

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

PRISCILA THALITA BARROS DE LIMA

**BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS USADA NA
PREPARAÇÃO DE CORTINAS VERTICAIS**

Campina Grande – PB

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

PRISCILA THALITA BARROS DE LIMA

BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS USADA NA
PREPARAÇÃO DE CORTINAS VERTICAIS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral, da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de mestre em Exploração Petrolífera e Mineral.

Orientadora: Prof. Dra. Claudia Maria de Oliveira Raposo.

Campina Grande – PB

2020

L732b

Lima, Priscila Thalita Barros de.

Borracha de pneus inservíveis usada na preparação de cortinas verticais / Priscila Thalita Barros de Lima. - Campina Grande, 2020.

97 f. : il. : color.

Dissertação (Mestrado em Exploração Petrolífera e Mineral) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2020.

"Orientação: Profa. Dra. Claudia Maria de Oliveira Raposo.

Referências.

1. Cortinas Verticais. 2. Pneus Inservíveis. 3. Borracha Triturada. 4. Contaminante. I. Raposo, Claudia Maria de Oliveira. II. Título.

CDU 665(043)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EXP. PETROLIFERA E MINERACAO
Rua Aprígio Veloso, 882, - Bairro Universitário, Campina Grande/PB, CEP 58429- 900

FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES

PRISCILA THALITA BARROS DE LIMA

**BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS USADA NA PREPARAÇÃO DE
CORTINAS VERTICAIS**

Dissertação (ou Tese) apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Exploração Petrolífera e Mineral - PPGEPM - UFCG como pré-requisito para
obtenção do título de Mestre em Exploração Petrolífera e Mineral .

Aprovada em: 28/08/2020

Profª. Drª. Cláudia Maria de Oliveira Raposo - Orientadora PPGEPM- UFCG

Prof. Dr. Harrizon Lima de Almeida - Examinador Interno PPGEPM- UFCG

Prof. Dr. José Avelino Freire - Examinador Externo UAMG - UFCG



Documento assinado eletronicamente por **CLAUDIA MARIA DE OLIVEIRA RAPOSO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/09/2020, às 19:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **HARRIZON LIMA DE ALMEIDA, COORDENADOR(A) ADMINISTRATIVO(A)**, em 12/09/2020, às 10:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSE AVELINO FREIRE, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/09/2020, às 17:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **0993405** e o código CRC **C7F7F085**.

Referência: Processo nº 23096.019429/2020-14

SEI nº 0993405

A Deus, que tem sido meu socorro presente em todos os momentos, sem a sua infinita graça eu não chegaria aqui. E aos meus pais e irmãs, que me concederam força e amor para enfrentar essa jornada.

AGRADECIMENTOS

A Deus, meu Salvador e libertador, que tem me abençoado desde meu primeiro dia de vida e me permitiu chegar até esse momento, me concedendo a coragem necessária para trilhar essa caminhada.

Aos meus pais, por toda paciência e amor, e também por me apoiarem incondicionalmente a seguir meu sonho.

As minhas irmãs, por todo apoio e ânimo nos momentos difíceis.

A toda minha família, avó, tias e tios, primas e primos, por todo suporte, amor e cuidado.

A minha orientadora, Prof. Dra. Claudia, por sua paciência, dedicação, disponibilidade, ajuda e ensinamentos transmitidos a mim desde a graduação e, por me inspirar diariamente a ser uma pesquisadora melhor.

Aos meus amigos, que me apoiaram e acreditaram na minha capacidade de vencer essa jornada.

Ao Prof. Dr. Reinhard, por sempre acreditar na minha capacidade intelectual, me ajudar a compreender o vasto mundo da ciência e me ensinar diariamente sobre os mais diversos assuntos.

Aos professores, Dr. Harrizon Lima de Almeida e Dr. José Avelino Freire, pela disponibilidade em avaliar meu trabalho.

A Capes, pelo apoio financeiro durante essa jornada de trabalho e aprendizado.

Ao Laboratório de Caracterização de Materiais da UAEMA/CCT/UFCEG nas pessoas, da técnica Juliana Melo e do técnico Emanuel Pereira Soares, pelas análises das amostras.

Ao Laboratório de Irrigação e Salinidade da UAEMA/CTRN/UFCEG, pela amostra de solo, na pessoa do senhor Francisco de Assis Clementino de Oliveira (*in memoriam*).

A empresa Antonio Raposo Sobrinho – ME, com sede em Campina Grande, por ceder as amostras de borracha de pneus inservíveis triturada.

“I am among those who think that science has great beauty. A scientist in his laboratory is not only a technician: he is also a child placed before natural phenomena which impress him like a fairy tale. We should not allow it to be believed that all scientific progress can be reduced to mechanisms, machines, gearings, even though such machinery has its own beauty”

(Marie Skłodowska Curie)

RESUMO

Atualmente, com o crescimento da sociedade aliado aos incontáveis avanços tecnológicos, tanto benefícios quanto malefícios têm atingido o planeta. Um significativo prejuízo tem sido a contaminação do solo, assim como dos recursos naturais alocados no subsolo, como os aquíferos. Foram preparadas dezesseis cortinas verticais cuja mistura de solo, de cimento e de bentonita foi acrescida de borracha de pneus inservíveis triturada em distintas granulometrias. A caracterização foi realizada por difratometria, por espectrometria de fluorescência de raios X, por microscopia óptica e por microscopia eletrônica de varredura. As cortinas verticais avaliadas quanto às capacidades de drenagem de água e de retenção de contaminante mostraram eficiência significativa em 50% destas destacando-se as concentrações mássicas de 1% de borracha de pneus inservíveis triturada com granulometrias de #14, #18 e #20 retidas. Estes resultados fundamentaram a proposta de um modelo de cortina vertical cuja adição de extratores e de outra cortina vertical viriam favorecer melhor controle de qualidade e de segurança do sistema. O desempenho das cortinas verticais garantiu a aplicação segura da borracha de pneus inservíveis triturada, e como consequência, contribuiu para que o descarte de pneus inservíveis não seja indevido no meio ambiente.

Palavras-chave: Cortinas verticais; pneus inservíveis, borracha triturada; contaminante.

ABSTRACT

Recently, with the development of the society associate with countless advances technological, benefits and harms have reaching the planet. A significant damage it has been soil contamination, as natural resources allocated underground, how aquifers. Sixteen slurry walls were prepared whose mixture of soil, of cement and of the clay was added with shredded scrap tires in distinct particles sizes. The characterization was realized by X-ray diffraction, by X-ray fluorescence spectrometry, by optical microscopy and by scanning electron microscopy. The slurry walls were evaluated for water drainage and contaminant retention capabilities showed significant efficiency in 50% of them, with featured for the mass concentrations of 1% of shredded scrap tires with retained # 14, # 18 and # 20 particle sizes. These results support the proposal of slurry wall model whose addition of extractors and other slurry wall would favor better quality control and of safety of the system. The performance of the slurry walls ensured the safe application of shredded scrap tires and as a consequence contributes so that tires discard is not inappropriate in the environment.

Keywords: Slurry walls; shredded tires; scrap tires; contaminant.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Proporção granulométrica das distintas frações que compõem o solo.	22
Figura 2: Arranjo cristalográfico da montmorilonita.	26
Figura 3: Estrutura, adaptada, de hidratação da montmorilonita cálcica e sódica. ...	28
Figura 4: Esquema adaptado de intercalação do surfactante na estrutura interlamelar do filossilicato, tornando a argila organofílica.	29
Figura 5: Localização do município de Cubati, indicado, no mapa da Paraíba.	31
Figura 6: Partes de um pneu convencional.	35
Figura 7: Esquema de uma cortina vertical, adaptado.	43
Figura 8: Amostra de solo.	45
Figura 9: Micrografias da borracha, pneus inservíveis, triturada para as distintas granulometrias com destaque para a morfologia das partículas.	46
Figura 10: Modelo idealizado para avaliações das capacidades de drenagem e de retenção de contaminante das cortinas verticais preparadas.	49
Figura 11: Fluxograma com a nomenclatura dos sistemas.	50
Figura 12: Fluxograma das etapas realizadas.	52
Figura 13: Triângulo textural adaptado.	53
Figura 14: Difratoograma da amostra de solo.	54
Figura 15: Difratoogramas da amostra de argila local, <i>in natura</i> , e hidrofóbica.	56
Figura 16: Difratoograma da amostra de cimento CII-F32.	56
Figura 17: Gráfico do resultado do teste relativo à capacidade de drenagem para as cortinas verticais preparadas com a borracha triturada com variações de percentuais mássicos, de 0,5 a 2,0%, retida em malha 14.	59
Figura 18: Gráfico do resultado do teste relativo à capacidade de drenagem para as cortinas verticais preparadas com a borracha triturada com variações de percentuais mássicos, de 0,5 a 2,0%, retida em malha 18.	60
Figura 19: Gráfico do resultado do teste relativo à capacidade de drenagem para as cortinas verticais preparadas com a borracha triturada com variações de percentuais mássicos, de 0,5 a 2,0%, retida em malha 20.	61

Figura 20: Gráfico do resultado do teste relativo à capacidade de drenagem para as cortinas verticais preparadas com a borracha triturada com variações de percentuais mássicos, de 0,5 a 2,0%, passante em malha 20.	62
Figura 21: Imagens das cortinas verticais e dos respectivos volumes drenados após ensaio de contenção de contaminante, preparadas com variações de 0,5% e 1,0% (a), e com variações de 1,5% e 2,0% (b), percentuais mássicos de BT, retida em malha 14.	63
Figura 22: Imagens das cortinas verticais e dos respectivos volumes drenados após ensaio de contenção de contaminante, preparadas com variações de 0,5% e 1,0% (a), e com variações de 1,5% e 2,0% (b), percentuais mássicos de BT, retida em malha 18.	64
Figura 23: Imagens das cortinas verticais e dos respectivos volumes drenados após ensaio de contenção de contaminante, preparadas com variações de 0,5% e 1,0% (a), e com variações de 1,5% e 2,0% (b), percentuais mássicos de BT, retida em malha 20.	65
Figura 24: Imagens das cortinas verticais e dos respectivos volumes drenados após ensaio de contenção de contaminante, preparadas com variações de 0,5% e 1,0% (a), e com variações de 1,5% e 2,0% (b), percentuais mássicos de BT, passante em malha 20.	66
Figura 25: Imagens da cortina vertical padrão, sem adição de BT, após ensaio de contenção de contaminante.	67
Figura 26: Micrografias das cortinas verticais compostas com BT retida em malha 14, com variações, percentuais mássicos, entre 0,5 a 2,0%.	69
Figura 27: Micrografias das cortinas verticais compostas com BT retida em malha 18 com variações, percentuais mássicos, entre 0,5 a 2,0%.	73
Figura 28: Micrografias das cortinas verticais compostas com BT retida em malha 20, com variações, percentuais mássicos, entre 0,5 a 2,0%.	77
Figura 29: Micrografias das cortinas verticais compostas com BT passante em malha 20, com variações, percentuais mássicos, entre 0,5 a 2,0%.	81
Figura 30: Sugestão de um novo modelo de cortinas verticais com adição de BT. ...	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos solos de acordo com a granulometria.	22
Tabela 2: Tipos de argila.....	24
Tabela 3: Classificação dos filossilicatos hidratados.	25
Tabela 4: Produção mundial de bentonita.	30
Tabela 5: Composição típica da borracha sintética.	36
Tabela 6: Algumas propriedades da borracha comparadas as do solo.	39
Tabela 7: Características relativas aos tipos de adsorção.....	40
Tabela 8: Granulometrias da borracha, de pneus inservíveis, triturada.....	47
Tabela 9: Porcentagens de argila modificada e de borracha triturada, adicionadas aos sistemas.	50
Tabela 10: Características geotécnicas do solo.	53
Tabela 11: Distâncias interplanares da amostra de solo.	55
Tabela 12: Teores obtidos por fluorescência de raios X da amostra de solo.	57
Tabela 13: Teores médios e experimentais dos óxidos na amostra de cimento CPII – F32.....	58
Tabela 14: Resumo da eficiência das cortinas verticais em função da granulometria e percentual de borracha de PIs triturada.	68

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

#14_R – Retida em malha 14

#18_R – Retida em malha 18

#20_R – Retida em malha 20

#20_P – Passante em malha 20

μ – Micron

Å – Angström

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AL – Argila local

Al – Elemento alumínio

Al₂O₃ – Óxido de alumínio

Al³⁺ – Íon alumínio (III)

ALH – Argila local hidrofóbica

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento

BR – Brasil

BT – Borracha de pneus inservíveis triturada

CaO – Óxido de cálcio

CCT – Centro de Ciências e Tecnologia

cm – Centímetro

cm³ – Centímetro cúbico

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CPII-F32 – Cimento Portland composto com fíler calcário, em teor entre 6% e 10%

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Naturais

CTC – Capacidade de Troca Catiônica

CTRN – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais

CV – Cortina Vertical

CV#14R_0,5% – Cortina vertical preparada com 0,5% de borracha de pneus inservíveis triturada com granulometria retida em malha 14

CV#14R_1,0% – Cortina vertical preparada com 1,0% de borracha de pneus inservíveis triturada com granulometria retida em malha 14

CV#14R_1,5% – Cortina vertical preparada com 1,5% de borracha de pneus inservíveis triturada com granulometria retida em malha 14

CV#14R_2,0% – Cortina vertical preparada com 2,0% de borracha de pneus inservíveis triturada com granulometria retida em malha 14

CV#18R_0,5% – Cortina vertical preparada com 0,5% de borracha de pneus inservíveis triturada com granulometria retida em malha 18

CV#18R_1,0% – Cortina vertical preparada com 1,0% de borracha de pneus inservíveis triturada com granulometria retida em malha 18

CV#18R_1,5% – Cortina vertical preparada com 1,5% de borracha de pneus inservíveis triturada com granulometria retida em malha 18

CV#18R_2,0% – Cortina vertical preparada com 2,0% de borracha de pneus inservíveis triturada com granulometria retida em malha 18

CV#20P_0,5% – Cortina vertical preparada com 0,5% de borracha de pneus inservíveis triturada com granulometria passante em malha 20

CV#20P_1,0% – Cortina vertical preparada com 1,0% de borracha de pneus inservíveis triturada com granulometria passante em malha 20

CV#20P_1,5% – Cortina vertical preparada com 1,5% de borracha de pneus inservíveis triturada com granulometria passante em malha 20

CV#20P_2,0% – Cortina vertical preparada com 2,0% de borracha de pneus inservíveis triturada com granulometria passante em malha 20

CV#20R_0,5% – Cortina vertical preparada com 0,5% de borracha de pneus inservíveis triturada com granulometria retida em malha 20

CV#20R_1,0% – Cortina vertical preparada com 1,0% de borracha de pneus inservíveis triturada com granulometria retida em malha 20

CV_{#20R_1,5%} – Cortina vertical preparada com 1,5% de borracha de pneus inservíveis triturada com granulometria retida em malha 20

CV_{#20R_2,0%} – Cortina vertical preparada com 2,0% de borracha de pneus inservíveis triturada com granulometria retida em malha 20

CV_{Padrão} – Cortina vertical padrão preparada sem adição de borracha de pneus inservíveis triturada

DIN – Norma alemã (*Deutsches Institut für Normung*)

DNPM – Departamento Nacional da Produção Mineral

DRX – Difração de raios X

EDX – Energia dispersiva de raios X

EN – Norma européia

exp. – Experimental

Fe – Elemento ferro

Fe₂O₃ – Óxido de ferro

Fe³⁺ – Íon ferro (III)

g – Grama

h – Hora

H₂O_{destilada} – Água destilada

H₃O⁺ – Íon hidrônio

K₂O – Óxido de potássio

kg – Quilograma

km² – Quilômetro quadrado

kN/m³ – Quilonewton por metro cúbico

m% – Percentual mássico

m² – Metro quadrado

m²/g – Metro quadrado por grama

m³ – Metro cúbico

ME – Microempresa

meq – Miliequivalente

mesh – Malha

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

Mg²⁺ – Íon magnésio (II)

MgO – Óxido de magnésio

min – Minuto

ml – Mililitro

mm – Milímetro

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

Mn – Elemento mangânes

MO – Microscopia Óptica

Mt – Mil toneladas

Na⁺ – Íon sódio (I)

Na₂O – Óxido de sódio

NBR – Norma Brasileira

nm – Nanômetro

pad. – Padrão

PB – Paraíba

PDF – Powder Diffraction File

pH – Potencial hidrogeniônico

PIs – Pneus inservíveis

ppm – Partes por milhão

S – Leste

SCB – Solo-Cimento-Bentonita

seg – Segundo

Si⁴⁺ – Íon silício (IV)

SiO₂ – Óxido de silício

SO₃ – Anidrido sulfúrico

TiO₂ – Óxido de titânio

TOT – Tetraédrica-octaédrica-tetraédrica

UAEA – Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola

UAEMa – Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais

UAMG – Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

USGS – U. S. Geological Survey

v% – Percentual em volume

W – Oeste

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
2. OBJETIVO	19
2.1. Objetivo geral	19
2.2. Objetivos específicos	19
3. JUSTIFICATIVA	19
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
4.1. Solos	20
4.1.1. <i>Definição</i>	20
4.1.2. <i>Perfil</i>	20
4.1.3. <i>Sistema trifásico</i>	21
4.1.4. <i>Características físicas e químicas</i>	21
4.2. Argilominerais	23
4.2.1. <i>Bentonita</i>	26
4.2.2. <i>Reservas e produção</i>	29
4.3. Cimento	32
4.4. Borracha de pneus inservíveis	33
4.5. Adsorção	39
4.5.1. <i>Adsorção no solo</i>	41
4.5.2. <i>Adsorção na borracha</i>	42
4.6. Cortinas verticais	42
4.6.1. <i>Plumas contaminantes</i>	42
4.6.2. <i>Sistemas convencionais</i>	43
4.6.3. <i>Sistema inovador</i>	44
5. MATERIAIS E MÉTODOS	45
5.1. Materiais	45
5.2. Modificação da argila local	48
5.3. Preparação das cortinas verticais	48
5.4. Análises mineralógica, composicional e microestrutural	50
5.4.1. <i>Difratometria (DRX)</i>	51
5.4.2. <i>Fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDX)</i>	51
5.4.3. <i>Microscopia óptica (MO)</i>	51
5.4.4. <i>Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</i>	51
5.5. Ensaio de capacidade de drenagem	51
5.6. Ensaio de capacidade de retenção de contaminante	52

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
6.1. Características do solo.....	53
6.2. Difratomia (DRX).....	54
6.3. Fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDX)	56
6.4. Ensaio de capacidade de drenagem	57
6.5. Ensaio da capacidade de retenção de contaminante	62
6.6. Microscopia eletrônica de varredura	68
6.7. Sugestão de um novo modelo.....	85
7. CONCLUSÃO	86
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
9. REFERÊNCIAS	89

1. INTRODUÇÃO

A população mundial tem evoluído cada vez mais rapidamente e, acompanhando esse crescimento, as empresas que fornecem matéria-prima, assim como, as indústrias transformadoras têm seguido o mesmo ritmo. Em meio a todo o progresso associam-se problemas como a poluição.

Fontes poluidoras podem ser provenientes de diversos meios causando danos ao ar, às águas e ao solo. Existem recursos naturais alocados no subsolo que também sofrem danos, como é o caso dos aquíferos. O vazamento de tanques de óleo, falhas em tubulações, descarte inadequado de produtos químicos, podem percolar no solo e atingir essas fontes de água subterrânea causando contaminação das mesmas (PIVER, 1992; CONSOLI; HEINECK; CARRARO, 2010).

Uma alternativa viável, estudada através de anos, é a aplicação de uma barreira protetora no solo, minimizando a percolação das plumas contaminantes nas fontes de água subterrânea. Essas barreiras são construídas na forma de trincheira, podendo ser preenchidas por solo-bentonita, cimento-bentonita ou solo-cimento-bentonita (HEINECK *et al.*, 2010).

O sistema composto por solo-cimento-bentonita é mais complexo, porém mais resistente. A argila atua como redutora de condutividade hidráulica e o cimento concede resistência ao sistema. No entanto, a bentonita apresenta boa capacidade de troca catiônica, de modo que, as propriedades finais modificadas podem favorecer a aplicação de modo diferenciado, por exemplo, nas cortinas verticais. Estudos prévios mostraram que a adição de bentonita hidrofóbica na preparação de cortinas verticais favoreceu, também, a contenção do contaminante em estudo (BATISTA; LEITE, 2010; LEITÃO; RAPOSO, 2013; SILVA; RAPOSO, 2015).

A borracha de pneus inservíveis, PIs, tem sido usada para várias finalidades, e também, na preparação das barreiras verticais buscando-se melhorar a eficiência destas na contenção de contaminantes impedindo assim a chegada até um aquífero (BENSON, 1995). A alta capacidade de drenagem da borracha atua como ponto positivo nesses sistemas (OIKONOMOU; MAVRIDOU, 2009). As pesquisas atuais voltadas para a inovação tecnológica têm possibilitado a elaboração de materiais versáteis indispensáveis nos novos tempos.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo geral

Preparar cortinas verticais, reaterro, utilizando-se borracha de pneus inservíveis triturada, com distintas granulometrias, para conter a ação de contaminante no solo.

2.2. Objetivos específicos

- a) Caracterização físico-química, mineralógica e composicional das amostras que irão compor os sistemas, cortinas verticais;
- b) Avaliar a capacidade de drenagem das cortinas verticais; e
- c) Realizar testes de retenção de contaminante utilizando-se uma mistura água-óleo com as novas formulações.

3. JUSTIFICATIVA

Estudos realizados por Leitão; Raposo (2013) e Silva; Raposo (2015), indicaram que bentonitas locais hidrofobizadas usadas na elaboração de cortinas verticais, reaterro, podem ser utilizadas, não apenas como retentoras de contaminantes, mas também, favorecendo a drenagem da água associada aos contaminantes.

Considerando a necessidade primordial da preservação dos recursos hídricos, e com base em estudos prévios, busca-se então modificar o sistema, solo/cimento/argila, usando-se borracha de pneus inservíveis, associada à argila hidrofobizada, buscando-se, não somente melhorar o desempenho dessa ferramenta, mas também, contribuir para reduzir os impactos ambientais causados pelos pneus inservíveis descartados, por vezes indevidamente.

A borracha de pneus inservíveis não causa dano à saúde dos seres vivos e, portanto, se adéqua para tal finalidade. De acordo com Nohara *et al.* (2005), os pneus são resíduos industriais classificados como resíduos inertes, ou seja, não sofrem degradação ou não se decompõem quando dispostos no solo, ou sofrem degradação de forma lenta.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Solos

4.1.1. Definição

Conforme o conceito apresentado pelo *Soil Survey Staff* (2014), o solo é uma coleção de corpos naturais presentes na superfície terrestre, composto por minerais e matéria orgânica, líquidos e gases, com capacidade de sustentar plantas. Superiormente é limitado pelo ar atmosférico, águas rasas ou plantas. Na parte lateral, é limitado gradualmente por rocha consolidada ou parcialmente desintegrada, água profunda ou gelo. Porém, o limite inferior trata-se do mais difícil de definir, podendo ser considerado como o limite inferior da atividade biológica.

De acordo com a Norma Brasileira 6502, dada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1995), o solo pode ser definido como um “*material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não conter matéria orgânica*”.

4.1.2. Perfil

A característica mais marcante do solo é sua estrutura em camadas, resultado da diferente intensidade da atuação dos processos que as formaram em profundidade. Estes processos criam diferentes zonas ou horizontes os quais, em conjunto, constituem o perfil pedológico (CORNER, 2007).

Os horizontes de um perfil de solo são formados por processos de adição, perdas, transformações e translocações, devido ao fato de ocorrerem com intensidades diferentes através do regolito, que é definido como todo material inconsolidado ou começando a se decompor que está sobre uma rocha. Os perfis exibem as características em profundidade e, se a estas são acrescidas as que ocorrem nas duas dimensões laterais da área, tem-se o corpo do solo (ZIMBACK, 2003).

A classificação geológica corresponde à interpretação da gênese do solo, com base na análise tátil-visual e em observação de campo acerca da forma de ocorrência, morfologia, e das relações estratigráficas com outras ocorrências, outros

solos ou rochas, interpretando-se os processos responsáveis pela gênese e, eventualmente, a rocha de origem (PASTORE; FONTES, 1998).

4.1.3. Sistema trifásico

Sabe-se que o solo é um material constituído por partículas sólidas e pelos vazios entre elas, estando preenchido por água ou ar, constituindo as fases sólida, líquida e gasosa (ALMEIDA, 2005).

A fase sólida de um solo é constituída por grãos minerais, com ou sem presença de matéria orgânica. Quimicamente, os silicatos, feldspato, mica, quartzo, serpentina, clorita e talco, compõem a maioria da fração de solo visível a olho nu, seguida pelos óxidos, hematita, magnetita e limonita, pelos carbonatos, calcita e dolomita, e pelos sulfatos, gesso e anidrita. Já nas frações argilosas, os principais minerais encontrados são as caulinitas, as montmorilonitas e as ilitas (ALMEIDA, 2005).

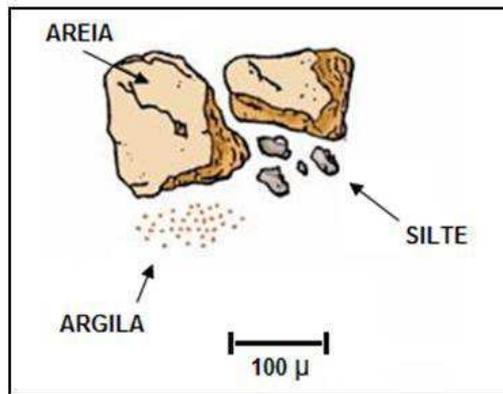
A fase líquida é composta pela água e/ou outra solução proveniente do solo a qual preenche os poros existentes no mesmo, podendo ficar retida em diferentes níveis dependendo da dimensão dos poros e da quantidade de líquido existente. O solo pode ser considerado saturado, quando os poros são totalmente preenchidos por essa fase, e não saturado, quando apenas uma parte do sistema poroso total apresenta água (FERNANDES FILHO; FRANCELINO, 2001).

