



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**

**CENTRO DE TECNOLOGIA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**Silvia Cristina Justo Fernandes Nobre de Araujo**

**ANÁLISE DE MICROESTRUTURA E DE CARACTERÍSTICAS  
GEOTÉCNICAS DE MISTURAS DE RESÍDUO DE POLIMENTO DE  
PORCELANATO E SOLO**

**Orientador: Profa. D.Sc. Carina Maia Lins Costa**

**Natal-RN**

**2016**

**Silvia Cristina Justo Fernandes Nobre de Araujo**

**ANÁLISE DE MICROESTRUTURA E DE CARACTERÍSTICAS  
GEOTÉCNICAS DE MISTURAS DE RESÍDUO DE POLIMENTO DE  
PORCELANATO E SOLO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – ênfase em Geotecnia.

Orientador: Profa. D.Sc. Carina Maia Lins Costa

**Natal-RN**

**2016**

Seção de Informação e Referência  
Catalogação da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Araujo, Silvia Cristina Justo Fernandes Nobre.  
Análise de microestrutura e de características geotécnicas de misturas de resíduo de polimento de porcelanato e solo / Silvia Cristina Justo Fernandes Nobre de Araujo. - Natal, 2016.  
114 f. : il.

Orientador: Carina Maia Lins Costa.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

1. Resíduo de Polimento de Porcelanato - Dissertação. 2. Aterro Compactado - Dissertação. 3. Capacidade de Carga - Dissertação. I. Costa, Carina Maia Lins. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624

SILVIA CRISTINA JUSTO FERNANDES NOBRE DE ARAUJO

**ANÁLISE DE MICROESTRUTURA E DE CARACTERÍSTICAS  
GEOTÉCNICAS DE MISTURAS DE RESÍDUO DE POLIMENTO DE  
PORCELANATO E SOLO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – ênfase em Geotecnia.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Profa. D.Sc. Carina Maia Lins Costa – Orientador, UFRN

---

Prof. D.Sc. Yuri Daniel Jatobá Costa – Examinador Interno, UFRN

---

Prof. D.Sc. Eder Carlos Guedes dos Santos – Examinador Externo, UPE-POLI

**Natal-RN, Março de 2016.**

# ANÁLISE DE MICROESTRUTURA E DE CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE MISTURAS DE RESÍDUO DE POLIMENTO DE PORCELANATO E SOLO

**Silvia Cristina Justo Fernandes Nobre de Araujo**

Orientador: Profa. D.Sc. Carina Maia Lins Costa

## RESUMO

O Brasil é um país em desenvolvimento dotado de imensa quantidade de recursos naturais que necessitam ser preservados a fim de que o crescimento econômico seja associado ao desenvolvimento sustentável. A gestão de resíduos sólidos é um desafio contínuo para as indústrias no Brasil, incluindo as que produzem materiais cerâmicos. Neste trabalho, foi estudada a utilização de Resíduo de Polimento de Porcelanato (RPP) para a execução de aterros compactados. O RPP é um resíduo em consistência de lama gerado durante a etapa de polimento do material cerâmico *porcelanato*, composto por material pulverulento desprendido da peça cerâmica polida, por material abrasivo gasto e por água de resfriamento e lavagem. O RPP utilizado nesta pesquisa foi coletado em empresa localizada no município de Conde/PB e será estudado em misturas com solo areno-argiloso, para a execução de aterros. Foram realizados ensaios de caracterização e de resistência mecânica com o solo puro, o RPP puro e misturas de solo e resíduo nas proporções de 5%, 10%, 15% e 20% da adição de RPP em massa seca de solo. Os ensaios de caracterização realizados em todas as amostras foram: massa específica dos sólidos, granulometria conjunta, granulometria a laser, limites de Atterberg, fluorescência de raios X, difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura e compactação. As amostras também foram compactadas e submetidas ainda a ensaios de cisalhamento direto e provas de carga em placa. Este último ensaio foi realizado em placa circular de 30 cm de diâmetro, sobre amostra moldada em caixa metálica no laboratório de Mecânica dos Solos da UFRN. A capacidade de carga do aterro foi avaliada para as amostras compactadas de solo puro e da mistura de 5%,

previamente selecionada. Todos os ensaios de resistência mecânica foram desenvolvidos na condição inundada, a fim de minimizar possíveis influências de sucção matricial. Os resultados dos ensaios de caracterização apontam que o RPP é um material fino, com granulometria inferior a 0,015 mm, rico em sílica e alumina, com partículas de formato angular. O solo em estudo é uma areia argilosa, caracterizado como laterítico, com altos teores de alumina e óxido de ferro, e com partículas de formato arredondado. Tanto o solo puro quanto as misturas foram identificados como materiais fracamente plásticos, enquanto o resíduo se mostrou medianamente plástico. Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto apontam que a adição de resíduo no solo não provocou variações significativas nos valores de ângulo de atrito interno das misturas, em relação ao solo puro, mas, no que diz respeito aos valores de pico da resistência ao cisalhamento, ocorreu uma tendência a um decréscimo na resistência das misturas com o aumento da quantidade de resíduo adicionada. Tanto o solo puro quanto a mistura de 5% apresentaram ruptura por puncionamento, para a prova de carga em placa. O resultado da prova de carga em placa mostrou também que a mistura de 5% apresentou tensão admissível 44% maior do que o solo puro. Os recalques da Mistura de 5% também foram menores do que os do solo puro.

**Palavras-chave:** Resíduo de polimento de porcelanato; aterro compactado; capacidade de carga.

## **ANALISYS OF MICROSTRUCTURE AND GEOTECHNICAL PROPERTIES OF BLENDS OF PORCELAIN TILE POLISHING RESIDUE AND SOIL**

**Silvia Cristina Justo Fernandes Nobre de Araujo**

Advisor: Prof. D.Sc. Carina Maia Lins Costa

### **ABSTRACT**

Brazil is a country in development, rich in natural resources. In order to grow sustainably, it is necessary to Brazil to preserve its environment, which is an expressive challenge, especially to industries, such as those producing ceramic materials. This study was developed using Porcelain Tile Polishing Residue (RPP) in blends with soil to build compacted fills. This residue is a slurry generated during the polishing process of porcelain tiles and contains powdery material from the polished tile, the abrasives used during the process and cooling water. The RPP was collected from a private company located in Conde/PB and it was mixed with a sandy-clayey soil, to build the fills. Laboratorial tests were conducted with pure soil, pure RPP and blends in proportions of 5%, 10%, 15% and 20% of RPP in addition to the dry mass of pure soil. The Chemical and Physical Characterization tests performed were: specific solid weight, grain size distribution, laser analysis of grain size distribution, Atterberg limits, X ray fluorescence, X ray diffraction, scanning electron microscopy and soil compaction,. The materials and blends were also compacted and direct shear tests and plate load tests were performed. Plate load tests were conducted using a circular plate with 30 cm diameter, on specimens of pure soil and 5% blend, compacted in a metallic box inside the Soil Mechanics Laboratory of the Federal University of Rio Grande do Norte, Brazil. Both mechanical tests performed were conducted under inundated conditions, willing to reduce the influence of soil suction. An evaluation of the results of the tests performed shows that RPP is a fine material, with grain size distribution smaller than 0,015mm, composed mainly of silica and alumina, and particles in angular shape. The soil was characterized as a clayey

sand, geologically known as a lateritic soil, with high percentages of alumina and iron oxide, and particles with rounded shape. Both the Soil and the blends presented low plasticity, while the residue showed a medium plasticity. Direct shear tests showed that the addition of RPP did not cause major changes into blends' friction angle data, however, it was possible to note that, for the proportions studied, that is a tendency of obtain lower shear stresses for higher percentages of RPP in the blends. Both pure soil and 5% mixture showed a *punching* disruption for the Plate load test. For this same test, the allowable stress for 5% mixture was 44% higher than the pure soil, and smaller vertical settlement results for all stresses.

**Keywords:** Porcelain tile polishing residue; compacted fill; plate load test.

A Deus, acima de tudo,  
Ao meu Esposo, Felipe Araújo,  
Aos meus Pais, Humberto e Cristina,  
E aos meus Irmãos, Humberto e Álvaro,  
Dedico, com carinho, o esforço deste trabalho.

## Agradecimentos

À professora Carina Costa pela orientação, paciência, inspiração e estímulo para me fazer alcançar altos voos.

Ao Departamento de Engenharia Civil da UFRN, na figura dos professores Luiz Alessandro e Olavo Santos Jr., pelas oportunidades oferecidas.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, na representação pela professora Ada Scudelari, por abrir as portas para a obtenção deste título profissional.

Ao professor Yuri Costa, por toda colaboração oferecida para esse mestrado e para o subsequente doutorado e por garantir a execução dos primeiros ensaios desta pesquisa, quando ainda era chefe do laboratório de Mecânica dos Solos.

Ao professores Fagner França, atual chefe do laboratório de Mecânica dos Solos da UFRN; Jaquelígia Brito, grande incentivadora da minha carreira acadêmica; Marcos Alyssandro, que gentilmente contribuiu nos resultados deste trabalho durante a Qualificação; e demais professores do DEC e do PEC: sou grata pela oportunidade de levar o conhecimento que vocês me passaram mais adiante.

Ao professor Eder Carlos Guedes dos Santos por prontamente aceitar o convite para a Defesa e pelas contribuições vindouras para melhoria deste trabalho.

Aos técnicos de laboratório Sandro Ricardo, João Batista e Anderson Dantas, por todo o auxílio na execução dos ensaios e por manterem a ordem e a infraestrutura de trabalho.

Aos colaboradores Rafael Paulino, Leandro Gomes e Guilherme Adler, por me ajudarem grandemente a ter sempre mais de um ensaio sendo executado ao mesmo tempo!

Aos bolsistas e funcionários do PEC e de outros laboratórios e empresas colaboradoras: Rafaella (PEC), Afra (PEC), Cintya (PEC), Yago (Elizabeth), Bruno (Lab. Física – Granulometria), Rogério (Lab. Química - Granulometria), Abner (Lab. Física – DRX), Igor (DEMAT), Carla (DEMAT), Jean (DRX) e Rodolfo (Estatística), por

dedicarem parte de seu precioso tempo para que eu obtivesse resultados maiores do que os puramente geotécnicos.

Aos meus grandes amigos do Mestrado, Charles Pereira Chaves e João Paulo da Silva Costa que, apesar de suas atribuições, se disponibilizaram a me ajudar em todas as etapas.

Às agências de fomento CNPq e CAPES, por conceder bolsas para esta pesquisa e para os meus estudos.

# Sumário

<b>Capítulo 1</b>	<b>1</b>	
1	Introdução	1
1.1	Objetivos da Pesquisa	3
1.1.1	Objetivo Geral	3
1.1.2	Objetivos Específicos	3
1.2	Justificativa	4
1.2.1	Ambiental	4
1.2.2	Econômica	4
1.2.3	Técnica	5
1.3	Estrutura do trabalho	5
<b>Capítulo 2</b>	<b>7</b>	
2	Revisão da Literatura	7
2.1	Materiais Cerâmicos	7
2.2	Porcelanato Polido	10
2.2.1	Etapas de produção do Porcelanato Polido	10
2.2.2	Processo Produtivo do Porcelanato Polido em Conde-PB	13
2.3	Resíduo de Polimento de Porcelanato (RPP)	20
2.3.1	Química do RPP	21
2.3.2	Estudos da utilização de RPP para formação de novos materiais	22
<b>Capítulo 3</b>	<b>30</b>	
3	Materiais e Métodos	30
3.1	Solo	30

<b>3.2</b>	<b>Resíduo de Polimento de Porcelanato (RPP)</b> .....	<b>32</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Coleta do RPP</b> .....	<b>32</b>
<b>3.3</b>	<b>Programa Experimental</b> .....	<b>33</b>
<b>3.4</b>	<b>Caracterização dos Materiais</b> .....	<b>36</b>
<b>3.4.1</b>	<b>Massa Específica dos Sólidos</b> .....	<b>36</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Análise Granulométrica Conjunta</b> .....	<b>36</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Análise Granulométrica a Laser</b> .....	<b>36</b>
<b>3.4.4</b>	<b>Limites de Atterberg</b> .....	<b>37</b>
<b>3.4.5</b>	<b>Fluorescência de Raios-X (FRX)</b> .....	<b>37</b>
<b>3.4.6</b>	<b>Difração de Raios-X (DRX)</b> .....	<b>37</b>
<b>3.4.7</b>	<b>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</b> .....	<b>38</b>
<b>3.4.8</b>	<b>Compactação</b> .....	<b>38</b>
<b>3.5</b>	<b>Ensaio de Resistência Mecânica</b> .....	<b>38</b>
<b>3.5.1</b>	<b>Ensaio de Cisalhamento Direto</b> .....	<b>38</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Prova de Carga em Placa</b> .....	<b>40</b>
	<b>3.5.2.1 Estimativa da capacidade de carga</b> .....	<b>46</b>

## **Capítulo 4..... 48**

<b>4</b>	<b>Resultados e Discussões</b> .....	<b>48</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização dos Materiais</b> .....	<b>48</b>
<b>4.1.1</b>	<b>Massa Específica dos Sólidos</b> .....	<b>48</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Granulometria Conjunta</b> .....	<b>49</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Granulometria a Laser</b> .....	<b>53</b>
<b>4.1.4</b>	<b>Limites de Atterberg</b> .....	<b>56</b>
<b>4.1.5</b>	<b>Fluorescência de raios X</b> .....	<b>57</b>
<b>4.1.6</b>	<b>Difração de raios X</b> .....	<b>60</b>
<b>4.1.7</b>	<b>Microscopia Eletrônica de Varredura e EDS</b> .....	<b>63</b>

4.1.8	Compactação .....	66
4.2	Ensaio de Resistência Mecânica .....	68
4.2.1	Cisalhamento Direto .....	68
4.2.2	Prova de Carga em Placa .....	73
<b>Capítulo 5.....</b>		<b>80</b>
5	Conclusões e Recomendações .....	80
5.1	Conclusões .....	80
5.2	Recomendações para pesquisas futuras .....	82
<b>Referências.....</b>		<b>84</b>
<b>Anexos .....</b>		<b>90</b>
<b>Anexo A – Gráficos de Cisalhamento Direto</b>		<b>901</b>

# Capítulo 1

## Introdução

Desde a época da Revolução Industrial (meados do século XVIII), quando houve expansão rápida dos centros urbanos, as cidades têm enfrentado o desafio de realizar a gestão de resíduos sólidos. Nas últimas décadas, a discussão entre o desenvolvimento sustentável e o crescimento econômico capitalista se tornou ainda mais evidente, uma vez que organizações não governamentais expuseram claramente as consequências do desenvolvimento sem planejamento e conseguiram chamar a atenção do grande público para a preservação ambiental. Desde então, ocorrem reuniões políticas globais com o intuito de estabelecer regras e limites para a geração de resíduos e a poluição em diversos países.

A velocidade do crescimento populacional, no entanto, foi expressivamente maior do que a capacidade de intervenção dos governos. A cada ano acrescentam-se 80 milhões de novos habitantes ao planeta e 50 trilhões de dólares em PIB (WWI, 2013) que são usados também para a construção de novas edificações e expansão dos centros populacionais. No Brasil, por exemplo, a taxa de geração de resíduos sólidos, em 2014, foi 0,9% maior do que a taxa de crescimento populacional (ABRELPE, 2014).

No setor da construção civil, o cenário crescente de geração de resíduos não é diferente, mas se torna ainda mais agravante quando se percebe que nesse setor há o consumo de até 50% de todos os recursos minerais explorados no planeta (Carvalho, 2013). Conscientes desse quadro, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e demais órgãos ambientais, têm pressionado o setor público e privado para minimizar os impactos gerados ao longo da cadeia produtiva, o que leva indústrias e universidades a estudarem soluções para reaproveitamento dos resíduos.

Dentre os inúmeros resíduos industriais gerados no Brasil encontra-se o Resíduo de Polimento de Porcelanato (RPP), que é o subproduto da etapa de polimento de peças cerâmicas, constituído por uma lama composta pelo material pulverulento da cerâmica desbastada, do material abrasivo gasto pelo polimento e

água de resfriamento. O Nordeste brasileiro, na última década, expandiu sua produção de pequenas olarias para grandes indústrias e pode tornar-se um pólo em futuro próximo, principalmente devido às condições propícias de matéria-prima, energia viável, mercado consumidor em desenvolvimento e localização geográfica favorável à exportação (ANICER, 2015; ANFACER, 2015).

