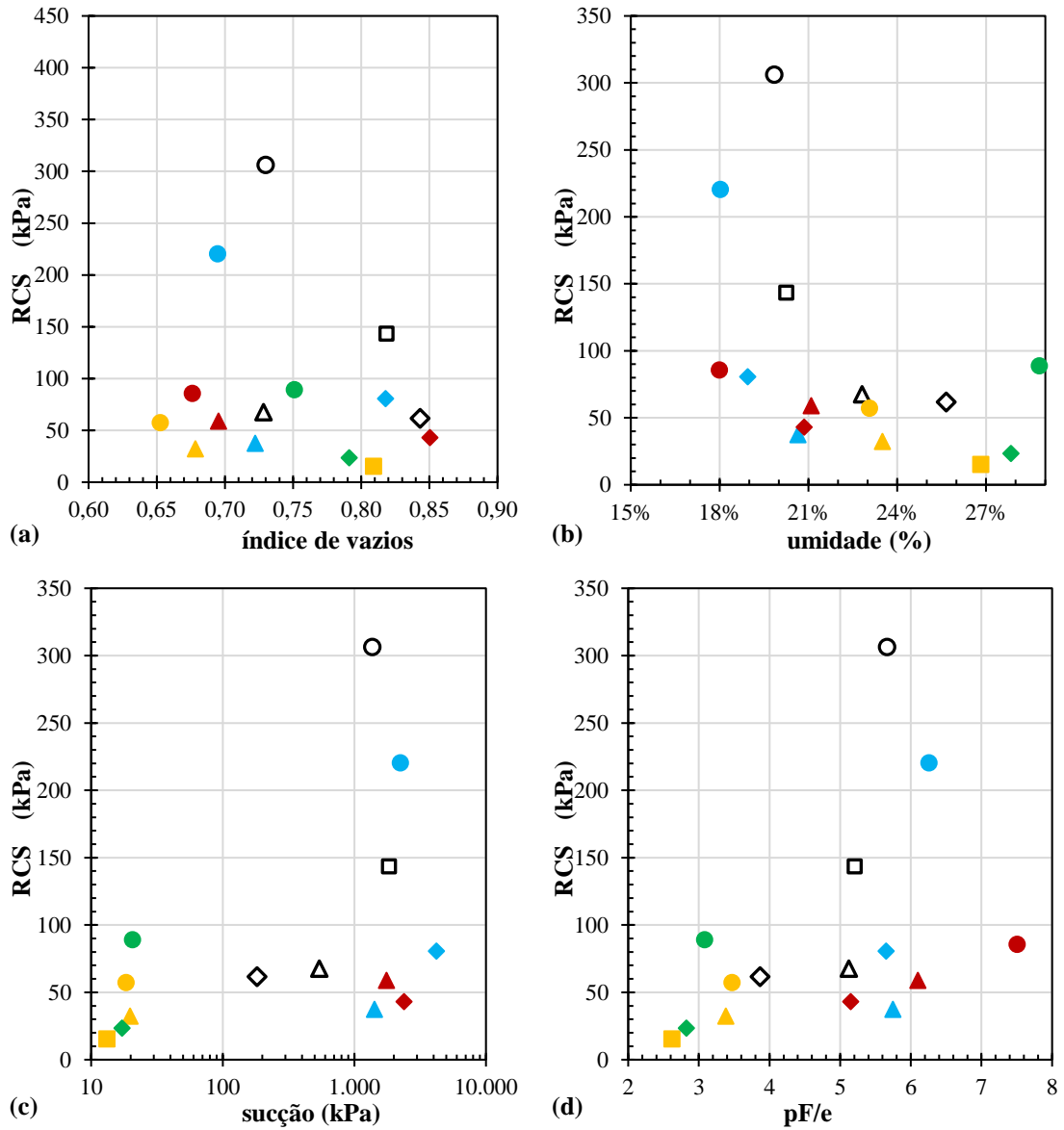


Figura E-5 - RCS das misturas solo – raque – 6 % de cal CH-I

**30D** ● 10% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **C1** ● 10% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**C2** ● 10% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **V1** ● 10% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**V2** ● 10% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%

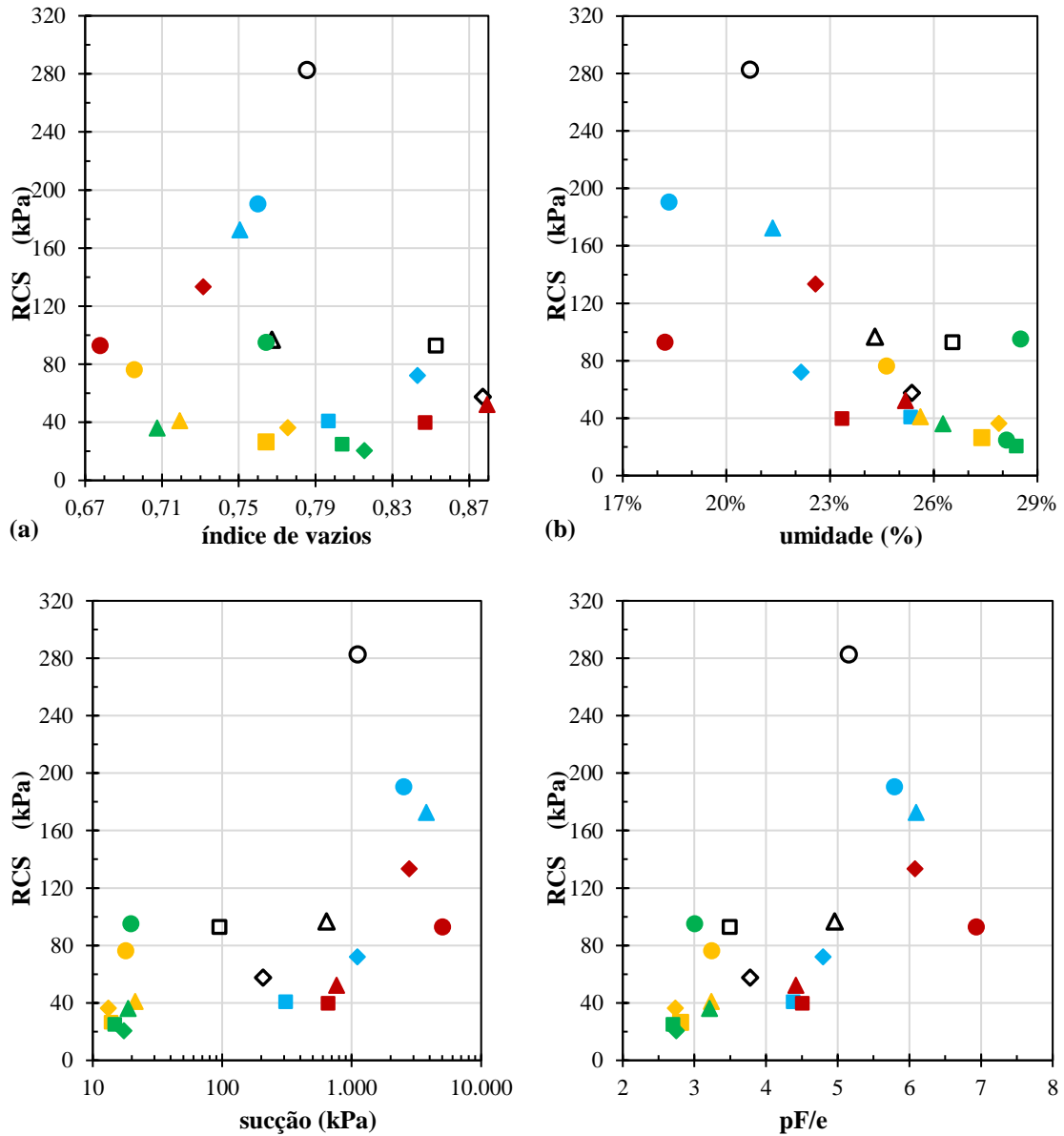


Figura E-6 - RCS das misturas solo – pena completa – 10 % de cal CH-I

**30D** ● 10% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **C1** ● 10% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**C2** ● 10% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **V1** ● 10% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**V2** ● 10% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%