Já a fase gasosa trata-se do ar que ocupa os poros não preenchidos pela fase líquida. A composição desse ar é semelhante ao ar atmosférico, dependendo basicamente, das condições de aeração, ou seja, o processo pelo qual se faz a troca de gases entre o solo e a atmosfera (FERNANDES FILHO; FRANCELINO, 2001).

4.1.4. Características físicas e químicas

As características físicas dos solos são: a textura, a granulometria, a plasticidade, a consistência, a compactidade, a cor, o cheiro, a friabilidade e a coesão. Porém, a textura é a principal característica física observada, por ser relacionada com a utilização e produtividade do solo, onde as partículas são agrupadas de acordo com a granulometria, Figura 1. A Tabela 1 apresenta a classificação dos solos considerando a granulometria (ZIMBACK, 2003; ALMEIDA, 2005).

Figura 1: Proporção granulométrica das distintas frações que compõem o solo.



FERNANDES FILHO; FRANCELINO, 2001.

Tabela 1: Classificação dos solos de acordo com a granulometria.

Nomenclatura	Dimensão das Partículas	Características
Fração grossa	2 - 0,05 mm	Também conhecida como fração areia é constituída quase que essencialmente de quartzo, é responsável pelo aparecimento de macroporos e, portanto, pela aeração do solo, retém pouca água e poucos nutrientes.
Fração média	0,05 - 0,002 mm	Também conhecida como fração silte é constituída em sua maior parte por quartzo, promove o aparecimento de poucos poros podendo causar adensamento do solo, retém pouca água e poucos nutrientes.
Fração fina	< 0,002 mm	Também conhecida como fração argila é constituída em sua maior parte por minerais de argila, promove a estruturação do solo fazendo com que ocorra o aparecimento de um alto volume de poros, principalmente de microporos, retém muita água e muitos nutrientes.

ZIMBACK, 2003.

Considerando as propriedades físico-químicas dos solos estas são obtidas através de características como: pH, em água, KCl e CaCl₂, matéria orgânica (%), hidrogênio (meq/100 g), alumínio (meq/100 g), fósforo (ppm), cálcio (meq/100 g), magnésio (meq/100 g), potássio (meq/100 g), soma de bases (meq/100 g), capacidade de troca catiônica (meq/100 g), saturação por bases (v%) e saturação por alumínio (m%) (ZIMBACK, 2003).

4.2. Argilominerais

O grupo de minerais que constitui a rocha, comumente conhecida por argilito, denomina-se argilominerais, silicatos de alumínio hidratados, onde o alumínio pode ser substituído total ou parcialmente por magnésio e ferro, cuja característica marcante é a granulometria fina dos seus constituintes, em geral inferior a 2 µm, e possuem capacidade de tornarem-se plásticos quando misturados com certa quantidade de água. Os argilominerais possuem estrutura em camadas, filossilicatos, formados por folhas contínuas de tetraedros, SiO₄, arranjados de forma hexagonal, condensados com folhas octaédricas de hidróxidos de metais tri e divalentes (GRIM, 1968; DANA, 1984; ABREU, 1973; GUGGENHEIM; MARTIN, 1995; VIEIRA COELHO; SANTOS; SANTOS, 2007).

Alguns fatores controlam as propriedades dos materiais argilosos ou os atributos que podem caracterizar um material argiloso, são eles: composição argilomineral; composição mineral não argilosa; material orgânico; textura, capacidade de troca iônica e solubilidade de sais (GRIM, 1968). Darley e Gray (1988) afirmaram que a estrutura atômica dos cristais que compõem os minerais argilosos é o principal fator que determina suas propriedades.

De acordo com o *U.S. Geological Survey* (USGS), as argilas podem ser diferenciadas, em geral, de acordo com as características que controlam suas propriedades, como: composição, plasticidade, cor, capacidade de absorção, característica de queima (*firing*) e propriedades de clarificação. Algumas argilas podem ser classificadas de acordo com as informações apresentadas na Tabela 2 (FLANAGAN, 2018).

Tabela 2: Tipos de argila.

Tipo de Argila	Características
Argila bola (ball clay)	Consiste, primariamente, de caulinita, contendo também ilita, clorita, minerais de esmectita, quartzo e materiais orgânicos.
Bentonita	Composta por minerais de esmectita, normalmente montmorilonita, com uma menor quantidade de feldspato, biotita e quartzo.
Argilas comuns	Compostas por ilita e clorita como minerais predominantes.
Terra fuller	Consiste, primariamente, por paligorsquita ou argila montmorilonita não plástica, rica em cálcio com quartzo.
Caulim	Inclui, predominantemente, caulinita ou minerais do grupo do caulim, embora minerais como: esmectitas, mica, quartzo e rutilo também são componentes de depósitos de caulim.
Paligorsquita e sepiolita	São silicatos hidratados de magnésio ferro e alumínio.

FLANAGAN, 2018.

A classificação dos argilominerais, que compõem a argila, pode ser realizada por meio de duas características intrínsecas a cada tipo: composição química e estrutura cristalina. As estruturas cristalinas podem ser de dois tipos, 1:1 e 2:1. A Tabela 3 exibe os principais grupos de argilominerais de acordo com suas características e algumas das respectivas espécies (VIEIRA COELHO; SANTOS; SANTOS, 2007).

Tabela 3: Classificação dos filossilicatos hidratados.

Tipo de Camada	Grupo	Característica Octaédrica	Espécies
1:1	Serpentinita-caulinita	Trioctaédrica	Lizardita, berthierine, amesita, cronstedita, nepouita, kellyita, frairpontita, brindleyita.
		Dioctaédrica	Caulinita, dickita, nacrita, haloisita (planar).
		Di, Trioctaédrica	Odinita
2:1	Talco-pirofilita	Trioctaédrica	Talco, wilemseita, kerolita, pimelita.
		Dioctaédrica	Pirofilita, ferropirofilita.
	Esmectita	Trioctaédrica	Saponita, hectorita, saucnita, estevensita, swinefordita.
		Dioctaédrica	Montmorilonita, beidelita, nontronita, volkonkoita.
	Vermiculita	Trioctaédrica	Vermiculita trioctaédrica.
		Dioctaédrica	Vermiculita dioctaédrica.
	Mica pura (flexível)	Trioctaédrica	Anita, flogopita, lepidolita, aspidolita.
		Dioctaédrica	Muscovita, celadonita, paragonita.
	Mica quebradiça	Trioctaédrica	Clintonita, kinoshitalita, bityita, anadita.
		Dioctaédrica	Margarita, chernykhita.
	Clorita	Trioctaédrica	Clinocloro, chamosita, pennantita, nimita, baileycloro.
		Dioctaédrica	Dombassita.
		Di, Trioctaédrica	Cookeita, sudoita.
		Tri, Dioctaédrica	Nenhuma.
2:1	Variável	Trioctaédrica	Corrensita, aliettita, hidrobiotita, kulkeita.
		Dioctaédrica	Rectorita, tosudita, brinrobertsita.
		Trioctaédrica	Dozyita.

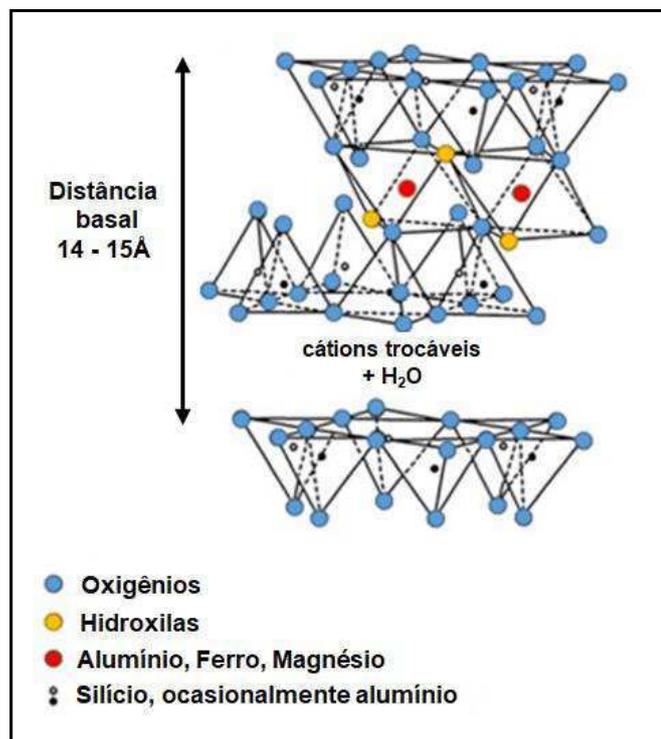
Adaptada de MARTIN *et al.*, 1991.

4.2.1. Bentonita

Diversos autores definem a bentonita como sendo uma rocha, cuja composição é essencialmente o argilomineral montmorilonítico, do grupo das esmectitas. A rocha é formada pela desvitrificação e posterior alteração química de um material vítreo de origem ígnea, normalmente sendo um tufo ou cinza vulcânica em ambientes alcalinos, onde a circulação de água é restrita (ROSS; SHANNON, 1926; CHRISTIDIS; HUFF, 2009).

Segundo Uskarci (2006), bentonita é uma argila caracteristicamente, esmectítica, sendo a montmorillonita o argilomineral mais abundante com estrutura 2:1, Figura 2, ou seja, com arranjo cristalográfico distribuído em camadas de folhas fundidas de octaedros de Al^{3+} ou de Mg^{2+} ou ainda de óxidos de Fe^{3+} e folhas de tetraedros de óxidos Si^{4+} . A interação das camadas gera cargas negativas que são balanceadas por cátions hidratados que pertencem à região interlamelar da argila, que são unidos à estrutura através de interações de Van der Waals. A referida disponibilidade de cargas aumenta o potencial iônico na argila resultando numa estrutura hidrofílica muito eficaz na adsorção de água (SILVA; FERREIRA, 2008; SILVA; RAPOSO, 2015).

Figura 2: Arranjo cristalográfico da montmorilonita.



Adaptado de PUSCH; KARNLAND, 1996 *apud* CARLSON, 2004.

Os depósitos de bentonita podem ser formados a partir de mecanismos de alteração diagenética ou hidrotermal de vidro vulcânico, ou ainda podem ser resultados da formação de sedimentos em lagos salgados e ambientes *sabkha*, ricos em esmectita, normalmente por dissolução de esmectitas detríticas que são frequentemente associadas com paligorsquita e/ou sepiolita (CHRISTIDIS; HUFF, 2009).

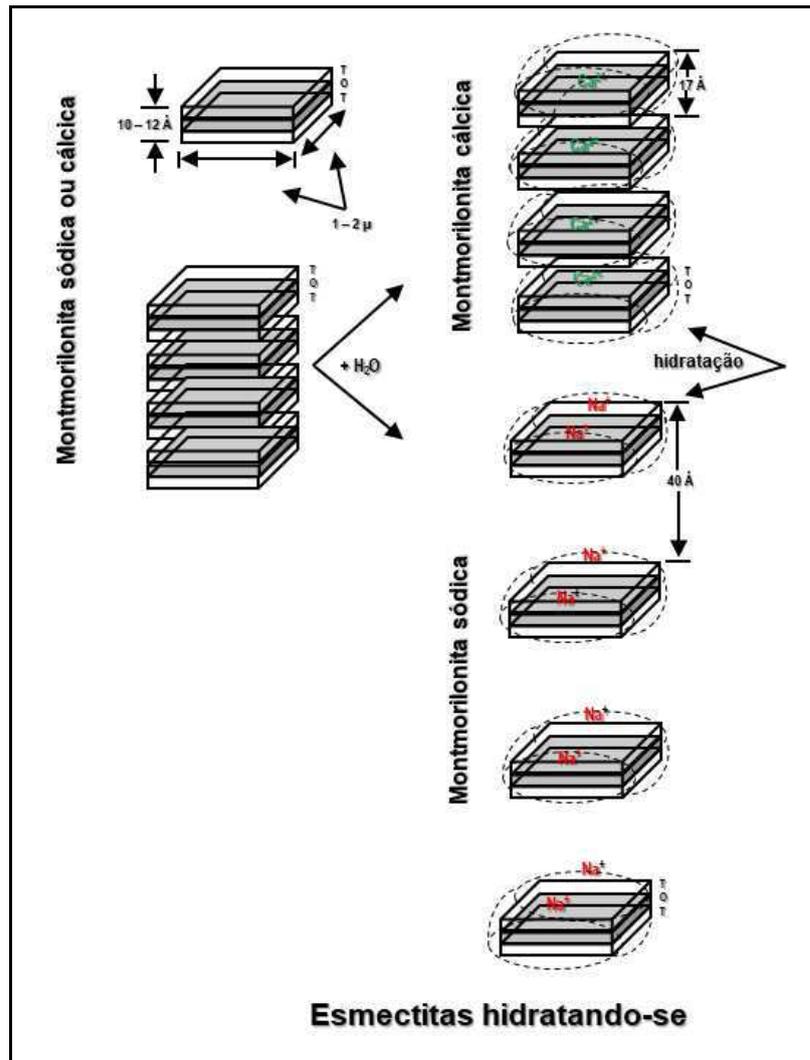
As bentonitas apresentam como principais características, elevado teor de matéria coloidal, grande área superficial, até 800 m²/g, significativa capacidade de troca catiônica, CTC, na faixa de 60 a 170 meq/100g, tixotropia e alto poder de inchamento, até 20 vezes seu volume inicial, atingindo espaços interplanares de até 100 Å, quando em presença de água (ABREU, 1973; SILVA, 2011; PORTO; ARANHA, 2002).

As argilas bentoníticas podem ser de três tipos, quanto ao cátion interlamelar preponderante, sódica, cálcica ou mista, sódio e cálcio. O cátion interlamelar irá influenciar a capacidade de inchamento da argila, onde a bentonita sódica apresenta melhor capacidade de inchamento, enquanto a cálcica e a mista apresentam menor capacidade, Figura 3. Essa diferença pode ser explicada pela força de atração entre as camadas, onde o cátion de cálcio provoca uma maior força de atração, causando a redução da quantidade de água que poderá ser adsorvida, enquanto o cátion sódio provoca uma menor força atrativa, permitindo que uma maior quantidade de água penetre entre as camadas, e seja então adsorvida (PEREIRA, 2008; SILVA; FERREIRA, 2008).

As principais formas de utilização da bentonita pelo mercado são: como agente tixotrópico de fluidos utilizados para perfuração de poços de petróleo e d'água; como aglomerante de areias de moldagem usadas em fundição; na pelotização de minério de ferro; no descoramento de óleos e clarificação de bebidas; como impermeabilizante de solos; como absorvente sanitário para animais de estimação; como carga mineral em produtos farmacêuticos, como produtos cosméticos; em catálise, atuando na remoção de poluentes da água (PORTO; ARANHA, 2002; LUZ; OLIVEIRA, 2008).

A capacidade de troca catiônica das argilas, comum às bentonitas, pode ser explicada por intermédio do excesso de cargas negativas na superfície da estrutura, causado pelas substituições isomórficas, pelas ligações químicas quebradas nas arestas das partículas e pela interação dos íons H₃O⁺ com as cargas nestas ligações

Figura 3: Estrutura, adaptada, de hidratação da montmorilonita cálcica e sódica.



LUMMUS; AZAR, 1986.

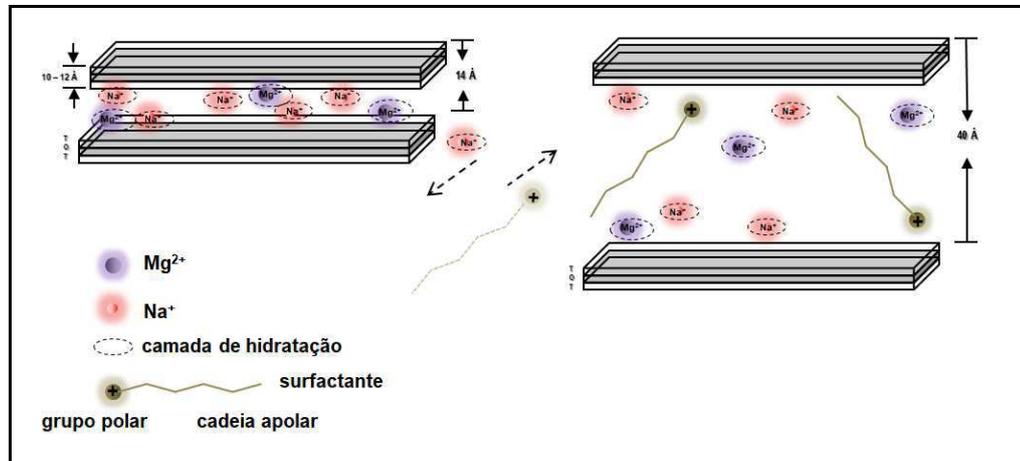
quebradas. Essa instabilidade eletrônica pode ser compensada por cátions adsorvidos nas partículas (BATISTA, 2010).

Essa troca catiônica vai depender de alguns fatores, como: pH da solução, população dos sítios trocáveis, natureza do mineral, concentração do eletrólito e natureza do cátion. Os íons trocáveis mais comuns são: o cálcio, o magnésio, o hidrogênio, o potássio, o amônio e o sódio (MORONTA, 2004)

Os argilominerais, como a montmorilonita, possuem cátions hidratados no espaço interlamelar os quais conferem uma superfície hidrofílica ineficaz na absorção de compostos orgânicos. Esses cátions podem ser trocados por íons orgânicos os quais inseridos na estrutura lamelar, promovem a formação de um flossilicato organofílico, Figura 4. Os argilominerais são modificados como a ampliação do espaço basal como consequência da funcionalidade, da densidade do

empacotamento e do comprimento da cadeia da molécula orgânica (MARRAS *et al.*, 2007; AVALOS *et al.*, 2008; PONTES; RAPOSO, 2013).

Figura 4: Esquema adaptado de intercalação do surfactante na estrutura interlamelar do filossilicato, tornando a argila organofílica.



PONTES; RAPOSO, 2013.

A capacidade de inchamento dessas argilas organofílicas foi estudada com líquidos orgânicos e misturas líquidas por Jordan (1949), concluindo que o grau de solvatação depende pelo menos de três fatores: da extensão do revestimento superficial das partículas de argila por matéria orgânica, do grau de saturação da capacidade de troca do mineral argiloso por cátions orgânicos e da natureza do líquido orgânico.

Argilas organofílicas podem ser utilizadas como: absorventes, agentes de controle reológico, em tintas, em graxas, em cosméticos, em produtos para cuidados pessoais e em fluidos para perfuração de poços de petróleo (PAIVA; MORALES; VALENZUELA DÍAZ, 2008). Ainda de acordo com Silva e Raposo (2015), as argilas hidrofóbicas podem, também, ser aplicadas no sistema solo-cimento-bentonita (SCB), melhorando a eficiência na retenção de contaminante orgânico.

4.2.2. Reservas e produção

Medeiros (2016) cita que, devido à abundante extensão das reservas mundiais dos principais países produtores de bentonita, as estimativas não são publicadas. Porém, as reservas brasileiras computadas no ano de 2015 foram

estimadas em 51,5 Mt, sendo a divisão por estado: 30,9% no Paraná; 16,7% em São Paulo; 45,2% na Paraíba e 7,3% na Bahia.

Os dados de produção mundial de bentonita, relativos aos anos de 2017 e 2018, estão apresentados na Tabela 4. Pode-se observar que a China, os Estados Unidos e a Turquia se destacaram como produtores de grande potencial. No Brasil, dados publicados pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) em 2016 mostraram que os principais estados produtores são a Paraíba e a Bahia (MEDEIROS, 2016; USGS, 2019).

Tabela 4: Produção mundial de bentonita.

País	2017(Mt)*	2018(Mt)*
Estados Unidos	4.300	3.700
Brasil (beneficiada)	405	400
China	5.600	5.590
República Tcheca	369	370
Alemanha	395	390
Grécia	1.100	1.200
Índia	800	810
Irã	436	440
México	470	460
Espanha	113	110
Turquia	3.140	3.090
Ucrânia	210	200
Outros países	3.300	3.800
TOTAL	20.600	21.000

*Dados em mil toneladas.
USGS, 2019.

O estado da Paraíba é um dos principais produtores brasileiros de bentonita. De acordo com Silva (2011), os principais depósitos do estado estão localizados nos municípios de Boa Vista, Cubati e Pedra Lavrada. Boa Vista se destaca como principal município produtor com bentonitas do tipo cálcica (LUZ; OLIVEIRA, 2008). Em virtude da disposição geológica, as argilas produzidas no município de Boa Vista

aparentam ter formação geológica semelhante às de Cubati (MENEZES *et al.*, 2009).

Cubati município do Estado da Paraíba, localizado na Microrregião Cubati e na Mesorregião Borborema com as seguintes coordenadas geográficas: latitude, 06° 52' 06"S e longitude, 36° 22' 31"W, Figura 5. Sua área é de 137 km² representando 0,2427% do Estado, 0,0088% da Região e 0,0016% de todo o território brasileiro. O acesso é feito a partir de João Pessoa pelas rodovias BR 230/PB e 177/PB 167. O município foi criado em 1959 e possui uma estimativa para o ano de 2019 de 7.797 habitantes (CPRM, 2005; IBGE, 2017).

O município está inserido na unidade geoambiental do Planalto da Borborema, formada por maciços e outeiros altos, com altitude variando entre 650 a 1.000 metros. Ocupa uma área de arco que se estende do sul de Alagoas até o Rio Grande do Norte. O relevo é geralmente movimentado, com vales profundos e estreitos dissecados (CPRM, 2005).

Menezes *et al.* (2009) realizaram um estudo com as bentonitas de Cubati e, por intermédio de caracterização, concluíram que as amostras possuem teores de CaO, K₂O e MgO semelhantes aos da bentonita de Boa Vista. Além de serem constituídas pelo argilomineral esmectítico, pelo quartzo e pela caulinita.

Figura 5: Localização do município de Cubati, indicado, no mapa da Paraíba.



PRANDI, 2015.

4.3. Cimento

De acordo com a norma europeia EN 197-1 (CEN, 2000), o cimento pode ser definido como um ligante hidráulico, isto é, um material inorgânico finamente moído, que quando misturado com água forma uma pasta que endurece através de reações e de processos de hidratação, e que, depois de endurecida se mantém resistente e estável mesmo sob a água.

O cimento Portland é um termo historicamente concedido a esse material ligante. Desde os tempos antigos, o homem já fazia uso de material cimentício, sendo primeiro utilizado gesso pelos Egípcios, evoluindo para o calcário calcinado com os Gregos e Romanos, passando pelo cimento pozolânico até chegar ao cimento hidráulico. A patente do cimento Portland foi obtida por Joseph Aspdin, pedreiro e construtor, em 1824. Esse nome foi concedido primeiramente pela semelhança entre a pedra Portland, um calcário extraído da região de Dorset, na Inglaterra, com a cor e qualidade do cimento endurecido (NEVILLE, 2016).

Esse cimento é um produto definido como um aglomerante hidráulico que é obtido através da pulverização do *clínquer*, que consiste de um material granular conduzido até a temperatura de fusão incipiente. Esse material granular consiste essencialmente de silicatos de cálcio hidráulicos e certa proporção de sulfato de cálcio natural, podendo ser adicionado, eventualmente, algumas substâncias que modifiquem as propriedades do material (OLIVEIRA, 2012; CARVALHO, 2012).

Os principais componentes do cimento Portland são, a cal (CaO), a sílica (SiO₂), a alumina (Al₂O₃), o óxido de ferro (Fe₂O₃), a magnésia (MgO) e uma pequena proporção de anidrido sulfúrico (SO₃), adicionado após a calcinação com o intuito de retardar o tempo de pega. Pode-se encontrar ainda em menor porcentagem os álcalis do cimento, óxido de sódio (Na₂O) e óxido de potássio (K₂O), e ainda óxido de titânio (TiO₂) (OLIVEIRA, 2012).

Como referenciado, algumas substâncias podem ser adicionadas ao cimento, atuando como agentes modificadores das propriedades do mesmo. O fíler calcário é uma dessas substâncias modificadoras, originária da rocha calcária finamente moída, que quando adicionado ao cimento tem a capacidade de produzir concretos mais trabalháveis. Fisicamente, a adição do fíler atua no preenchimento dos poros, devido sua granulometria fina. A partir da adição do fíler é gerado o cimento Portland

composto do tipo CII-F, que possui diversas possibilidades de aplicação na construção civil (ABNT, 1991; CARVALHO, 2012).

Atua como um material aglomerante hidráulico, com capacidade de hidratação que gera um período de solidificação da pasta e dos demais materiais que estiverem juntos e, posteriormente, o endurecimento trazendo resistência ao sistema. A utilização do cimento nos sistemas SCB tem o objetivo de promover resistência mantendo o mesmo estável e um possível isolamento hidráulico (BATISTA; LEITE, 2010; CARVALHO, 2012).

4.4. Borracha de pneus inservíveis

A borracha natural é uma substância extraída do látex da seringueira, sendo reconhecida como um polímero linear de alto peso molecular e que exhibe propriedades únicas. Aproximadamente 2500 plantas são capazes de produzir o látex, porém, o látex proveniente da espécie *Hevea brasiliensis* é a fonte comercial mais importante do látex de borracha natural (GALIANI *et al.*, 2007; RIPPEL; BRAGANÇA, 2009).

A borracha trata-se de uma matéria-prima, que pode ser natural ou sintética, podendo ser submetida a processo de reticulação ou de vulcanização. De acordo com a norma alemã DIN (*Deutsches Institut für Normung*) 53501 (1980) *apud* Cachada (2017) a borracha, o elastômero e o processo de vulcanização podem ser definidos como:

- **Borracha (matéria-prima):** é um polímero não reticulado, passível de reticulação (vulcanização), e elástico (*rubber-elastic*) à temperatura ambiente e, dentro de certos limites, em gamas adjacentes de temperatura. Quando submetida a temperaturas elevadas e/ou forças de deformação, essa matéria-prima exhibe, de modo crescente, um fluxo viscoso que a torna capaz, perante condições adequadas, de sofrer processos de modelação. A borracha, como matéria-prima, é o material inicial para a manufatura de elastômeros, tido como borracha.
- **Elastômero (borracha):** material polimérico reticulado, ou seja, vulcanizado até sua temperatura de decomposição. Quando em temperaturas baixas é duro como vidro e, quando submetido a temperaturas altas, não é sujeito a

fluxo viscoso. Porém, quando em temperatura ambiente, o elastômero exibe comportamento elástico.