Segundo a ANFACER (2015), atualmente o Brasil figura como o segundo maior mercado consumidor e produtor mundial de materiais cerâmicos – incluindo porcelanatos polidos, que são os mais procurados –, atrás apenas da China. Como exportador, o Brasil é o quinto maior mercado mundial e seus destinos principais são as Américas (do Sul, Central e do Norte, respectivamente).

Esta pesquisa estudou, então, a possibilidade de utilização do RPP em aterros compactados, a fim de permitir uma possível destinação mais adequada ao resíduo.

A indústria de produtos cerâmicos de onde o RPP foi coletado está localizada no município de Conde/PB, nordeste brasileiro, e tem alta produção diária, com cerca de 15.000 m<sup>2</sup> de produto acabado pronto para ser comercializado, porém com geração de mais de 30 toneladas de resíduo de polimento por dia.

Atualmente, o resíduo fica estocado no pátio da empresa por aproximadamente um mês, até que seja dado outro destino ao mesmo, como utilizar como aterro nas áreas de escavação da extração de argila (matéria-prima) no terreno da empresa, ou utilização como *filler* na indústria de produção de cimentos da própria marca.

Neste cenário, o uso do RPP como componente da mistura de material na compactação de aterros apresenta-se como um destino adequado a este subproduto, uma vez que não requer qualquer tratamento adicional do resíduo para sua utilização, como ajuste granulométrico ou tratamento térmico. O beneficiamento do resíduo geraria aumento de gastos na produção e, por isso, seu consumo *in natura* mostra-se mais adequado, uma vez que, além de reduzir o estoque deste material indesejado do pátio da empresa, também favorece a preservação ambiental da região, com diminuição de partículas finas que podem provocar doenças respiratórias e/ou reduzir a oxigenação do solo ao limitar os vazios superficiais.

Para esta pesquisa foram realizados ensaios de caracterização química, mineralógica e geotécnica, além de avaliar a resistência mecânica ao cisalhamento direto e a capacidade de carga dos aterros compactados de solo e RPP. Os teores analisados foram estipulados como “adição do RPP em massa de material seco em solo” e estudaram-se as porcentagens de 5%, 10%, 15% e 20% de adição de RPP, além dos grupos controle de solo puro e RPP puro.

## **1.1 Objetivos da Pesquisa**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

O presente trabalho tem por objetivo avaliar a possibilidade do emprego de resíduo de polimento de porcelanato em adição a solo para execução de aterros compactados.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar geotecnicamente o solo, o resíduo de polimento de porcelanato (RPP) e misturas solo-RPP através de ensaios de massa específica dos sólidos, granulometria conjunta, granulometria a laser, limites de Atterberg e compactação;
- Caracterizar química e mineralogicamente o solo, o RPP e misturas solo-RPP por meio de análises de fluorescência de raios X, difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura;
- Analisar o comportamento mecânico do solo, do RPP e de misturas solo-RPP com ensaios de cisalhamento direto, em laboratório;
- Avaliar a capacidade de carga de solo e de uma mistura solo-RPP por meio da execução de provas de carga em placa, em laboratório, em amostras compactadas, na condição inundada.

## **1.2 Justificativa**

### **1.2.1 Ambiental**

A indústria da construção civil consome entre 20% e 50% de todos os recursos minerais explorados mundialmente e é, dentre as indústrias de transformação, a maior geradora de resíduos (Carvalho, 2013). Dados do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (ABRELPE, 2014) apontam que a produção total de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), incluindo os Resíduos de Construção e Demolição, foi de 78,6 milhões de toneladas em 2014, o que significa um aumento de 2,9% em relação a 2013. Este aumento é ainda superior à taxa de crescimento da população urbana, que foi de 0,9% no mesmo período, indicando que a geração *per capita* de RSU, no Brasil, foi de 387,63 kg/hab/ano.

A coleta dos resíduos sólidos no Brasil não é a ideal e a região nordeste apresenta o pior índice entre as regiões do país, com apenas 78,53% de todo o RSU coletado. A situação se mostra ainda mais agravante quando se verifica que apenas 41,6% desse material coletado teve destinação final adequada (ABRELPE, 2014).

A indústria cerâmica de porcelanato polido é uma indústria de transformação da construção civil que gera, por dia, mais de 30 toneladas de resíduo oriundo apenas do procedimento de polimento. Desse modo, a possibilidade de utilização do resíduo de polimento de porcelanato em aterros compactados pode se mostrar como um meio de destinação viável para este subproduto indesejável.

### **1.2.2 Econômica**

Carvalho (2013) afirma que a indústria de revestimentos cerâmicos passou por consideráveis transformações tecnológicas na última década, fato que permitiu automatizações da fabricação, redução de perdas e uniformidade dos produtos acabados. A utilização de processos controlados rigorosamente por especialistas e laboratórios também permitiu um ganho de produtividade e qualidade do material acabado (Breitenbach, 2013). Apesar de evoluído, o processo de produção de

materiais cerâmicos não consegue evitar perdas consideráveis de matéria-prima ao longo de todas as etapas (Hansen *et al.*, 2010).

A geração de resíduos não reaproveitados provoca gastos energéticos desnecessários, utilização maximizada de terreno, impactos na qualidade ambiental interna e externa às empresas (problemas respiratórios como a silicose e redução da aeração do solo, por exemplo), maior consumo de matérias-primas e maior valor de produção agregado ao produto final (Purificação, 2009; Ferraz, 2007). Logo, a reciclagem do resíduo de polimento de porcelanato em aterros compactados poderia permitir menor utilização de área de terreno pela indústria, menor impacto ambiental e melhor visibilidade da empresa perante os clientes.

### **1.2.3 Técnica**

Estudos prévios de incorporação de resíduo de polimento de porcelanato em solo laterítico para fins rodoviários mostrou que, para uma adição de 10% de resíduo, houve melhora na resistência, em comparação com o solo puro, em termos de cisalhamento direto (Araujo e Costa, 2014), índice de suporte Califórnia, compressão simples (Araujo e Costa, 2015) e compressão edométrica (Araujo, 2014).

Espera-se, portanto, que seja viável o emprego de resíduo de polimento de porcelanato em solo para a execução de aterros compactados.

## **1.3 Estrutura do trabalho**

Esta dissertação foi organizada em cinco capítulos. O primeiro deles apresenta uma breve introdução para contextualização da pesquisa, os objetivos e a justificativa do trabalho.

O segundo capítulo trata sobre a revisão da literatura concernente aos materiais cerâmicos, com ênfase no porcelanato polido, no resíduo originado pelo

polimento do porcelanato e nos trabalhos já desenvolvidos sobre o uso desse resíduo na formação de novos materiais.

O terceiro capítulo constitui a descrição dos materiais e a metodologia utilizada nos ensaios, com detalhamento do procedimento experimental adotado.

O quarto capítulo apresenta os resultados e a discussão dos dados obtidos a partir dos ensaios descritos no capítulo três.

O último capítulo expõe as conclusões obtidas das análises dos resultados, bem como oferece sugestões para futuros trabalhos.

## Capítulo 2

### Revisão da Literatura

#### 2.1 Materiais Cerâmicos

Materiais cerâmicos, de acordo com a abordagem química, são compostos inorgânicos e não metálicos, formados pela ligação interatômica predominantemente iônica – com alguma ligação covalente – entre elementos metálicos e não-metálicos (Callister, 2002).

Pela análise geral, materiais cerâmicos são aqueles cuja matéria-prima é queimada (*keramicos*, em grego), a fim de se obter propriedades desejáveis (Callister, 2002), especialmente em aspectos de dureza e resistência.

A Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres (ANFACER, 2015) afirma que “a cerâmica é o material artificial mais antigo produzido pelo homem” e que, a partir de achados arqueológicos, estima-se que a cerâmica “é produzida há cerca de 10 a 15 mil anos”. Isto foi possível devido à facilidade de produção de peças cerâmicas, uma vez que consistem, basicamente, da mistura de proporções corretas de argila e água, de modo a se obter uma massa plástica de fácil modelagem.

A argila é uma matéria prima abundante, barata, encontrada na natureza e frequentemente utilizada da mesma forma como foi extraída, isto é, sem quaisquer intervenções para a melhoria de sua qualidade. Depois de moldadas, as peças cerâmicas sofrem secagem para remover parte da umidade e, em seguida, passam por um cozimento, em altas temperaturas, de modo a melhorar a resistência mecânica sem perder a forma desejada.

Quimicamente, as argilas são aluminossilicatos, com estrutura em camadas de alumina e sílica, com água quimicamente ligada. Geotecnicamente, tratam-se de solos com granulometria inferior a 0,002 mm (ABNT, 1995).

As argilas encontradas na natureza podem estar acompanhadas de impurezas, tais como: óxidos de bário, cálcio, sódio, potássio e ferro, além de matéria orgânica (Callister, 2002), e mesmo assim podem produzir artigos de excelente qualidade. Nos últimos anos, porém, devido às competições de mercado, a indústria cerâmica adotou a produção em larga escala e a introdução de técnicas de gestão, como o controle das matérias-primas e a dosagem em massa.

Para fins industriais, são realizadas algumas alterações químicas de modo a se obter produtos com qualidades desejadas a menores custos e, assim, podem ser adicionados alguns componentes não-plásticos às argilas. Como exemplos desses componentes pode-se citar o quartzo, que serve como material barato de enchimento ou carga, é relativamente duro, tem elevada temperatura de fusão e é quimicamente não-reativo com as argilas e os fundentes, como o feldspato e aluminossilicatos com íons  $K^+$ ,  $Na^+$  e  $Ca^+$ , cuja função é reduzir a temperatura de fusão da peça, formando um vidro (Callister, 2002), de modo a obter economia no aquecimento. As características da peça acabada dependem das proporções de argila, quartzo e fundentes utilizadas e, em aspectos de microestrutura, tem-se uma fase cristalina minoritária imersa em uma fase vítrea (Bernardín *et al.*, 2006a; 2006b).

Até a década de 60, materiais cerâmicos produzidos com nenhum ou pouco tratamento eram conhecidos como “cerâmicas tradicionais”, mas a partir do final do século XX pesquisas auxiliaram a compreender os processos e fenômenos que ocorrem nas cerâmicas e que lhes garante determinadas propriedades (Callister, 2002). Assim, outras indústrias passaram a utilizar materiais cerâmicos de alta pureza como componentes eletrônicos ou como peças aeroespaciais (ANFACER, 2015). Desse modo, os materiais cerâmicos passaram a ser divididos em seis grandes grupos de aplicação, com alguns subgrupos, conforme apresentado na Figura 2.1.

Os materiais cerâmicos relevantes para este trabalho são os “produtos argilosos estruturais” e os “abrasivos”. Os produtos argilosos estruturais são também conhecidos como produtos de “cerâmica vermelha”, como tijolos, telhas, azulejos, tubulações de esgoto e porcelanatos (cujo resíduo do polimento é utilizado na pesquisa). Para a moldagem desses produtos argilosos há a conformação de uma massa formada pela mistura de argila e água e, posteriormente, a queima.

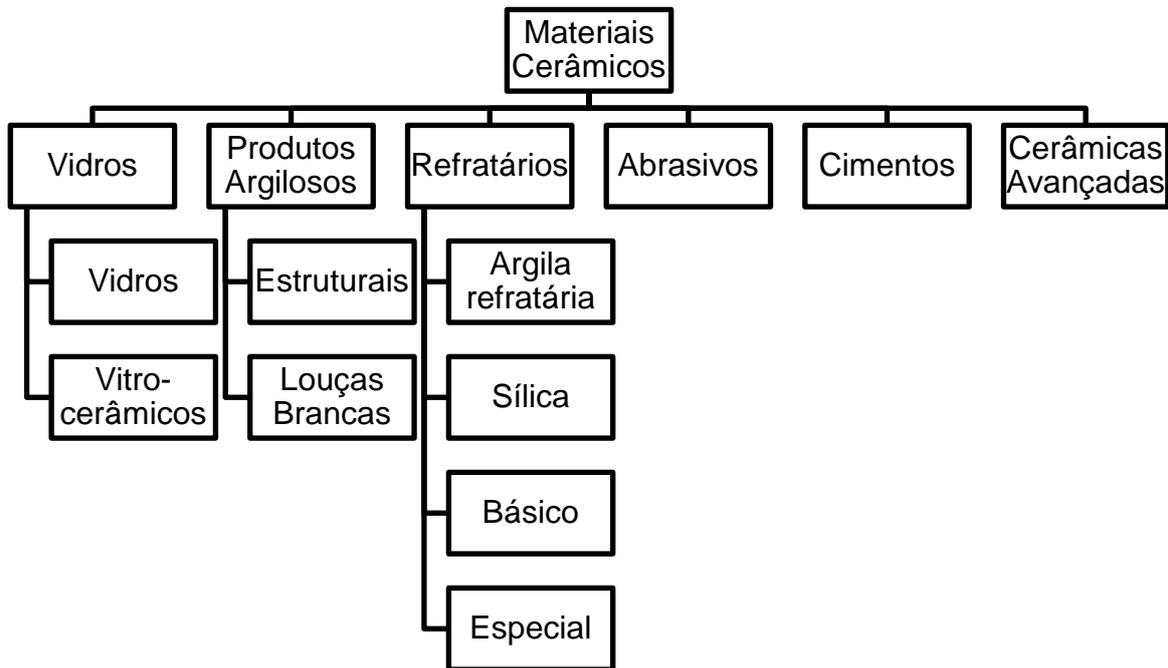


Figura 2.1 – Grupos e subgrupos dos materiais cerâmicos.

Fonte: Adaptado de Callister (2002).

Os materiais cerâmicos abrasivos são destinados a polir, esmerilhar ou cortar outros materiais menos duros e, portanto, têm que ter dureza elevada, alta tenacidade e devem resistir às altas temperaturas geradas pelo atrito. O diamante é um abrasivo amplamente conhecido, mas muito caro e, por isso, sua substituição pelas cerâmicas abrasivas torna o processo industrial menos oneroso. As cerâmicas abrasivas mais comuns são carbeto de tungstênio, óxido de alumínio (coríndon), areia de sílica e carbeto de silício. Este último é o mais leve, mais duro, apresenta excelente condutividade térmica, baixa expansão térmica e é muito resistente aos ácidos e lixívia (Ceramtec, 2015) e é o abrasivo utilizado no processo de polimento do porcelanato cujo resíduo é utilizado neste trabalho, conforme será explicado no item 2.2.2 adiante.

## 2.2 Porcelanato Polido

Dentre todos os tipos de materiais cerâmicos, os produtos argilosos estruturais são os que apresentam maior utilização no mercado da construção civil. Neste mercado existem dois tipos principais de porcelanatos: i) esmaltados, que recebem uma camada de tinta antes da queima; e ii) polidos, que recebem uma abrasão em sua superfície após a queima.

Na última década, os porcelanatos polidos se destacaram como o produto cerâmico de revestimento com o maior crescimento de vendas a nível global (Rambaldi, 2007), impulsionado principalmente por seu alto padrão de acabamento, baixa absorção de água, baixa porosidade, alta dureza, alta resistência ao ataque químico, resistência ao congelamento, resistência à compressão, isolamento a descargas elétricas estáticas e aparência semelhante a pedras naturais (Heck, 1996; Silva, 2005; Souza, 2007; Kummer *et al.*, 2007).

Segundo a Norma ISO13006/NBR13818 (ABNT, 1997), o porcelanato é um produto cerâmico do tipo “Bia”, isto é, prensado, de alta resistência e com absorção de água de até 0,5%. Segundo Callister (2002), a prensagem ocorre por meio da compactação na pressão desejada de uma massa pulverizada com pequena quantidade de água ou outro elemento aglutinante. Os vazios são reduzidos por meio de proporções adequadas de partículas mais finas e partículas maiores, de modo que o encaixe entre elas seja o mais otimizado possível.

### 2.2.1 Etapas de produção do Porcelanato Polido

As sete etapas de produção do porcelanato polido estão descritas a seguir e tanto as etapas (Rosso *et al.*, 2005) como as respectivas perdas de material (Hansen *et al.*, 2010) durante parte do processo produtivo estão explicitadas na Figura 2.2.