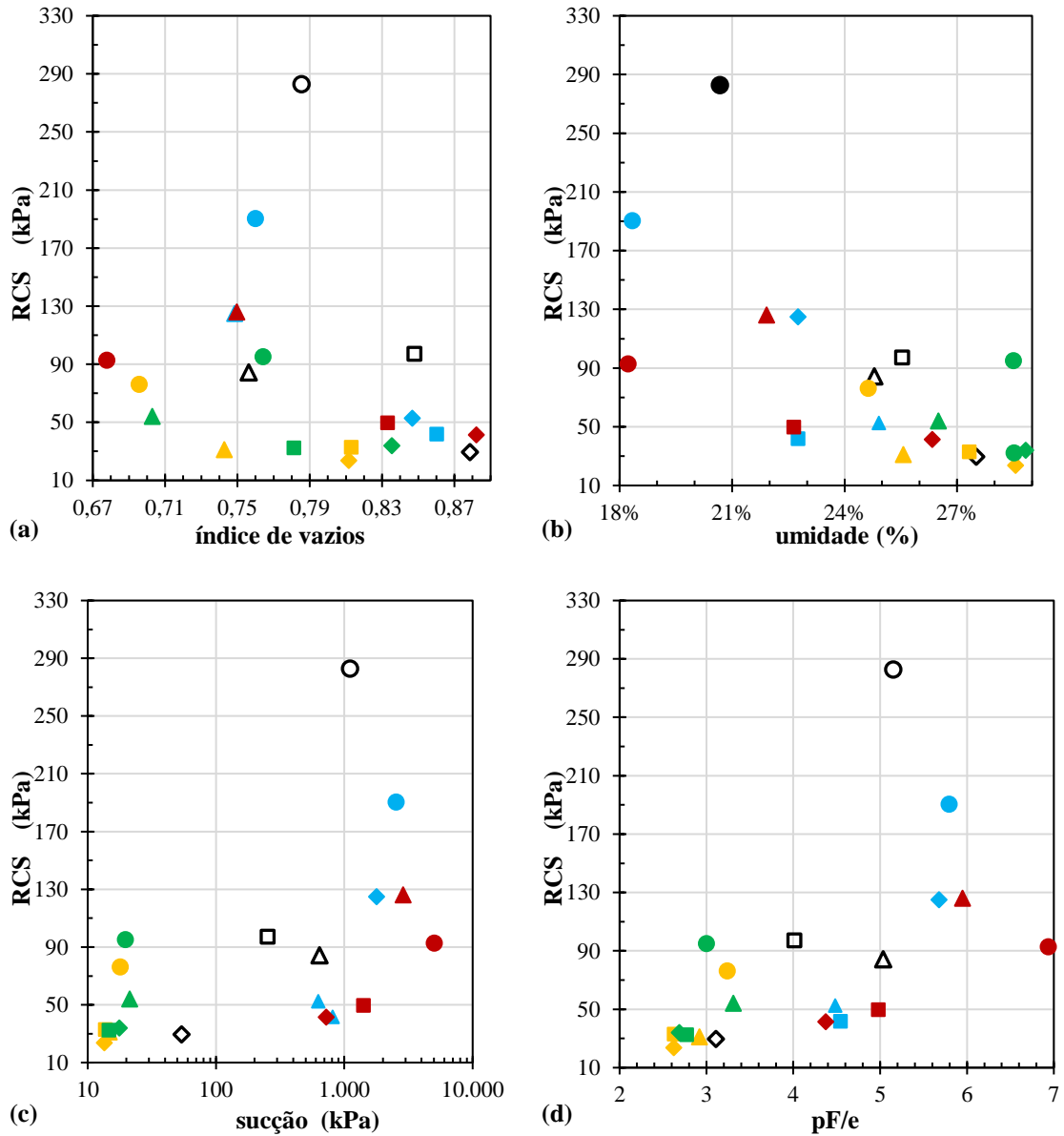


Figura E-7 - RCS das misturas solo – barba – 10 % de cal CH-I



**30D** ● 10% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **C1** ● 10% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**C2** ● 10% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **V1** ● 10% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**V2** ● 10% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%

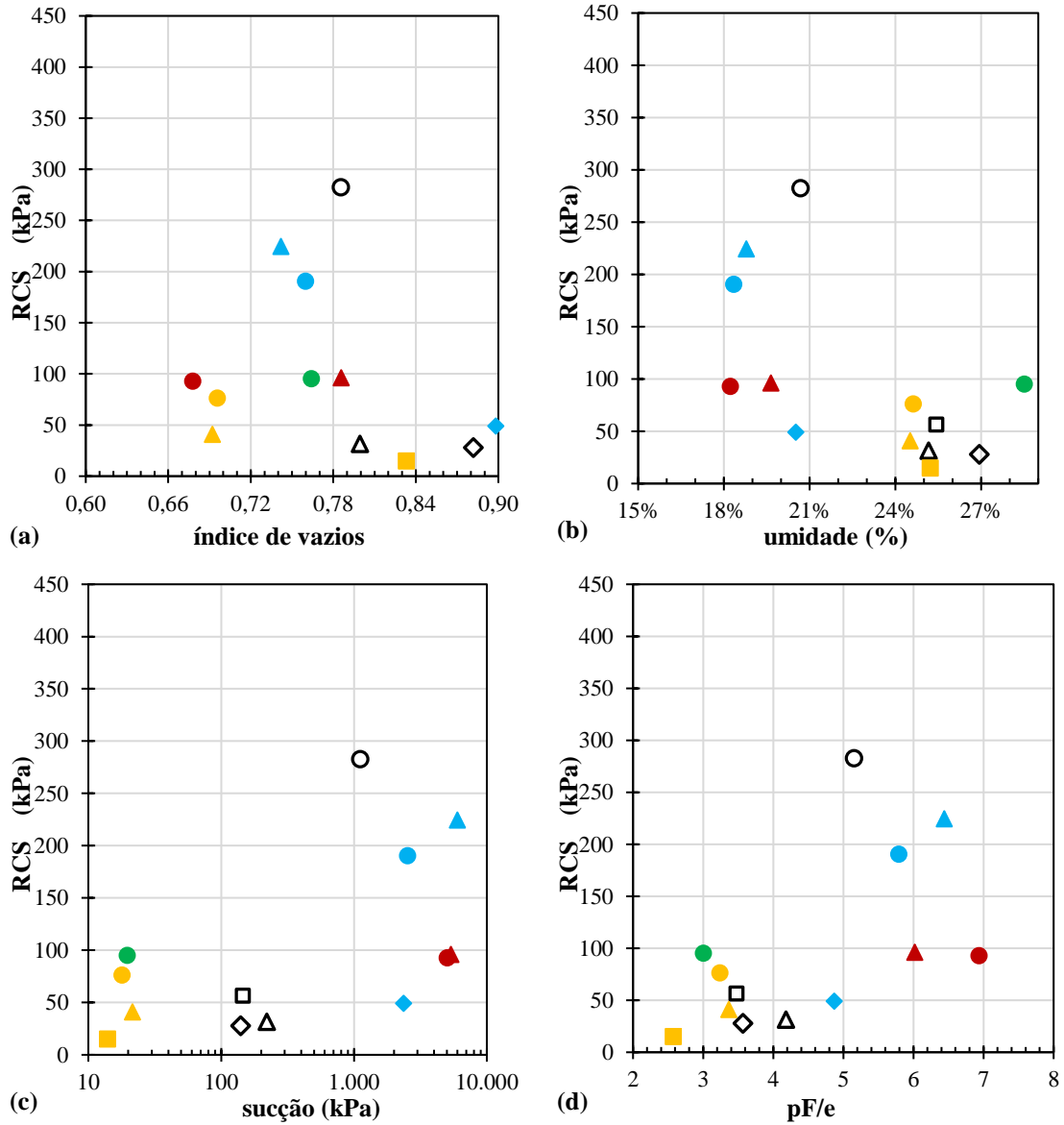


Figura E-8 - RCS das misturas solo – raque – 10 % de cal CH-I

## APÊNDICE F – ANÁLISE TEMPORAL DA RESISTÊNCIA A TRACÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL - RTCD

**30D** ● SP ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **1D** ● SP ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**V1** ● SP ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **V2** ● SP ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%