- **Vulcanização:** processo de reticulação no qual a estrutura química da borracha, matéria-prima, é alterada. Essa mudança torna o material elástico, restaura a elasticidade que o material possuía no início ou ainda pode aumentar o intervalo de temperatura em que a elasticidade é observada do início ao fim. Este comportamento é caracterizado pelos baixos valores de módulo de corte que são pouco dependentes da temperatura.

A borracha natural é utilizada em mais de 50 mil produtos, tendo como principais aplicações: em luvas descartáveis, em adesivos, em preservativos, em pisos e revestimentos, em pneumáticos, em material cirúrgico como; tubos intravenosos, seringas, estetoscópios, cateteres e esparadrapos, e na impermeabilização de fios e tecidos (RIPPEL; BRAGANÇA, 2009).

Como mencionado, um dos principais usos da borracha é na composição dos pneumáticos ou pneus, *pneumáticus*, “sopro”. O Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), na resolução nº 416/09, no artigo 2º, inciso I, define o pneu como:

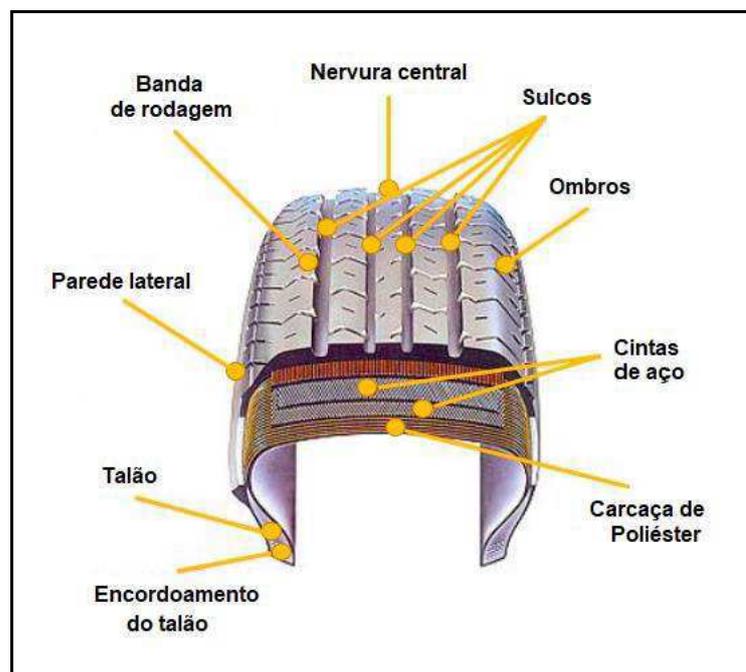
“Componente de um sistema de rodagem, constituído de elastômeros, produtos têxteis, aço e outros materiais que quando montado em uma roda de veículo e contendo fluido(s) sob pressão, transmite tração dada a sua aderência ao solo, sustenta elasticamente a carga do veículo e resiste à pressão provocada pela reação do solo” (BRASIL, 2009, pág.1).

Na Figura 6, podemos observar com detalhes as partes de um pneu convencional de automóveis. De acordo com BNDES (1998), Kamimura (2002), Bockstal *et al.*(2019), os pneus são compostos basicamente de quatro partes:

- **Carcaça:** trata-se da estrutura interna do pneu, tem como função reter o ar sob pressão e sustentar o peso do veículo. É composta por lonas de nylon, aço ou poliéster, que são dispostas no sentido diagonal umas das outras, em pneus convencionais, ou no sentido radial em pneus radiais. Esses chamados pneus radiais ainda contam com uma estrutura de lonas, que são conhecidas por “cintura”, e tem o objetivo de estabilizar a carcaça radial.
- **Talão:** estrutura em forma de anel, tendo como objetivo manter o pneu acoplado ao aro. É composta por arames de aço de alta resistência, unidos e recobertos por borracha.

- **Flancos:** parte lateral do pneu responsável por proteger a carcaça. São compostos por borrachas que apresentam alto grau de flexibilidade.
- **Banda de rodagem:** parte do pneu que entra em contato direto com o solo. Os desenhos exibidos na sua superfície são chamados de esculturas. É composta por partes cheias ou biscoitos e partes vazias ou sulcos, cuja função é de melhorar a aderência do veículo com o solo. É feita com compostos de borracha com alta resistência ao desgaste. Com o desgaste, essas bandas podem ser substituídas, e esse processo é chamado de recauchutagem de pneus.

Figura 6: Partes de um pneu convencional.



BRAZIL TIRES (2009) *apud* DIAS (2011).

De acordo com Kamimura (2002), os compostos de borrachas têm diversos aditivos que são adicionados no decorrer do processamento. Um desses aditivos é o negro de carbono, vulgarmente conhecido como negro de fumo, composto orgânico que, quando misturado à borracha, aumenta a resistência mecânica. Porém, esse composto dificulta a reciclagem dos pneus inservíveis, sendo responsável, por um dos maiores problemas ambientais causados pela indústria pneumática (BNDES, 1998). Na Tabela 5 está apresentada a composição típica de uma borracha sintética.

Os pneus podem ser submetidos a diversos tipos de reforma, com o intuito de aumentar a vida útil do mesmo, como: recapagem, onde a banda de rodagem é

substituída; recauchutagem, com a substituição da banda de rodagem e dos ombros; e remoldagem, onde a banda de rodagem, ombros e toda a superfície de seus flancos são substituídos. Porém, quando os danos na estrutura são irreparáveis, impossibilitando a sua rodagem de forma segura ou a sua reforma, o pneu é considerado inservível (BRASIL, 2009).

Tabela 5: Composição típica da borracha sintética.

Componente	Percentual mássico (%)
SBR	62,1
Negro de carbono	31,0
Óleo extensor	1,9
Óxido de zinco	1,9
Ácido esteárico	1,2
Enxofre	1,1
Acelerador	0,7
Total	99,9

Dodds *et al.*, 1983.

Algumas estratégias podem ser tomadas para a recuperação dos pneus inservíveis, seja em sua forma inteira na construção civil ou como fonte energética, ou ainda em partes, como material de reciclagem podendo ser aplicado a novos produtos (BOCKSTAL *et al.*, 2019; SATHISKUMAR; KARTHIKEYAN, 2019). A reciclagem, de acordo com a diretiva 2008/98/EC do Parlamento e Conselho da União Européia, pode ser definida como:

“Qualquer operação de valorização através da qual os materiais constituintes dos resíduos são novamente transformados em produtos, materiais ou substâncias para o seu fim original ou para outros fins. Inclui o reprocessamento de materiais orgânicos, mas não inclui a valorização energética nem o reprocessamento em materiais que devam ser utilizados como combustível ou em operações de enchimento” (EC, 2008, pág. 10).

A reciclagem da borracha prevê a modificação física e/ou estrutural da mesma de acordo com a sua aplicação. O tratamento aplicado à borracha está

associado a quatro níveis básicos estando atrelados à crescente complexidade do processo (BOCKSTAL *et al.*, 2019; SHULMAN, 2019):

- **Nível 1:** destruição da estrutura do pneu por opções mecânicas que destroem um ou mais atributos físicos, sendo eles, a forma, a capacidade de carga e a rigidez. Este nível inclui remoções de esferas, banda de rodagem e paredes laterais. Os produtos resultantes são utilizados em aplicações de engenharia, como isolante térmico, como carga leve ou como matéria-prima para outros níveis de reciclagem.
- **Nível 2:** liberação e separação dos elementos do pneu usando-se tratamentos que segregam a borracha, os metais e os componentes têxteis. A mais comum é a tecnologia de redução de tamanho, incluindo a trituração, o lascamento e a moagem ambiente ou criogênica. A pirólise também pode ser considerada neste nível de reciclagem.
- **Nível 3:** tratamentos e tecnologias subsequentes que modificam mecânica, térmica, química ou mecanoquimicamente pelo menos uma característica estrutural do material. A desvulcanização, recuperação, modificação da superfície e a pirólise estão entre as tecnologias mais adotadas.
- **Nível 4:** as tecnologias são utilizadas para refinar propriedades ou características selecionadas. A preparação de elastômeros termoplásticos, produtos de carbono são exemplos mais significativos.

A legislação prevê que o pneu inservível, não renovável, tenha destinação correta a fim de evitar o descarte em local indevido e, conseqüentemente, a poluição do meio ambiente. Alternativas ambientais vêm sendo desenvolvidas com a finalidade de aproveitar essa borracha descartada na composição de novos produtos. Algumas dessas aplicações, (BRASIL, 2009; AOUDIA *et al.*, 2017):

- na forma de agregado em argamassas ou concreto (TOPÇU, 1995; OIKONOMOU; MAVRIDOU, 2009; CORINALDESI; DONNINI, 2019);
- na composição de asfaltos (MASSON *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2018);
- em processo de degradação térmica, pirólise, em que o resíduo resulta em subprodutos como óleo e gás (LAGARINHOS; TENORIO, 2008; CZAJCZYŃSKA *et al.*, 2017);

- na sua forma inteira ou em partes, podendo ser usado em projetos de obras de drenagem; estabilização de taludes; construção de barragens; recifes artificiais; quebra-mares; contenção de erosão do solo; parques infantis e playground; compostagem; limitação de territórios esportivos, entre outros (NOHARA *et al.*, 2005; OIKONOMOU; MAVRIDOU, 2009; SIEIRA, 2010); e
- como agente auxiliador na retenção de contaminantes, sendo aplicada na composição de cortinas verticais (BENSON, 1995).

Pesquisas foram realizadas, relativas às características físicas da borracha, apesar da complexidade do material e de não haver uma normatização para definir as propriedades da mesma. No entanto, algumas propriedades foram determinadas conforme apresentado na Tabela 6, levando em consideração as características da borracha quando comparadas as do solo, CWA (2002) *apud* OIKONOMOU; MAVRIDOU (2009).

Os estudos usando-se pneus inservíveis são diversos buscando-se a inovação tecnológica (SILVA *et al.*, 2019; CHEN *et al.*, 2020; PAN *et al.*, 2020; RODRIGUES *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2020).

Tabela 6: Algumas propriedades da borracha comparadas as do solo.

Densidade compactada	2,3 - 4,8 kN/m ³ comparado com o solo de 15,6 – 19,5 kN/m ³
Massa unitária compactada seca	1/3 que a do solo
Compressibilidade	3 vezes mais compressível que o solo
Densidade	1/3 a 1/2 menos denso que o preenchimento granular
Durabilidade	Não biodegradável
Pressão da terra	Baixa comparada ao solo ou areia, até 50% menor
Tensão horizontal	Na base fraca: menor do que com preenchimento convencional
Módulo de elasticidade	1/10 da areia
Permeabilidade	Maior que 10 cm/s
Massa específica	± 1,14 – 1,27 kg/m ³ comparado ao solo de 2,20 – 2,80 kg/m ³
Isolamento térmico	8 vezes mais efetivo que cascalho
Massa unitária	Metade da massa unitária típica de cascalho
Tensão vertical	Na base fraca: menor do que o preenchimento granular

CWA (2002) *apud* OIKONOMOU; MAVRIDOU (2009).

4.5. Adsorção

A transferência de um ou mais constituintes de uma fase fluida, em geral líquida ou gasosa, denominada adsorbato, para a superfície de uma fase sólida, denominada adsorvente, é referida como processo de adsorção. É um fenômeno de superfície em que uma concentração finita de moléculas em um fluido adere a uma superfície com forças desbalanceadas, gerando equilíbrio (DABROWSKI, 2001; ARAÚJO, 2017):

O processo de adsorção pode ocorrer de forma física ou química. A adsorção física ou fisissorção resulta da interação de forças intermoleculares relativamente fracas, enquanto que a quimissorção ou adsorção química envolve a formação de uma ligação química entre as moléculas do adsorbato e a superfície do adsorvente (RUTHVEN, 1984). Algumas características referentes aos tipos de adsorção estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7: Características relativas aos tipos de adsorção.

Adsorção Física	Adsorção Química
Baixo calor de adsorção (< 2 ou 3 vezes o calor latente da evaporação)	Alto calor de adsorção (> 2 ou 3 vezes o calor latente da evaporação)
Não específica	Altamente específica
Monocamada ou multicamadas	Apenas monocamada
Sem dissociação das espécies adsorvidas	Pode envolver dissociação
Significante apenas a temperaturas relativamente baixas	Possível sobre uma ampla gama de temperatura
Rápida, não ativada, reversível	Ativada, pode ser lenta e irreversível
Sem transferência de elétrons, embora possa ocorrer a polarização do adsorbato	Transferência de elétrons para a formação de ligação entre o adsorbato e a superfície

RUTHVEN, 1984.

As interações que, geralmente, estão envolvidas nesse processo são as forças de Van der Waals, dispersão-repulsão, e eletrostáticas, no que compreende as interações de polarização, dipolo permanente, dipolo induzido e quadrupolo. (RUTHVEN, 1984; CRITTENDEN; THOMAS, 1998; DABROWSKI, 2001).

No caso da adsorção química, ocorre o compartilhamento ou troca de elétrons entre o adsorvente e o adsorbato. As energias envolvidas durante esse fenômeno se aproximam dos valores observados em reações químicas. A ocorrência de ligações iônicas ou covalentes entre os componentes da adsorção faz com que a quimissorção perca suas características puramente físicas. Trata-se de um processo

complexo, que exige altas temperaturas e é irreversível (DABROWSKI, 2001; RUTHVEN, 1984; ARAÚJO, 2017).

No processo de adsorção a porosidade dos adsorventes é uma característica importante. O tamanho dos poros influencia como a adsorção decorrerá, sendo caracterizados como micro (< 2 nm), meso (2 - 50 nm) e macroporos (> 50 nm). A adsorção em microporos é dominada quase inteiramente pelas interações entre as moléculas de fluido e as paredes dos poros. Em consequência dessa característica, a adsorção em microporos funciona como um processo de preenchimento de poros, no qual o volume dos poros é considerado um parâmetro essencial para controle do fenômeno (DABROWSKI, 2001; THOMMES, 2010).

Para os mesoporos, onde as paredes são formadas por um grande número de átomos ou moléculas adsorventes, o fenômeno de adsorção não depende só da atração fluido-parede, mas também das interações entre as moléculas do fluido. Esse processo leva a ocorrência de adsorção em multicamadas e condensação capilar, poro. As paredes dos poros são cobertas por uma película adsorvida em multicamadas no início da condensação dos poros. Já nos macroporos, a ação das forças de adsorção não ocorre ao longo do volume vazio, mas a uma distância próxima das paredes. Os meso e macroporos desempenham um importante papel no transporte de moléculas de adsorbato dentro do volume de microporos (DABROWSKI, 2001; THOMMES, 2010).

4.5.1. Adsorção no solo

A adsorção de substâncias no solo depende de fatores como, teor de matéria orgânica; teor e tipo de argila, dos óxidos de Fe, de Al e de Mn, do pH; da textura, e da propriedade de superfície dos constituintes mineralógicos. As superfícies reativas mais importantes em solos de carga variável são a fração argila, os óxidos e os grupos funcionais da matéria orgânica (POZZA *et al.*, 2007; ALLEONI *et al.*, 2005).

A retenção de água no solo é um importante fator a ser considerado, onde a polaridade, as pontes de hidrogênio e a tensão superficial fazem com que a água, em sistemas porosos, atinja o estado de menor energia livre e seja retida contra a gravidade, tanto por capilaridade quanto por adsorção. O tamanho dos poros presentes na matriz também influencia na retenção de água. Em microporos a

adsorção de água é predominante. Já em poros maiores a própria gravidade remove a água (RESENDE *et al.*, 1997; REINERT; REICHERT, 2006).

4.5.2. Adsorção na borracha

Considerando o processo de vulcanização ao qual a borracha é submetida para ser aplicada como pneu, um dos principais aditivos adicionados é o negro de carbono que tem como finalidade aumentar a resistência mecânica da mesma. (SNOEYINK; WEBER JR, 1967; ROWLEY; HUSBAND; CUNNINGHAN, 1984; KAMIMURA, 2002).

De acordo com as características adsorptivas que apresentam a partir do negro de carbono, a borracha de pneus, convencional ou através de modificação, tem sido utilizada em pesquisas de adsorção de metais pesados contidos em soluções aquosas (ROWLEY; HUSBAND; CUNNINGHAN, 1984; GUPTA *et al.*, 2013). Lapkovskis, Mironovs e Goljandin (2018), também apresentaram a possibilidade de adsorção de óleo resultado de derrame de petróleo a partir da borracha de pneu convencional e após processo de desvulcanização. Para tanto, os autores fizeram um comparativo entre a borracha de pneus convencional, sem modificação, e a borracha desvulcanizada, onde o material modificado exibe uma superfície desenvolvida no processo de desvulcanização que facilita a adesão de óleo. Em análise da capacidade de retenção de óleo, realizada com óleo de motor, os resultados mostraram que a borracha desvulcanizada possui uma capacidade de retenção, em percentual mássico, de $400 \pm 50\%$, e a borracha convencional apresentou um resultado de $280 \pm 50\%$, demonstrando eficiência em ambos os casos.

4.6. Cortinas verticais

4.6.1. Plumas contaminantes

A poluição ambiental é crescente, consequência do aumento da população e do desenvolvimento tecnológico. O solo é um dos meios, significativamente, prejudicado, pois além de sua superfície, ainda guarda preciosos aquíferos no subsolo, sendo passíveis de contaminação. Esses contaminantes são transportados

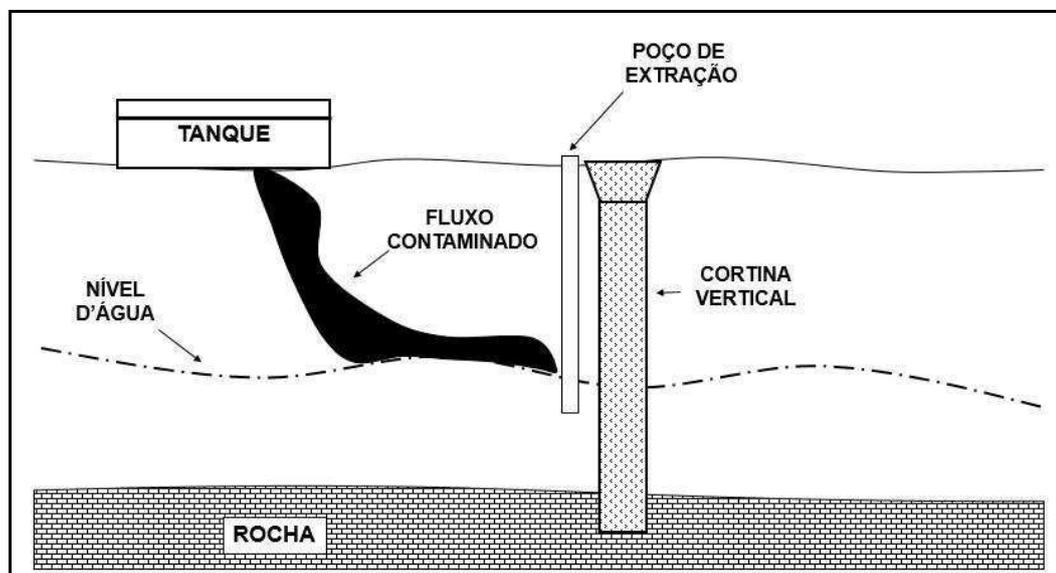
por convecção e dispersão através da porosidade da matriz de subsuperfície. As forças intermoleculares dos produtos químicos e das superfícies sólidas do meio poroso podem causar uma sorção entre os mesmos, que geralmente tem o efeito de retardar ou segurar o transporte (PIVER, 1992).

Piver (1992) ainda aponta como principais fontes de contaminantes dos recursos hídricos subterrâneos: lagoas de resíduos químicos; injeção de produtos químicos tóxicos em poços profundos; produtos químicos agrícolas; locais de disposição subterrânea para resíduos químicos; vazamentos de tanques de armazenamento subterrâneo para produtos químicos e combustíveis; e resíduos radioativos de baixo nível.

4.6.2. Sistemas convencionais

Diversos autores citam as cortinas verticais como uma solução para os problemas de contaminação no subsolo, encapsulando e minimizando a ação dos poluentes nos recursos hídricos subterrâneos. As cortinas verticais são escavações em forma de trincheira podendo alcançar até dezenas de metros de profundidade, Figura 7, (GARVIN; HAYLES, 1999; LEE; BENSON, 2000; HEINECK *et al.*, 2010; MALUSIS *et al.*, 2010; BATISTA; LEITE, 2010; LIM *et al.*, 2014).

Figura 7: Esquema de uma cortina vertical, adaptado.



BATISTA, LEITE, 2010.

Essas barreiras são preenchidas por uma mistura de solo e bentonita, podendo conter ou não cimento Portland. A bentonita misturada com água tem a função de estabilização geotécnica e redução da condutividade hidráulica. Essa lama bentonítica forma uma película fina que recobre as paredes e o fundo da trincheira, que em seguida é reaterada com uma mistura do solo, bentonita e cimento, diminuindo ainda mais a sua condutividade hidráulica e aumentando a sua resistência mecânica (BATISTA; LEITE, 2010; HEINECK *et al.*, 2010; MORANDINI, 2014; ATA; SALEM; ELKHAWAS, 2015).

Apesar de ser um sistema bastante utilizado, algumas limitações são demonstradas pelo fato de não tratar a água poluída, apenas conter o avanço; além disso, ao longo do tempo os contaminantes acabam por degradar a cortina, o que acarreta preocupações quanto à sua estabilidade (BATISTA; LEITE, 2010; LEITÃO; RAPOSO, 2013; SILVA; RAPOSO, 2015).

Silva e Raposo (2015) utilizaram bentonitas hidrofóbicas na preparação das cortinas buscando aproveitar a água drenada pelo sistema. Os resultados foram significativos e as argilas modificadas, provavelmente, contribuíram para aumentar a eficiência deste sistema.

4.6.3. Sistema inovador

A argila hidrofóbica foi usada previamente na preparação de cortinas verticais. Porém, alguns materiais podem auxiliar para melhorar a eficiência desse sistema, como é o caso da borracha de pneus inservíveis. Segundo Benson (1995), a borracha pode ser usada como material de drenagem, meio de tratamento do material drenado, isolante térmico ou cobertura. De acordo com estudos realizados pela *University of Wisconsin-Madison*, os pneus inservíveis podem ser mais permeáveis que cascalhos e areias, que são normalmente utilizados em sistemas de coleta de material drenado.

Acrescido a esse fator os pneus inservíveis podem absorver compostos químicos orgânicos tóxicos encontrados em material drenado, sendo esse mesmo material drenado mais facilmente removido e pré-tratado, garantindo assim, um sistema mais eficiente (BENSON, 1995).

A utilização de pneus inservíveis em locais onde há água contaminada é bastante eficiente. Uma parede é construída com pneu triturado a fim de diminuir o

fluxo da água contaminada. Em geral é composta de argila, porém, quando o pneu é adicionado à argila o fluxo de água contaminada diminui drasticamente. Pesquisas apontaram, também, que a movimentação de alguns produtos químicos foi retardada graças à adição de pneus triturados à argila bentonítica na composição da parede (BENSON, 1995).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Materiais

O presente trabalho foi idealizado para a concepção de sistemas, solo-cimento-bentonita acrescido de borracha de pneus inservíveis triturada. Para elaboração dos mesmos, a bentonita utilizada foi coletada na Fazenda Boa Esperança, distante 9 km do município de Cubati na região sertaneja da Paraíba/Brasil, sendo codificada como argila local, AL.

O cimento, utilizado na composição das cortinas verticais foi o CII-F32, obtido comercialmente.

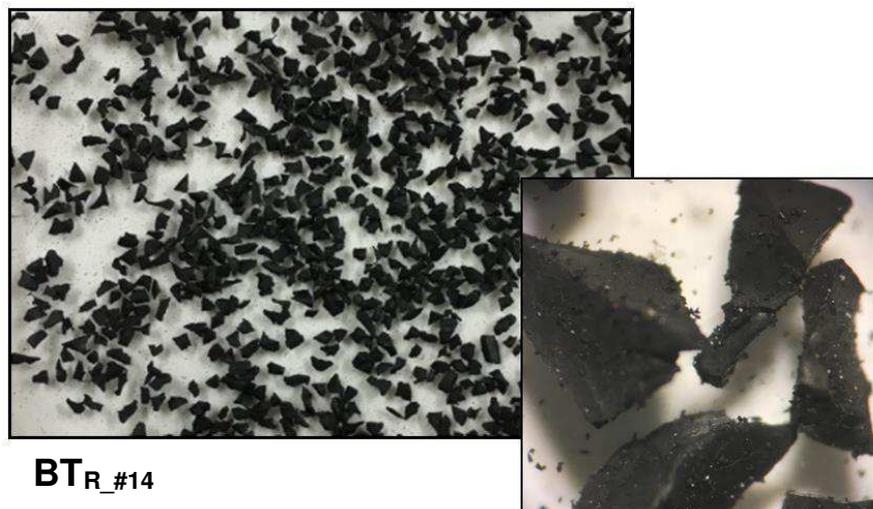
O solo, Figura 8, utilizado na preparação dos sistemas, cortinas verticais, foi cedido pelo Laboratório de Irrigação e Salinidade da UAEA/CTRN/UFCG, e foi coletado na Fazenda Santa Francisca localizada no município de Mamanguape-PB distando de 128 km de Campina Grande/Paraíba/Brasil. Os resultados de análises físico-químicas e geotécnicas foram disponibilizados pelo referido laboratório. A amostra foi usada nas condições originais e 1500 g foram destinados para a preparação dos sistemas.

Figura 8: Amostra de solo.



A borracha de pneus inservíveis, PIs, pneu tipo convencional, foi cedida, triturada, pela empresa Antônio Raposo Sobrinho-ME, com sede em Campina Grande/Paraíba/Brasil. A amostra foi padronizada a seco usando-se peneiras Bertel para quatro granulometrias, partículas retidas em malhas 14, 18 e 20, e passante em malha 20, Figuras 9(a-d), cujos tamanhos de partículas variaram entre 1,40 e 0,850 mm, padrão ABNT, Tabela 8, e nenhum tratamento prévio foi adotado. A borracha de pneus inservíveis triturada foi denominada de BT. As imagens registradas em primeiro plano, mais detalhadamente para todas as granulometrias, mostram partículas recobertas com micro partículas da BT, com contornos irregulares e fissuras.