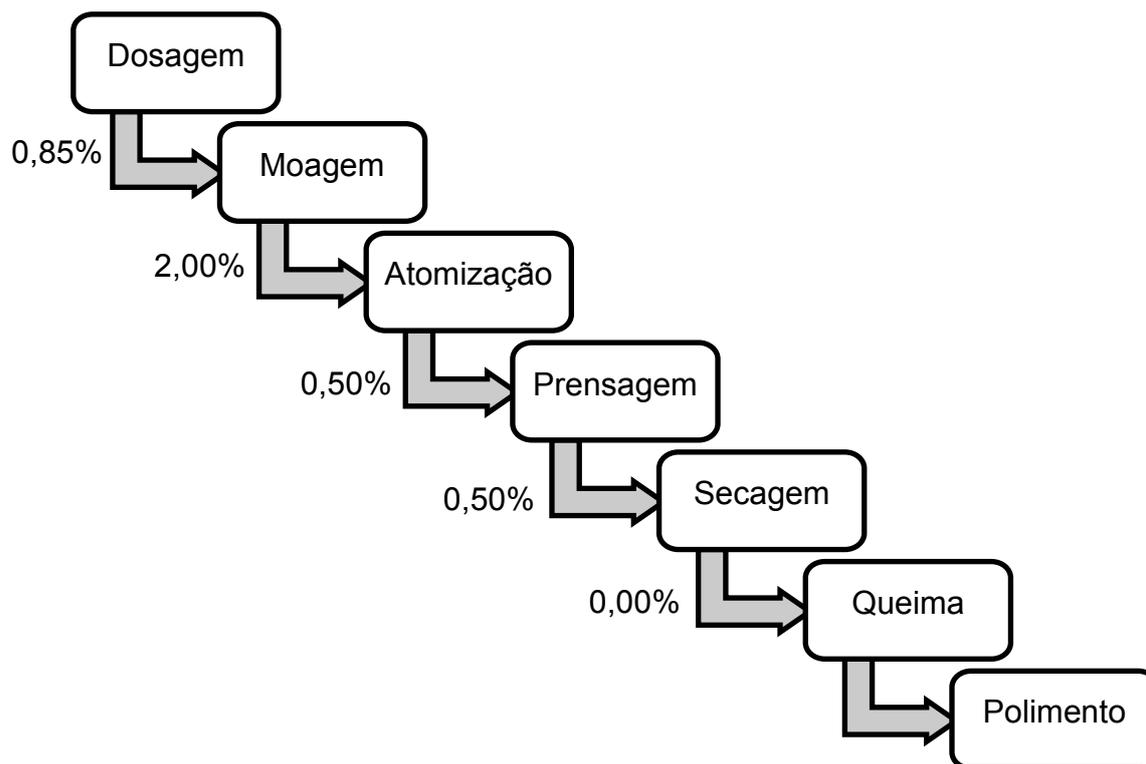


Figura 2.2 – Etapas de produção do porcelanato polido e respectivas perdas.

Adaptado de: Rosso *et al.* (2005) e Hansen *et al.* (2010).

A dosagem do material é uma das etapas mais importantes para a qualidade do produto resultante, uma vez que é necessário obter argilas, quartzo e fundentes de jazidas confiáveis e realizar as dosagens em proporções, em massa, pré-determinadas, de modo a se obter, ao final, peças resistentes e com padrões de cores semelhantes.

A moagem ocorre em grandes moinhos de bola e tem a função tanto de proporcionar elevada finura do material, quanto homogeneizar as amostras, para que o produto final não tenha tanta diferenciação de cores. Nesta etapa, é adicionada água ao material, e por isso a mistura passa a ser chamada de barbotina. Caso seja necessário, é nesta etapa que se realiza a coloração da barbotina.

Rosso *et al.* (2005) afirmam que “uma moagem não eficiente poderá comprometer a reatividade da massa durante a queima”, o que poderia provocar o desprendimento das partículas durante o polimento. Logo, deve ser realizado um

controle de qualidade da moagem por meio de ensaios de densidade, viscosidade, resíduo de barbotina e peneiramento.

A atomização consiste em transformar a barbotina em pó, reduzindo a umidade do material. Para isso, são utilizados queimadores.

As prensas realizam duas funções principais: conformar a peça uniaxialmente nas dimensões próximas às de comercialização e aplicar pressões tais que a porosidade interna da peça seja a mínima possível. As pressões costumam variar entre 400 kgf/cm<sup>2</sup> a 500 kgf/cm<sup>2</sup> e devem ser aplicadas uniformemente, a fim de evitar deformações.

Após a prensagem, as peças apresentam o formato adequado, mas a quantidade de água ainda é elevada, em torno de 10% de umidade. Para evitar a formação abrupta de bolhas de vapor e consequentes defeitos, o material é levado inicialmente para secadores, a fim de perder a umidade. A secagem ocorre em temperaturas inferiores a 1000°C. Indústrias cerâmicas tradicionais (telhas e tijolos) também fazem uso de secagem ao sol. Após a secagem as peças aparentam ter resistência elevada, mas ainda são capazes de serem quebradas com a força das mãos.

Com a umidade reduzida ao mínimo, as peças são encaminhadas aos fornos contínuos, para serem queimadas (ou cozidas) e, assim, obterem a máxima densificação da massa. Callister (2002) afirma que “durante a queima a peça moldada sofre redução da porosidade e melhoria da integridade mecânica por meio da coalescência das partículas de pó”. Durante este estágio de sinterização, as partículas que, após prensagem, apenas se tocavam, passam a se unir por um empescoçamento (Figura 2.3) e os poros assumem formas mais esféricas.

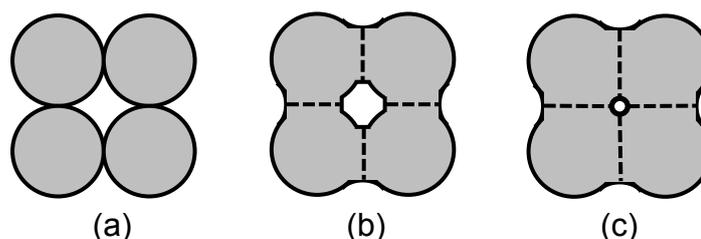


Figura 2.3 – alterações microestruturais que ocorrem durante o cozimento das peças cerâmicas. (a) Partículas de pó após prensagem; (b) coalescência das partículas e

formação de poros com o início da sinterização; (c) com progressão da sinterização os poros mudam de tamanho e forma.

Fonte: Adaptado de Callister (2002).

A etapa de polimento é obrigatória para os porcelanatos polidos e consiste em submeter a peça a equipamento dotado de cabeças polidoras com tijolos abrasivos. Tal equipamento realiza movimento de rotação em alta velocidade controlada, com resfriamento e limpeza por água, de modo a permitir que a peça apresente brilho, ao final. Cada peça passa por três equipamentos, com diferentes granas de cabeças polidoras. Na primeira, as granas grossas nivelam a peça; na segunda, as granas intermediárias removem os riscos deixados pelas granas grossas; e na terceira ocorre o polimento propriamente dito, em que as granas mais finas propiciam o brilho na superfície. Estima-se que, ao final do polimento, a peça tenha perdido cerca de 5 mm de sua cobertura.

### **2.2.2 Processo Produtivo do Porcelanato Polido em Conde-PB**

O processo de produção do porcelanato polido segue a sequência básica indicada no item 2.2.1 deste trabalho, mas cada indústria tem suas particularidades, como será apresentado a seguir.

Inicialmente, um laboratório interno simula todo o processo produtivo e testa a matéria-prima, a fim de identificar se ela atende aos padrões de acabamento da peça. Somente então é estabelecida a seleção da jazida e a formulação do material.

No processo de dosagem, a indústria localizada em Conde-PB coleta caulinita e feldspato do tipo albita em jazidas próprias, localizadas no interior do terreno da fábrica, por meio de caminhões. Pás carregadeiras encaminham este material, já seco ao ar, de baias no interior do galpão de produção para as balanças de dosagem, conforme Figura 2.4. Este material selecionado, juntamente com um processo produtivo altamente controlado, permite, ao final, que se obtenha um produto com absorção de água de 0,01%, bem inferior ao recomendado pela NBR 13818 (ABNT, 1997).



Figura 2.4 – Matéria-prima separada em baias.

Fonte: Souza (2007).

A moagem é realizada em moinho de bolas de porcelanato, que permanece em funcionamento entre 9h e 12h para cada amostra (Figura 2.5), e a barbotina não recebe coloração adicional. A peça final tem a coloração da matéria-prima queimada que lhe deu origem e a cor é uniforme tanto na base quanto no centro e na superfície da peça, uma vez que se trata de um porcelanato não esmaltado (mas polido).



Figura 2.5 – Moinhos de bola.

Fonte: Souza (2007).

Antes de ser encaminhada para o atomizador (Figura 2.6), a massa passa por oito peneiras de mesma granulometria, bastante fina, de modo a reter o material grosso e obter um material homogêneo.



Figura 2.6 – Atomizador.

Fonte: Souza (2007).

O material pulverulento atomizado é transportado por esteiras rolante aéreas até a prensa hidráulica uniaxial (Figura 2.7), que aplica pressão de 350 kgf/cm<sup>2</sup>. O material conformado segue para a secagem em ambiente interno.

Do secador, as peças são encaminhadas para o forno a gás, contínuo, com 140 m de extensão. Nele, o produto permanece por cerca de 45 minutos, desde a entrada até a saída, sob temperatura de 1320°C, a fim de obter a resistência e porosidade desejadas. A Figura 2.8 apresenta o aspecto externo do forno.



Figura 2.7 – Prensa.

Fonte: Souza (2007).



Figura 2.8 – Forno.

Fonte: Souza (2007).

Após a queima, as peças são direcionadas para equipamentos polidores (Figura 2.9), onde sofrerão esmerilhamento por tijolos abrasivos com diferentes granas. Cada tijolo abrasivo é constituído por partículas de carbeto de silício aglomeradas por cimentos. Nesta indústria específica, parte dos abrasivos é comprada da China e outra parte é de fabricação própria. A primeira parte do polimento ocorre com granas de 100 *mesh* a 200 *mesh*. A segunda parte ocorre em

granas com 240 *mesh* a 700 *mesh* (Figura 2.10). A última etapa do polimento ocorre com granas superiores a 800 *mesh*.



Figura 2.9 – Equipamentos polidores.

Fonte: Souza (2007).



Figura 2.10 – Equipamento polidor com 6 cabeças polidoras (tijolos abrasivos).

Fonte: Souza (2007).

Durante o polimento, a quantidade de água utilizada por peça é elevada – de aproximadamente 4.000 l – , e sua temperatura, após o polimento, encontra-se ligeiramente acima da convencional e, por isso, há necessidade de recirculação em circuito fechado, para que seja realizado tratamento químico e físico e haja reaproveitamento do líquido na própria produção. Para isso, a lama que compõe o resíduo do polimento de porcelanato é direcionada por tubos para o exterior do galpão de produção. Então, a lama é comprimida em uma prensa de modo que o pó úmido forme uma placa retangular (Figura 2.11) e a água seja captada por tubos e valas (Figura 2.12) e, a partir daí, siga para o tratamento. As placas retangulares são liberadas em leiras, que posteriormente são transportadas para terrenos a céu aberto onde sofrerão secagem ao ar (Figura 2.13).



Figura 2.11 – Liberação em leira, pela prensa, de placa de resíduo úmido comprimido.

Fonte: Do autor.



Figura 2.12 – Água removida de resíduo sendo encaminhada para tratamento.

Fonte: Do autor.



Figura 2.13 – Leiras de resíduo a céu aberto.

Fonte: Do autor.

### 2.3 Resíduo de Polimento de Porcelanato (RPP)

Segundo a *Política Nacional de Resíduos Sólidos* (Brasil, 2010), resíduo sólido é todo “material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade cuja destinação final se procede [...] no estado sólido, semissólido, gases em recipientes ou líquidos, cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d’água, ou exijam, para isso, soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível”. Como visto anteriormente na Figura 2.2, o processo de produção de materiais cerâmicos favorece a geração e o descarte de subprodutos ao longo de todas as etapas, mas a fase de polimento é, sem dúvidas, responsável pela maior quantidade de resíduos gerados.

Breitenbach (2013) define o RPP como sendo “uma mistura de material cerâmico resultante do polimento e de material abrasivo desprendido durante o processo”. Devido ao uso de água no processo de polimento, a mistura de material pulverulento e água forma uma lama (Rambaldi *et al.*, 2007), que, após seco e destorroado, resulta em um pó de coloração branca.

Apesar de seu potencial como matéria-prima alternativa, o RPP é usualmente descartado em aterros, o que pode ocasionar elevados custos por perdas, necessidade de manter grandes áreas ocupadas com material de descarte, possibilidade de originar problemas ambientais pelo transporte aéreo de material pulverulento, contaminação do solo, do lençol freático e da vegetação local (Breitenbach, 2013). Desse modo, a reutilização e a reciclagem são soluções possivelmente adequadas para promover melhor destinação do resíduo. Soluções viáveis necessitam ser criadas em curto prazo, dado que a quantidade de porcelanato polido comercializado, em porcentagem de todos os materiais cerâmicos produzidos, passou de aproximadamente 54% em 2003 para mais de 73% em 2010 apenas na Itália, que é o terceiro maior exportador mundial deste produto (ANFACER, 2015).

Estudos indicaram que a reciclagem do RPP para reaplicação em massas cerâmicas era inviável por liberar gases durante a queima, elevando a quantidade de vazios e respectiva absorção de água das peças (Bernardin *et al.*, 2006; Marques *et*

*al.*, 2007; Kummer *et al.*, 2007). Isto significa que a busca de outras aplicações, como, por exemplo, em aterros compactados, pode ser correspondente com as necessidades de melhores destinações de resíduo pelas indústrias.

### 2.3.1 Química do RPP

O RPP é constituído pela mistura de material cerâmico originado do porcelanato polido e por material abrasivo desgastado durante o processo de produção.

O material cerâmico que compõe o porcelanato é uma mistura de argilas, feldspatos, quartzo e, às vezes, caulins. Rosso *et al.* (2005) e Pureza (2004) descrevem as funções de cada elemento do material cerâmico: as argilas têm o papel de promover a plasticidade e capacidade de conformação das peças; os feldspatos e materiais alcalino e alcalino-terrosos funcionam como fundentes, proporcionando maior densificação das peças, uma vez que se tornam líquidos nas primeiras fases de queima do material; o quartzo funciona como material de carga, tornando o processo produtivo mais barato e a conformação mais estável, pois reduz a plasticidade e a contração na secagem; e os caulins também podem vitrificar durante a queima, formando vidros sílico-aluminosos, ou formar mulita ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) com desenho de agulhas, que trabalham como um esqueleto para a peça, favorecendo um aumento na resistência mecânica. Silva (2005) afirma que o caulim também auxilia na brancura do produto acabado.

O material abrasivo é composto por carbeto de silício aglomerado, em geral, com cimento à base de cloreto magnésiano, de modo a proporcionar alta qualidade de abrasão sem desprendimento elevado de partículas (Breitenbach, 2013).

Assim, a análise química do resíduo de polimento de porcelanato apresenta elevada quantidade de sílica – oriunda tanto do porcelanato e do abrasivo (na forma de carbeto de silício) –, de alumina (proveniente do porcelanato) e de óxido de magnésio – quando existente (associado ao cimento magnésiano desgastado do abrasivo) – (Marques *et al.*, 2007). O RPP apresenta ainda baixa quantidade de óxidos fundentes em sua composição, provenientes da peça de porcelanato.

As fases cristalinas do RPP, na literatura, indicam picos de mulita, quartzo, carbeto de silício (SiC) e periclase (MgO), sendo a mulita e o quartzo provenientes, possivelmente, do porcelanato, enquanto SiC e MgO são relacionados à fase cimentante da matriz do abrasivo (Marques *et al.*, 2007).

O resíduo analisado por Kummer *et al.* (2007) indica, pelo ensaio de solubilização, a classificação como Classe IIa (não perigoso, mas não inerte) devido à concentração de alumínio no extrato se situar acima do limite estabelecido pela norma NBR 10004 (ABNT, 2004).

### **2.3.2 Estudos da utilização de RPP para formação de novos materiais**

O porcelanato é um produto com criação relativamente recente, datada de meados da década de 80 (Heck, 1996). Por essa razão, os primeiros trabalhos publicados em periódicos ou repositórios, referentes a este produto cerâmico, sintetizam apenas o processo industrial de produção. Relevantes para esta pesquisa, 26 trabalhos foram identificados até o momento, sendo aproximadamente 90% deles de autores brasileiros, 7% de autores chineses e 3% de autores italianos, de modo que três dos cinco maiores exportadores mundiais de porcelanato demonstram preocupação quanto ao uso e destino do resíduo gerado na produção.

De todos os trabalhos, apenas 15 são artigos, sendo somente 40% destes publicados em revistas internacionais. Dos demais trabalhos, cinco utilizaram o resíduo de polimento de porcelanato oriundo da mesma indústria de onde foi coletado o estudado no presente trabalho. Duas dessas teses, inclusive, geraram patentes.

Quatro trabalhos não realizaram ensaios com misturas, mas apresentaram resultados qualitativos de importância fundamental para o entendimento do comportamento do RPP.