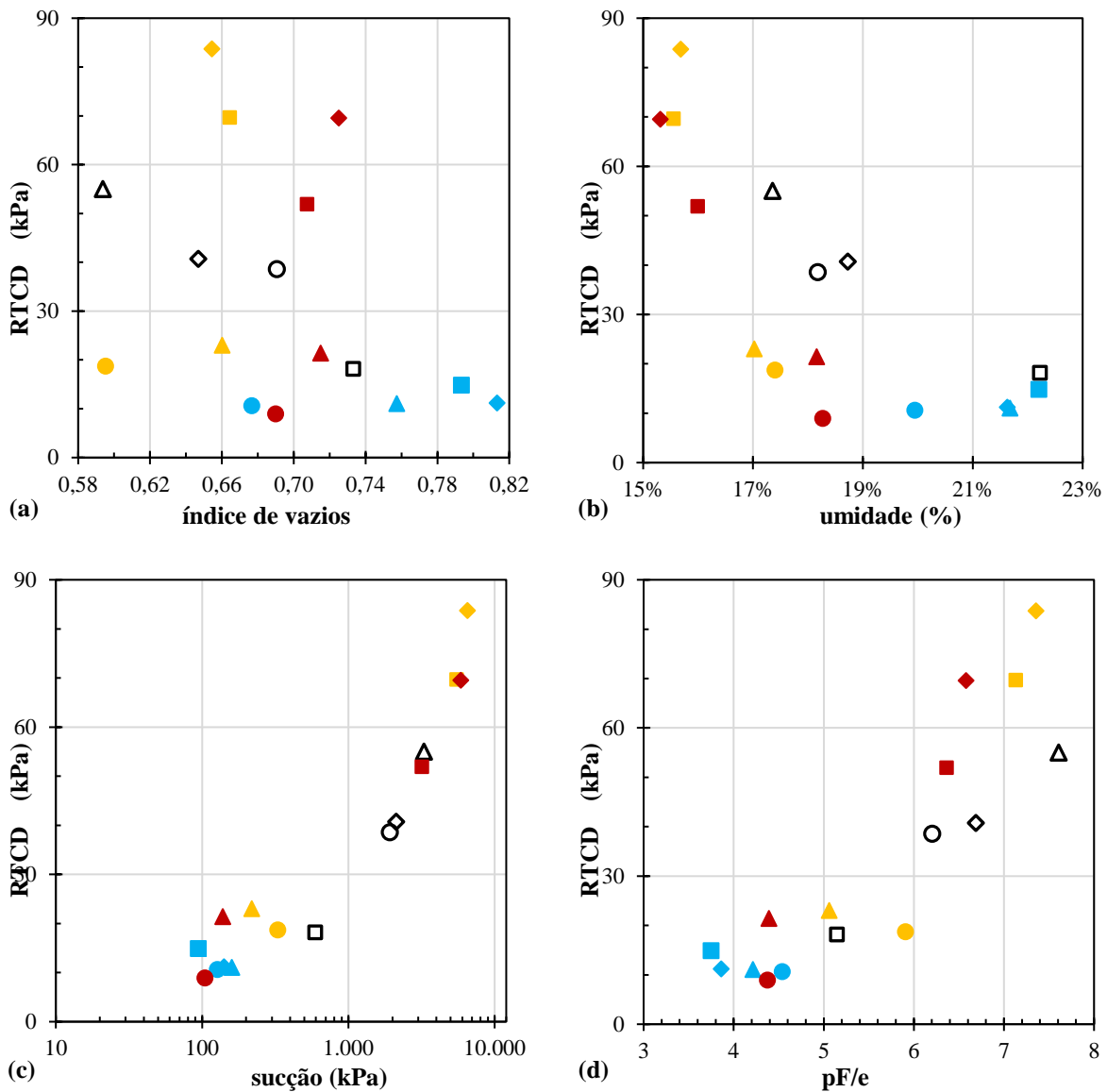


Figura F-1 - RTCD das misturas solo – fibra barba

**30D** ● SP ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **1D** ● SP ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**V1** ● SP ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **V2** ● SP ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%