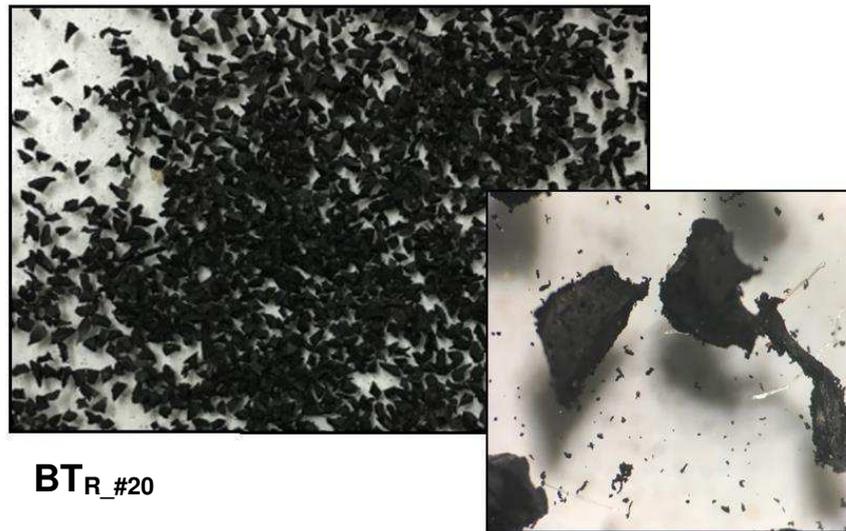
Figura 9: Micrografias da borracha, pneus inservíveis, triturada para as distintas granulometrias com destaque para a morfologia das partículas.



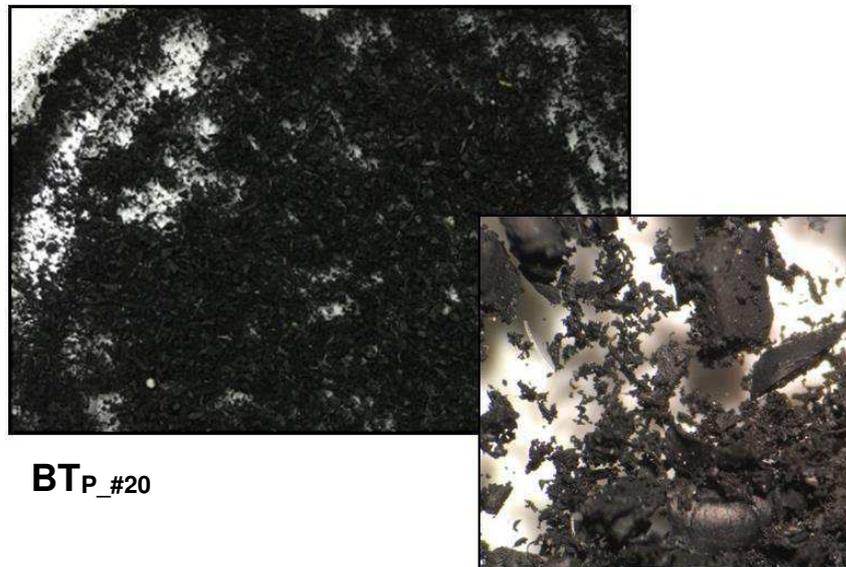
(a)



(b)

**BT_R_#20**

(c)

**BT_P_#20**

(d)

Tabela 8: Granulometrias da borracha, de pneus inservíveis, triturada.

Fração de borracha (mesh)	Tamanho da partícula (mm)
Retido em 14	$\text{Ø} \geq 1,40$
Retido em 18	$1,00 \leq \text{Ø} < 1,40$
Retido em 20	$0,850 \leq \text{Ø} < 1,00$
Passante em 20	$\text{Ø} < 0,850$

5.2. Modificação da argila local

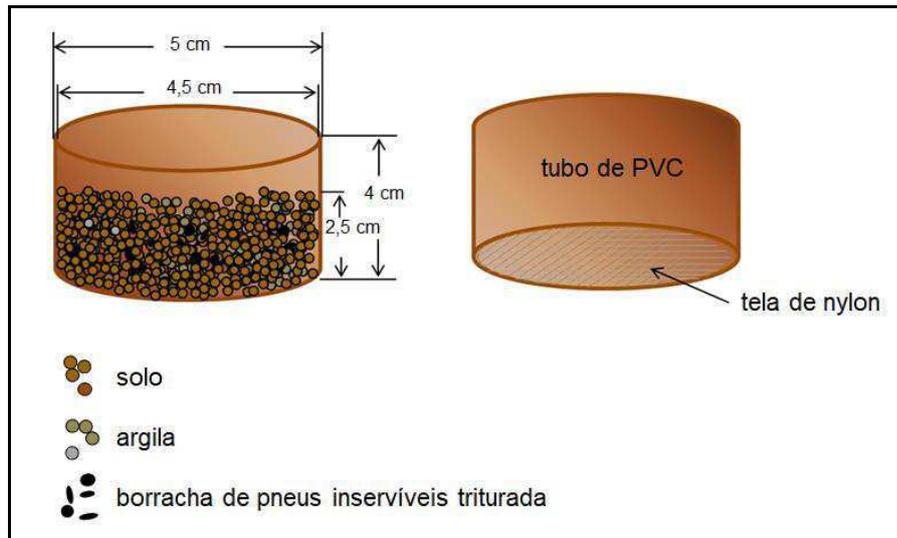
A argila local, AL, na forma, *in natura*, foi coletada na Fazenda Boa Esperança, município de Cubati/PB. Foi homogeneizada, quarteada e padronizada em malha 200, padrão ABNT. Todo processo de preparação foi realizado a seco em temperatura ambiente.

A hidrofobização da amostra, argila local, foi realizada utilizando-se o brometo de cetil trimetil amônio, $[C_{16}H_{34}N(CH_3)_3]^+Br^-$, cetremide, VETEC, em quantidade calculada em função da capacidade de troca catiônica, CTC, de 60 meq/100 g para a referida amostra (SILVA; RAPOSO, 2015). Após a adição do agente de hidrofobização a amostra permaneceu em repouso por 24 horas a temperatura ambiente, foi filtrada, lavada com água destilada, seca em estufa FANEM, modelo 315 SE, e peneirada para padrão ABNT malha 200. A amostra hidrofóbica foi codificada como, ALH, argila local hidrofóbica.

5.3. Preparação das cortinas verticais

Os referidos materiais, solo, cimento, argila local hidrofóbica e a borracha de pneus inservíveis triturada foram devidamente pesados de acordo com percentuais de composição previamente determinados (SILVA; RAPOSO, 2015). As misturas foram acondicionadas em modelo idealizado, Figura 10, para a realização dos ensaios de capacidades de drenagem e de retenção de contaminante. As misturas foram homogeneizadas, umedecidas com água destilada, transferidas para o modelo e mantidas sob condições de temperatura e de pressão ambientes por 24 horas para secagem.

Figura 10: Modelo idealizado para avaliações das capacidades de drenagem e de retenção de contaminante das cortinas verticais preparadas.



Os sistemas contaram com 92% de solo, 4% de cimento e 4% de argila local hidrofóbica mais a borracha de PIs triturada. Os percentuais mássicos das frações de ALH variaram, de um máximo de 3,5% a um mínimo de 2,0% com gradiente de 0,5%, conseqüentemente, as frações de BT variaram, entre 0,5% e 2,0%. A Tabela 9 apresenta os percentuais relativos à argila local hidrofóbica e à borracha de PIs triturada usados.

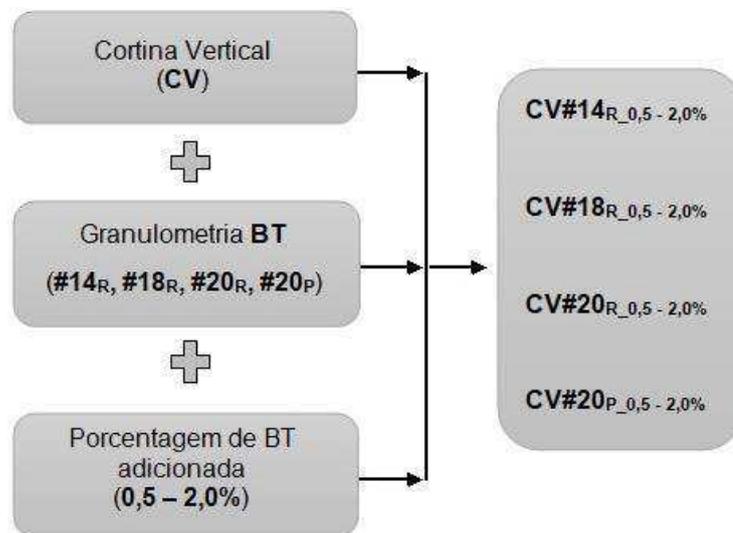
Os sistemas ou cortinas verticais, CVs, foram nomeados destacando-se, em subscritos, a granulometria da borracha de PIs triturada, a fração, se retida, R, ou passante, P, e o percentual de BT, conforme apresentado na Tabela 8. O fluxograma, Figura 11, resume a nomenclatura dos sistemas.

Uma cortina vertical, sem adição de BT, foi preparada para fins comparativos, sob as mesmas condições das demais e denominada de CV_{padrão}.

Tabela 9: Porcentagens de argila modificada e de borracha triturada, adicionadas aos sistemas.

Argila Local Hidrofóbica (ALH)	Borracha, de Pneus Inservíveis, Triturada (BT)
3,5%	0,5%
3,0%	1,0%
2,5%	1,5%
2,0%	2,0%

Figura 11: Fluxograma com a nomenclatura dos sistemas.



5.4. Análises mineralógica, composicional e microestrutural

Os ensaios por difratometria, DRX, por espectrometria de fluorescência de raios X por energia dispersiva, EDX, e por microscopia eletrônica de varredura, MEV, das amostras foram realizados no Laboratório de Caracterização de Materiais/UAEMa/CCT/UFCG. A microscopia óptica, MO, foi realizada no Laboratório de Físico-Química UAMG/CTRN/UFCG.

5.4.1. Difractometria (DRX)

Para a realização das análises por difração de raios X, DRX, pelo método do pó, das amostras de solo, de bentonita modificada e de cimento, foi utilizado um difratômetro de marca SHIMADZU XRD-6000, com radiação de $\text{CuK}\alpha$, operando com corrente de 30,0 mA e voltagem de 40,0 kV, no intervalo de $2^\circ \leq 2\theta \leq 60^\circ$, com fendas Soller, filtro de níquel, passo de $0,02\text{seg}^{-1}$ e step de $2^\circ.\text{min}^{-1}$.

5.4.2. Fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDX)

As análises de composição química das amostras de solo e de cimento foram realizadas utilizando-se um espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva, modelo EDX-720 da SHIMADZU.

5.4.3. Microscopia óptica (MO)

Imagens da borracha de pneus inservíveis triturada foram obtidas por meio de microscopia óptica, utilizando-se um microscópio binocular ZEISS modelo STEMI DV4, com aumento de 10x.

5.4.4. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As micrografias das cortinas verticais registradas com aumentos de 2000x e 5000x foram obtidas por meio do ensaio de microscopia eletrônica de varredura, utilizando-se um microscópio SHIMADZU modelo SSX 550.

5.5. Ensaio de capacidade de drenagem

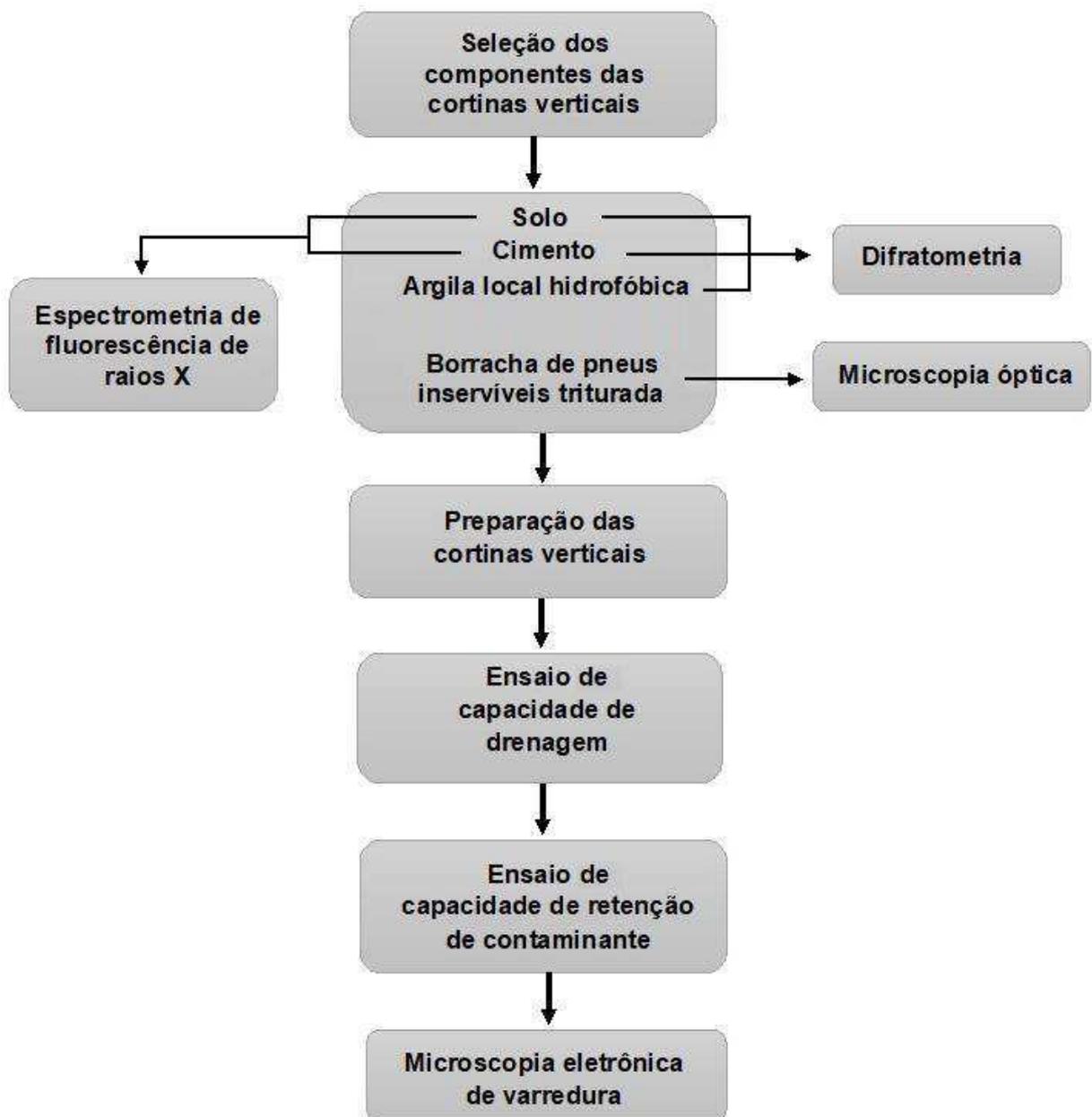
As cortinas verticais preparadas foram, inicialmente, saturadas com água destilada para em seguida serem submetidas ao ensaio de capacidade de drenagem, permeabilidade. A adição de $\text{H}_2\text{O}_{\text{destilada}}$ aos sistemas foi realizada por gotejamento por um período de 1 h com vazão de $1 \text{ ml}/1'20''$, aproximadamente.

5.6. Ensaio de capacidade de retenção de contaminante

Para o ensaio de capacidade de retenção de contaminante foi preparada uma mistura bifásica em volume total de 10 ml, água potável/óleo comercial, referência ZC 80/S, na proporção de 3:1, respectivamente. A mistura foi posta em contato com a cortina vertical, previamente saturada com água destilada, e o ensaio foi então realizado sob as mesmas condições de tempo anteriormente estabelecidas.

As etapas realizadas nesta pesquisa encontram-se resumidas na Figura 12.

Figura 12: Fluxograma das etapas realizadas.



6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

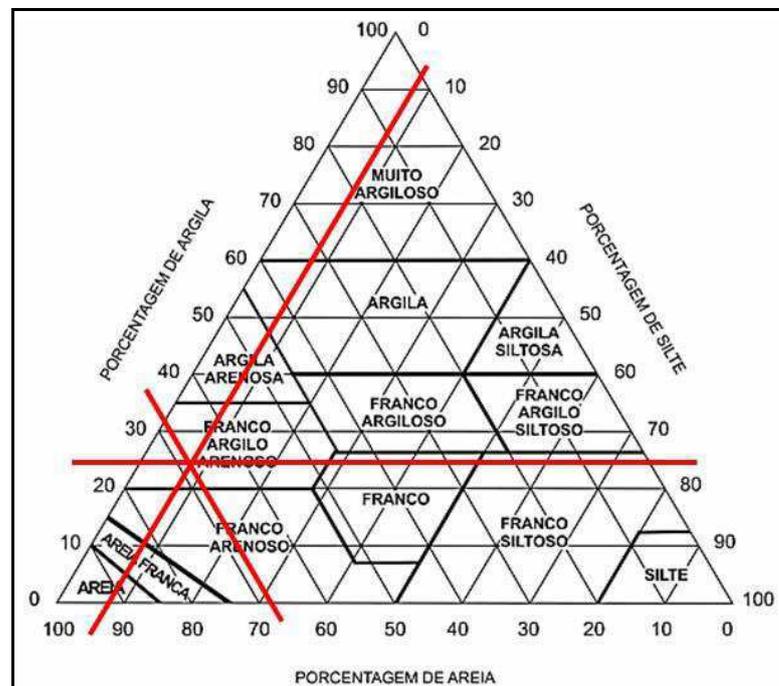
6.1. Características do solo

O solo utilizado apresenta como características físico-químicas: matéria orgânica em percentual de 2,12%, um potencial hidrogeniônico, pH em água, 1:2,5, medindo 6,33 e uma densidade de partículas 2,66 g/cm³. Quanto à caracterização geotécnica, Tabela 10, apresenta percentual granulométrico de 67,63; 24,12 e de 8,25% relativo às frações, areia, argila e silte, respectivamente, suportada pela classificação textural, solo franco argilo arenoso, confirmada por meio do triângulo textural apresentado na Figura 13, e, percentual de porosidade de 53,61%. Tais características indicam um solo com significativa capacidade de drenagem de líquidos.

Tabela 10: Características geotécnicas do solo.

Granulometria (%)			Classificação textural	Porosidade (%)
Areia	Argila	Silte		
67,63	24,12	8,25	Franco argilo arenoso	53,61

Figura 13: Triângulo textural adaptado.

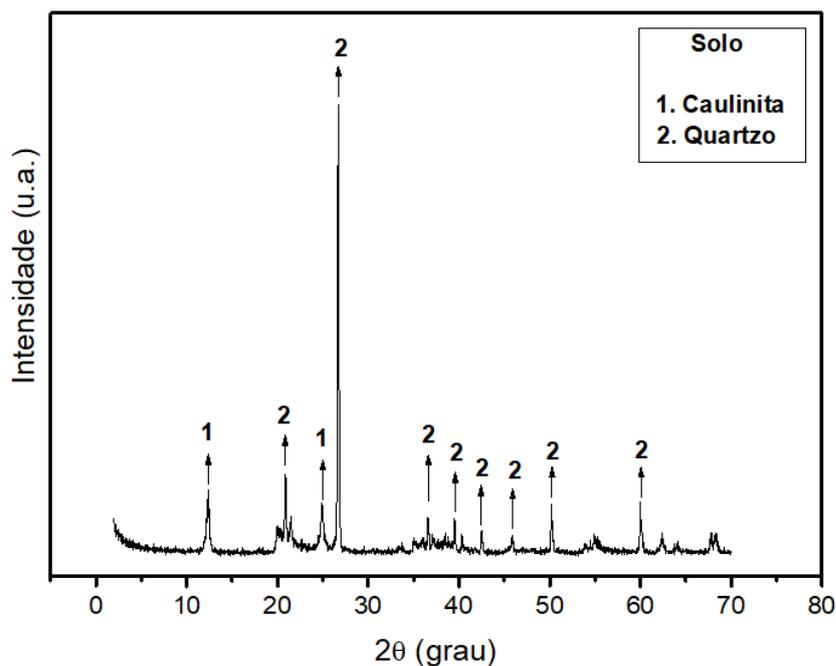


SANTOS *et al.*, 2005.

6.2. Difractometria (DRX)

A Figura 14 apresenta o difratograma gerado a partir da análise da amostra de solo, cujas distâncias interplanares calculadas evidenciam a presença de minerais como caulinita e quartzo, (PDFs 14-164; 33-1161), respectivamente. A presença, principalmente, de minerais silicáticos e argilosos, confirma a classificação textural do mesmo como sendo franco argilo arenoso. As distâncias interplanares dos respectivos minerais estão apresentadas na Tabela 11.

Figura 14: Difrátograma da amostra de solo.



Os difratogramas das amostras de argilas, local e hidrofobizada, estão apresentados na Figura 15. Dados de difratometria desta amostra na forma *in natura* confirmam como componente principal a fase mineral montmorilonita com espaçamento basal de 14,82 Å, estando de acordo com a literatura (PONTES; RAPOSO, 2013, PDF 13-259). Após tratamento com o surfactante, cetremide, o perfil difratado apresenta uma distância interplanar de 20,16 Å. Tal registro é típico de argilominerais intercalados, o que então confirma a efetividade do processo adotado.

O cimento CII-F32 também analisado por difração de raios X, cujo resultado obtido está apresentado na Figura 16, apresenta fases como a ferrita ou ferro aluminato tetracálcico, $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, alita ou silicato tricálcico, $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$,

belita ou silicato bicálcico, $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, e ainda calcita, CaCO_3 , correspondendo a composição de um cimento com adição de fíler calcário. Esta análise está endossada pela literatura, (TENÓRIO *et al.*, 2003; OLIVEIRA, 2012; CARVALHO, 2012).

Tabela 11: Distâncias interplanares da amostra de solo.

Mineral	Distância interplanar (Experimental (Å))	Distância interplanar (Padrão (Å))
Caulinita^(a)	7,14	7,17
	3,58	3,59
Quartzo^(b)	4,25	4,26
	3,34	3,34
	2,45	2,46
	2,28	2,28
	2,12	2,13
	1,98	1,98
	1,82	1,82
	1,54	1,54

PDFs – ^(a)14-164; ^(b)33-116

Figura 15: Difratomogramas da amostra de argila local, *in natura*, e hidrofóbica.

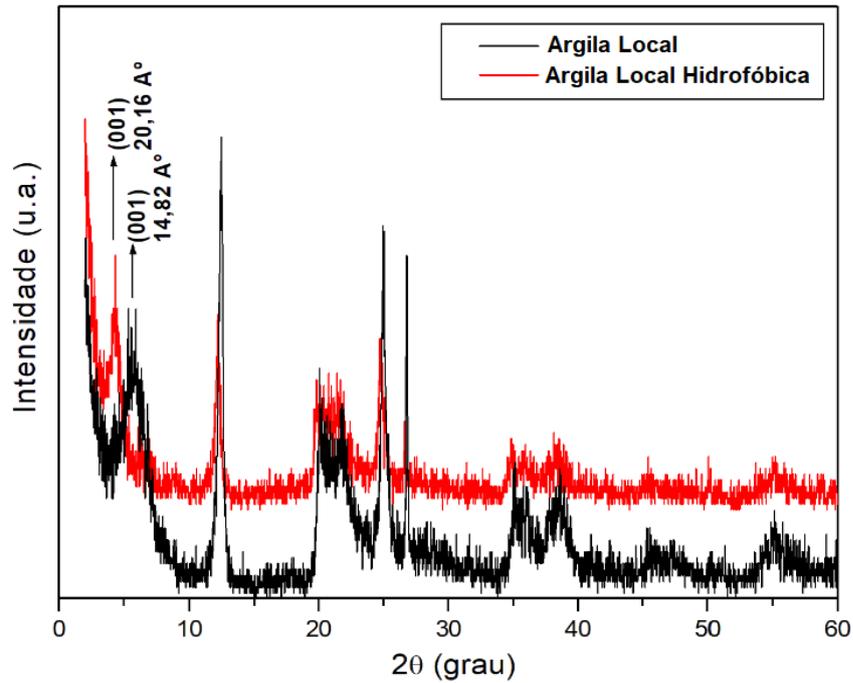
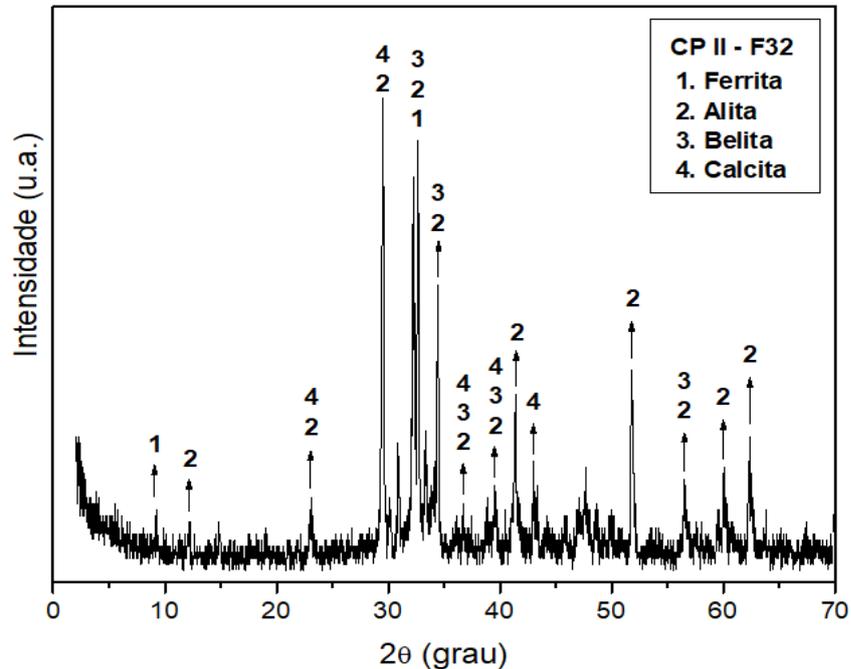


Figura 16: Difrátograma da amostra de cimento CP II-F32.