Heck (1996) expõe as características e uma breve discussão do processo produtivo, a partir de observações diretas em uma indústria de porcelanato polido. No ano seguinte, a Associação Brasileira de Normas Técnicas publicou a primeira norma tratando sobre aspectos do porcelanato e outros produtos cerâmicos,

conferindo-os uma classificação a partir do teor de absorção de água (NBR 13818 – ABNT, 1997).

Em 2002, Bittencourt e Benincá (2002) apresentaram, assim como Heck (1996), o processo produtivo do porcelanato polido, mas estudaram as possíveis influências na estética e porosidade do produto ao variar o tipo de abrasivo utilizado, a qualidade e quantidade de água, e a pressão e a velocidade do polimento. Identificaram, então, que quanto mais homogêneo o abrasivo, mais brilhosa e menos riscada era a superfície do produto acabado. Águas menos contaminadas e em maiores quantidades forneciam peças com melhor acabamento. Maiores pressão e velocidade dos abrasivos aumentava o brilho, mas também aumentava a porosidade na superfície.

Rosso *et al.* (2005) foram os primeiros autores a pesquisar as características químicas e mineralógicas do porcelanato polido e identificaram que cada componente (argila, quartzo e fundentes) cumpriam papéis essenciais no comportamento do produto acabado, conforme já apresentado no item 2.3.1.

Hansen *et al.* (2010) estudaram as perdas que ocorriam no processo produtivo de fabricação do porcelanato, mas não obtiveram resultados quanto ao processo de polimento, uma vez que preferiram priorizar o acabamento por esmaltação.

Nos demais trabalhos, os autores utilizaram diferentes porcentagens de RPP em materiais específicos como cerâmicas, concreto e solo, por exemplo (Figura 2.14). Uma análise desta figura enfatiza que a maior parte das pesquisas conduzidas até o momento envolvem materiais cimentícios, isto é, 15% em argamassas e 18% em concretos, seguida por materiais cerâmicos (18% em cerâmicas vermelhas queimadas e 11% em cerâmica celular e material de isolamento). Apesar de a aplicação em solo corresponder a 15% das publicações onde houve misturas com RPP, todos os trabalhos publicados foram resultados de uma mesma pesquisa.

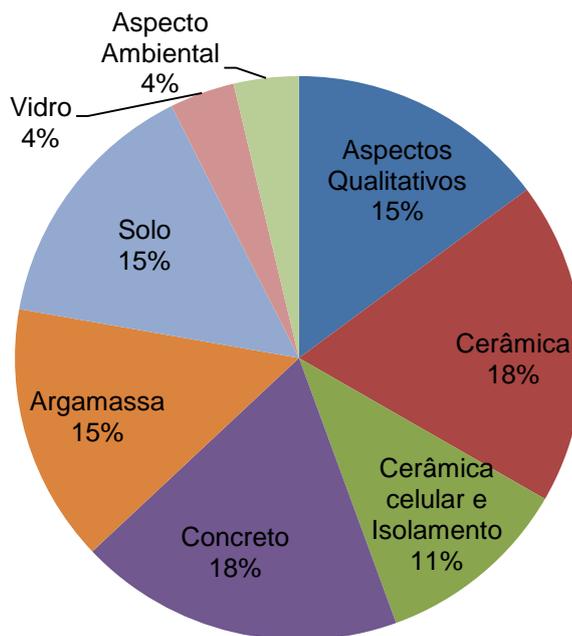


Figura 2.14 – Aplicações do RPP nos diferentes estudos.

Fonte: Do autor.

Pureza (2004), Rambaldi *et al.* (2007), Marques *et al.* (2007), Kummer *et al.* (2007) e Silva (2012) utilizaram o RPP como parte da composição de peças cerâmicas submetidas a secagem e queima. As porcentagens de RPP utilizadas variaram de 1% a 69%. Todos os estudos apresentaram análises em relação à temperatura de queima das peças e a algum tipo de resistência mecânica do produto sinterizado. Nos cinco trabalhos, os autores concluíram que a inserção de RPP ajudou a reduzir a temperatura de queima, provocou diminuição na densidade das peças e não mostrou respostas significativamente diferentes na resistência mecânica em relação ao grupo controle. Desse modo, cada autor determinou qual seria a porcentagem ideal de adição de RPP e estes valores foram próximos ou iguais aos máximos utilizados no procedimento experimental na maioria deles.

Assim, para Pureza (2004) e Marques *et al.* (2007), o teor ótimo era o máximo estudado de 5%. Para Rambaldi *et al.* (2007), 10%, mas 15% também apresentou valores melhores do que o do material puro. Para Kummer *et al.* (2007) o melhor teor considerado foi 23%, uma vez que acima deste valor havia elevada formação de

vazios e lixiação de alumínio acima do permitido em norma. Para Silva (2012), a melhor porcentagem foi a máxima utilizada de 12,5%.

Bernardín *et al.* (2006a; 2006b) e Ji *et al.* (2015) perceberam que a queima do resíduo de polimento de porcelanato a temperaturas a partir de 1000°C provocava a decomposição do carbeto de silício (SiC), proveniente do resíduo, em sílica (SiO<sub>2</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). O CO<sub>2</sub>, ao evaporar, gerava elevada quantidade de poros no interior das peças cerâmicas e, o que era ruim para a indústria cerâmica vermelha, poderia ser benéfico para a indústria de isolamentos acústicos e térmicos. Todos os autores perceberam que quanto maior a inserção de RPP, maior a quantidade de ar aprisionado obtido. Assim, para Bernardín *et al.* (2006a; 2006b), a porcentagem máxima foi de 12% de adição de RPP e Ji *et al.* (2015), baseado na pesquisa de Bernadín *et al.* (2006a), conseguiram obter um novo material de isolamento utilizando 100% de RPP queimado a 1200°C.

O vidro, que também é um material cerâmico, foi estudado por Ferraz (2007), utilizando o RPP como material de partida. A partir desse vidro, foram produzidas as fritas (vidro pré-fundido, moído), que são elementos de interesse para indústrias cerâmicas de porcelanato esmaltado. A melhor porcentagem encontrada pelo autor foi de 50% de RPP em mistura e foi gerada uma patente com este teor.

A utilização de RPP em argamassa e concreto assemelha-se ao que seria desenvolvido com solo, dado que o material não sofre ação de elevadas temperaturas após moldagem. Entretanto, deve-se observar que reações químicas podem ocorrer entre o RPP e a pasta de cimento, uma vez que ambos os materiais são ricos em finos e o tempo de pega do concreto pode ser acelerado ou retardado quando são colocadas adições minerais.

Santos (2008), Pelisser *et al.* (2012) e Steiner (2014) estudaram a possibilidade de redução do consumo de cimento ao adicionar RPP à pasta da argamassa como componente do cimento. Os resultados dos autores apontaram que o RPP gerou reação pozolânica e funcionou como *filler*. Houve redução no índice de consistência, aumento da coesão da argamassa, mas perda de resistência à tração na flexão e à compressão. Mesmo assim, Santos (2008) e Pelisser *et al.* (2012) julgaram 20% de RPP em adição ao cimento como sendo a melhor porcentagem. Steiner (2014) apresentou que 25% era o melhor teor em ganho de

resistência à compressão e 40% o teor que mais ajudou a reduzir a retração autógena.

Breitenbach (2013) também estudou a adição de RPP em argamassa, mas como componente substituinte de parte do agregado (areia). Foi identificado que a substituição de 10% da areia por RPP fornecia maior estabilidade na retração; 15% de RPP proporcionou melhor densidade aparente do concreto no estado fresco; e 20% gerou um comportamento satisfatório de resistência à compressão, tração na flexão e aderência à base. Assim, a escolha da melhor porcentagem a partir do embasamento teórico dependerá da aplicação pretendida para o material.

Os trabalhos de Silva (2005), Souza (2007), Purificação (2009), Carvalho (2013) e Yunhong *et al.* (2014) utilizaram o RPP como parte componente da fabricação de concreto. As conclusões obtidas são compatíveis com os resultados dos trabalhos que utilizaram RPP em argamassa, dado que houve atividade pozolânica com o RPP, a consistência aumentou, reduzindo a exsudação e houve melhora na durabilidade, com redução da porosidade e da absorção do concreto.

Silva (2005) utilizou teores de 10% e 20% de resíduo em relação à massa de cimento e avaliou diversas características no concreto fresco e no concreto endurecido, sendo que 10% de RPP apresentou os melhores resultados para ambos os estados simultaneamente. Souza (2007) realizou diversos ensaios no concreto fresco e no concreto endurecido, com e sem utilização de aditivo plastificante e, para o aspecto de resistência à compressão, observou o teor de 40% de RPP, sem aditivo, como sendo o que alcançou os melhores resultados.

Purificação (2009) e Carvalho (2013) utilizaram o concreto com adição de RPP para a produção de concreto intertravado. O primeiro verificou que a substituição de 20% do volume de cimento por RPP provocou maior resistência à compressão simples. Já Carvalho (2013) encontrou maiores valores de resistência à compressão simples quando substituiu parte da areia por RPP e a melhor porcentagem foi 30%.

Yunhong *et al.* (2014) substituíram parte do cimento por RPP, nas proporções 10%, 20%, 30% e 40%, a fim de estudar a resistência do concreto à corrosão por carbonatos e sulfatos. Não houve melhora na resistência à corrosão por carbonatos

em quaisquer dos teores, mas o teor de 40% apresentou-se como o melhor na resistência ao ataque de sulfatos.

Araujo (2014) e Araujo e Costa (2014; 2015) estudaram a adição de RPP a solo em proporções que variaram de 5% a 50% de adição em massa seca, para verificar o índice de suporte Califórnia, a resistência à compressão confinada, a resistência à compressão simples e ao cisalhamento direto. Para todos os testes executados houve melhora na resistência das misturas, em relação ao solo puro, sendo o teor de 10% o que apresentou os valores mais elevados.

Alguns autores, em suas sugestões, propõem que sejam realizados ensaios para a verificação da viabilidade ambiental de utilização do RPP. Costa (2010) executou um estudo ecotoxicológico para possível valorização do resíduo, com a lama *in natura*, sobre microcrustáceos, minhocas e sementes de rúcula. Costa (2010) realizou ainda coleta de extrato lixiviado com subsequente análise química. As minhocas foram os únicos seres afetados com toxicidade crônica para longevidade, crescimento e reprodução. As sementes de rúcula apresentaram um crescimento ligeiramente inferior ao do grupo plantado em hidroponia. Logo, concluiu-se que o RPP, em seu estado puro, apresentou toxicidade aguda nula ou baixa, o que representa uma valorização para sua reutilização ou reciclagem em novos materiais.

A Tabela 2.1 sumariza as melhores porcentagens de adição de RPP obtidas pelos autores citados, em função de cada tipo de novo material estudado. Há necessidade de avaliar os resultados apresentados na Tabela 2.1 com ressalvas, uma vez que algumas das porcentagens utilizadas pelos autores foram realizadas com *substituição* e/ou por *volume*, enquanto neste trabalho a incorporação de RPP dar-se-á por *adição* em *massa seca* de material.

É importante salientar também que alguns autores realizaram ensaios que envolviam a queima do material e que esta etapa não estará presente na execução de aterros compactados. Logo, ainda que a porcentagem de 100% de RPP seja selecionada e ensaiada nesta dissertação, sua função é, principalmente, a análise como um grupo controle, sem expectativa de que o material puro apresente altos valores de resistência.

Material	Autor	Porcentagem de RPP mais adequada	Comentários
Cerâmica	Pureza (2004)	5%	Todos os materiais foram submetidos à queima. RPP provocou redução da temperatura de queima, menor densidade e pouca variação da resistência mecânica.
	Rambaldi <i>et al.</i> (2007)	10%	
	Marques <i>et al.</i> (2007)	5%	
	Kummer <i>et al.</i> (2007)	23%	
	Silva (2012)	12,5%	
Cerâmica celular e isolamento	Bernardín <i>et al.</i> (2006a; 2006b)	12%	A queima do RPP libera CO <sub>2</sub> que provoca aumento de poros no material. Este comportamento é adequado para uso do material em isolamentos termo-acústicos.
	Ji <i>et al.</i> (2015)	100%	
Vidro	Ferraz (2007)	50%	O uso de RPP para produção de fritas (vidros pré-fundidos, moídos), permitiu a geração de patente com este trabalho.
Argamassa	Santos (2008)	20%	Breitenbach substituiu parte da areia por RPP, enquanto os outros autores substituíram parte do cimento. O RPP gerou reação pozolânica. Não houve aumento da resistência à compressão e à flexão em quaisquer dos casos.
	Pelisser <i>et al.</i> (2012)	20%	
	Steiner (2014)	25%	
	Breitenbach (2014)	20%	
Concreto	Silva (2005)	10%	Cada autor pesquisou aspectos variados sobre o concreto, mas, em comum, pode-se concluir que as porcentagens mais adequadas (entre 10% e 40%) proporcionaram aumento na resistência à compressão, atividade pozolânica, menor exsudação, menor porosidade e menor absorção do concreto.
	Souza (2007)	40%	
	Purificação (2009)	20%	
	Carvalho (2013)	30%	
	Yunhong <i>et al.</i> (2014)	40%	
Solo	Araujo (2014)	10%	Estudo da adição de RPP em solo laterítico para aplicações rodoviárias. Houve aumento da resistência mecânica e possibilidade de utilização da mistura com adição de 10% como material de reforço de subleito.
	Araujo e Costa (2014; 2015)	10%	

Tabela 2.1 – Quadro-resumo da aplicação de RPP para formação de novos materiais por diversos autores e a porcentagem de RPP aplicada mais adequada.

(OBS.: quando um mesmo autor encontrava mais de um resultado, foi considerado aquele obtido em ensaio de resistência à compressão.).

Fonte: Do autor.

A observação da Tabela 2.1 indica que a maior parte dos melhores resultados obtidos nos trabalhos apresentados envolvem a utilização entre 5% e 20% de RPP nas misturas. Portanto, a faixa de adição de RPP em solo a ser utilizada nesta pesquisa estará próxima da verificada pelos diversos autores, como pode ser visto no item 3.3.

## Capítulo 3

### Materiais e Métodos

#### 3.1 Solo

O solo utilizado nesta pesquisa é oriundo de área rural do município de São José de Mipibu, região metropolitana de Natal – RN, nas coordenadas 6°04'55.8"S, 35°13'17.3"W. Este solo apresenta semelhança com jazidas localizadas em Conde-PB, próximas à fábrica de porcelanato e já foi utilizada como material para execução de aterros rodoviários. A amostra foi coletada deformada, por meio de pás.

O solo coletado encontrava-se, inicialmente, em uma região mais elevada do terreno (Figura 3.1). Tal região havia sido escavada por retroescavadeira, tendo parte do material sido deixado em leira na área frontal da encosta, e este material foi então coletado, a cerca de 1,0 m do nível do terreno.



Figura 3.1 – Local da coleta.

Fonte: Do autor.

Uma análise visual do material permite identificar que este tem coloração avermelhada, com partículas granulares e finas e torrões de aproximadamente 100 mm de diâmetro. Segundo o mapa de solos do Brasil (EMBRAPA, 1982 *apud* Ker,

1997), nesta região predomina solo classificado como Latossolo Amarelo (Figura 3.2)..



Figura 3.2 – Distribuição de Latossolos Amarelos no Brasil.

Fonte: EMBRAPA (1982) *apud* Ker (1997).

Latossolos são assim nomeados a partir da análise química e mineralógica do material. Trata-se de solos altamente evoluídos, laterizados, ricos em argilominerais 1:1 (caulinita) e óxidos de ferro e alumínio. São característicos de solos de regiões tropicais e úmidas, onde o intemperismo é mais intenso. EMBRAPA (1988, *apud* Ker, 1997) afirma, entre outros aspectos, que os latossolos apresentam textura mais fina do que arenosa, com baixos teores de sílica numa relação silte/argila menor que 0,7 e relação molecular sílica/alumina ( $k_f$ ) menor do que 2,2.

Na região em estudo, os latossolos amarelos normalmente se formam de sedimentos do Grupo Barreiras e são solos profundos, caulíníticos e com coesão elevada, esta devido, principalmente, ao arranjo microscópico das partículas (Ker, 1997). Durante a coleta do material a coesão elevada deste latossolo pôde ser observada.

## **3.2 Resíduo de Polimento de Porcelanato (RPP)**

O RPP utilizado neste estudo foi coletado em uma indústria de porcelanato polido localizada no município de Conde-PB. É uma fábrica em expansão, com produção atual diária de 15.000 m<sup>2</sup> de peças prontas para comercialização. Devido à intensa atividade, o volume gerado de resíduos do polimento também é significativo e varia entre 30 e 35 toneladas de lama por dia, segundo informações da própria fábrica. Tais valores são compatíveis com os apresentados por Souza (2007), Silva (2012) e Breitenbach (2013).