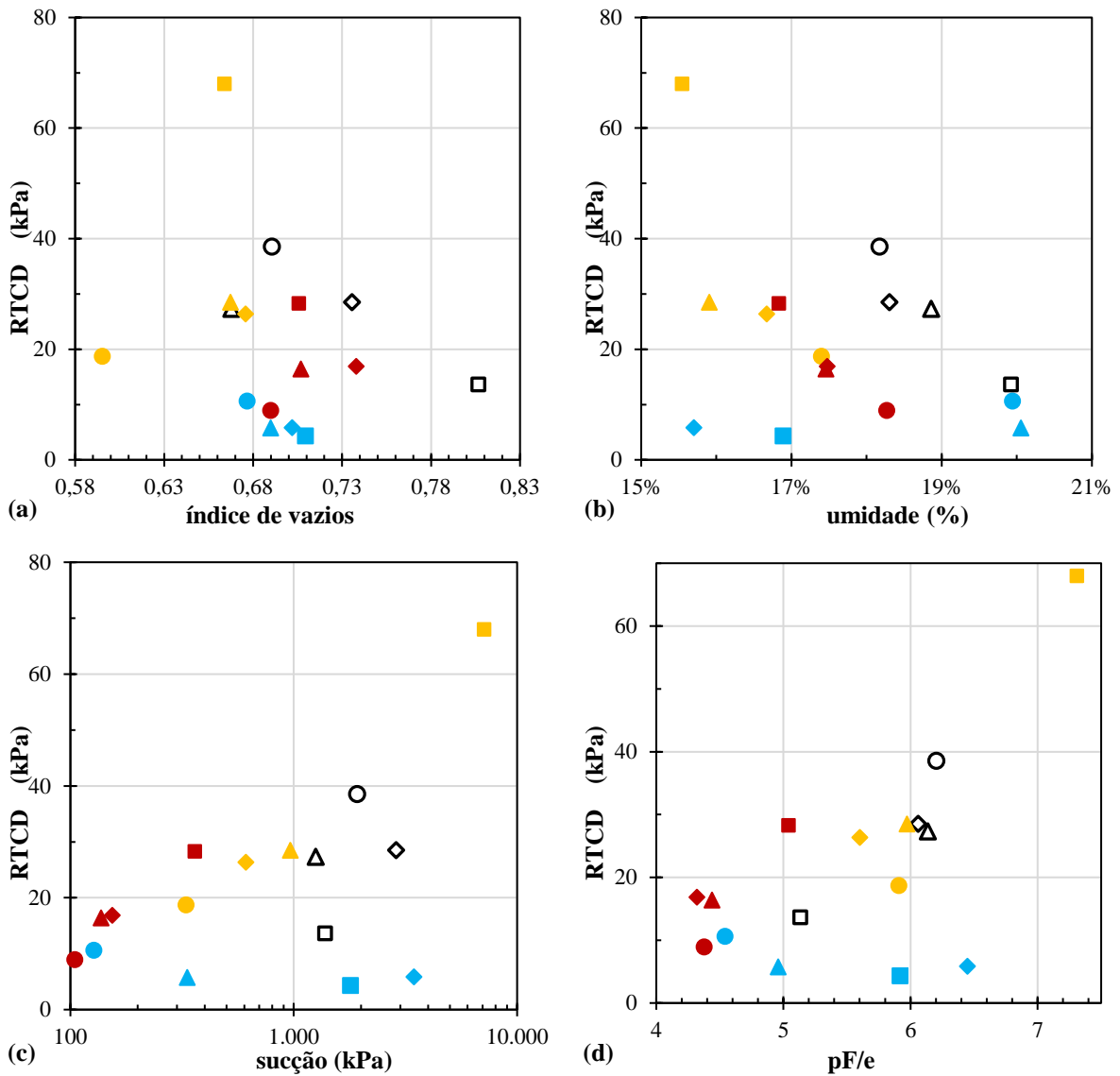


Figura F-2 - RTCD das misturas solo – fibra raque

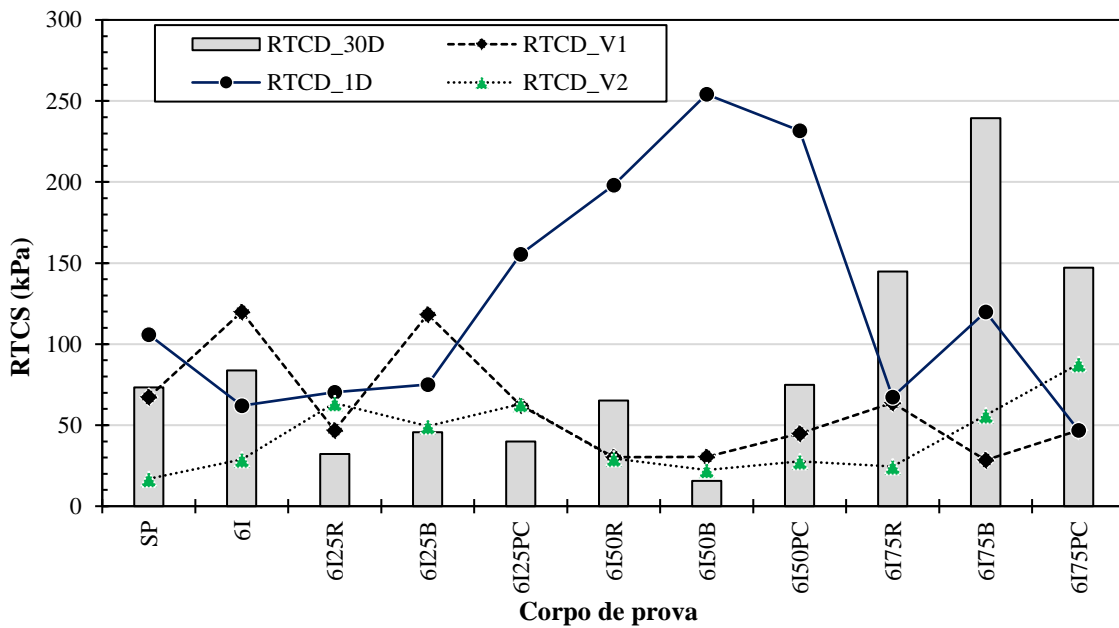


Figura F-3 - Variação da RTCD em 4 tempos e 2 métodos de cura de misturas solo fibra 6%

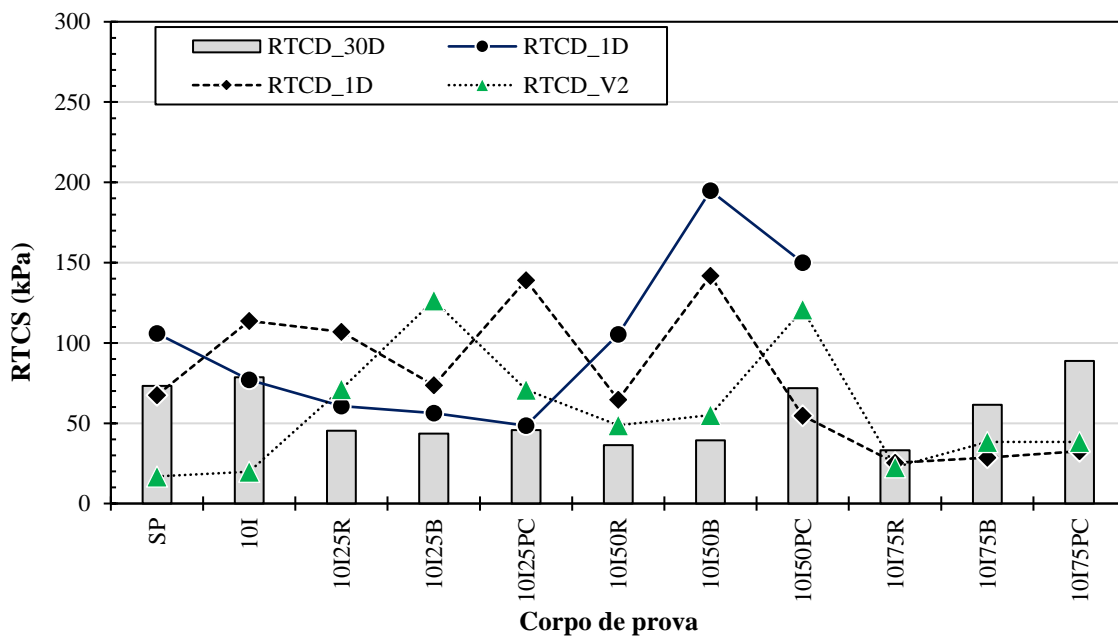


Figura F-4 - Influência da unidade na RTCD em 4 tempos e 2 métodos de cura de misturas solo fibra cal 10%

# APÊNDICE G – ANÁLISE TEMPORAL DA RESISTÊNCIA A TRACÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL – RTCD MISTURAS SOLO FIBRA CAL

**30D** ● 4% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **D1** ● 4% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**V1** ● 4% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **V2** ● 4% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%