6.3. Fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDX)

O resultado da composição química do solo obtido através da fluorescência de raios X encontra-se apresentado na Tabela 12. Os percentuais dos teores relativos dos respectivos óxidos estão de acordo com a classificação textural, Figura 13, que evidencia, nesta amostra, a presença de minerais silicáticos. Este

dado está, também, de acordo com o resultado da análise por difração de raios X registrado na Figura 14, cujas fases minerais identificadas, a caulinita, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, e o quartzo, SiO_2 , guardam em suas composições químicas o SiO_2 e o Al_2O_3 como os percentuais mais significativos. Estes dados, também, são corroborados pela literatura, (DANA, 1984; KLEIN; HURLBUT JR. , 1993).

O resultado da análise química realizada por EDX para o cimento usado, CPII-F32, apresentado na Tabela 13, mostra teores dos respectivos óxidos condizentes com dados da literatura, (PETRUCCI, 1998; NEVILLE, 2016).

6.4. Ensaios de capacidade de drenagem

Os resultados obtidos com o teste de capacidade de drenagem para as cortinas verticais preparadas estão apresentados nas Figuras 17 - 20.

Tabela 12: Teores obtidos por fluorescência de raios X da amostra de solo.

Óxido	Teor do óxido (%)	Óxido	Teor do óxido (%)
SiO_2	57,200	K_2O	0,085
Al_2O_3	37,466	Cr_2O_3	0,015
Fe_2O_3	3,829	MnO	0,014
TiO_2	0,938	ZnO	0,003
CaO	0,222	Ga_2O_3	0,003
SO_3	0,117	Y_2O_3	0,002
ZrO_2	0,104	NbO	0,002

Tabela 13: Teores médios e experimentais dos óxidos na amostra de cimento
CPII – F32.

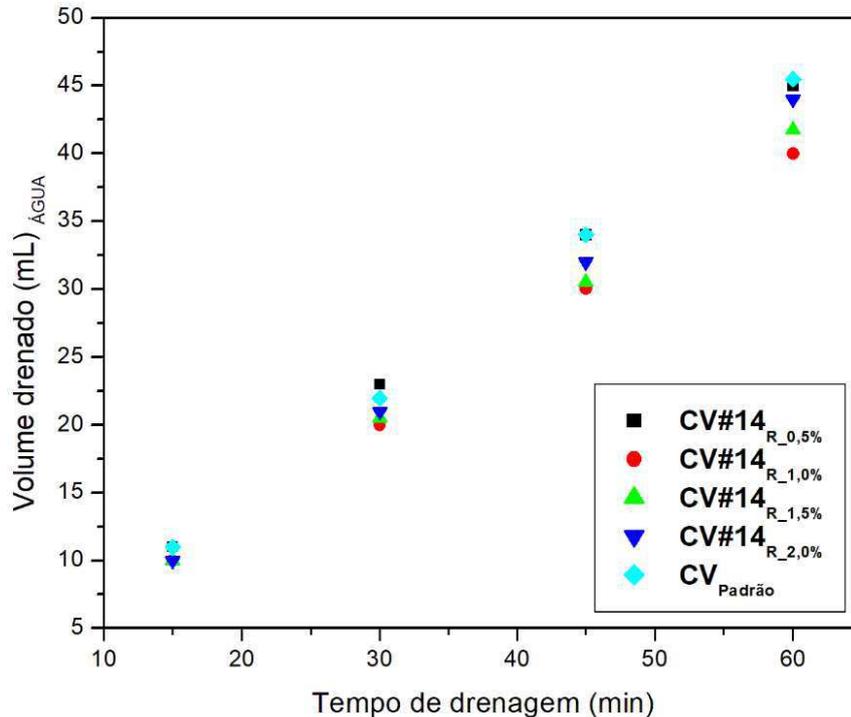
Óxido	Teor médio _{pad} ^a (%)	Teor _{exp} ^b (%)	Óxido	Teor médio _{pad} ^a (%)	Teor _{exp} ^b (%)
CaO	60 – 67	57,155	K ₂ O	0,3 – 1,2	0,944
SiO ₂	17 – 25	20,166	BaO	xxxx	0,321
Al ₂ O ₃	3 – 8	9,236	TiO ₂	xxxx	0,172
MgO	0,5 – 4	5,913	SrO	xxxx	0,037
SO ₃	2 – 3,5	4,309	ZnO	xxxx	0,029
Fe ₂ O ₃	0,5 – 6	1,707	ZrO ₂	xxxx	0,012

PETRUCCI, 1998; NEVILLE, 2016.

^apad. (padrão); ^bexp. (experimental).

Observa-se para as cortinas verticais preparadas com borracha triturada retida em malha 14, Figura 17, comportamento similar no intervalo de tempo testado, 60 minutos. Não se registra, praticamente, variação no volume drenado, independente do percentual de BT adicionada, nos primeiros 15 minutos. No entanto, a partir de 30' de teste um volume de água drenado, discretamente maior, para a composição com 0,5% de BT é registrado, sugerindo, uma redução no volume de poros para as demais composições, ou seja, 1,0 - 2,0%.

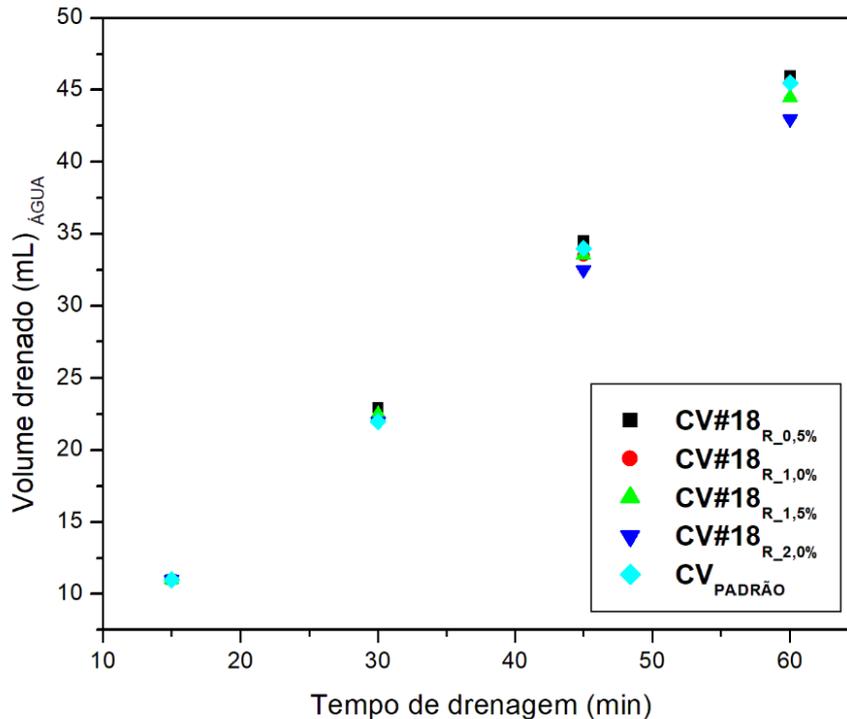
Figura 17: Gráfico do resultado do teste relativo à capacidade de drenagem para as cortinas verticais preparadas com a borracha triturada com variações de percentuais mássicos, de 0,5 a 2,0%, retida em malha 14.



Os resultados de volume de água drenado pelas cortinas verticais compostas com borracha triturada retida em malha 18, Figura 18, apresentam-se semelhantes para os intervalos de tempo analisados. Não se observa variação no volume drenado nos primeiros 30 minutos de experimento por comparação com cada uma das cortinas verticais preparadas, CV#18R, P_0,5-2,0%, sugerindo uma melhor interação da BT com ALH como consequência, provavelmente, do padrão granulométrico da borracha triturada, partículas menores, com tamanhos aproximados de 1,00 mm

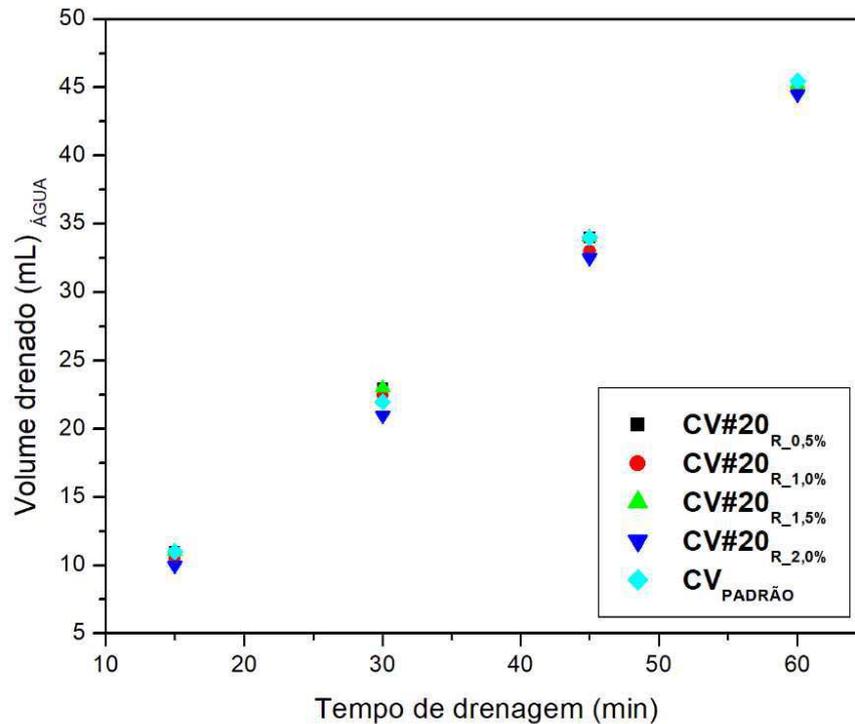
As diferentes respostas na capacidade de drenagem dos sistemas em estudo nesta etapa sugerem, possivelmente, redução no volume de poros para aqueles com percentuais com 1,5 e 2,0% de borracha triturada adicionados, marcadamente, para os 30' finais de ensaio. A média de água drenada manteve-se, praticamente, constante do início ao final do ensaio, ou seja, de aproximadamente 10 ml para cada intervalo de 15 minutos testado.

Figura 18: Gráfico do resultado do teste relativo à capacidade de drenagem para as cortinas verticais preparadas com a borracha triturada com variações de percentuais mássicos, de 0,5 a 2,0%, retida em malha 18.



O teste realizado com as cortinas verticais compostas com a borracha triturada retida em malha 20, não registra, praticamente, variação de volume de água drenado para todas as composições dentro do intervalo de tempo avaliado, Figura 19, diferentemente dos sistemas anteriores. O volume médio de água drenado, idêntico aos demais experimentos, de aproximadamente 10 ml para cada 15' de teste, manteve-se constante durante os 60 minutos do ensaio. Partículas de borracha triturada, $0,850 \leq \varnothing < 1,00$ mm, podem ter sido mais uniformemente distribuídas favorecendo caminhos difusionais semelhantes e, portanto, resultados equivalentes no processo de drenagem da água adicionada.

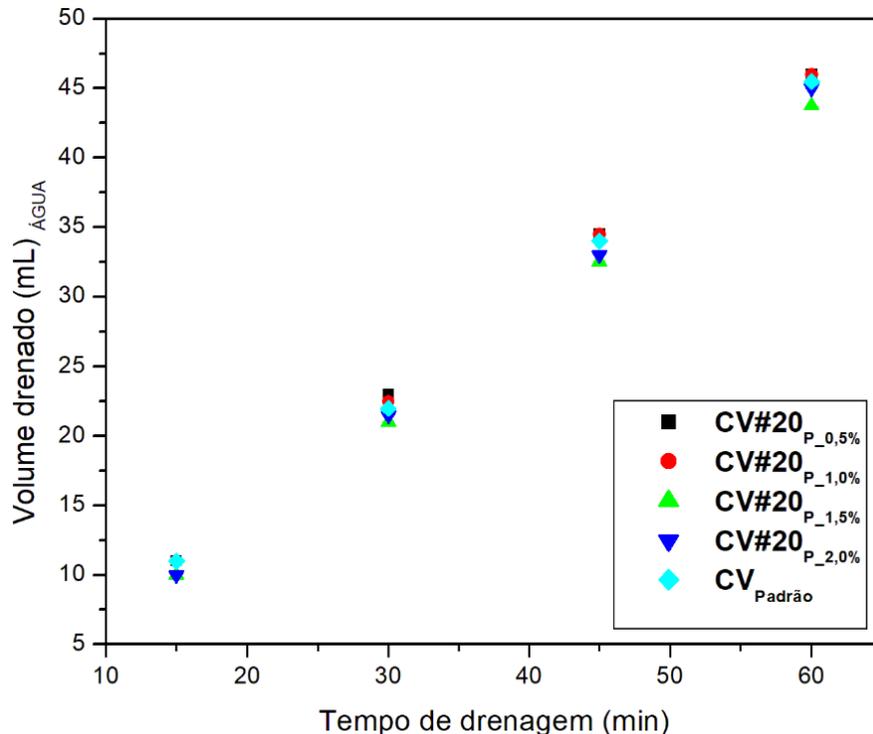
Figura 19: Gráfico do resultado do teste relativo à capacidade de drenagem para as cortinas verticais preparadas com a borracha triturada com variações de percentuais mássicos, de 0,5 a 2,0%, retida em malha 20.



Por fim, os resultados do teste relativo à capacidade de drenagem para as cortinas verticais preparadas com borracha triturada passante em malha 20 estão registrados na Figura 20. O volume médio de água drenado é, também, de aproximadamente, 10 ml a cada 15 minutos de ensaio e, todos os sistemas apresentam praticamente o mesmo volume drenado, independente da quantidade de borracha triturada adicionada à composição, sugerindo que, características relativas à distribuição das partículas e ao volume de poros em todos os sistemas são semelhantes.

Comparando os resultados das CVs com BT com a CV_{Padrão} observa-se que a adição da BT não compromete a capacidade de drenagem dos sistemas.

Figura 20: Gráfico do resultado do teste relativo à capacidade de drenagem para as cortinas verticais preparadas com a borracha triturada com variações de percentuais mássicos, de 0,5 a 2,0%, passante em malha 20.

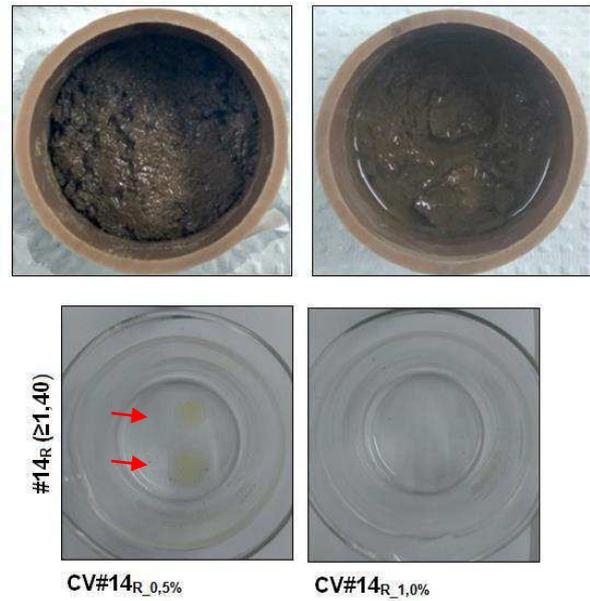


A argila local hidrofóbica e mais a borracha de PIs triturada, caracteristicamente, também, hidrofóbica, usadas na elaboração destas cortinas verticais, reaterro, constituídas com um solo tipo argilo-arenoso com um volume de poros, aproximado, de 54%, provavelmente, são determinantes na eficiência da percolação do fluido em teste.

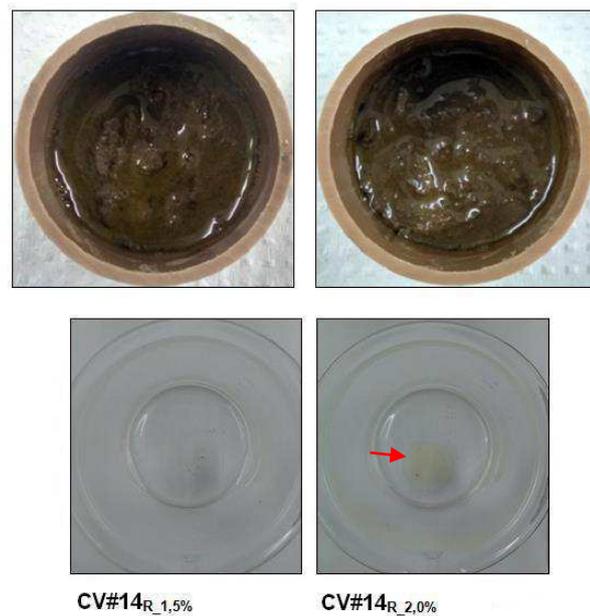
6.5. Ensaio da capacidade de retenção de contaminante

Em análise visual dos volumes drenados da mistura água/óleo, Figuras 21(a, b), não se verifica para as composições com 1,0 e 1,5% de BT a presença de contaminante, cortinas verticais, CV#14R_1,0% e CV#14R_1,5%, comprovando assim a eficiência destas, não somente, relativo à retenção de, provavelmente, todo o volume de óleo, mas, sobretudo, à drenagem de todo o volume de água usado em tal mistura, aproximadamente 7,5 ml. Para as demais composições, CV#14R_0,5% e CV#14R_2,0%, as imagens evidenciam a presença, discreta, indicada por setas, de resíduo contaminante, óleo comercial, disperso no volume de água drenado.

Figura 21: Imagens das cortinas verticais e dos respectivos volumes drenados após ensaio de contenção de contaminante, preparadas com variações de 0,5% e 1,0% (a), e com variações de 1,5% e 2,0% (b), percentuais mássicos de BT, retida em malha 14.



(a)

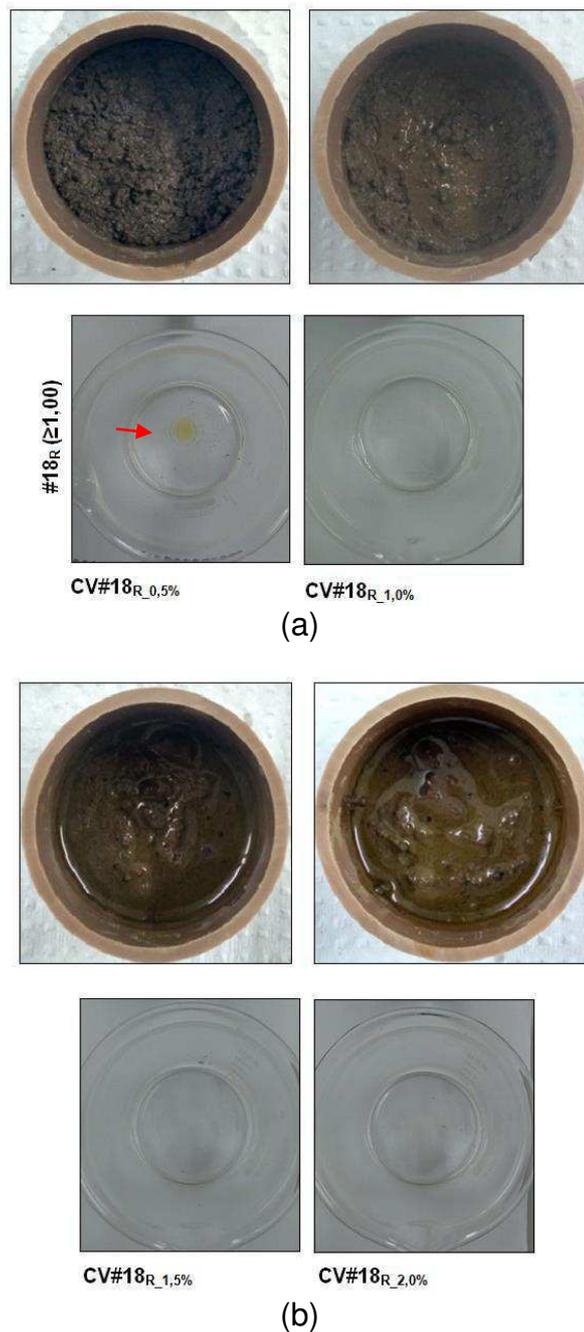


(b)

Os resultados do ensaio de retenção de contaminante para as cortinas verticais preparadas com BT_{#18R} encontram-se apresentados nas Figuras 22(a, b). Com exceção da CV_{#18R_0,5%} todas as imagens das demais cortinas verticais, CV_{#18R_1,0_2,0%}, mostram a drenagem da água e a retenção do contaminante, em

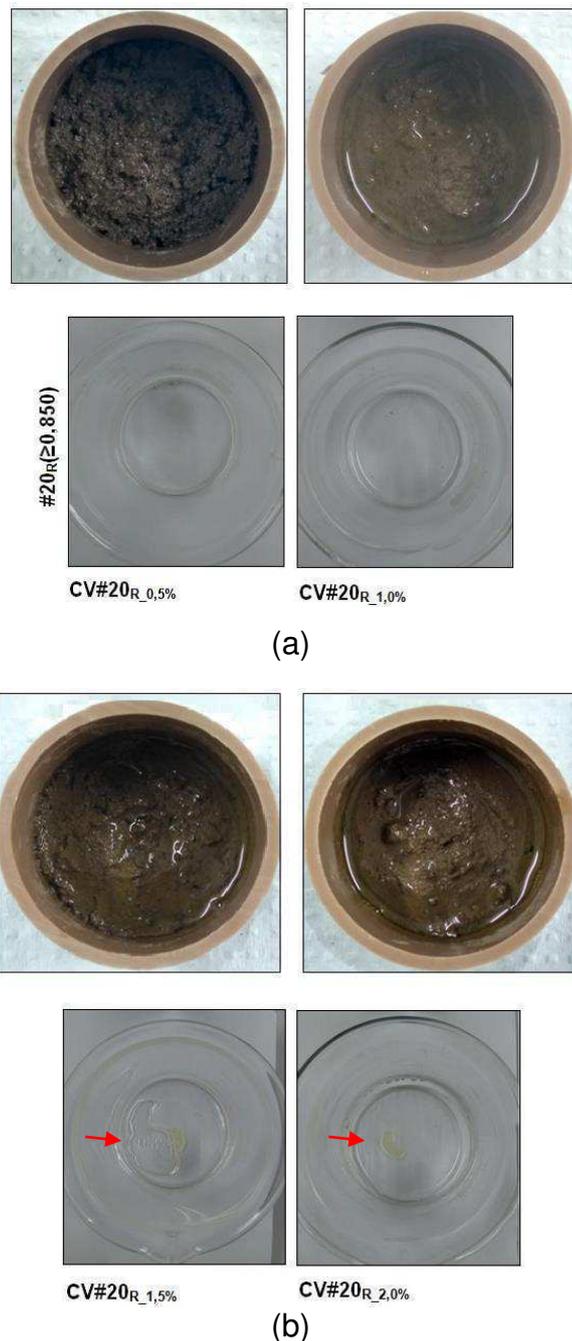
volume drenado de água de, aproximadamente, 7,0 ml da mistura água/óleo, respectivamente. Estes dados mostram a efetividade, também, destas cortinas verticais. A presença de um volume discreto de contaminante, óleo comercial visualisa-se, apenas, na cortina vertical preparada com 0,5% de BT.

Figura 22: Imagens das cortinas verticais e dos respectivos volumes drenados após ensaio de contenção de contaminante, preparadas com variações de 0,5% e 1,0% (a), e com variações de 1,5% e 2,0% (b), percentuais mássicos de BT, retida em malha 18.



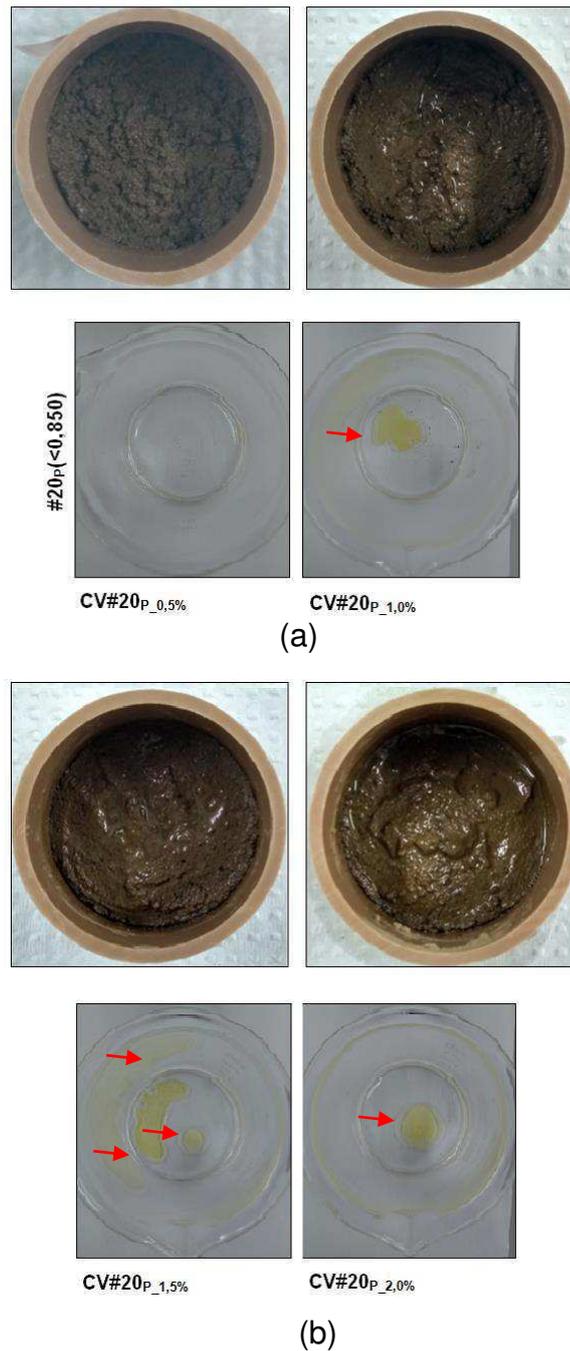
Destaca-se a eficiência das cortinas verticais, $CV_{\#20R_{0,5\%}}$, $CV_{\#20R_{1,0\%}}$, Figura 23a, com contenção do contaminante e com drenagem da água, usados na mistura em teste. Volume discreto de contaminante está registrado para as demais cortinas, $CV_{\#20R_{1,5\%}}$, $CV_{\#20R_{2,0\%}}$, Figura 23b.