### **3.2.1 Coleta do RPP**

O resíduo coletado estava localizado em leira imediatamente abaixo da prensa de compressão do resíduo úmido, indicando que o material havia sido gerado pela produção de até, no máximo, 8 horas antes da coleta. A leira possuía altura aproximada de 1,80 m e, a cada 15 minutos, a prensa liberava novas placas retangulares de resíduo comprimido sobre a leira. A coleta foi realizada seguindo-se a recomendação da norma NBR 10007 (ABNT, 2004).

A leira foi dividida imaginariamente em três camadas de aproximadamente 0,6 m cada (Figura 3.3), e o material foi coletado por meio de pá apenas pela parte frontal, igualmente nas três camadas, pois o acesso às laterais e à parte posterior era impedido por paredes. Cerca de 900 kg de material úmido foi coletado e armazenado em sacos identificados com o nome do responsável pela coleta daquele material, a posição do material na leira (topo, meio ou base) e o número sequencial do saco, e todos foram selados com lacre plástico.



Figura 3.3 – Leiras de resíduo a céu aberto.

Fonte: Do autor.

### 3.3 Programa Experimental

Os procedimentos e ensaios de caracterização e resistência mecânica dos materiais utilizados nesta pesquisa serão apresentados nos tópicos seguintes.

Os materiais ensaiados foram divididos em dois grupos: o primeiro é o grupo controle e se refere tanto ao solo puro quanto ao resíduo puro, isto é, apenas com tratamento prévio exigido para os ensaios; o segundo grupo é o das misturas de solo e resíduo em diferentes proporções.

Tanto o solo quanto o resíduo sofreram secagem ao ar e foram destorroados. Posteriormente, foram realizados ensaios nos materiais puros e em misturas.

As misturas foram realizadas por meio da adição de resíduo em quatro diferentes proporções de 5%, 10%, 15% e 20% em massa de solo e resíduo secos, conforme indicado na Equação 3.1.

$$\chi\% = \frac{m_{sRPP}}{m_{sSolo}} \times 100 \quad (3.1)$$

Onde  $\chi\%$  é a porcentagem desejada de resíduo a ser adicionada ao solo,  $m_{sRPP}$  é a massa de resíduo de polimento de porcelanato completamente seco e  $m_{sSolo}$  é a massa de solo completamente seco.

As proporções das misturas analisadas foram assim adotadas por serem valores aproximados aos encontrados na literatura, conforme mencionado na Tabela 2.1. A adição da proporção em *massa* de material seco (e não em *volume*) possibilita maior controle do material durante os ensaios.

A Figura 3.4 detalha os ensaios realizados em cada dosagem e a Tabela 3.1 apresenta a quantidade de repetições executadas para cada ensaio. Foram realizadas tantas repetições quantas necessárias, de modo a tentar minimizar grandes variações nos resultados.

Ensaio	Solo Puro	RPP puro	Quantidade				Total
			5%	10%	15%	20%	
<b>Massa Específica dos Sólidos</b>	2	2	5	3	2	3	17
<b>Granulometria Conjunta</b>	3	2	1	1	1	1	9
<b>Granulometria a Laser</b>	1	1	1	1	1	1	6
<b>Limite de Liquidez</b>	4	5	7	4	4	4	28
<b>Limite de Plasticidade</b>	7	8	8	8	6	4	41
<b>Fluorescência de Raios-X</b>	1	2	2	2	2	1	10
<b>Difração de Raios-X</b>	1	1	1	1	1	1	6
<b>Microscopia Eletrônica de Varredura</b>	5	5	3	2	2	2	19
<b>EDS</b>	7	2	7	3	3	3	25
<b>Compactação</b>	2	3	2	4	1	1	12
<b>Cisalhamento Direto Inundado</b>	2	2	2	2	-	2	10
<b>Prova de Carga em Placa - Inundado</b>	1	-	1	-	-	-	2

Tabela 3.1 – Quantitativo de ensaios para cada amostra analisada.

Fonte: Do autor.

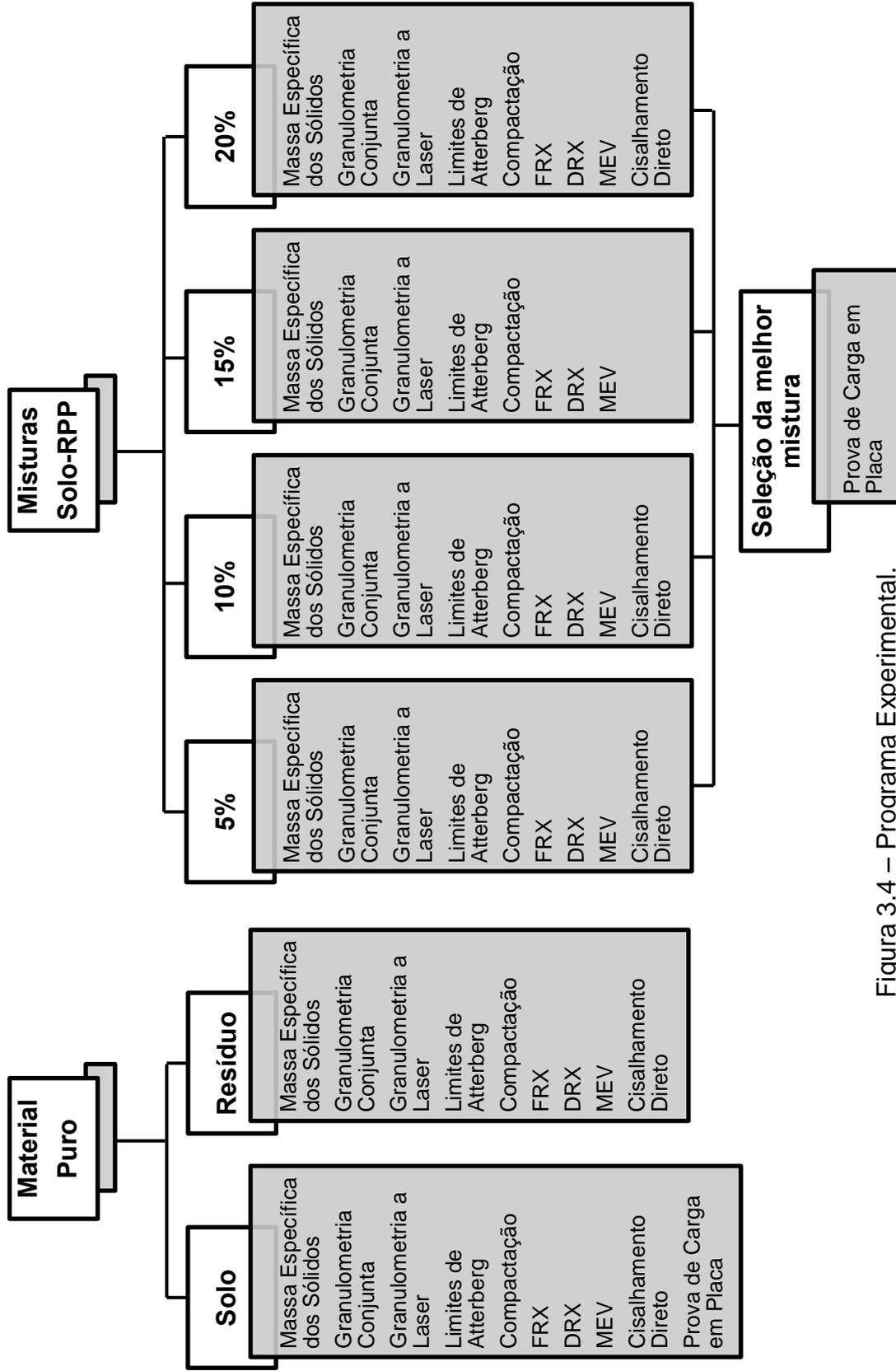


Figura 3.4 – Programa Experimental.

Fonte: Do autor.

### **3.4 Caracterização dos Materiais**

A caracterização dos materiais foi feita por meio dos ensaios de determinação da massa específica dos sólidos, análise granulométrica conjunta, análise granulométrica a laser, determinação dos limites de Atterberg, fluorescência de raios-x, difração de raios-x, microscopia eletrônica de varredura e compactação do solo, explicitados nos tópicos a seguir.

#### **3.4.1 Massa Específica dos Sólidos**

O ensaio de determinação da Massa Específica dos Sólidos foi executado de acordo com os procedimentos determinados pela NBR 6508 (ABNT, 1984), em picnômetro de 500 ml, com cerca de 60g de cada amostra. O resultado é a média obtida de pelo menos dois ensaios para cada amostra estudada.

#### **3.4.2 Análise Granulométrica Conjunta**

A Análise Granulométrica Conjunta consiste na determinação da distribuição dos diâmetros das partículas por meio dos procedimentos de peneiramento grosso, sedimentação e peneiramento fino. O ensaio foi realizado conforme procedimentos constantes na norma NBR 7181 (ABNT, 1984), inclusive no que concerne ao uso de defloculante (Hexametáfosfato de Sódio). Apenas para o RPP puro houve a execução de um ensaio sem o uso do defloculante, para fins de comparação de resultados.

#### **3.4.3 Análise Granulométrica a Laser**

A Análise Granulométrica a Laser foi realizada no granulômetro CILAS 1180, do laboratório de Engenharia Química da UFRN, usando a água como meio dispersante. Este ensaio foi realizado apenas com os materiais com granulometria

entre 2,5 mm e 0,00004 mm e teve como principal objetivo a possibilidade de comparação entre os resultados da porção de finos obtidos por meios digitais com o granulômetro e os resultados de leitura por operador da granulometria conjunta.

#### **3.4.4 Limites de Atterberg**

Os ensaios de Limites de Atterberg analisados neste estudo foram o limite de liquidez e o limite de plasticidade.

O limite de liquidez (LL) foi ensaiado manualmente em aparelho de Casagrande, seguindo os parâmetros da NBR 6459 (ABNT, 1984). O limite de plasticidade (LP) foi determinado por meio do procedimento de moldagem de cilindro em placa de vidro, de acordo com a NBR 7180 (ABNT, 1984). Ambos os ensaios são essenciais para a determinação do Índice de Plasticidade, que consiste na diferença entre os valores de LL e LP.

#### **3.4.5 Fluorescência de Raios-X (FRX)**

O ensaio de Fluorescência de raios-X foi executado para conhecimento dos óxidos e suas porcentagens na composição de todos os materiais secos e destorroados. O ensaio foi realizado no laboratório de Engenharia de Materiais da UFRN em equipamento Shimadzu EDX-720.

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

A difração de raios-X foi realizada no laboratório de Física da UFRN, em equipamento Shimadzu XRD-7000. As especificações de raios-X utilizadas foram de cobre, 30 kV e 15 mA, com ângulos entre 2° e 80° e passo de 2° por minuto. Todas as amostras foram analisadas.

### **3.4.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

A Microscopia eletrônica de varredura foi realizada em equipamento Hitachi TM3000, no laboratório de Engenharia de Materiais da UFRN. Na ocasião, também foi realizado o ensaio de EDS (*energy dispersive x-ray detector*) em pontos específicos das amostras, de modo a ser possível compatibilizar os resultados obtidos na fluorescência de raios-X.

### **3.4.8 Compactação**

O ensaio de compactação foi realizado seguindo-se as recomendações da NBR 7182 (ABNT, 1986), com energia tipo Proctor Normal. Todos os materiais sofreram o processo de secagem ao ar e não houve reuso das amostras.

## **3.5 Ensaios de Resistência Mecânica**

O objetivo principal deste trabalho é determinar a possibilidade de aplicação da mistura de certa porcentagem de RPP em solo para aplicação em aterros compactados. Para isso, fez-se necessário identificar, em laboratório, qual o comportamento de resistência mecânica esperado para os materiais. Assim, foram realizados dois ensaios: i) o de resistência ao cisalhamento direto, e ii) provas de carga em placa.

### **3.5.1 Ensaio de Cisalhamento Direto**

O ensaio de Cisalhamento Direto foi realizado seguindo os parâmetros da norma americana D3080 (ASTM, 1998). Esta norma não limita as dimensões máximas do corpo-de-prova, mas especifica que o diâmetro não deve ser inferior a 10 vezes a partícula de maior diâmetro. Desse modo, moldaram-se os corpos-de-prova com a umidade ótima e a massa específica seca máxima determinadas pelo

ensaio de compactação, em amostras com granulometria passante na peneira de malha 4,75 mm, em caixa de cisalhamento direto com 59,81 mm de diâmetro e 31,52 mm de altura.

Cada corpo-de-prova foi preparado compactando-se o material em três camadas, escarificadas entre elas. Não houve reuso de material. A Figura 3.5 mostra a caixa bipartida onde foram moldados os corpos-de-prova para o cisalhamento, em que é possível perceber uma das camadas de RPP puro já moldada. Após moldado, cada corpo-de-prova foi encaixado na prensa de cisalhamento direto onde dois extensômetros permitiram a leitura dos deslocamentos horizontais e verticais e um anel dinamométrico permitiu a leitura da força aplicada ao material. A velocidade do ensaio foi de 0,05 mm/min.

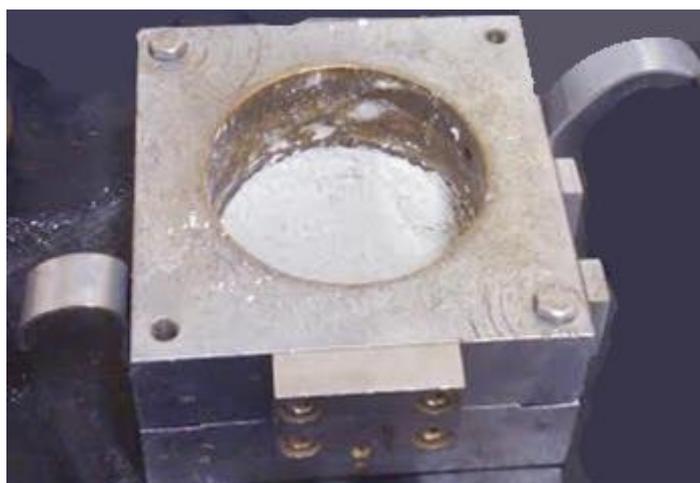


Figura 3.5 – Caixa bipartida do cisalhamento direto com uma das três camadas de RPP puro já moldada.

Fonte: Do autor.

Os ensaios foram realizados aplicando-se tensões normais iguais a 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa, o que correspondia a uma série, sendo que, tanto para o solo e o resíduo puros quanto para as misturas, foram realizados uma série e uma repetição de cada série. O ensaio foi realizado em único estágio de carregamento.

Os ensaios foram realizados na condição inundada. A função da inundação foi minimizar os efeitos da sucção matricial nos resultados. Assim, os corpos-de-

prova foram moldados, colocados em água e rompidos apenas após 24h de adensamento. O grau de saturação obtido após o período de inundação foi de  $98\% \pm 2\%$  para os corpos-de-prova analisados e, por isso, este tempo foi considerado adequado para o estudo. A inundação de um único corpo-de-prova por 72h provocou um grau de saturação de 99% e pouca variação na resistência ao cisalhamento, o que não justifica utilizar maior tempo de inundação do que o período de 24 horas estipulado.

### **3.5.2 Prova de Carga em Placa**

O ensaio de Prova de Carga em Placa tem por objetivo avaliar a capacidade de carga de um modelo de aterro sob a ação de carregamento sobre uma placa circular. A execução deste ensaio foi baseada nos procedimentos adotados por Nascimento (2015). Este ensaio foi realizado com a amostra de solo puro e com a dosagem de 5%, selecionada a partir dos resultados do ensaio de cisalhamento direto, em condição inundada.

O aterro foi construído em uma caixa de aço reforçado, com assoalho e paredes removíveis, montáveis por meio de parafusos, medindo, internamente, 1,40 m x 1,40 m x 0,75 m, nas dependências do laboratório de Mecânica dos Solos da UFRN. O aterro, com 0,6 m de profundidade, foi construído a partir da compactação manual do material estudado, em 6 camadas de 0,10 m cada, por meio do lançamento de um malho de seção quadrada com peso de 0,2 kN, com altura de queda aproximada de 0,40 m (Figura 3.6), respeitando-se a energia de compactação Proctor Normal, e os valores de massa específica seca máxima e umidade ótima estabelecidos pelo ensaio de compactação. Para cada camada foram aplicados cerca de 1000 golpes do malho, distribuídos por toda a superfície.