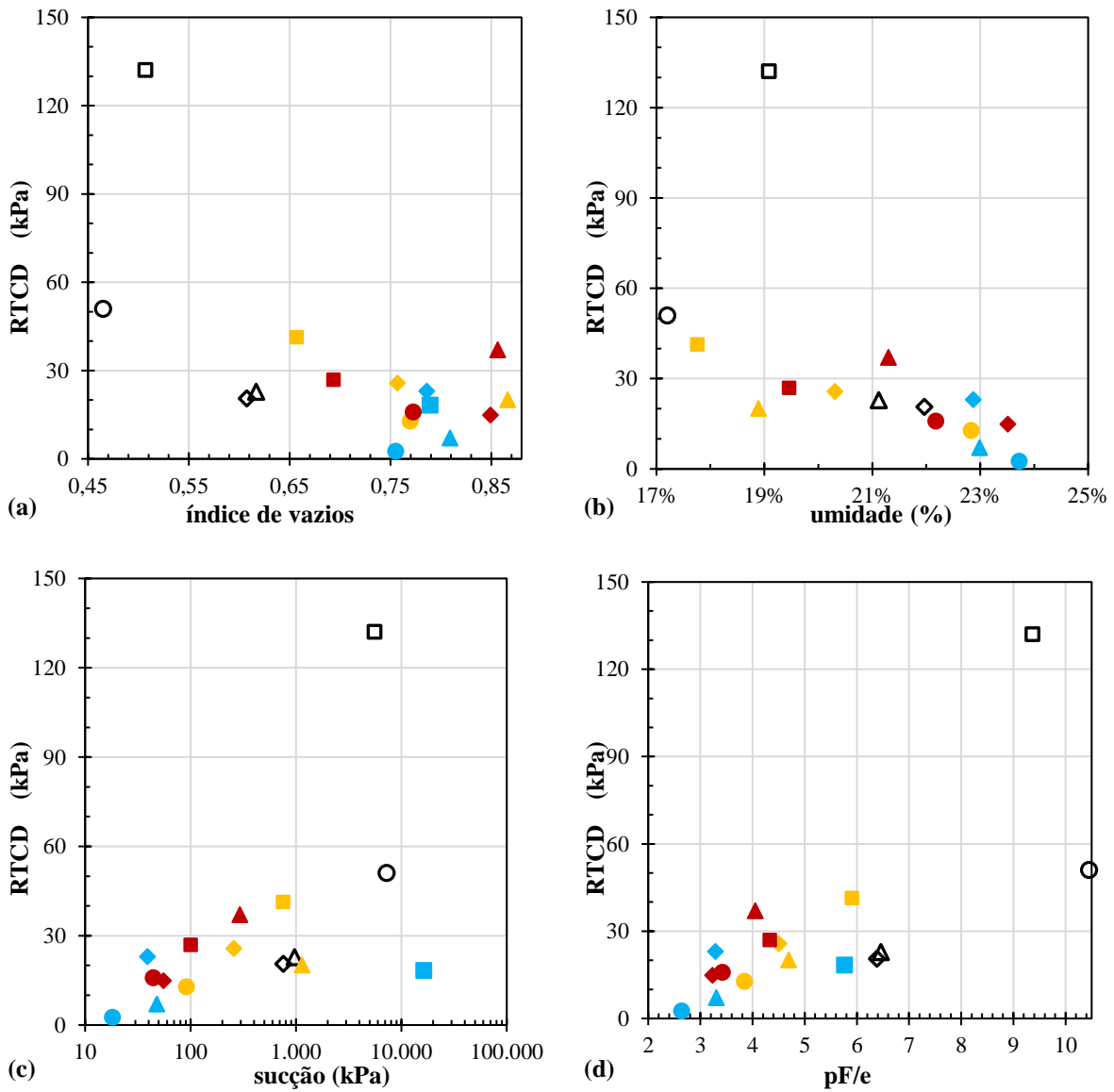


Figura G-1 - Influência da umidade, índice de vazios, sucção e pF/e na RTCD misturas de solo 4% cal fibra barba

**30D** ● 4% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **D1** ● 4% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**V1** ● 4% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **V2** ● 4% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%

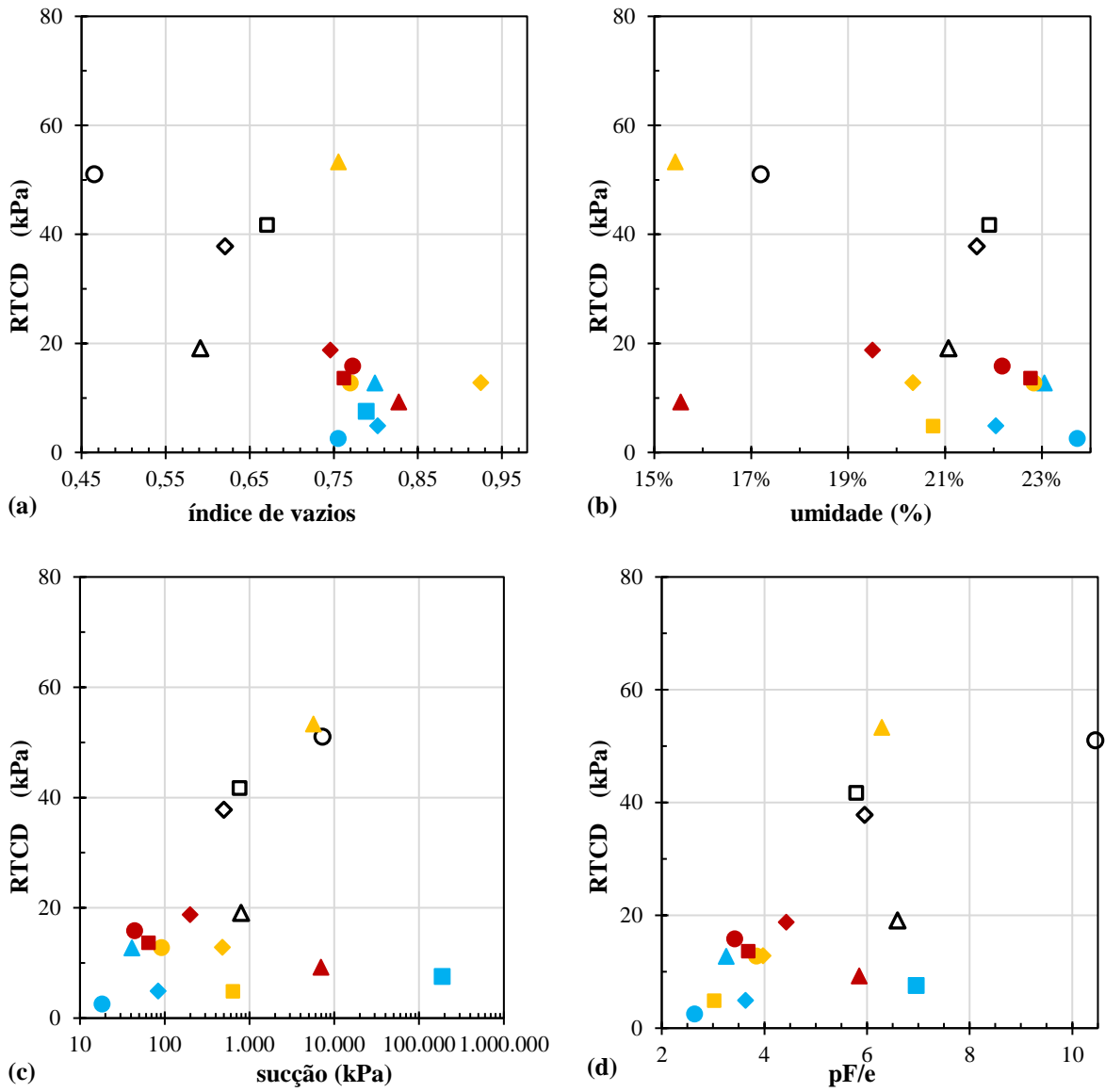


Figura G-2 - Influência da umidade, índice de vazios, sucção e pF/e na RTCD misturas de solo 4% cal fibra raque

**30D** ● 6% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%   
**D1** ● 6% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**V1** ● 6% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%   
**V2** ● 6% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%