Figura 23: Imagens das cortinas verticais e dos respectivos volumes drenados após ensaio de contenção de contaminante, preparadas com variações de 0,5% e 1,0% (a), e com variações de 1,5% e 2,0% (b), percentuais mássicos de BT, retida em malha 20.



Os resultados do teste relativo à capacidade de contenção de contaminante, realizado com as cortinas verticais preparadas com BT passante em malha 20 encontram-se registrados nas imagens apresentadas nas Figuras 24(a, b).

Figura 24: Imagens das cortinas verticais e dos respectivos volumes drenados após ensaio de contenção de contaminante, preparadas com variações de 0,5% e 1,0% (a), e com variações de 1,5% e 2,0% (b), percentuais mássicos de BT, passante em malha 20.



Destaca-se eficiência para a CV_{#20P_0,5%}, não somente pela retenção de contaminante, óleo comercial, mas, sobretudo pela capacidade de drenagem de água, Figura 24a.

O resultado do ensaio de contenção de contaminante usando-se a CV_{Padrão} evidencia um volume significativo de água drenado porém, com traços de oleosidade, embora, não claramente observados pela imagem registrada, Figura 25.

Figura 25: Imagens da cortina vertical padrão, sem adição de BT, após ensaio de contenção de contaminante.



Os resultados mostram uma relação inversamente proporcional entre percentual mássico de BT e tamanho de partícula, ou seja: para partículas maiores, #14 e #18 retidas, com menor concentração, 0,5% mássico de BT, as cortinas verticais não se mostram efetivas para a contenção do contaminante, enquanto que, a efetividade relativa à contenção do agente poluente registra-se para menor concentração, 0,5% mássico de BT, quando as cortinas verticais são preparadas com partículas de BT com menores tamanhos, ou seja, #20 retida e passante. Tal fato sugere uma interdependência da granulometria da BT e do percentual usado com a porosidade do solo, o que favorece, provavelmente, uma dispersão pouco homogênea da BT e, portanto, preenchimentos, parcial ou total de alguns poros, resultando em efetividade de 50% dos sistemas preparados, cortinas verticais.

Com base nos resultados dos ensaios de capacidade de retenção de contaminante, um resumo relativo à eficiência das cortinas verticais, está apresentado na Tabela 14.

Tabela 14: Resumo da eficiência das cortinas verticais em função da granulometria e percentual de borracha de PIs triturada.

Granulometria BT (malha)	Percentual mássico de BT			
	(0,5%)	(1,0%)	(1,5%)	(2,0%)
#14R*				
#18R*				
#20R*				
#20P**				

*R – retido; **P - passante

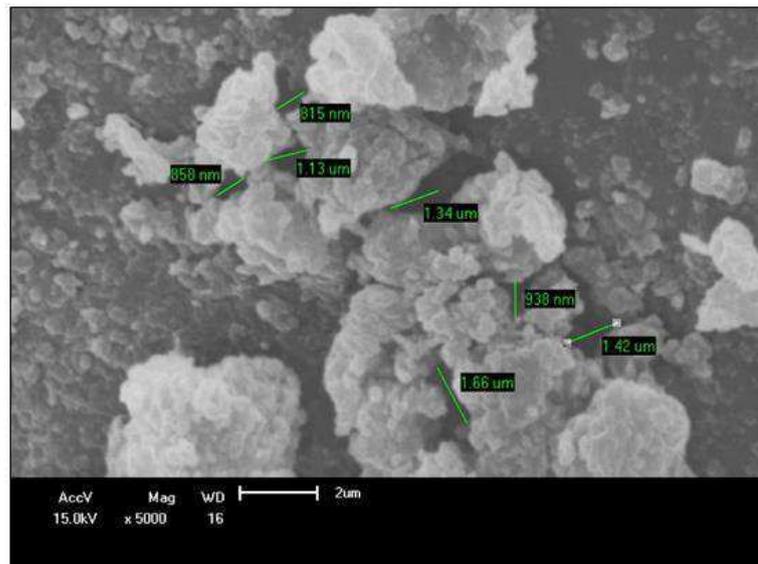
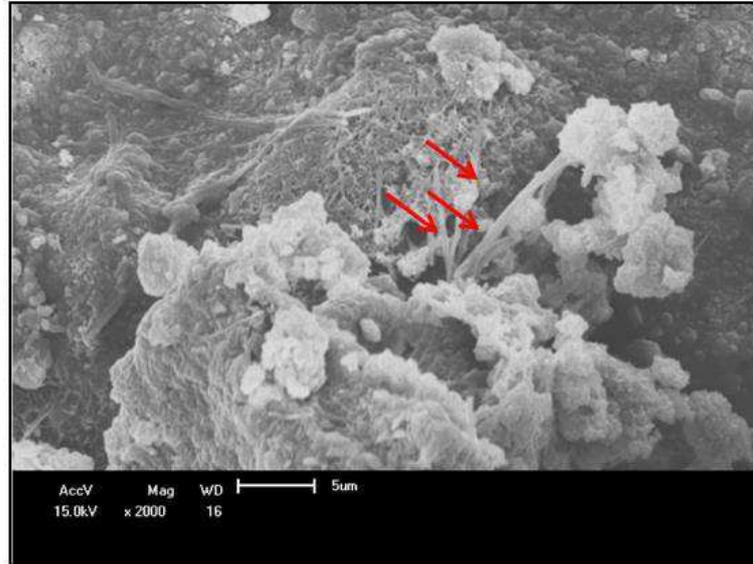
(água+óleo)

(água)

6.6. Microscopia eletrônica de varredura

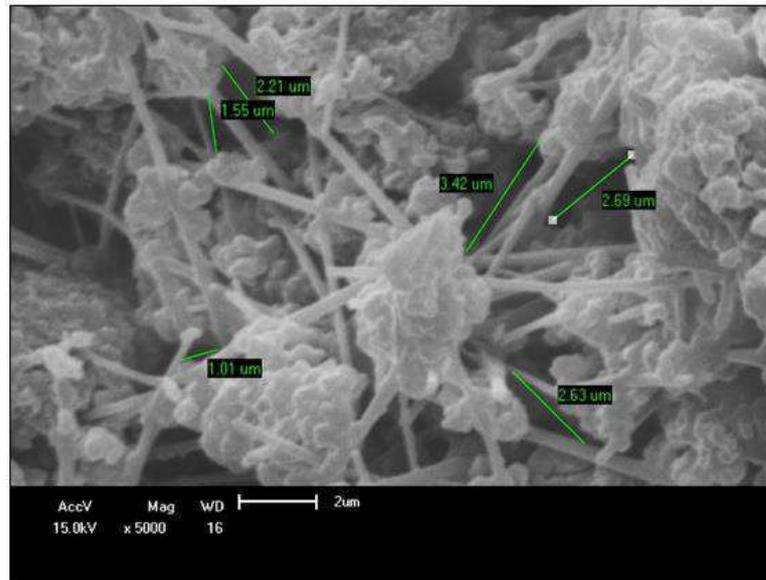
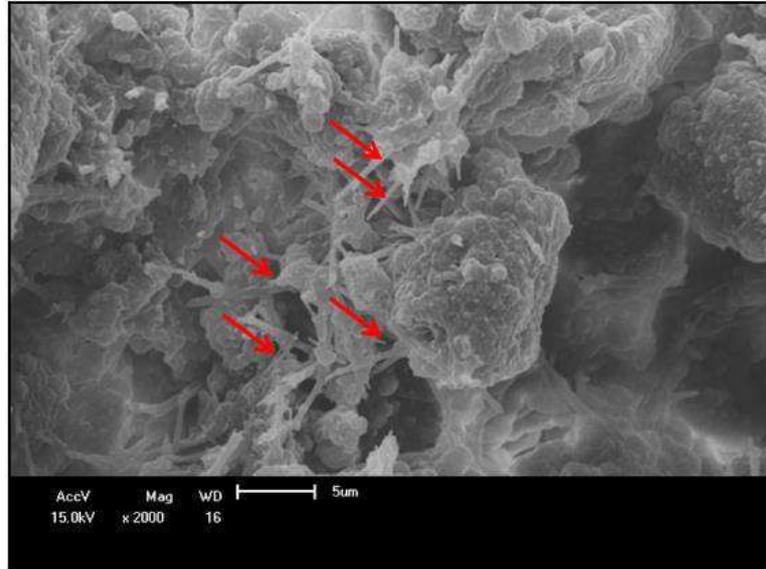
As micrografias das cortinas verticais elaboradas estão apresentadas nas Figuras 26(CV#14R_0,5-2,0%), 27(CV#18R_0,5-2,0%), 28(CV#20R_0,5-2,0%) e 29(CV#20P_0,5-2,0%). A topografia registrada inicialmente, com aumento 2000x, é similar para todas as CVs. A interação das partículas de BT associadas à argila local hidrofóbica está pontualmente destacada pelas setas e, mais acentuadamente, com o aumento da concentração e diminuição do padrão granulométrico. As partículas apresentam-se morfologicamente irregulares, independente da granulometria, e estão associadas à presença, predominante, de microporos, micrografias com 5000x de aumento. Não se observa, em geral, homogeneidade na distribuição destas partículas, e sim, regiões aleatórias dos referidos sistemas com uma maior quantidade de BT quando comparadas a outras regiões. Tal fato, provavelmente, contribui para uma melhor resposta, relativa à contenção do contaminante, em alguns casos.

Figura 26: Micrografias das cortinas verticais compostas com BT retida em malha 14, com variações, percentuais mássicos, entre 0,5 a 2,0%.

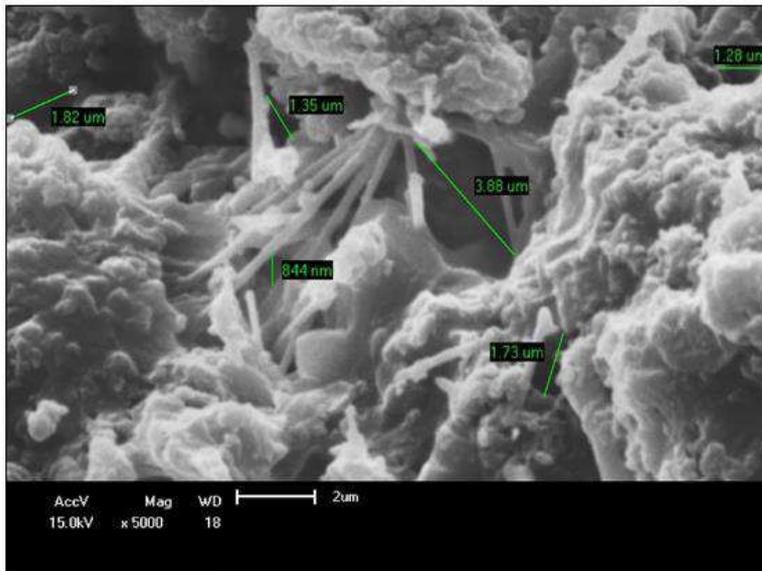
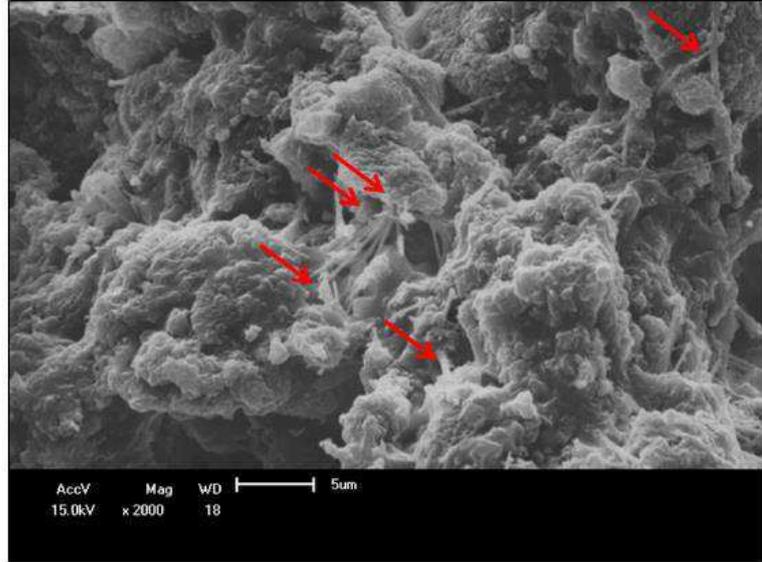


CV #R14_0,5%

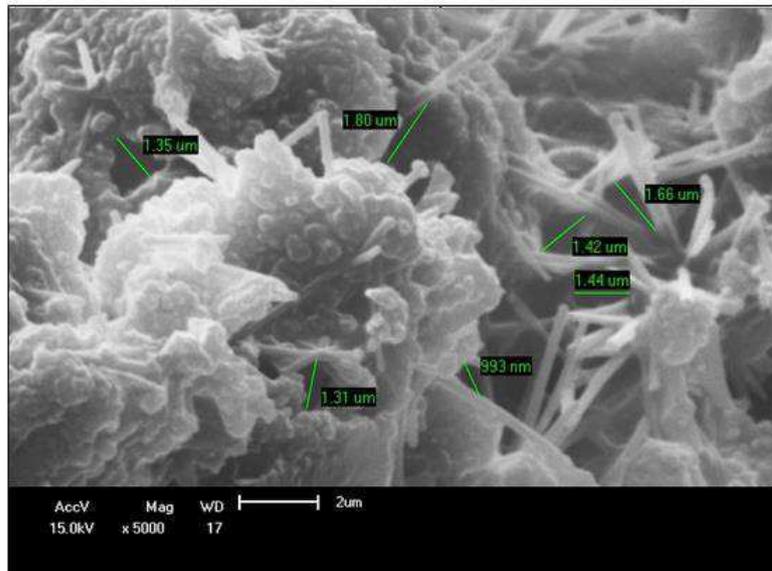
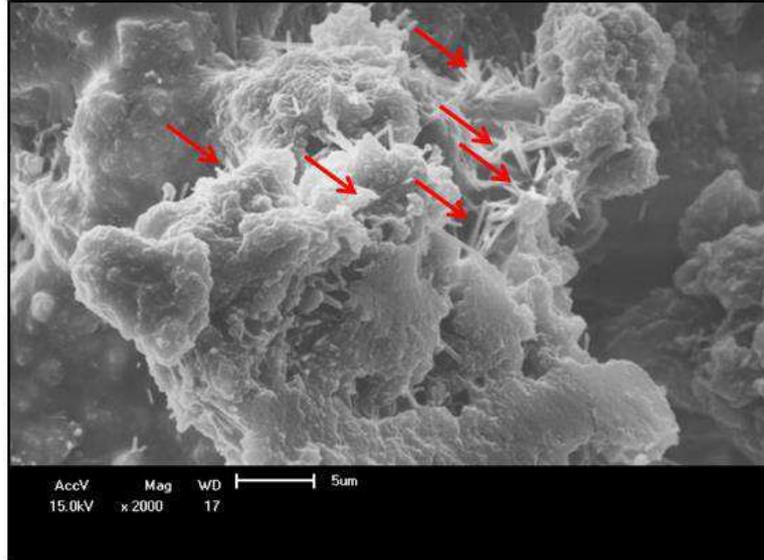
1,40 ≤ Ø



CV #R14_1,0%

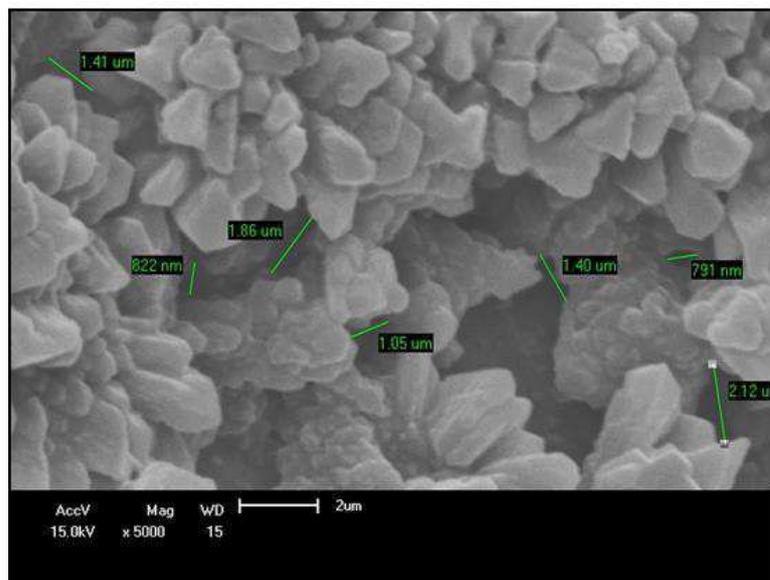
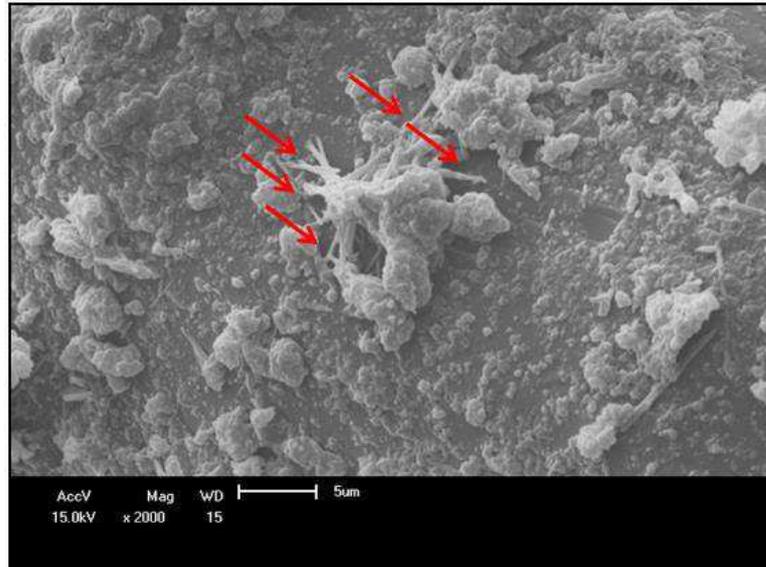


CV #R14_1,5%



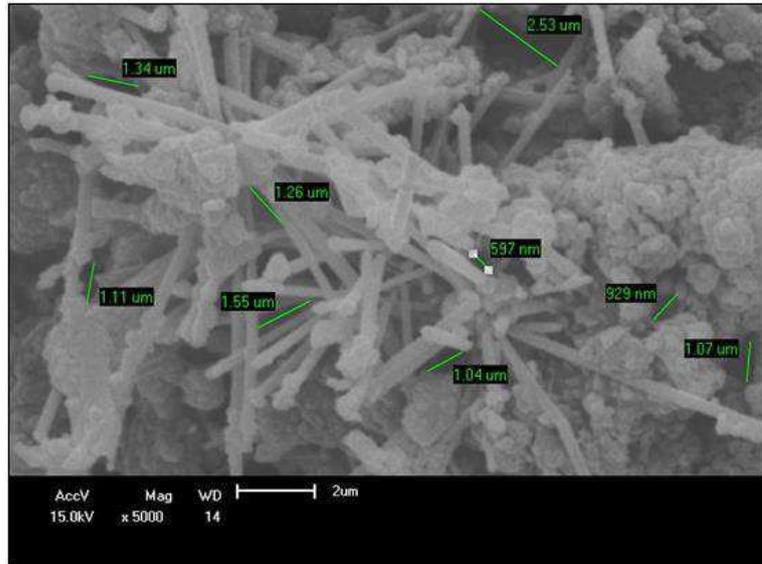
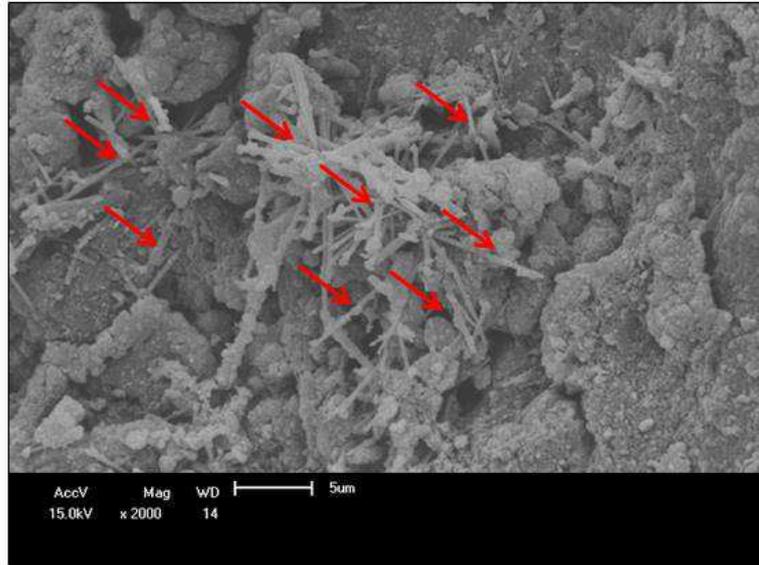
CV #R14_2,0%

Figura 27: Micrografias das cortinas verticais compostas com BT retida em malha 18 com variações, percentuais mássicos, entre 0,5 a 2,0%.

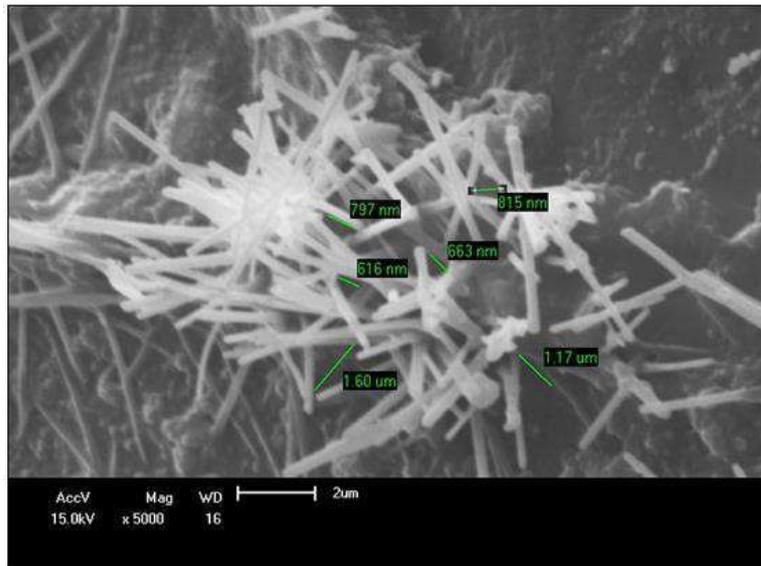
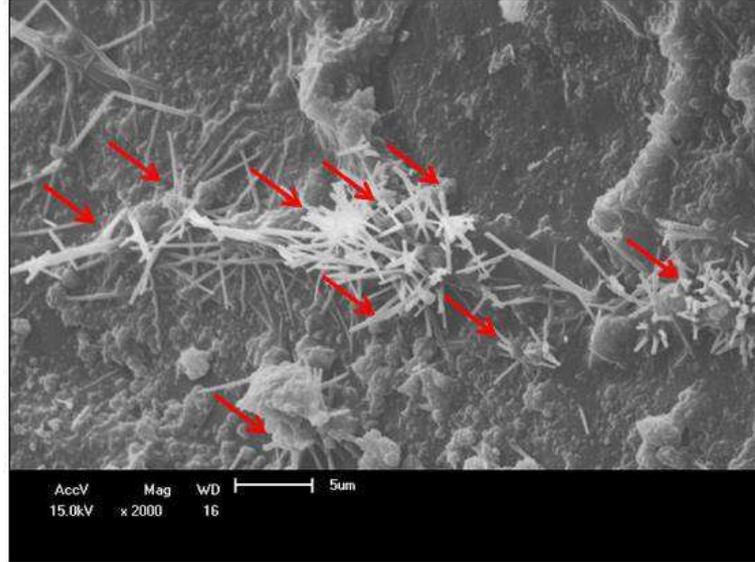


CV #R18_0,5%

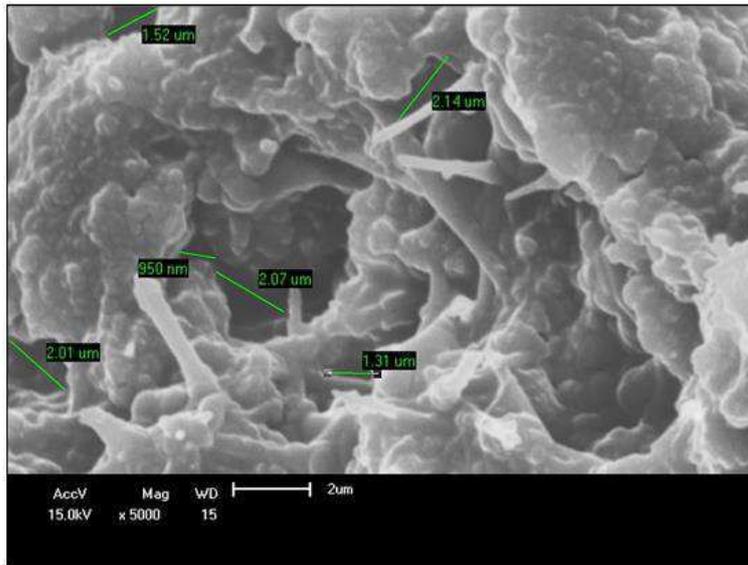
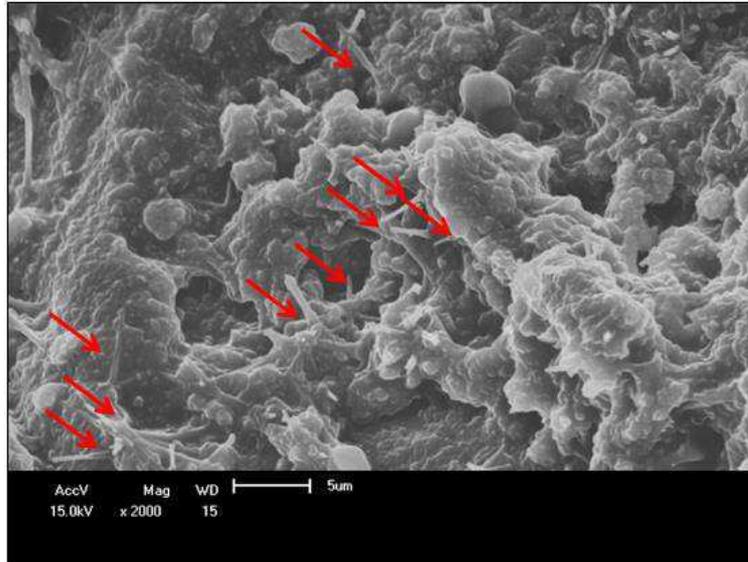
$1,00 \leq \varnothing < 1,40$