Para cada camada foi calculada a massa de material a ser colocada, bem como a quantidade de água a ser adicionada para permitir a correção da umidade. A mistura do material com a água foi feita em betoneira, onde eram colocados cerca de 40 kg de material (solo ou solo e resíduo) e a respectiva quantidade de água, deixada em funcionamento por cerca 30 segundos. Esse material úmido era então despejado em carro-de-mão e, em seguida, colocado na caixa metálica. Esse

processo foi repetido tantas vezes quantas necessárias até obter a massa total de material por camada. Após o espalhamento do material da camada na caixa, foram retiradas três amostras para verificação da umidade. A Figura 3.6 mostra a compactação da primeira camada de solo puro sendo realizada.



Figura 3.6 – Compactação da primeira camada de solo puro na caixa metálica.  
Ênfase no malho utilizado para compactação.

Fonte: Do autor.

Após a compactação de cada camada, foi realizada a medição da altura da camada nos quatro cantos e no centro da caixa, bem como foi verificada a densidade *in situ* em três pontos distintos, intercalados entre as camadas, conforme apresentado na Figura 3.7. Para cada amostra da densidade *in situ* foram extraídos exemplares utilizados novamente para a verificação da umidade (mas, agora, do material já compactado). O material restante foi devolvido e recompactado no espaço de onde foi retirado. Todas as camadas atingiram grau de compactação igual ou superior a 95%.

Após a completa compactação do aterro, o material foi submetido à inundação, seguindo-se, novamente, os procedimentos adotados por Nascimento

(2015). Para isso, foram realizados 12 furos verticais, abertos com trado manual de 30 mm de diâmetro, espaçados conforme indicado na Figura 3.8, de modo a acelerar e uniformizar o processo de inundação e possível saturação. A inundação foi feita mantendo-se uma lâmina d'água de aproximadamente 30 mm sobre o aterro – Figura 3.9 –, por 72 horas, seguida de uma drenagem por 24 horas.

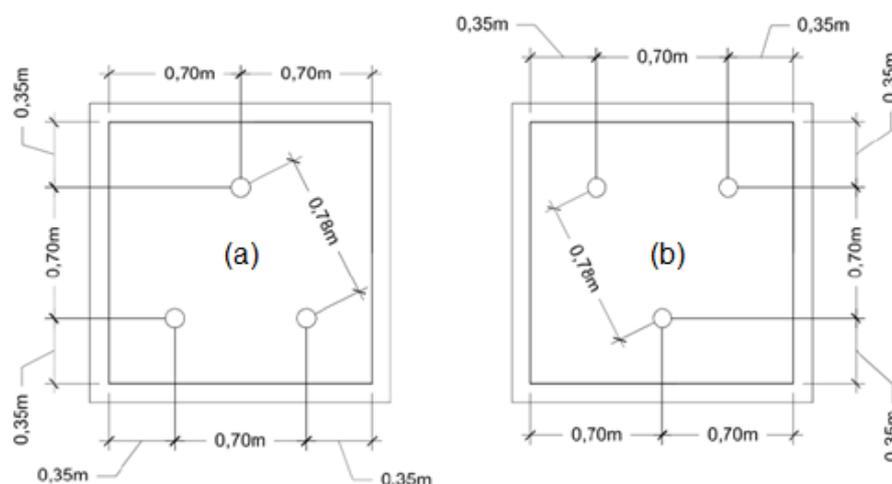


Figura 3.7 – Posição dos furos dos ensaios de densidade *in situ* para (a) camadas ímpares e (b) camadas pares.

Fonte: Adaptado de Nascimento (2015).

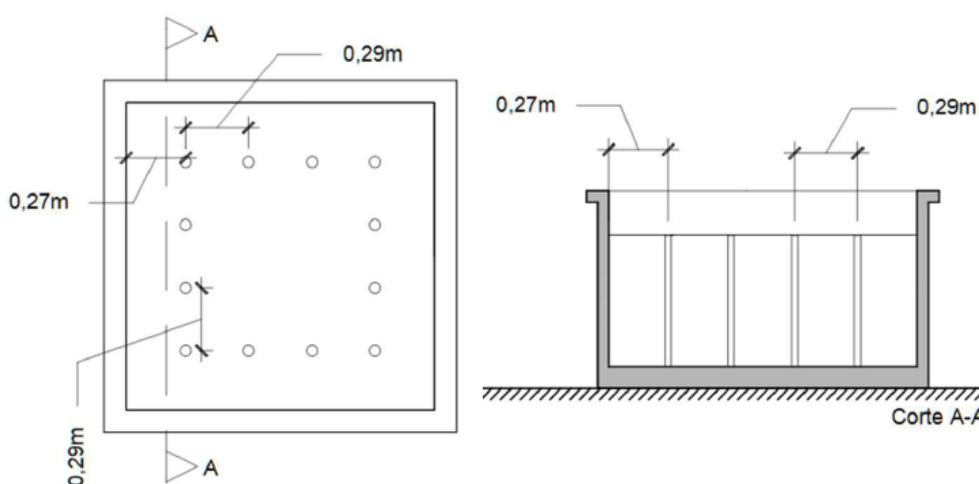


Figura 3.8 – Posição dos furos verticais realizados para acelerar inundação.

Fonte: Adaptado de Nascimento (2015).



Figura 3.9 – Aterro inundado. Detalhe para a lâmina d'água e os furos verticais.

Fonte: Do autor.

Para a execução do ensaio, foi necessário aplicar estágios de carregamento sobre o solo. Para tanto, uma placa metálica circular de 0,30 m de diâmetro foi posicionada exatamente sobre a parte central do aterro, previamente nivelada, para que a carga fosse distribuída homogeneamente no aterro. Um nível de bolhas foi utilizado para certificar que a placa estava realmente nivelada. Esta dimensão de placa foi escolhida a fim de reduzirem-se possíveis influências das paredes da caixa nos resultados e ainda porque o diâmetro de 0,30 m simula a influência da pegada de um pneu sobre o aterro compactado.

Um macaco hidráulico, de acionamento manual, foi posicionado sobre o centro da placa metálica e, sobre este, foi colocada uma célula de carga de 50 toneladas de capacidade. De modo a proporcionar reação a este sistema de carregamento, um pórtico de reação, considerado fixo, foi parafusado a duas paredes opostas da caixa metálica, de modo tal que sua parte central estivesse localizada exatamente acima da célula de carga. Os valores da carga aplicada foram transferidos pela célula de carga a um computador, por meio de um sistema de aquisição de dados chamado *Spider*, de fabricação da HBM. No computador, o software *Catman* recebia os dados e os compilava em um único arquivo, posteriormente convertido a uma planilha de *Excel*.

Para a obtenção dos dados do recalque do solo, foram feitas leituras em extensômetros. Para os ensaios executados (aterro com solo puro e aterro da

Mistura de 5%) foram utilizados apenas dois extensômetros, atendendo-se ao mínimo exigido pela norma NBR 6489 (ABNT, 1984). Estes elementos possuíam precisão de 0,01 mm e curso total de 50 mm, sendo reposicionados sempre que seu curso estava próximo do fim e ainda havia estágios de carga a ser aplicados. Os extensômetros foram fixados ao macaco hidráulico por meio de bases magnéticas, mas a ponta do seu curso foi posicionada sobre vigas de madeira, chamadas de vigas de referência.

Para ambos os ensaios foram necessários dois operadores: um para aplicar e manter a carga de cada estágio, monitorando os valores no computador, e outro para anotar as leituras dos extensômetros. A Figura 3.10 sumariza o esquema de montagem do sistema.

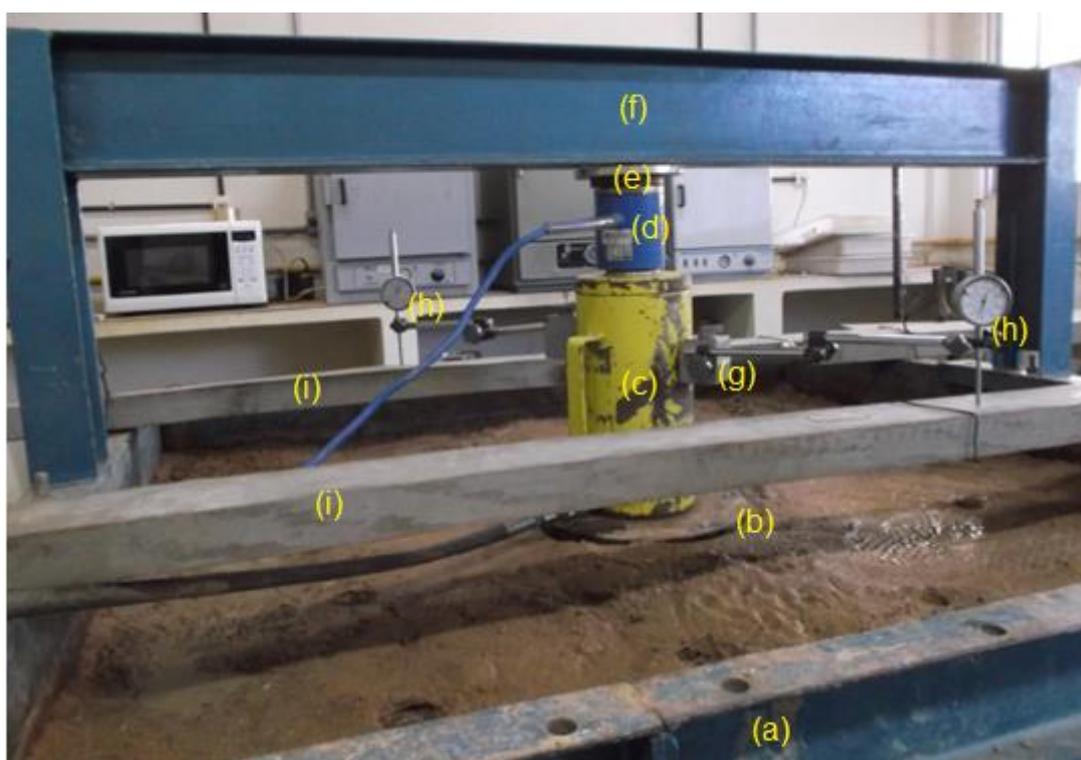


Figura 3.10 – Esquema de montagem do sistema necessário para a aplicação e leitura das cargas e leitura do recalque. (a) Parede da caixa metálica. (b) Placa metálica circular, nivelada e centralizada no aterro. (c) Macaco hidráulico. (d) Célula de carga de 50 toneladas. (e) Tarugos metálicos utilizados para eliminar a distância existente entre a célula de carga e o pórtico de reação. (f) Pórtico de reação, centralizado, parafusado às paredes da caixa metálica. (g) Base magnética

conectada ao macaco hidráulico. (h) Extensômetros. (i) Vigas de madeira para referência.

Fonte: Do autor.

A execução do ensaio seguiu os procedimentos sugeridos na norma NBR 6489 (ABNT, 1984), com as seguintes exceções: a dimensão da placa foi inferior à apresentada pela norma, de modo que o resultado apresentado na caixa fosse compatível com as dimensões da mesma; e o estágio de carregamento não foi determinado a partir da diferença de leituras no recalque, mas, sim, com um tempo fixo.

O ensaio foi do tipo *rápido*, que se baseia numa proposição de Fellenius para provas de carga estáticas em estacas, aplicada na norma americana ASTM D1143 (2007). Neste ensaio, o importante é que cada estágio de carregamento tenha a mesma duração, independente de qual seja ela (Fellenius, 1975 *apud* Cintra *et al.*, 2013). Neste caso, a duração de cada estágio foi de 15 minutos, com recebimento de dados da célula de carga a cada segundo e leitura dos extensômetros a cada 0 minutos, 1 minuto, 2 minutos, 4 minutos, 8 minutos e 15 minutos após o começo de cada estágio.

A norma NBR 6489 (ABNT, 1984), de prova de carga direta, estabelece que os estágios de carregamento têm que ser realizados em tensões de até, no máximo, 20% do valor da tensão admissível. A mesma norma determina ainda que os critérios de parada do ensaio devem ser: ou atingir um recalque superior a 25 mm ou atingir o dobro da tensão admissível prevista. Nos ensaios realizados, o recalque ultrapassou os 25 mm, o único critério de parada do ensaio foi atingir o dobro da tensão admissível. Desse modo, foram realizados 10 estágios de carregamento, com média de 550 kgf por estágio para o solo puro. Como a mistura de 5% apresentou uma tensão admissível teórica maior do que o solo puro, foram executados 12 estágios de carregamento, com 550 kgf de carga por estágio. O descarregamento foi feito em quatro estágios equiespaçados.

### 3.5.2.1 Estimativa da capacidade de carga

Os estágios dos ensaios de prova de carga em placa foram desenvolvidos com base nos valores da capacidade de carga teórica, calculadas por meio da equação de Terzaghi, com a proposição de Vesic (Cintra *et al.*, 2011), expressa na Equação 3.2.

$$\sigma_r = cN_c S_c + qN_q S_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma S_\gamma \quad (3.2)$$

Nesta equação, “ $N_c$ ”, “ $N_q$ ” e “ $N_\gamma$ ” são fatores de capacidade de carga, dependentes diretamente do valor do ângulo de atrito do material, obtido pelo resultado do ensaio de cisalhamento direto; “ $c$ ” é o valor do intercepto de coesão, também obtido no ensaio de cisalhamento direto; “ $S_c$ ”, “ $S_q$ ” e “ $S_\gamma$ ” são fatores de forma do elemento de fundação que, neste caso, foi considerado *circular* por ser o formato da placa metálica; “ $q$ ” é o valor da sobrecarga externa, quando existente; “ $\gamma$ ” é o valor do peso específico do material; e “ $B$ ” é o diâmetro do elemento de fundação. No caso específico dos ensaios realizados, não havia sobrecarga externa e, portanto, a segunda parcela da Equação 3.2 foi considerada nula.

É possível calcular a capacidade de carga teórica dos três modos de ruptura (geral, local ou por puncionamento) pela Equação 3.2, mas a diferença entre elas reside no fato de que, para ruptura geral, utilizam-se os valores reais de intercepto de coesão e ângulo de atrito obtidos pelo ensaio de cisalhamento direto, enquanto que, para a ruptura por puncionamento, é necessário aplicar uma redução nestes parâmetros, conforme apresentado nas Equações 3.3 e 3.4. No caso de ruptura local, a capacidade de carga teórica é a média entre a ruptura geral e a ruptura por puncionamento.

$$c^* = \frac{2}{3} c \quad (3.3)$$

$$\tan \phi^* = \frac{2}{3} \tan \phi \quad (3.4)$$

Na ocasião desta pesquisa, não eram conhecidos os tipos de ruptura referentes ao solo, tampouco à mistura de 5%, e, portanto, recorreu-se a um artifício apresentado por Cintra *et al.* (2011), mostrado na Figura 3.11.

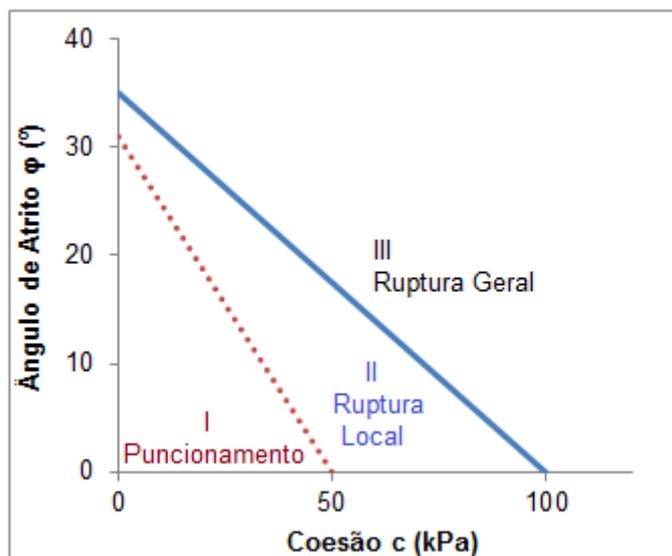


Figura 3.11 – Modos de ruptura para solos c- $\phi$ .

Fonte: Adaptado de Cintra *et al.* (2011).

De acordo com a NBR 6122 (ABNT, 2010), o valor da tensão admissível, quando se utiliza um método teórico de cálculo de capacidade de carga é o valor calculado sobre um fator de segurança global de 3,0, quando não se tem informações prévias de prova de carga em placa. Logo, neste trabalho, o fator de segurança utilizado foi o recomendado de 3,0.

## Capítulo 4

### Resultados e Discussões

#### 4.1 Caracterização dos Materiais

##### 4.1.1 Massa Específica dos Sólidos

Os resultados do ensaio de determinação da Massa Específica dos Sólidos estão apresentados na Tabela 4.1 a seguir.