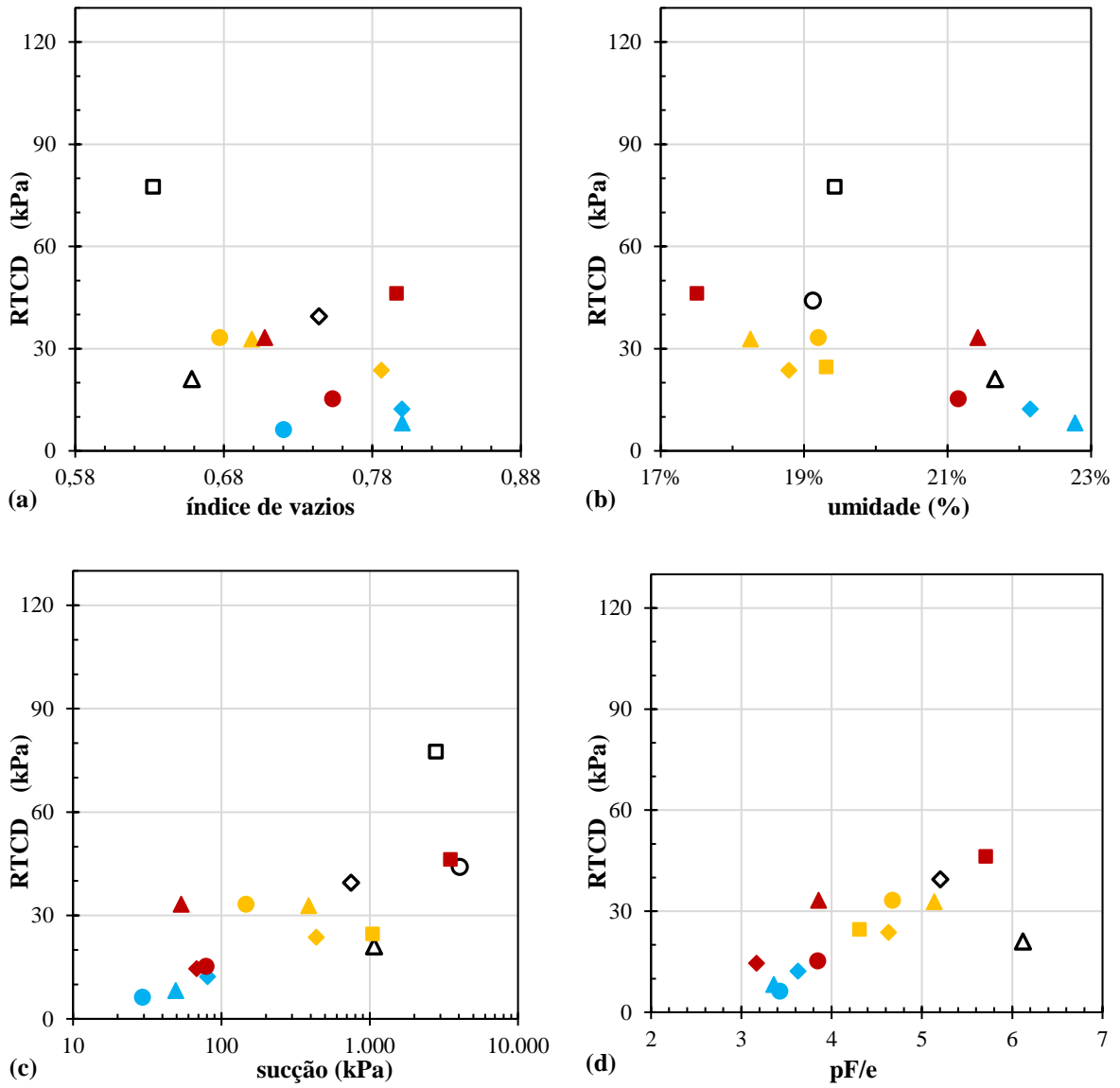


Figura G-3 - Influência da umidade, índice de vazios, sucção e pF/e na RTCD misturas de solo 6% cal fibra pena completa

**30D** ● 6% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%   
**D1** ● 6% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**V1** ● 6% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%   
**V2** ● 6% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%

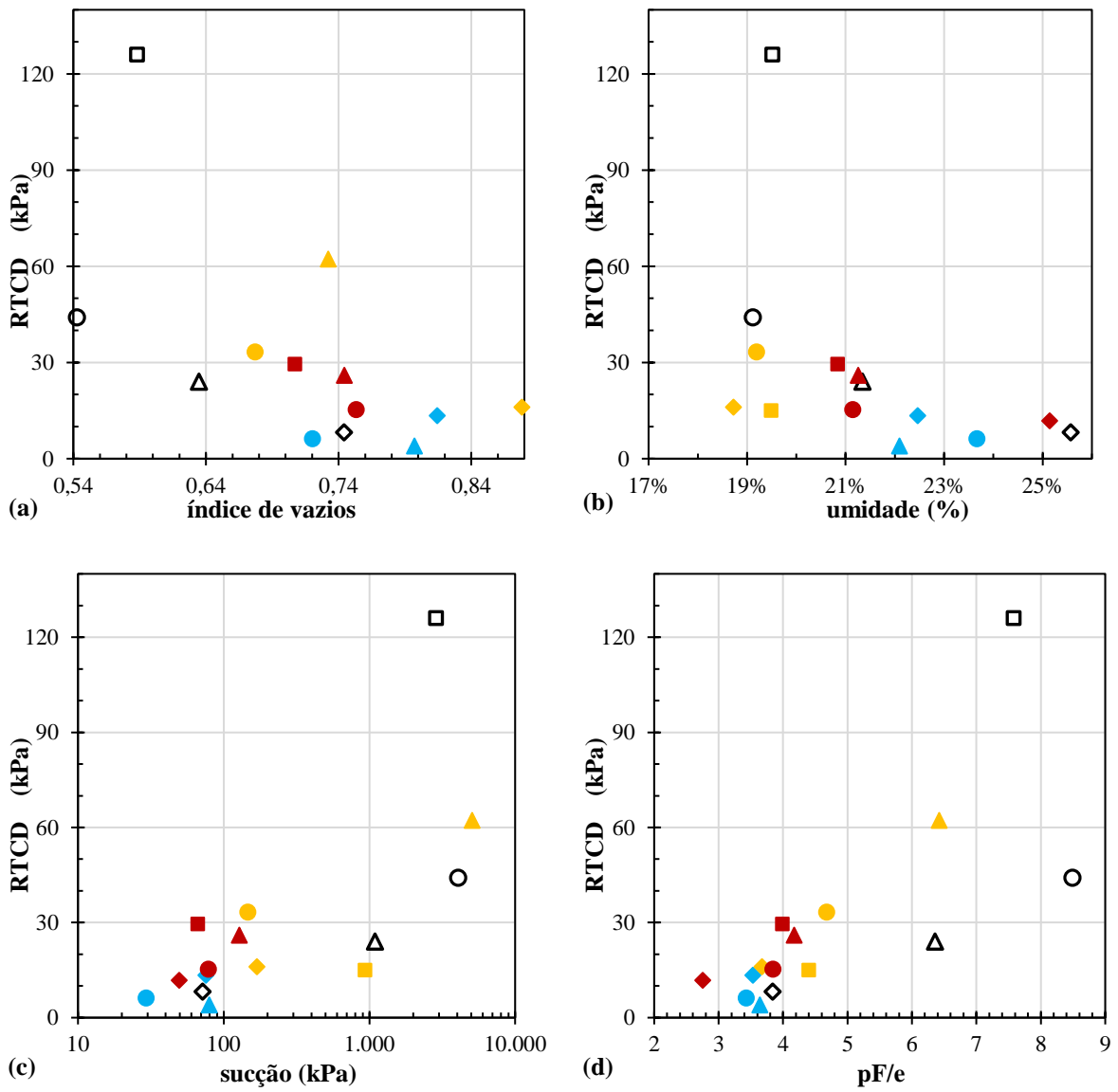


Figura G-4 - Influência da umidade, índice de vazios, sucção e pF/e na RTCD misturas de solo 6% cal fibra barba



**30D** ● 6% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%   
**D1** ● 6% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**V1** ● 6% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%   
**V2** ● 6% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%