CV #R18_1,0%

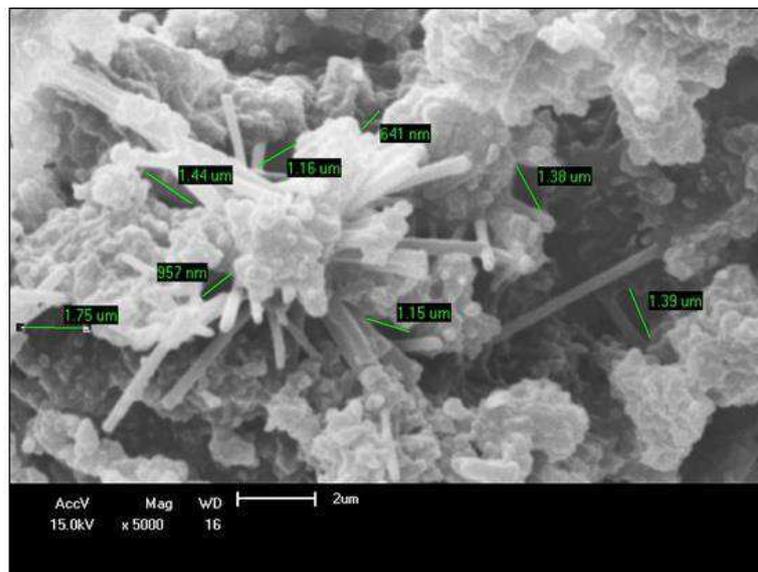
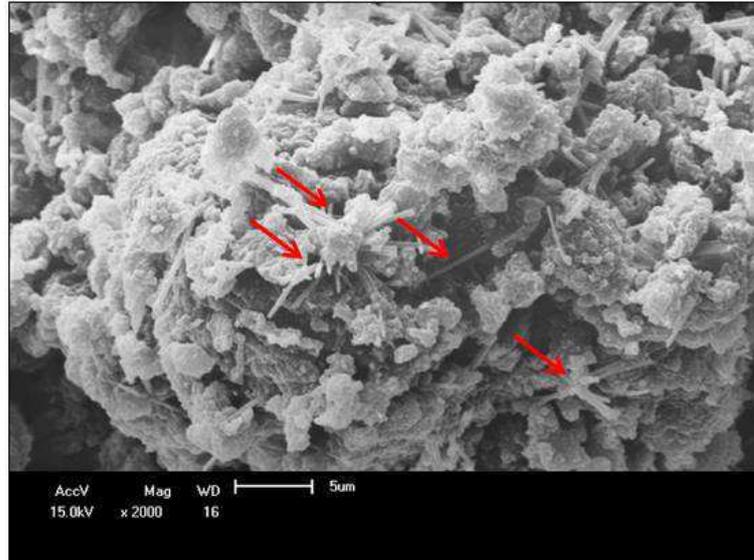


CV #R18_1,5%



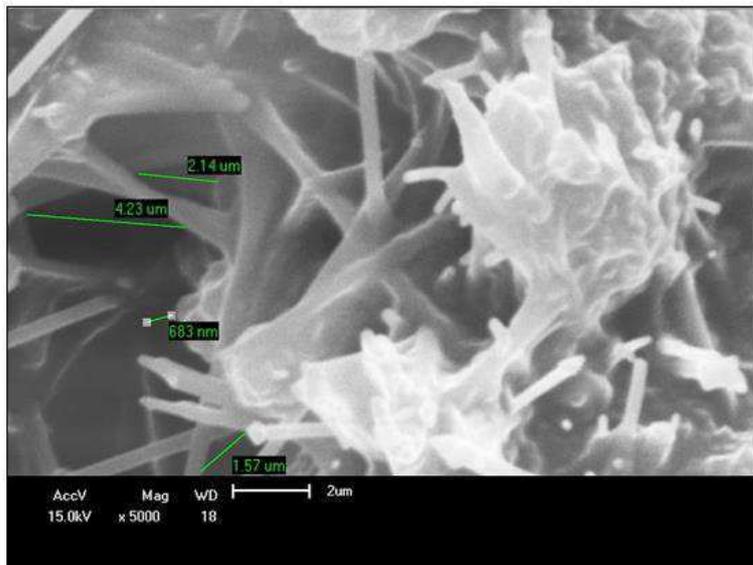
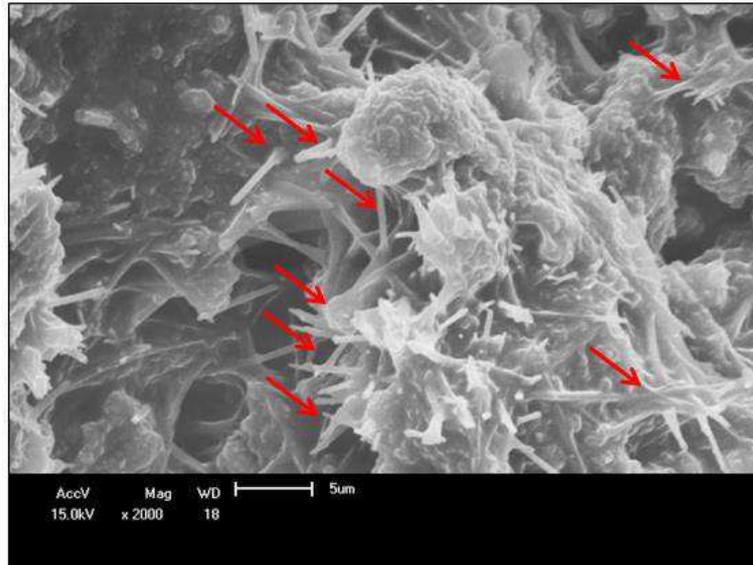
CV #R18_2,0%

Figura 28: Micrografias das cortinas verticais compostas com BT retida em malha 20, com variações, percentuais mássicos, entre 0,5 a 2,0%.

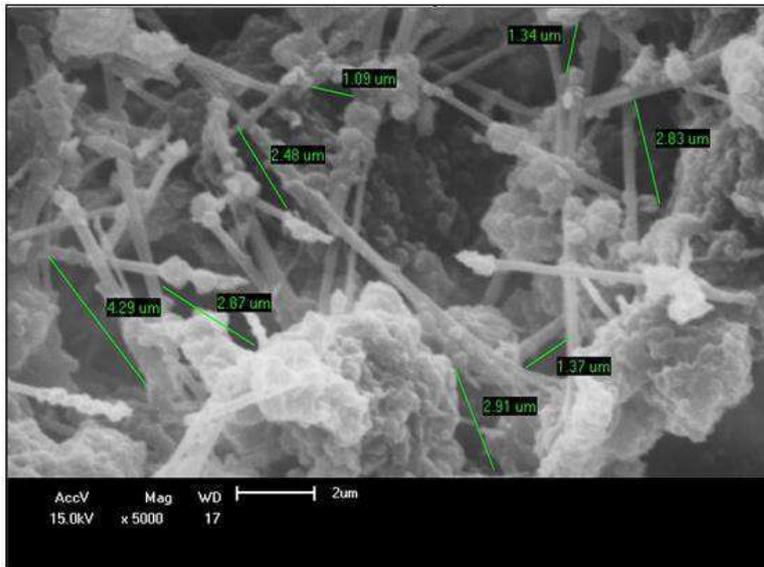
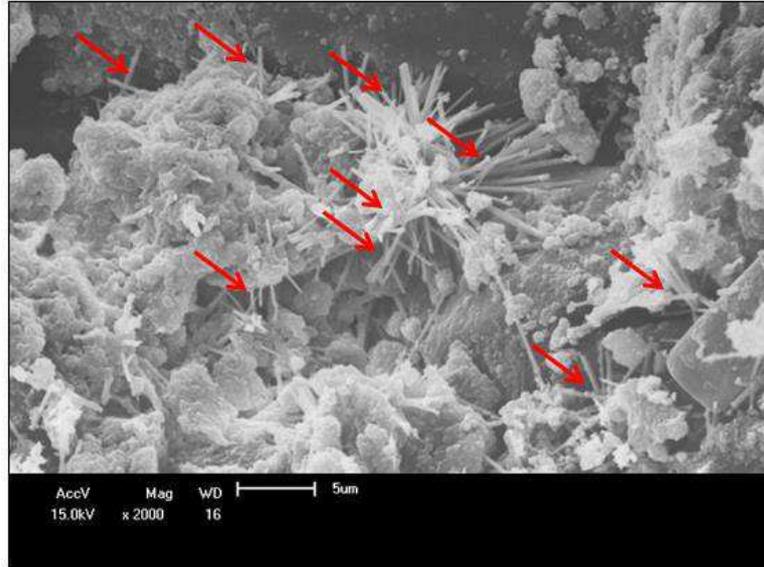


CV_{#R20_0,5%}

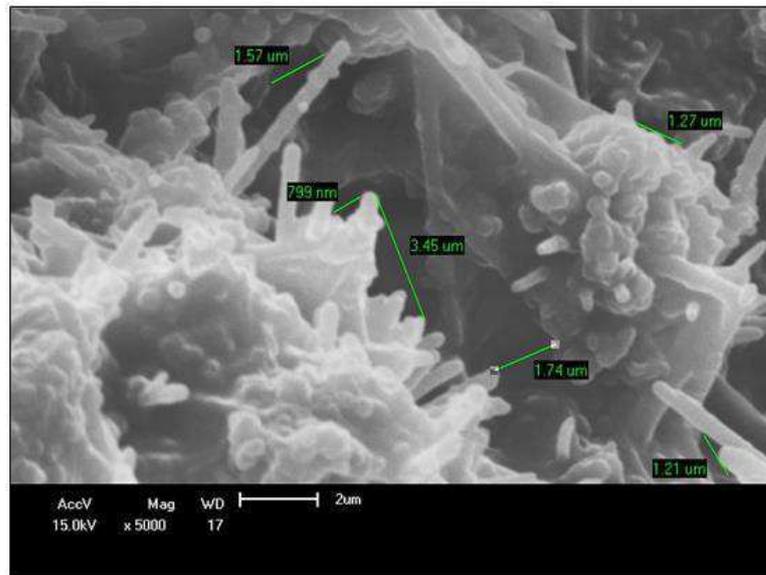
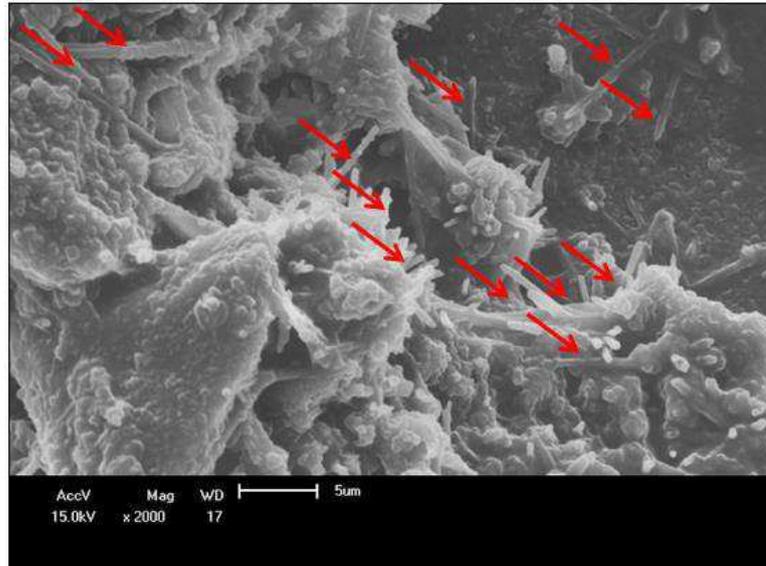
$0,850 \leq \varnothing < 1,00$



CV #R20_1,0%

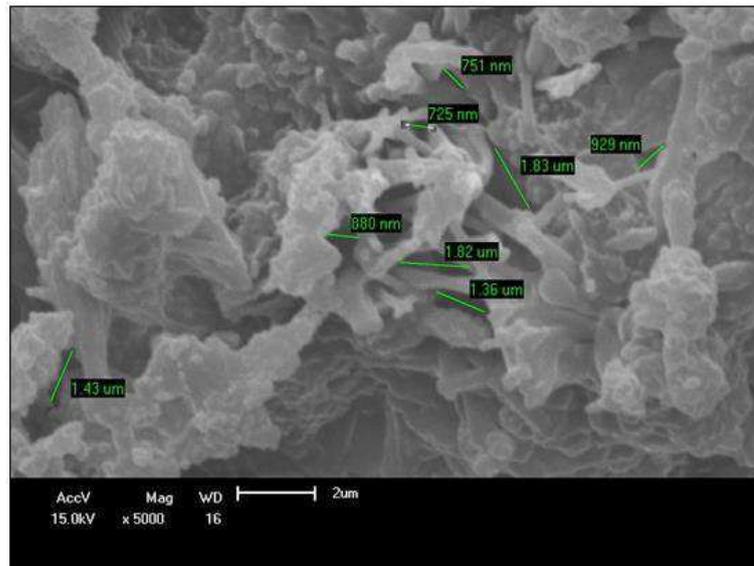
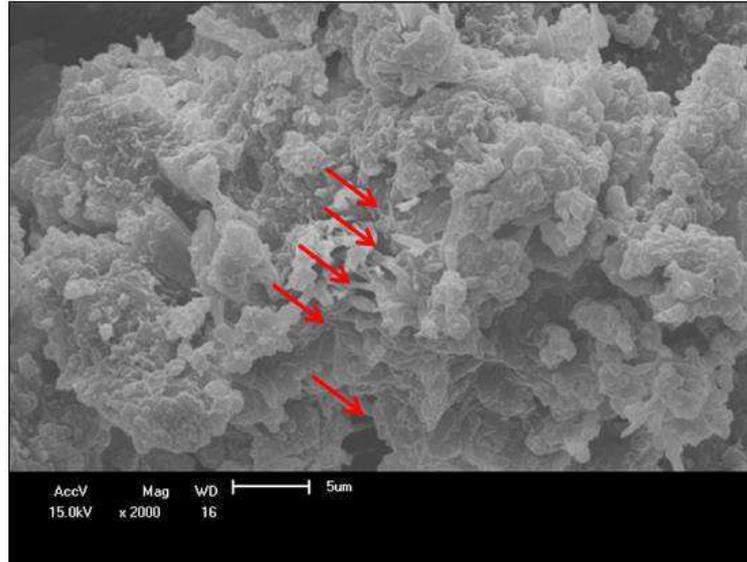


CV #R20_1,5%



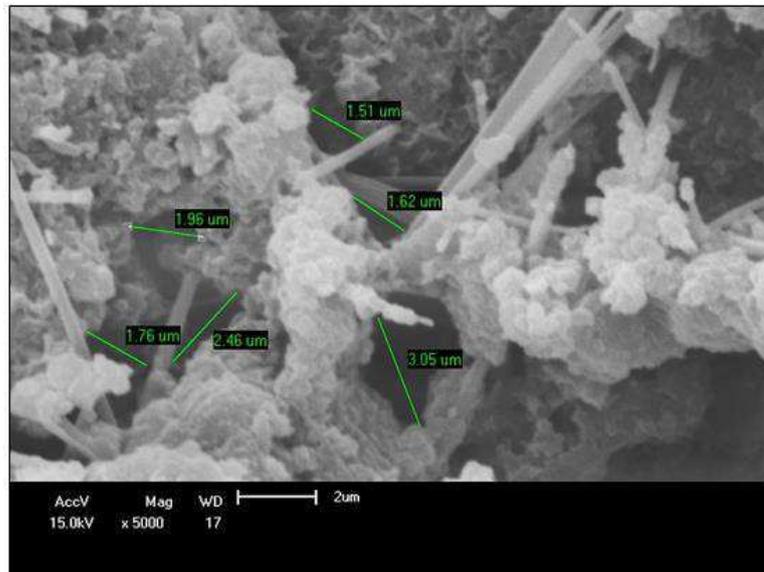
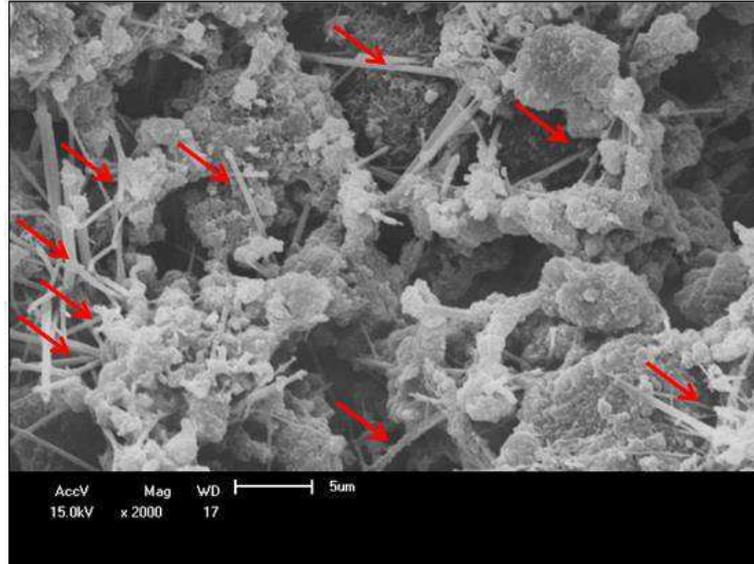
CV #R20_2,0%

Figura 29: Micrografias das cortinas verticais compostas com BT passante em malha 20, com variações, percentuais mássicos, entre 0,5 a 2,0%.

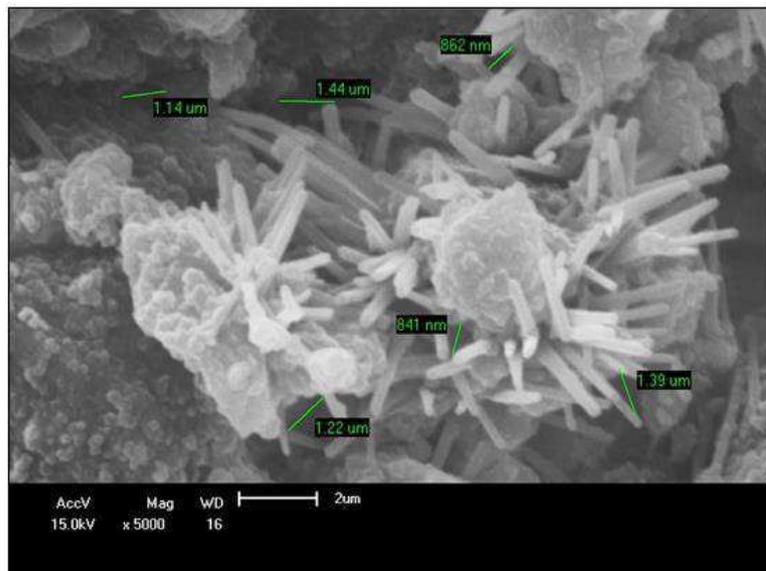
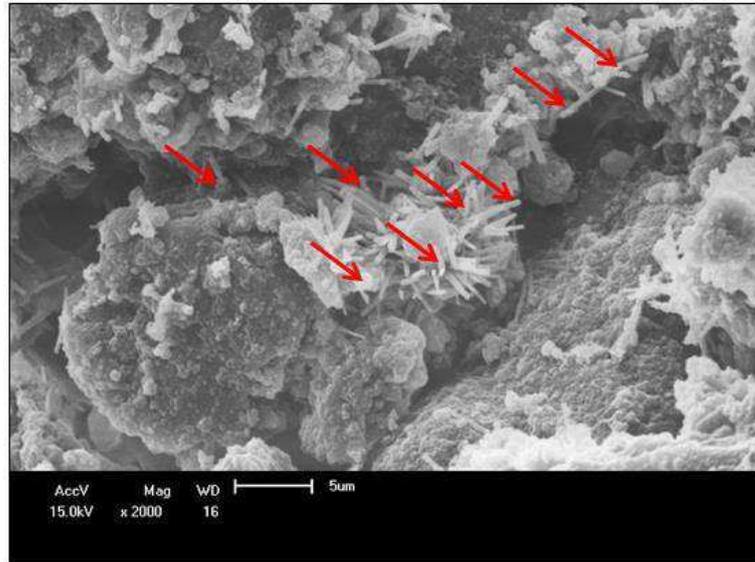


CV #P20_0,5%

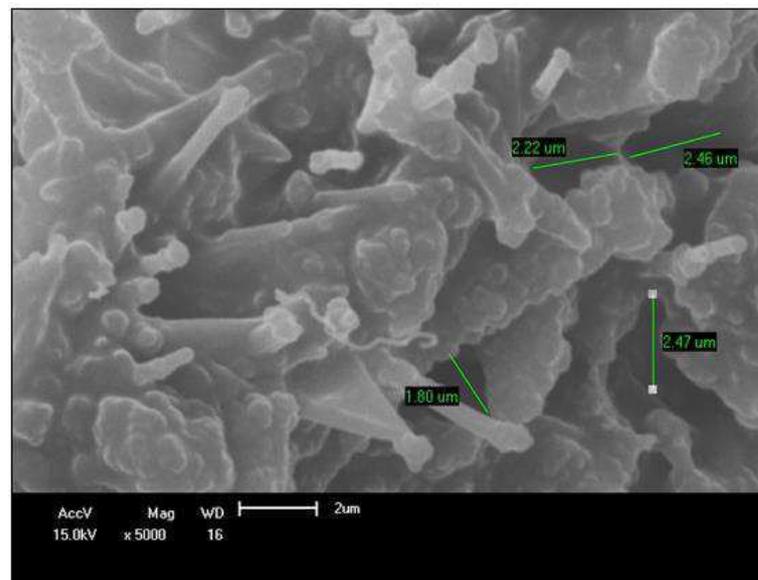
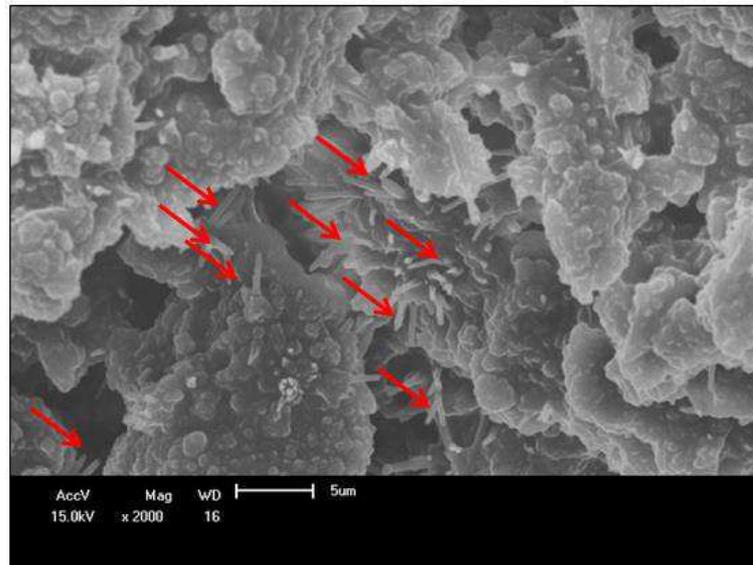
0,850 > Ø



CV#P20_1,0%



CV #P20_1,5%



CV #P20_2,0%

Todas as cortinas verticais elaboradas constituídas do mesmo solo, do mesmo cimento e da mesma amostra de argila hidrofóbica, provavelmente, o fator diferencial e determinante é a borracha de PIs triturada usada nestes sistemas considerando, particularmente, a concentração e a granulometria. A forma irregular das partículas, independente da granulometria, favorece uma distribuição

emaranhada destas com cada outra partícula promovendo um fluxo turbulento, aumento da permeabilidade do meio e, conseqüentemente, maior condutividade hidráulica, justificando assim, a drenagem, predominantemente, de água registrada em 50% das cortinas verticais tratadas nos experimentos de retenção de contaminante, mistura água-óleo. Destaca-se, também, para estas CVs, efetividade na contenção do contaminante orgânico nas imagens registradas após 60 minutos de testes, Figuras 21-24(a, b), estando associada à capacidade de adsorção da BT usada.

A presença de componentes inorgânicos, como aditivos e materiais vulcanizados, nas partículas de BT confere a estas uma superfície eletrostaticamente carregada. A argila modificada, caracteristicamente hidrofóbica, também, guarda cargas superficiais. A percolação da mistura em teste, água-óleo, tem favorecida, provavelmente, a interligação com cargas superficiais, eletricamente opostas, da espécie contaminante resultando assim, na retenção desta. O equilíbrio da rede estrutural complexa formada pelo conjunto de materiais como o solo, o cimento, a argila modificada e a borracha de PIs triturada com propriedades texturais e mineralógicas distintas, com volume de poros significativo, tamanho de poros em escala micrométrica, favorece, certamente, para a eficiência das CVs preparadas. Os parâmetros destacados em análise estão de acordo com a literatura (EDIL; BOSSCHER, 1994; PARK, *et al.*, 1997; PARK *et al.*, 2003; EDIL; PARK; KIM, 2004; SOUSA, VOROBIEV, SOUSA, 2012).