<b>Material</b>	<b>Massa Específica dos Sólidos (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>Solo puro</b>	2,600
<b>Solo + 5% RPP</b>	2,595
<b>Solo + 10% RPP</b>	2,588
<b>Solo + 15% RPP</b>	2,577
<b>Solo + 20% RPP</b>	2,566
<b>RPP puro</b>	2,538

Tabela 4.1 – Valores de Massa Específica dos Sólidos de cada material

Fonte: Do autor.

A análise dos dados de Massa Específica dos Sólidos mostra que o resíduo puro é um material mais leve do que o solo puro e que a adição de RPP ao solo reduz a massa específica dos sólidos da mistura. O valor encontrado para o RPP está ligeiramente superior ao encontrado na literatura, uma vez que estes variam entre 2,25g/cm<sup>3</sup> e 2,49 g/cm<sup>3</sup> (Silva, 2005; Santos, 2008). Isto pode ser justificado pela maior presença de teores de ferro e alumínio no material, que foram encontrados na análise de Fluorescência de Raios-X, o que causa maior tendência de aumento da massa específica dos sólidos. As porcentagens dos óxidos presentes nos materiais são apresentadas no item 4.1.5.

O solo puro apresenta valor de massa específica dos sólidos semelhante com o disponível na literatura, pois latossolos são solos intemperizados com maiores teores de óxidos cimentícios (ferro e alumínio) que não conseguem ser carregados tão facilmente como a sílica e, portanto, mais densos.

#### 4.1.2 Granulometria Conjunta

Inicialmente, foi realizado o ensaio de granulometria conjunta no solo puro nas condições de coleta, sendo apenas destorroado. Posteriormente, para que fosse possível realizar o ensaio de cisalhamento direto, o solo foi preparado passando na peneira de abertura 4,75 mm. A Figura 4.1 apresenta a curva granulométrica do solo puro nas duas condições supracitadas. É possível perceber que ambas as curvas são praticamente coincidentes em sua porção final e que, na curva do solo passado na #4,75 mm, ocorre apenas um deslocamento da curva original para a esquerda e para cima.

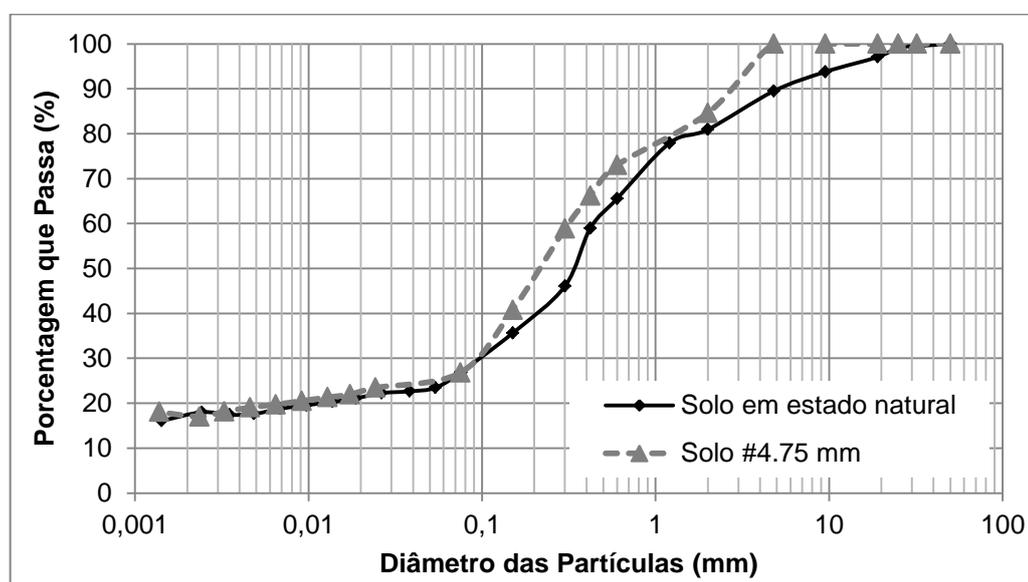


Figura 4.1 – Curva granulométrica do solo puro em estado natural, destorroado e do solo puro passado na peneira #4,75 mm.

Fonte: Do autor.

A interpretação das curvas granulométricas do solo puro mostra que o diâmetro médio ( $D_{50}$ ) das partículas não variou muito entre o solo puro em estado natural ( $D_{50} = 0,35$  mm) e o solo puro passado na #4,75 mm ( $D_{50} = 0,20$  mm).

O solo em estudo tem aproximadamente 60% de sua composição constituída por partículas de areia, 18% de argila e apenas 6% de silte. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação (SUCS), o solo puro em estado natural é classificado como “SC”, isto é, areia argilosa, com argila de baixa compressibilidade.

O RPP é um material particulado, rico em finos, cuja análise tátil-visual indica a existência de muitos torrões oriundos da aglomeração das partículas finas pela água relacionada ao processo de polimento. A curva granulométrica do RPP puro, seguindo o procedimento padrão da norma NBR 7181 (ABNT, 1984) está apresentada na Figura 4.2.

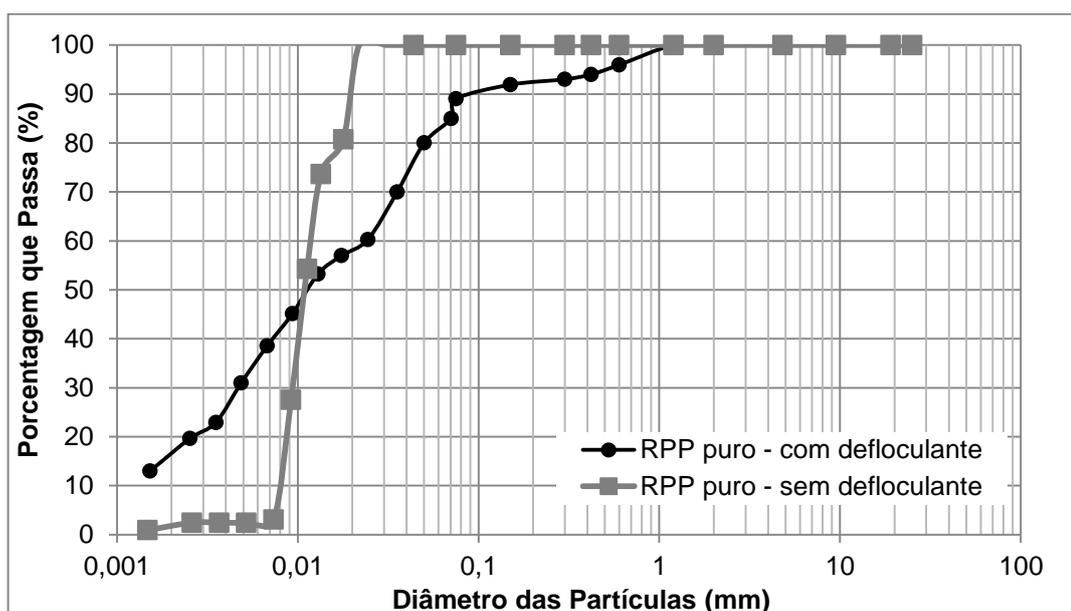


Figura 4.2 – Curva granulométrica do RPP puro, destorroado, com uso de defloculante (hexametafosfato de sódio), conforme recomendação da respectiva norma e sem defloculante.

Fonte: Do autor.

A curva granulométrica do RPP, obtida por granulometria conjunta completa (com uso de defloculante), neste trabalho, se apresenta ligeiramente diferente da

encontrada na literatura por Souza (2007), Silva (2012) e Breitenbach (2013), por exemplo. Tais autores relataram em seus trabalhos que 100% das partículas do RPP eram inferiores a 0,075 mm. Essa diferença pode ser resultante da dificuldade de realizar o peneiramento fino no material oriundo da sedimentação, uma vez que novos torrões foram formados e não conseguiram ser completamente desfeitos manualmente, nem durante a agitação das peneiras em mesa vibratória. Esses torrões podem ter sido formados principalmente por uma possível interação química entre as partículas do resíduo e o defloculante (hexametáfosfato de sódio), dado que a velocidade do ensaio é reduzida e, portanto, há tempo para a aglomeração das partículas do material. Assim, foi realizado novamente o ensaio de granulometria conjunta, sem o uso do defloculante, e verificou-se que o resultado obtido (Figura 4.2) foi mais compatível com a literatura. Para certificar-se qual das duas curvas era a mais adequada, foi necessária a execução do ensaio de Granulometria a Laser para confirmar os diâmetros das partículas do RPP, uma vez que esse foi o método de determinação da granulometria utilizado pelos autores referenciados.

A interpretação da curva granulométrica do RPP deve ser vista com ressalvas, uma vez que as classificações do solo foram desenvolvidas para materiais naturais e não para subprodutos de beneficiamento. *A priori*, no entanto, tem-se que a maior parte das partículas do RPP tem diâmetro semelhante ao de siltes.

O ensaio de granulometria conjunta das misturas foi realizado com adição de RPP, em massa seca, sobre solo puro passado na peneira de abertura 4,75 mm, por se tratar da condição em que ocorre o ensaio de cisalhamento direto. Somente após a conclusão de todos os ensaios de cisalhamento direto é que será determinada a proporção mais adequada de mistura, com posterior adição de RPP, em massa seca, sobre solo natural.

A Figura 4.3 mostra as curvas granulométricas das quatro misturas analisadas, isto é, 5%, 10%, 15% e 20% de adição de RPP em massa seca de solo. A observação das curvas granulométricas das misturas mostra que a quantidade de resíduo adicionada não é suficiente para provocar grandes alterações granulométricas no conjunto, mas existe uma ligeira tendência de as curvas com maiores porcentagens de adição de RPP serem deslocadas para a esquerda e para cima, isto é, possuírem mais finos.

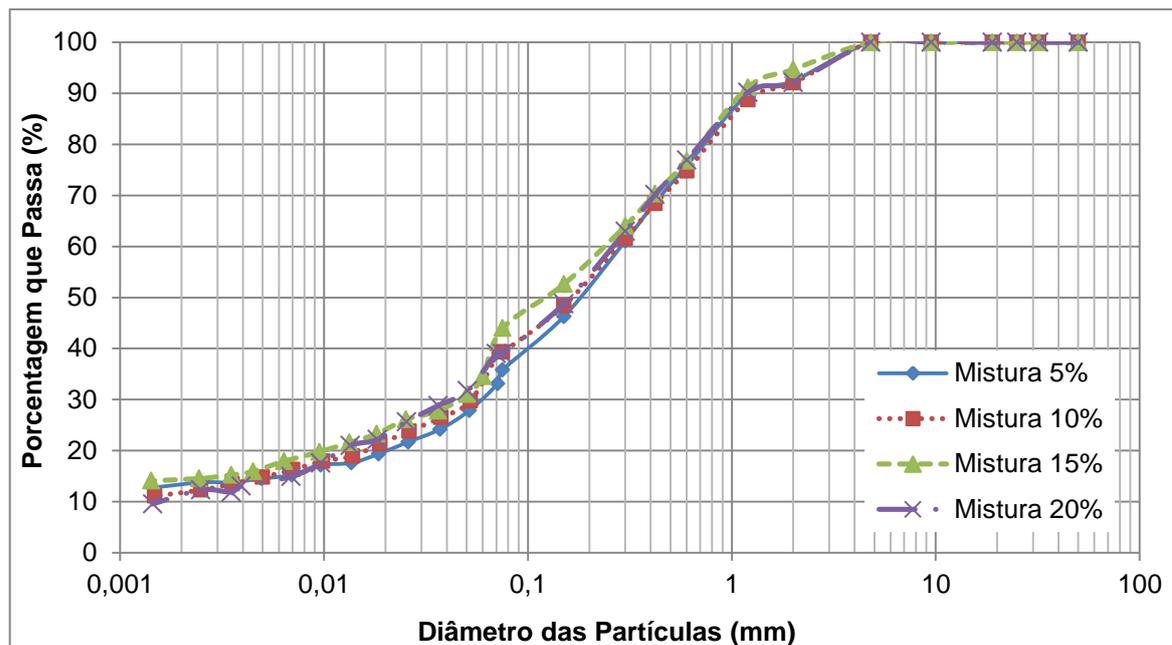


Figura 4.3 – Curva granulométrica das misturas de 5%, 10%, 15% e 20% de adição de RPP em massa seca de solo.

Fonte: Do autor.

De acordo com a classificação unificada (SUCS), todas as misturas são classificadas como “areia silto-argilosa”, o que leva a entender que a porção *siltosa* da mistura foi oriunda da inserção de RPP.

A Tabela 4.2, a seguir, resume os dados da análise granulométrica por peneiramento e sedimentação das amostras estudadas. É possível perceber, através dos dados da Tabela 4.2, que as quatro misturas apresentam maiores teores equivalentes de areia fina e silte do que o solo puro, mas menores teores de pedregulho e argila. De fato, o RPP tem alto teor de partículas com diâmetro equivalente de silte, argila e areia fina, mas a quantidade de material equivalente à fração argila no resíduo ainda é inferior ao do solo puro. Desse modo, aparentemente, a adição do RPP provocou maior uniformização das frações areia, silte e argila nas misturas, ao preencher a fração de silte que era reduzida no solo puro.

	Solo puro estado natural	Solo puro #4,75 mm	RPP puro com defl.	RPP puro sem defl.	Mistura 5%	Mistura 10%	Mistura 15%	Mistura 20%
<b>Pedregulho</b>	19,06%	15,41%	0,00%	0,00%	7,57%	7,98%	5,32%	7,90%
<b>Areia Grossa</b>	15,39%	11,58%	4,06%	0,00%	16,60%	17,22%	17,93%	15,23%
<b>Areia Média</b>	29,94%	32,26%	4,04%	0,00%	29,55%	26,40%	24,14%	28,09%
<b>Areia Fina</b>	12,19%	13,95%	11,90%	0,00%	18,43%	18,67%	21,58%	17,06%
<b>Silte</b>	5,42%	9,79%	66,99%	97,54%	14,07%	17,46%	16,50%	19,41%
<b>Argila</b>	18,00%	17,01%	13,02%	2,46%	13,78%	12,28%	14,53%	12,31%
<b>Classif. SUCS</b>	Areia argilosa	Areia argilosa	Equivalente a silte de baixa comp.	Equivalente a silte de baixa comp.	Areia silto argilosa	Areia silto argilosa	Areia silto argilosa	Areia silto argilosa

Tabela 4.2 – Resumo dos dados de granulometria conjunta.

Fonte: Do autor.

#### 4.1.3 Granulometria a Laser

Os resultados do ensaio de granulometria a laser estão apresentados na Figura 4.4, a seguir. As curvas obtidas pela granulometria a laser têm formato e distribuição similares aos obtidos pela granulometria conjunta, mas com os resultados apresentados pelo ensaio de granulometria a laser é possível ter maior clareza na distribuição dos finos. A principal diferença entre os ensaios se mostra pela indicação do  $D_{10}$  (diâmetro pelo qual passam 10% do material), uma vez que não foi possível sua determinação a partir das curvas da granulometria conjunta (exceto na curva de RPP puro com ensaio executado sem defloculante). Nas curvas de granulometria a laser, percebe-se um valor de  $D_{10}$  em torno de 0,003 mm para o solo puro e misturas. Uma possível explicação seria que o defloculante (hexametáfosfato de sódio) utilizado na etapa sedimentação, da granulometria conjunta, pode ter favorecido a formação de torrões nas amostras e não proporcionou a leitura adequada dos finos através do densímetro. Isto é, o defloculante atuou como um aglutinante para o resíduo por, possivelmente, por ter havido reações químicas entre os dois materiais.

A curva obtida pelo granulômetro a laser para o RPP puro mostrou-se semelhante às obtidas por Santos (2008) e Breitenbach (2013), mas com maior teor

de argila do que as obtidas por Silva (2012) e Carvalho (2013). Comparando-se o resultado da granulometria a laser com a granulometria conjunta sem defloculante (Figura 4.5), identificou-se que o RPP é um material composto por partículas com diâmetro inferior a 0,015 mm, com a maior parte de suas partículas com diâmetro equivalente à fração silte.