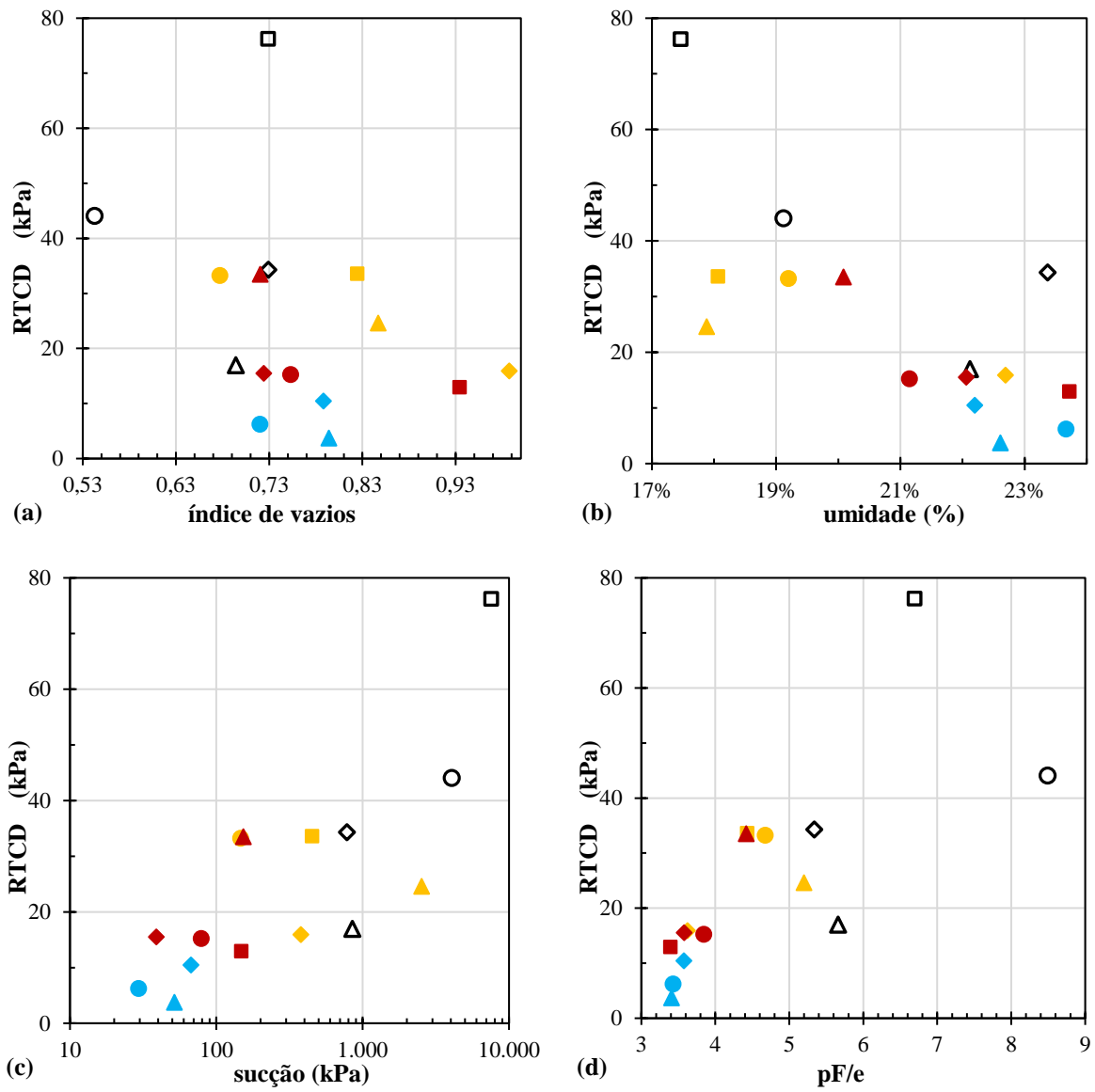


Figura G-5 - Influência da umidade, índice de vazios, sucção e pF/e na RTCD misturas de solo 6% cal fibra raque

**30D** ● 10% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **D1** ● 10% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**V1** ● 10% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **V2** ● 10% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%

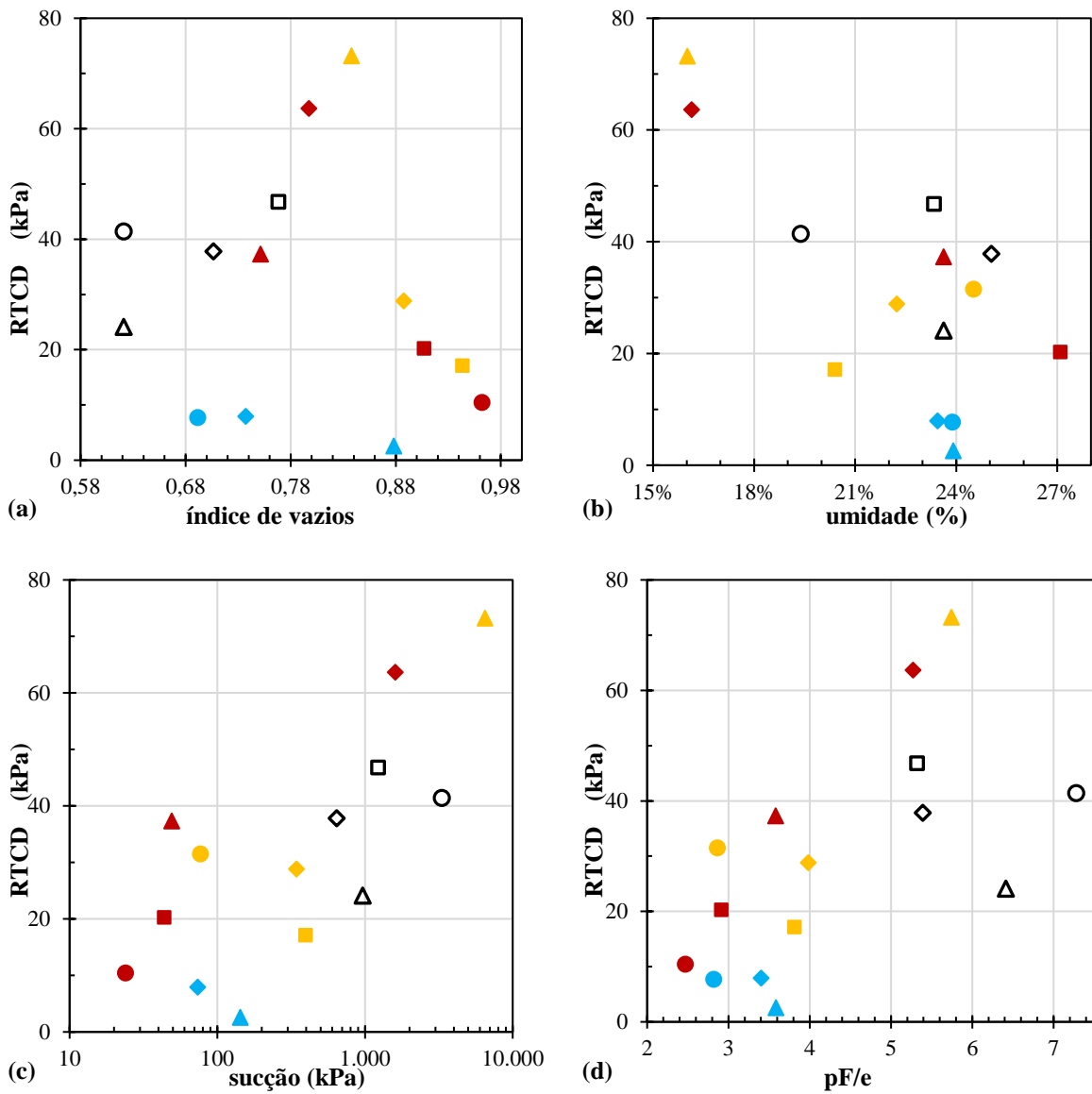


Figura G-6 - Influência da umidade, índice de vazios, sucção e pF/e na RTCD misturas de solo 10% cal fibra pena completa

**30D** ● 10% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **D1** ● 10% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**V1** ● 10% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%    **V2** ● 10% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%