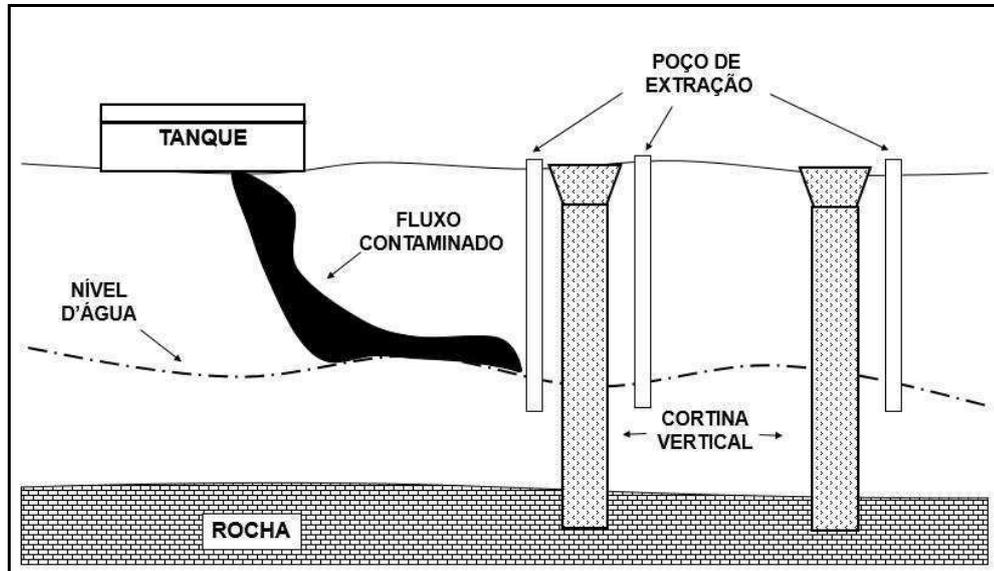
6.7. Sugestão de um novo modelo

O modelo usualmente utilizado, representado na Figura 7, não realiza o tratamento do fluxo de água contaminada, tendo por objetivo principal encapsular o fluxo contaminante e, com o auxílio de um poço extrator, favorecer a retirada da água contaminada para posterior tratamento.

A proposta de um novo modelo usando-se cortinas verticais modificadas, SCB_BT, está apresentada na Figura 30. Uma segunda CV foi estrategicamente posicionada no esquema, não somente, como forma de segurança para o caso de deterioração do primeiro sistema, dada a carga de contaminante retida neste, mas,

para promover um tratamento secundário do fluxo passante auxiliado pelos dois poços de extração favorecendo assim, comprovar a eficiência do modelo.

Figura 30: Sugestão de um novo modelo de cortinas verticais com adição de BT.



7. CONCLUSÃO

O solo selecionado foi classificado texturalmente como sendo franco argilo arenoso com base nos percentuais granulométricos de areia, argila e silte sendo confirmado pela identificação, por difratometria, das fases silicáticas e argilosas, e pela composição química obtida por fluorescência de raios X.

A argila modificada com brometo de cetil trimetil amônio, adquiriu caráter hidrofóbico sendo confirmado pelo fenômeno de difração de raios X cujo espaçamento basal, $d_{(001)}$, foi ampliado em, aproximadamente, 36% quando comparado à argila local *in natura*.

As análises, microestrutural e de composição química do cimento CII-F32 mostraram composição típica de um cimento com adição de fíler calcário, com identificação da fase mineral calcita e 57,16% de óxido de cálcio.

As borrachas de pneus inservíveis trituradas analisadas por microscopia óptica, independente da granulometria, mostraram partículas isoladas ou em tufo, com contornos irregulares e com fissuras.

Nas micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura foi possível visualizar microporos, predominantes, borrachas de pneus inservíveis trituradas morfológicamente irregulares e distribuídas de modo aleatório.

A eficiência das cortinas verticais foi registrada em 50% destas considerando a contenção do contaminante, em análise visual do volume de água drenado quando do teste de capacidade de contenção de contaminante realizado.

Destacam-se as cortinas verticais preparadas com as borrachas de pneus inservíveis trituradas com granulometrias de #14, #18 e #20 retidas, quando associadas ao percentual mássico de 1,0% de BT indicando serem estas as condições ideais para formulações.

O sistema solo-cimento-bentonita, conhecido como cortina vertical, é uma ferramenta importante no combate ao avanço de plumas contaminantes no subsolo, em especial quando da existência de uma fonte de água subterrânea próxima ao agente contaminador. Desse modo, os processos combinados, matérias-primas e pedaços de borracha de pneus inservíveis triturada têm se mostrado promissores pelo ganho nas propriedades finais dos sistemas elaborados.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a vida útil das cortinas verticais formuladas com borracha de pneus inservíveis triturada considerando a condutividade hidráulica dos sistemas ideais.
- Avaliar a potabilidade da água drenada após ensaio de retenção de contaminante.

9. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, G. C. P. **Caracterização Física e Classificação dos Solos**. Juiz de Fora – MG, 2005, 145p. Disponível em: <http://pt.slideshare.net/Arquiteturando/caracterizao-fsica-e-classificacao-dos-solos-almeida-2005>. Acesso em: 05 jul. de 2017.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6502** - Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 11578** - Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.

ABREU, S. F. **Recursos Minerais do Brasil**. 2 Ed. São Paulo/ Rio de Janeiro: Editora Edgard Blücher LTDA, 1973.

ALLEONI, L. R. F.; IGLESIAS, C. S. M.; MELLO, S. C.; CAMARGO, O. A.; CASAGRANDE, J. C.; LAVORENTI, N. A. Atributos do Solo Relacionados à Adsorção de Cádmio e Cobre em Solos Tropicais. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, v.27, n.4, p.729-737, outubro-diciembre 2005.

AOUDIA, K.; AZEM, S.; HOCINE, N. A.; GRATTON, M.; PETTARIN, V.; SEG HAR, S. Recycling of Waste Tire Rubber: Microwave Devulcanization and Incorporation in a Thermoset Resin. **Waste Management**, [S.l.], v.60, p.471-481, fev. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.051>.

ARAÚJO, D. A. **Remoção de Óleo da Água Produzida por Adsorção: Estudo de Adsorventes, Comparação entre Processos e Proposição de Aumento de Escala**. 2017. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

ATA, A. A.; SALEM, T. N.; ELKHAWAS, N. M. Properties of Soil–bentonite–cement bypass Mixture for Cutoff Walls. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v.93, p.950-956, set. 2015. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.064>.

AVALOS, F.; ORTIZ, J. C.; ZITZUMBO, R.; LÓPEZ-MANCHADO, A.; VERDEJO, R.; ARROYO, M. Effect of Montmorillonite Intercalant Structure on the Cure Parameters of Natural Rubber. **European Polymer Journal**, v.44, p.3108–3115, 2008.

BATISTA, A. P. S. **Caracterização de Argilas Bentonitas de Cubati-PB Visando sua Aplicação em Fluidos de Perfuração Base Água**. 2010. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande – Paraíba, 2010.

BATISTA, P.; LEITE, A. L. Misturas de um Solo Laterítico com Cimento e Bentonita para uso em Cortinas Verticais. **Revista Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 63, n.2, p.255-263, 2010.

BENSON, C. H. **Using Shredded Scrap Tires in Civil and Environmental Construction**. University of Wisconsin. Madison. Resource Recycling, October 1995.

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. **Pneus**. BNDES: Áreas de Operações Industriais 2/Gerência Setorial 2, Junho/1998, 34p.

BOCKSTAL, L.; BERCHEM, T.; SCHMETZ, Q.; RICHEL, A. Devulcanisation and Reclaiming of Tires and Rubber by Physical and Chemical Processes: A review. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v.236, p.1-16, nov. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.049>.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA 416**, DOU Nº 188, de 01/10/2009, p.64-65.

CACHADA, M. J. V. **Melhoria do Processo de Adesão entre Mangueiras de Borracha e Abraçadeiras Metálicas utilizando Ferramentas da Qualidade**. 2017. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Processos Industriais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2017.

CARLSON, L. **Bentonite Mineralogy - Part 1: Methods of Investigation-a Literature Review, Part 2: Mineralogical Research of Selected Bentonites**. Working Report 2004-02. Oikiluoto, Finland: POSIVA, 2004, 108p.

CARVALHO, E. F. T. **O concreto sem mistérios**. Ouro Preto: UFOP, 2012, 392p.

CEN - European Committee for Standardization. EN 197-1 - **Cement - Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements**. 2000.

CHEN, L.; MA, X.; TANG, F.; LI, Y.; YU, Z.; CHEN, X. Comparison of Catalytic Effect on Upgrading Bio-oil Derived from Co-pyrolysis of Water Hyacinth and Scrap Tire over Multilamellar MFI Nanosheets and HZSM-5. **Bioresource Technology**, v.312, 2020.

CHRISTIDIS, G. E.; HUFF, W. D. Geological Aspects and Genesis of Bentonites. **Elements**, v.5, n.2, p.93–98, 2009.

CONSOLI, N. C.; HEINECK, K. S.; CARRARO, J. A. H. Portland Cement Stabilization of Soil–Bentonite for Vertical Cutoff Walls Against Diesel Oil Contaminant. **Geotechnical and Geological Engineering**, [S.l.], v.28, n.4, p.361-371, jan. 2010. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10706-009-9297-5>.

CORINALDESI, V.; DONNINI, J. Waste Rubber Aggregates. **New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete**, [S.l.], p.87-119, 2019. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-102480-5.00004-x>.

CORNER, G. D. **Solos**. Universidade de Tromsø, Noruega, 2007. Tradução de Carlos Eduardo G. Araujo. Disponível em:

http://ansatte.uit.no/webgeology/webgeology_files/brazil/soils_bra.html. Acesso em: 31 mai. de 2018.

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Serviço Geológico do Brasil. **Diagnóstico do Município de Cubati**, 2005.

CRITTENDEN, B.; THOMAS, W. J. **Adsorption Technology & Design**. 1 Ed. Butterworth-Heinemann, 1998.

CZAJCZYŃSKA, D.; KRZYŻYŃSKA, R.; JOUHARA, H.; SPENCER, N. **Use of Pyrolytic Gas from Waste Tire as a Fuel: A Review**. *Energy*, [S.l.], v.134, p.1121-1131, set. 2017. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.042>.

DABROWSKI, A. Adsorption: From Theory to Practice. **Advances in Colloid and Interface Science**, v.93, n.1–3, p.135–224, 2001.

DANA, J. D. **Manual de Mineralogia**. Livros Técnicos e Científicos Editora S. A. Rio de Janeiro-Brasil, 1984.

DARLEY, H. C. H.; GRAY, G. R. **Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids**. 5 Ed. United States of America: Gulf Professional Publishing, 1988.

DIAS, J. L. F. **Misturas Betuminosas Incorporando por Via Seca Borracha de Pneus Usados: Caracterização e validação tecnológica**. 2011. 300 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2011.

DODDS, J.; DOMENICO, W. F.; EVANS, D. R.; FISH, L. W.; LASSAHN, P. L.; TOTH, W. J. **Scrap Tires: A Resource and Technology Evaluation of Tire Pyrolysis and other Selected Alternate Technologies**. US Dept. of Energy Report No. EGG-2241, Washington, DC, 1983.

EC - European Commission (2008), **Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on Waste and Repealing Certain Directives**. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A32008L0098>. Acesso em: 14 ago. de 2019.

EDIL, T. B.; BOSSCHER, P. J. Engineering Properties of Tires Chips and Soil Mixtures. **The American for Testing and Materials**, 1994.

EDIL, T. B.; PARK, K. J.; KIM, Y. J. Effectiveness of Scrap Tire Chips as Sorptive Drainage Material. **Journal of Environmental Engineering**, p.824, 2004.

EC - European Committee for Standardization. EN 197-1 - **Cement - Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements**. 2000.

FLANAGAN, D. M. **2015 Minerals Yearbook: Clay and shale**. U. S. Geological Survey, feb. 2018. Disponível em:

<https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/clays/myb1-2015-clays.pdf>.

Acesso em: 30 ago. de 2018.

FERNANDES FILHO, E. I.; FRANCELINO, M. R. Apostila - **Solo como Sistema Trifásico**. Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos. Viçosa, 2001. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/285895366/Apostila-Fisica-Do-SoloUFV>. Acesso em: 03 jun. de 2018.

GALIANI, P. D.; MALMONGE, J. A.; SANTOS, D. P.; MALMONGE, L. F. Compósitos de Borracha Natural com Polianilina. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.17, n.2, p.93-97, 2007.

GARVIN, S. L.; HAYLES, C. S. The Chemical Compatibility of Cement–Bentonite Cut-off Wall Material. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v.13, n.6, p.329-341, set. 1999. Elsevier. [http://dx.doi.org/10.1016/s0950-0618\(99\)00024-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0950-0618(99)00024-0).

GRIM, R. E. **Clay Mineralogy**. Second ed. New York: McGraw-Hill, 1968.

GUGGENHEIM, S.; MARTIN, R. T. Definition of Clay and Clay Mineral: Joint Report of the AIPEA Nomenclature and CMS Nomenclature Committees. **Clays and Clay Minerals**, [S.l.], v.43, n.2, p.255-256, 1995. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1346/ccmn.1995.0430213>.

GUPTA; V. K.; ALI, I.; SALEH, T. A.; SIDDIQUI, M. N.; AGARWAL, S. Chromium Removal from Water by Activated Carbon Developed from Waste Rubber Tires. **Environmental Science and Pollution Research**, v.20, n.3, p.1261–1268, 2013.

HEINECK, K. S.; LEMOS, R. G.; LAUTENSCHLAGER, C. E. R.; CONSOLI, N. C. Behavior of Vertical Hydraulic Barriers Composed by Sandy Soil, Bentonite, and Cement Subjected to Alkaline Contaminants. **Geoflora** 2010, [S.l.], p.462-2471, fev. 2010. American Society of Civil Engineers. [http://dx.doi.org/10.1061/41095\(365\)250](http://dx.doi.org/10.1061/41095(365)250).

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/cubati/panorama>. Acesso em: 15 set. de 2019.

JORDAN, J. W. Organophilic Bentonites. I: Swelling in Organic Liquids. **Journal of Physical and Colloid Chemistry**, v.53, n.2, p.294–306, 1949.

KAMIMURA, E. **Potencial de Utilização dos Resíduos de Borracha de Pneus pela Indústria da Construção Civil**. 2002. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

KLEIN, C.; HURLBUT JR, C. S. **Manual of Mineralogy**. 21th edition, John Wiley & Sons, New York, 1993, 681p.

LAGARINHOS, C. A. F.; TENORIO, J. A. S. Tecnologias Utilizadas para a Reutilização, Reciclagem e Valorização Energética de Pneus no Brasil. **Polímeros**, São Carlos, v.18, n.2, p.106-118, june 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282008000200007>.

LAPKOVSKIS, V.; MIRONOV, V.; GOLJANDIN, D. Suitability of Devulcanized Crumb Rubber for Oil Spills Remediation. **Energy Procedia**, v.147, p.351–357, 2018.

LEE, T.; BENSON, C. H. Flow past Bench-Scale Vertical Ground-Water Cutoff Walls. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v.126, n.6, june 2000.

LEITÃO, N. R. M.; RAPOSO, C. M. O. **Preparação e Caracterização de Sistemas Solo/Cimento/Bentonita Visando a Contenção de Contaminantes**. 2013. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2013.

LIM, J.; LEE, D.; CHOI, H. - J.; CHOI, H. Analytical Solution for Transient Groundwater Flow During Slug Test in Vertical Cutoff Walls. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, [S.l.], v.38, n.17, p.1855-1870, abr. 2014. <http://dx.doi.org/10.1002/nag.2289>.

LUMMUS, J.L.; AZAR, J.J. **Drilling Fluids Optimization a Practical Field Approach**, PennWell Publishing Company, Tulsa, Oklahoma, 1986.

LUZ, A. B.; OLIVEIRA, C. H. **Argila – Bentonita**. Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações. 2 Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008, 990p.

MALUSIS, M. A.; MANEVAL, J. E.; BARBEN, E. J.; SHACKELFORD, C. D.; DANIELS, E. R. Influence of Adsorption on Phenol Transport through Soil–bentonite Vertical Barriers Amended with Activated Carbon. **Journal of Contaminant Hydrology**, [S.l.], v.116, n.1-4, p.58-72, jul. 2010. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jconhyd.2010.06.001>

MASSON, T. J.; MIRANDA, L. F.; CUNHA, F. M.; ALMEIDA, L. F. P.; CAMARGO, M. C. R.; MUNHOZ JR, A. H. Asfalto-Borracha: Incorporação de Pneus no Asfalto. **XVII Safety, Health and Environment World Congress**. Vila Real, Portugal, 2017.

MARRAS, S. I.; TSIMPLIARAKI, A.; ZUBURTIKUDIS, I.; PANAYIOTOU, C. Thermal and Colloidal behavior of Amine-treated Clays: The Role of Amphiphilic Organic Cation Concentration. **J. Coll. Interf. Science**, v.315, p.520-527, 2007.

MARTIN, R. T.; BAILEY, S. W.; EBERL, D. D.; FANNING, D. S.; GUGGENHEIM, S.; KODAMA, H.; PEVEAR, D. R.; SRODON, J.; WICKS, F. J. Report of the Clay Minerals Society Nomenclature Committee: Revised Classification of Clay Materials. **Clays and Clay Minerals**, v.39, n.3, p.333–335, 1991.

MEDEIROS, K. A. **Bentonita**. In: LIMA, T. M. (Org.); NEVES, C. A. R. (Org.). Sumário Mineral, 2016. DNPM, Brasília, v.36, p.30, 2016.

MENEZES, R. R.; MARQUES, L. N.; CAMPOS, L. A.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Caracterização de Argilas Bentoníticas de Cubati-PB. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.4, n.3, p.64-71, 2009.

MORANDINI, T. L. C. **Solos Tropicais e Bentonita: Análise Geotécnica de Misturas com Ênfase na Abordagem Coloidal**. 2014. 267 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

MORONTA, A. Catalytic and Adsorption Properties of Modified Clay Surfaces. **Interface Science and Technology**, v.1, p.321–344, 2004.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5 Ed. Brasil: Bookman, 2016.

NOHARA, J. J.; ACEVEDO, C. R.; PIRES, B. C. C.; CORSINO, R. M. **GS – 40 - Resíduos Sólidos: Passivo Ambiental e Reciclagem de Pneus**. THESIS. Ano I, v.3, p.21-57. São Paulo, 2005.

OIKONOMOU, N.; MAVRIDOU, S. The Use of Waste Tyre Rubber in Civil Engineering Works. **Sustainability of Construction Materials**, p.213–238, 2009.

OLIVEIRA, H. M. **Cimento Portland**. In: BAUER, L. A. F. (Ed.); DIAS, J. F. (Ed.) **Materiais de Construção**. v.1, 5 Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012, 490p.

PAIVA, L. B.; MORALES, A. R.; VALENZUELA DÍAZ, F. R. Organoclays: Properties, Preparation and Applications. **Applied Clay Science**, 2008.

PAN, Y.; YANG, D.; SUN, K.; WANG, X.; ZHOU, Y.; HUANG, Q. Pyrolytic Transformation behavior of Hydrocarbons and Heteroatom Compounds of Scrap Tire Volatiles. **Fuel**, 276, 2020.

PARK, K. J.; KIM, Y. J.; MADSEN, D. C.; EDIL, B. T. Retardation of Volatile Organic Compound Movement by a Soil-bentonite Slurry Cutoff Wall Ammended with Ground Tires. **Water Environment Research**, v.69, n.5, 1997.

PARK, J. K.; KIM, J.Y.; HUB, M.; LEE, S. H.; LEE, J. J. Suitability of Shredded Tyres as a Substitute for a Landfill Leachate Collection Medium. **Waste Management & Research**, v.21, p.278-289, 2003.

PASTORE, E. L.; FONTES, R. M. **Caracterização e Classificação de Solos**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, São Paulo - SP, 1998.

PEREIRA, K. R. O. **Estudo, em Escala de Laboratório, do Uso de Argilas do Tipo Bofe na Obtenção de Argilas Organofílicas e Ativadas**. 2008. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. [doi:10.11606/T.3.2008.tde-02062008-165709](https://doi.org/10.11606/T.3.2008.tde-02062008-165709).

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland**. 13 Ed. São Paulo: Globo, 1998.

PIVER, W. T. Contamination and Restoration of Groundwater Aquifers. **Environmental Health Perspectives**, v.100, p.237-247, 1992.

PONTES, E. M.; RAPOSO, C. M. O. **Influência do tipo de Silicato Aplicado na Adsorção de Contaminantes**. In: X CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE, Campina Grande, PB, 2013.

PORTO, J. P. P.; ARANHA, I. B. **Caracterização Cristalográfica Preliminar de Bentonitas Brasileiras**. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 10, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2002.

POWDER DIFFRACTION FILE: 13-259; 14-164; 33-1161.

POZZA, A. A. A.; CURI, N.; COSTA, E. T. S.; GUILHERME, L. R. G.; MARQUES, J. S. M.; MOTTA, P. E. F. Retenção e Dessorção Competitivas de Ânions Inorgânicos. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v.42, n.11, p.1627-1633, nov. 2007.

PRANDI, J. **Mapas da Paraíba**. MapasBlog, 2015. Disponível em: <https://mapasblog.blogspot.com/2011/12/mapas-da-paraiba.html>. Acesso em: 10 dez. de 2019.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Propriedades Físicas do Solo**. Universidade Federal de Santa Maria: Centro de Ciências Rurais, Santa Maria, 2006.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B.de; CORRÊA, G.F.; **Pedologia: Base para Distinção de Ambientes**. 2 Ed. Viçosa: NEPUT, 1997. 367p.

RIPPEL, M. M.; BRAGANÇA, F. C. Borracha Natural e Nanocompósitos com Argila. **Química Nova**, v.32, n.3, 818-826, 2009.

RODRIGUES, E.; ALAZNE, R. P.; ARANTES, G. J. M.; BILBAO, A. J. Scrap Tires Pyrolysis Oil as a Co-feeding Stream on the Catalytic Cracking of Vacuum Gasoil under Fluid Catalytic Cracking Conditions. **Waste Management**, v.105, p.18-26, 2020.

ROSS, C. S.; SHANNON, E. V. The Minerals of Bentonite and Related Clays and their Physical Properties. **Journal of the American Ceramic Society**, v.9, n.2, p.77-96, 1926.

ROWLEY, A. G.; HUSBAND, F. M.; CUNNINGHAM, A. B. Mechanisms of Metal Adsorption from Aqueous Solutions by Waste Tyre Rubber. **Water Research**, v. 18, n.8, p.981 - 984, 1984.

RUTHVEN, D. M. **Principles of Adsorption and Adsorption Processes**. United States: JOHN WILEY & SONS, 1984.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. **Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo**. 5 Ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência de Solo, 2005.100p.

SATHISKUMAR, C.; KARTHIKEYAN, S. Recycling of Waste Tires and its Energy Storage Application of By-products – A review. **Sustainable Materials and Technologies**, [S.l.], v.22, p.1-6, dez. 2019. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00125>.

SHULMAN, V. L. Tire Recycling. **Waste**, [S.l.], p.489-515, 2019. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-815060-3.00026-8>.

SIEIRA, A. C. C. F. Geossintéticos e Pneus: Alternativas de Estabilização de Taludes. **Engevista**, [S.l.], v.11, n.1, p.50-59, fev. 2010. Pro Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação - UFF. <http://dx.doi.org/10.22409/engevista.v11i1.227>.

SILVA, A. A. **Contribuição ao Estudo das Bentonitas do Município de Boa Vista Estado da Paraíba**. 2011. 282 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 2011.

SILVA, R. V.; FERREIRA, H. C. Argilas Bentoníticas: Conceitos, Estruturas, Propriedades, Usos Industriais, Reservas, Produção e Produtores/fornecedores Nacionais e Internacionais. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.3, n.2, p.26-35, 2008.

SILVA, L. S.; MOUTA, J. R.; COSTA, M. C. B.; GOMES, L. G. Concreto com Borracha de Recauchutagem de Pneu para uso em Pavimentação de Baixo Tráfego. **Revista Matéria**, v.24; n.2; 2019.

SILVA, L. S.; NASCIMENTO, F. R.; NOGUEIRA, M. H. P.; LIMA, G. K. M.; ROCHA SOBRINHO, D. C. Utilização de Resíduos de Borracha de Recauchutagem de Pneus na Composição de Asfalto. RCT - **Revista de Ciência e Tecnologia**, [S.l.], v.4, n.7, dec. 2018. Disponível em: <https://revista.ufrr.br/rct/article/view/4950>>. Acesso em: 15 jul 2019.

SILVA, R. C.; RAPOSO, C. M. O. **Preparação de Cortinas Verticais Usando-se Bentonitas Hidrofóbicas: Estudo da Eficiência na Retenção de Contaminantes**. 2015. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2015.

SNOEYINK, V. L.; WEBER JR, W. J. The Surface Chemistry of Active Carbon: A Discussion of Structure and Surface Functional Groups. **Environmental Science and Technology**, v.1, n.3, p.228 – 234, 1967.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**. 12th edition. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook, 2014, 372p.

SOUSA, B. J.; VOROBIEV, A.; SOUSA, R. Extensor Elastómero de Betume – A Nova Fronteira das Misturas Betuminosas com Ligantes Betuminosos Modificados com Borracha. **Estradas**, 2012.

TENÓRIO, J. A. S.; ARAÚJO, F. G. S.; PEREIRA, S. S. R.; FERREIRA, A. V.; ESPINOSA, D. C. R.; BARROS, A. Decomposição da Fase Majoritária do Cimento Portland - Parte II: Alita com Adições de Fe e Al. **R. Esc. Minas**, Ouro Preto, v.56, n.2, p.113-117, abr. jun. 2003.

TOPÇU, I. B. The Properties of Rubberized Concretes. **Cement and Concrete Research**, v.25, n.2, p.304-310, 1995.

THOMMES, M. Physical Adsorption Characterization of Nanoporous Materials. **Chemie Ingenieur Technik**, [S.l.], v.82, n.7, p.1059-1073, 2010.

USGS - U.S. Geological Survey, 2019, **Mineral Commodity Summaries 2019**: U.S. Geological Survey, 200 p. <https://doi.org/10.3133/70202434>.

USKARCI, T. **Behaviour of Bentonite Suspensions in Non-Aqueous Media**. [S.l.] Middle East Technical University, 2006.

VIEIRA COELHO, A. C.; SANTOS, P. D. S.; SANTOS, H. D. S. Argilas Especiais: O que são, Caracterização e Propriedades. **Química Nova**, v.30, n.1, p.146-152, 2007.

ZHANG, H.; YUAN, X.; LIU, Y.; WU, J.; SONG, X.; HE, F. Experimental Study on the Pullout behavior of Scrap Tire Strips and their Application as Soil Reinforcement. **Construction and Building**, v.254, 2020.

ZIMBACK, C. R. L. **Formação dos Solos**. Grupo de Estudos e Pesquisas Agrárias Georreferenciadas, FCA-UNESP, Botucatu - SP, UNESP, 2003.