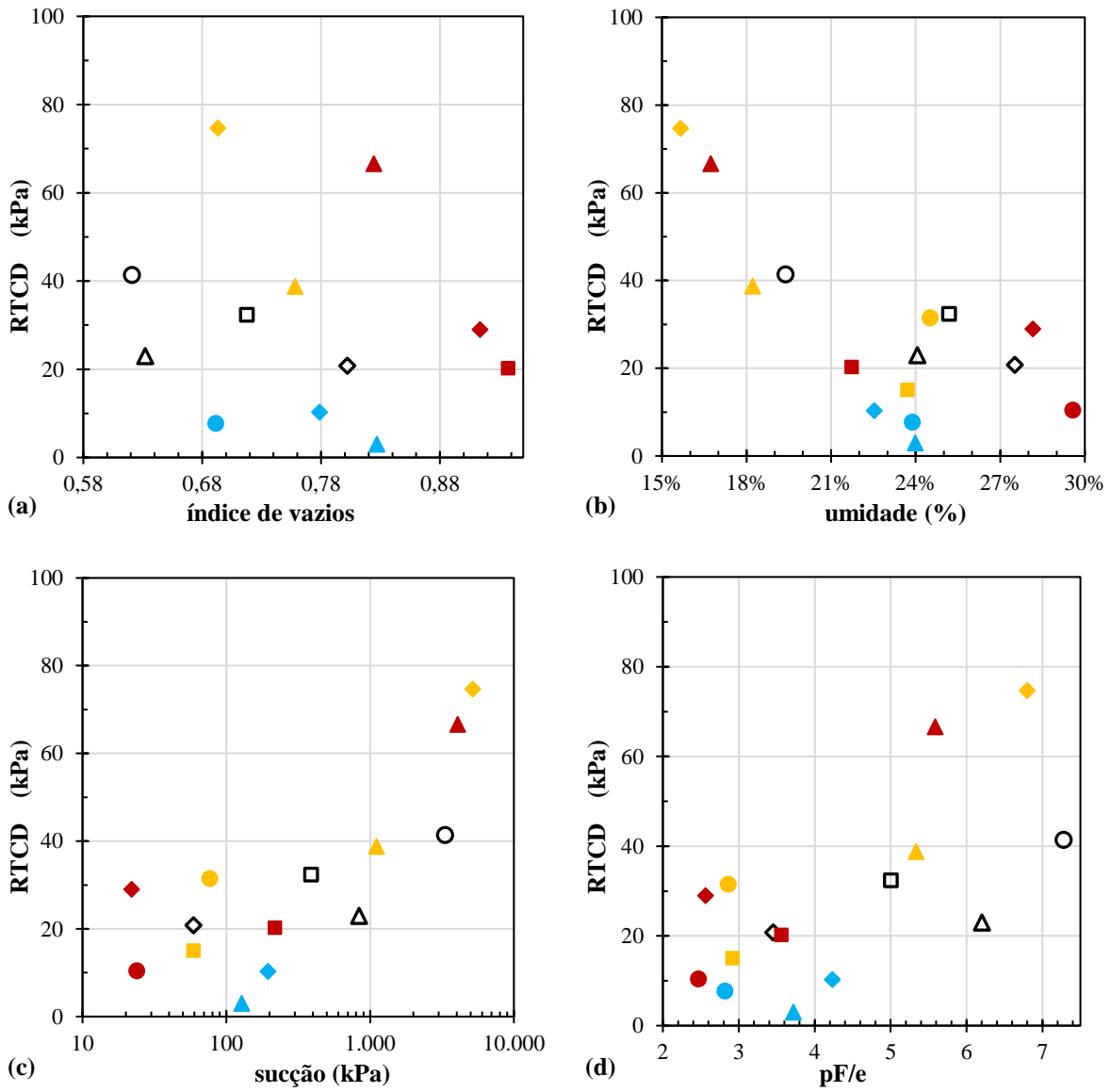


Figura G-7 - Influência da umidade, índice de vazios, sucção e pF/e na RTCD misturas de solo 10% cal fibra barba

**30D** ● 10% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%   
**D1** ● 10% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%  
**V1** ● 10% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%   
**V2** ● 10% ▲ 0,25% ◆ 0,50% ■ 0,75%

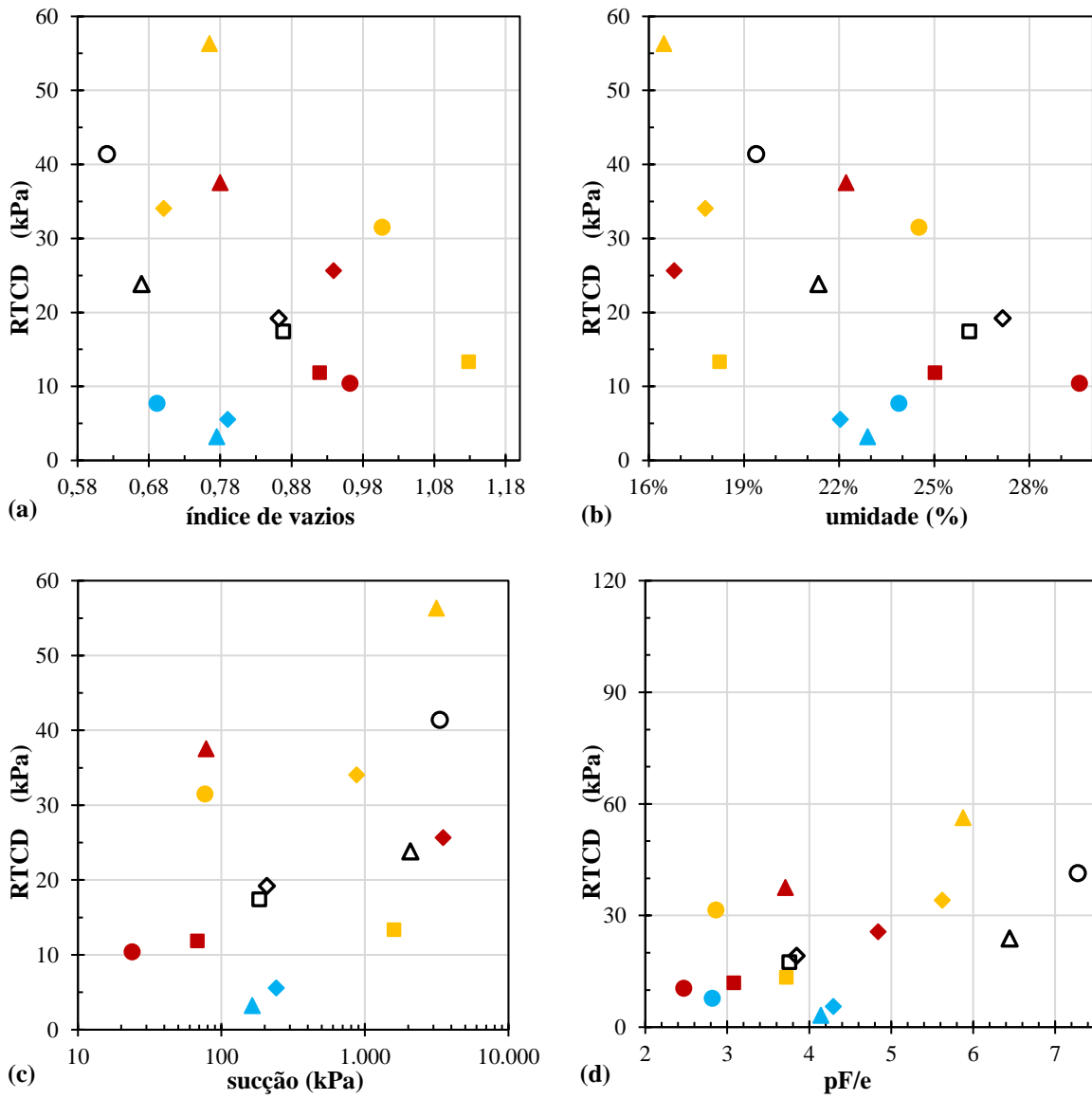


Figura G-8 - Influência da umidade, índice de vazios, sucção e pF/e na RTCD misturas de solo 10% cal fibra raque