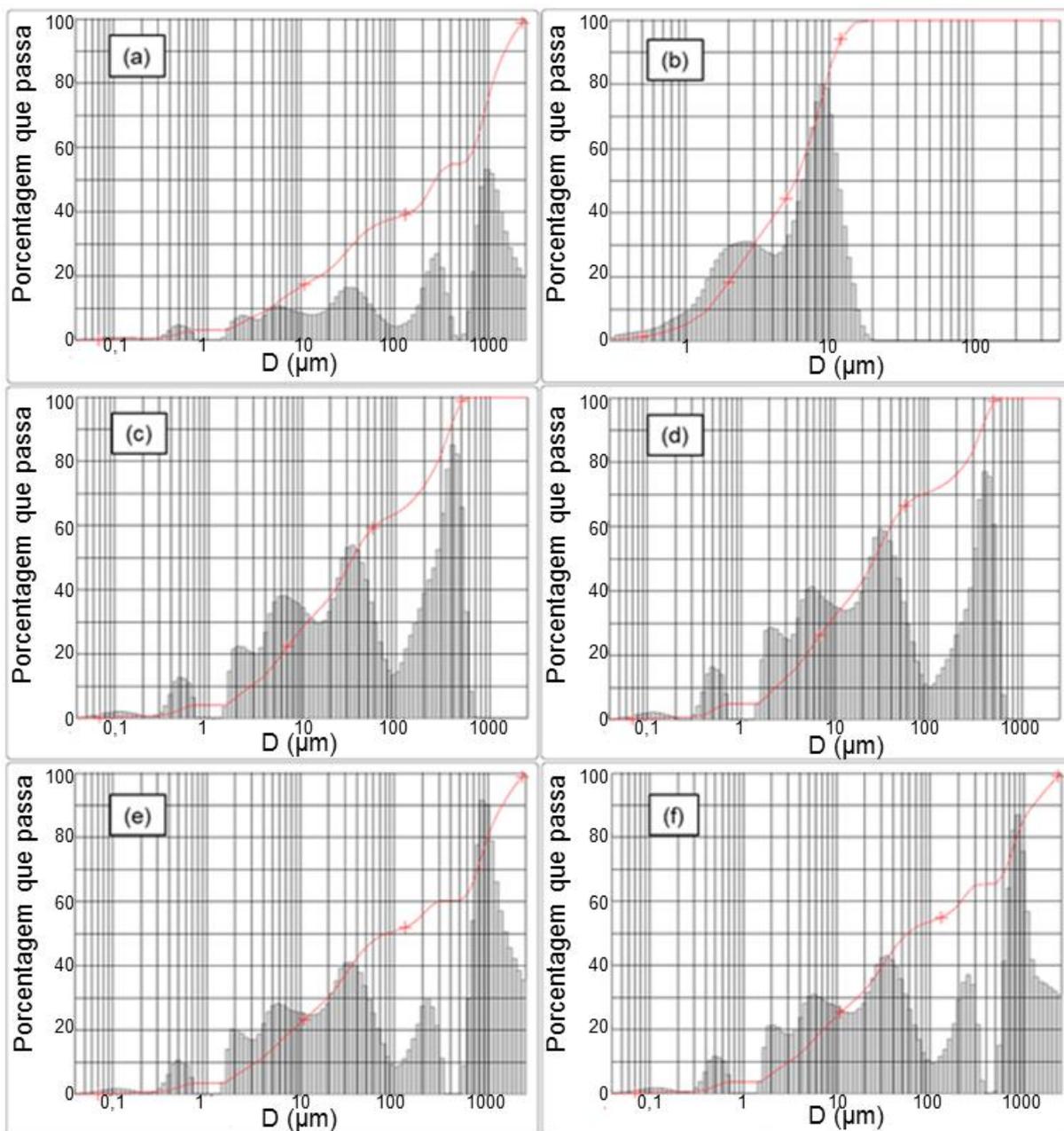


Figura 4.4 – Curvas de granulometria a laser. (a) Solo puro. (b) RPP puro. (c) Mistura 5%. (d) Mistura 10%. (e) Mistura 15%. (f) Mistura 20%.

Fonte: Do autor.

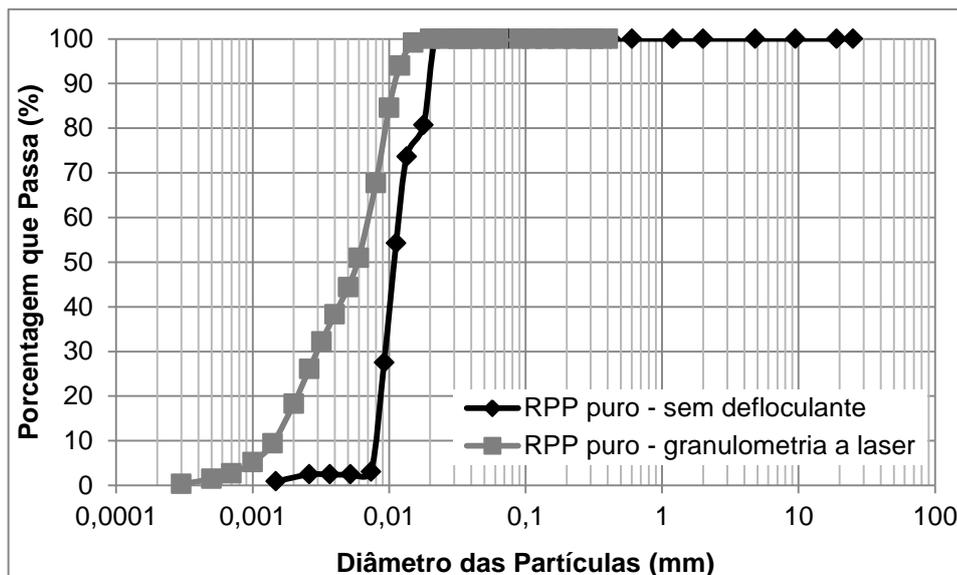


Figura 4.5 – Curvas de granulometria a laser e granulometria conjunta sem defloculante para o RPP puro.

Fonte: Do autor.

Considera-se que os dados obtidos pela granulometria a laser, para o RPP, são mais confiáveis do que pela granulometria conjunta, pois o equipamento digital é configurado para a análise com precisão de partículas finas e a constante agitação do meio favorece a não formação de torrões durante o ensaio. Diante disso, pode-se afirmar que o RPP puro apresenta cerca de 82% de partículas equivalentes a silte e 18% de partículas equivalentes a argila.

O histograma presente na curva de granulometria a laser permite o conhecimento da uniformidade das partículas. Quanto mais picos houver, menos uniforme é o material e, portanto, mais ideal sua utilização em compactação, porque as partículas tendem a se arranjar mais compactamente, com finos ocupando vazios dos grossos. Assim, percebe-se que as misturas de 15% e 20% são as que apresentam maior número de picos (7, no total) e que o RPP é o único material com características mais uniformes (apenas 2 picos).

#### 4.1.4 Limites de Atterberg

A Tabela 4.3, a seguir mostra os valores de Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Índice de Plasticidade (IP) para as amostras puras e para as misturas.

	Solo puro	Mistura 5%	Mistura 10%	Mistura 15%	Mistura 20%	RPP puro
<b>Média LL (%)</b>	26,7	23,7	24,5	24,2	23,8	38,5
<b>Coefficiente de variação – LL (%)</b>	3,21	4,39	6,93	2,59	4,82	7,91
<b>Média LP (%)</b>	17,7	15,6	17,1	18,2	17,4	27,4
<b>Coefficiente de variação – LP (%)</b>	21,00	14,16	7,41	2,80	4,19	18,45
<b>IP (%)</b>	8,9	8,1	7,5	6,1	6,4	11,1

Tabela 4.3 – Valores dos limites de Atterberg e Índice de Plasticidade das amostras.

Fonte: Do autor.

A análise dos valores de LL e LP mostrou que não existem grandes diferenças de resultados das misturas em relação ao solo puro, quando se comparam os valores das misturas com o RPP puro, o que pode ser justificado pelo fato de que estas misturas ainda possuem alto teor de solo em suas composições. Os valores dos coeficientes de variação para o solo puro e para as misturas, para ensaio do limite de liquidez, se mostraram inferiores ao valor do RPP puro, o que pode ser uma evidência de que o resíduo é um material de manuseio difícil, especialmente quando em contato com água, mesmo este ensaio sendo padronizado. Quanto aos valores do coeficiente de variação apresentados para o ensaio de limite de plasticidade, é possível perceber que, na maioria dos casos, os valores aumentaram, quando comparados com os valores apresentados no limite de liquidez, o que pode representar que não há apenas a variabilidade do material, mas também variabilidades inerentes à execução do ensaio, que depende do operador.

A análise tátil-visual durante o ensaio mostrou que, apesar de o RPP ser o material que apresentou maior índice de plasticidade, era muito mais difícil de ser moldado do que o solo puro e as misturas, porque a adição de água formava torrões que atrapalhavam a execução dos ensaios.

A análise exclusiva do Índice de Plasticidade mostrou-se não ser clara quanto ao comportamento de plasticidade dos materiais. As misturas de 15% e 20%, que, no geral, apresentaram os menores valores de coeficiente de variação, são classificadas como materiais fracamente plásticos, pois seus valores de IP são inferiores a 7,0%. Por outro lado, o solo puro, a mistura de 5%, a mistura de 10% e o RPP puro apresentam valores de Índice de Plasticidade correspondentes a um material medianamente plástico. Maiores valores de coeficiente de variação podem ser indicativos de que estes materiais também poderiam ser classificados como fracamente plásticos. Portanto, para este ensaio, baseado nas porcentagens de adição de RPP adotados na pesquisa, não é possível determinar explicitamente a influência do resíduo sobre o comportamento da mistura, mas é possível que haja cargas elétricas na superfície das partículas do resíduo que sejam influenciadas pelas partículas do solo, de modo a provocar uma redução na plasticidade das misturas, em comparação com o solo puro, mesmo o resíduo se apresentando como o material de maior plasticidade.

#### 4.1.5 Fluorescência de raios X

A Tabela 4.4 sintetiza os resultados do ensaio de fluorescência de raios X das amostras analisadas.

	Solo puro	Mistura 5%	Mistura 10%	Mistura 15%	Mistura 20%	RPP puro
<b>SiO<sub>2</sub></b>	38,12%	39,24%	43,61%	45,25%	49,16%	62,57%
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	29,19%	28,12%	26,39%	24,23%	19,80%	5,53%
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	28,15%	25,94%	22,39%	22,09%	21,92%	18,71%
<b>TiO<sub>2</sub></b>	2,03%	1,93%	1,73%	1,67%	1,46%	0,97%
<b>ZrO<sub>2</sub></b>	0,17%	0,32%	0,69%	1,03%	1,50%	0,91%
<b>MgO</b>	0,20%	0,77%	0,91%	1,02%	1,09%	1,20%
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,10%	2,64%	2,82%	3,10%	3,35%	6,42%
<b>MnO</b>	0,04%	0,10%	0,16%	0,27%	0,31%	1,04%
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	2,00%	0,80%	0,87%	0,77%	0,60%	0,02%
<b>CaO</b>	0,00%	0,14%	0,43%	0,57%	0,81%	2,63%

Tabela 4.4 – Resultados FRX.

Fonte: Do autor.

A análise dos dados obtidos no ensaio de FRX mostrou que o solo puro tem teores de óxidos compatíveis com latossolos apresentados na literatura. Teores elevados de óxidos de ferro e alumínio são indicadores de que o solo sofreu certa evolução através da laterização (intemperismo), de modo que as bases solúveis, como cálcio, magnésio, sódio e potássio foram rapidamente lixiviadas, resultando em baixas porcentagens. A sílica também tende a ser liberada em solos em evolução e, portanto, pode-se perceber que sua porcentagem é inferior no solo puro, em comparação, por exemplo, com o resíduo, que contém material cerâmico (argila natural) em sua composição.

Pelo processo de laterização, há uma tendência à fixação de alumina no solo, uma vez que este é um elemento pesado, dificilmente carregável. Quando a drenagem do local é satisfatória, há intensa lixiviação do material e fixação também do ferro. Latossolos amarelos tendem a apresentar uma relação sílica/alumina superior a 1,5 e inferior a 2,2 e teores de ferro inferiores a 7% (Ker, 1997). No caso do latossolo em questão, a relação sílica/alumina é 1,35 e há alto teor de ferro, o que pode ser um indicador de que o solo ainda está em evolução e perderá sílica no futuro, e que a drenagem do local é elevada, de modo que houve fixação do ferro. Como mostrado no item 3.1 deste trabalho, o solo encontrava-se inicialmente em uma região elevada (compactada) e, talvez por isso, a evolução tenha sido reduzida. Ao ser colocado na leira em frente à região elevada, o solo pode ter desenvolvido maior liberdade de drenagem e, portanto, teve condições de fixar mais o ferro.

Valores elevados de sesquióxidos (óxido de ferro e alumina), como os observados na Tabela 4.4, favorecem a presença de cimentação natural no solo quando sob ciclo de umedecimento e secagem, o que pode ser um aspecto favorável para o uso deste tipo de solo como material para aterro compactado.

Os teores de sílica e alumina obtidos para o RPP foram compatíveis com os obtidos por outros autores referenciados neste trabalho e são fortes indicadores de que grande parte do RPP é formada por restos da peça cerâmica, que contém argila e, portanto, altos teores de sílica e alumina, em sua composição. Parte dessa sílica também pode ser proveniente do quartzo utilizado na estabilização do produto.

Os teores de óxido de ferro e óxido de magnésio obtidos foram bastante diferentes dos encontrados na literatura para o RPP. A quantidade de ferro apresenta-se elevada, inclusive em comparação com Souza (2007), Silva (2012) e

Breitenbach (2013), que utilizaram o resíduo oriundo da mesma indústria pesquisada neste trabalho. Acredita-se que isto possa ser correspondente, por exemplo, à utilização, pela indústria, de matéria-prima coletada em outra jazida e, após a queima, a peça cerâmica produzida em 2015 possivelmente tem coloração mais avermelhada do que a produzida nos anos anteriores.

A quantidade de óxido de magnésio obtida mostrou-se bastante inferior à apresentada na literatura – fato confirmado pelos dados obtidos na difração de raios X e na análise de EDS, apresentados adiante neste trabalho – e talvez seja indicativo de que o cimento utilizado para agregar as partículas do abrasivo não seja magnésiano. Esta condição poderia justificar, também, a existência de óxido de titânio no RPP, uma vez que ele é uma impureza comum no cimento Portland. Profissionais da indústria de onde foi coletado o RPP não souberam informar o tipo de cimento que compunha o abrasivo, mas explicaram que parte das cabeças polidoras era comprada da China e parte era produzida pela própria fábrica, dado que o grupo também tem uma indústria cimenteira na Paraíba, inaugurada em 2014.

A quantidade de fundentes ( $MgO$ ,  $K_2O$  e  $CaO$ ) equivale a 10,25% do total de RPP e se mostrou compatível com a literatura. Tais óxidos são responsáveis por proporcionar maior densificação da peça cerâmica a menores temperaturas de queima, por formar fase vítrea onde ficam imersas as fases cristalinas.

Quando a temperatura de queima das peças cerâmicas é inferior à temperatura de fusão da argila (como ocorre quando há fundentes na composição), é possível formar pozolanas artificiais. Pozolanas são substâncias constituídas de sílica e alumina que, quando em reação com hidróxido de cálcio, por meio da presença de água, formam compostos estáveis e com propriedades aglomerantes (Leite e Molin, 2002). Os materiais argilosos, antes de atingirem a temperatura de fusão, têm a porosidade aumentada e sua superfície ativada, formando a sílica ativa. A atividade pozolânica do RPP pôde ser percebida pelo simples manuseio do pó seco, quando em contato com água, pois formava torrões difíceis de serem desfeitos por compressão da mão-de-graal, além de enrijecer significativamente após alguns dias de evaporação da água utilizada para misturar.

A presença de óxido de cálcio no RPP evidencia que, quando em contato com a água, é possível a formação do hidróxido de cálcio, necessário para a reação pozolânica. O alto teor de sílica no RPP pode ser responsável por provocar uma

possível reação pozolânica, comportamento compatível com a literatura, como apresentado no item 2.3.2 deste trabalho. O desenvolvimento da resistência nas primeiras idades é menor nas pozolanas (Leite e Molin, 2002) – como é o caso do RPP – e, portanto, é possível que, para altos teores de resíduo na mistura, os aterros compactados apresentem ganho de resistência somente após certo tempo de execução.

Assim, ainda que tanto o solo quanto o resíduo possuam praticamente os mesmos óxidos em suas composições e, aparentemente, não ocorra reação química evidente entre eles, entende-se que o solo estudado tem uma tendência à cimentação natural enquanto o resíduo tem uma tendência ao endurecimento por reações pozolânicas. Desse modo, ao observar os dados da Tabela 4.4 para as misturas, para menores porcentagens de RPP adicionado é provável que haja uma maior influência da cimentação do solo do que da atividade pozolânica do RPP, enquanto que, para maiores teores de RPP adicionado, os teores de sílica e cálcio são maiores e podem ser mais influenciados pela atividade pozolânica.

#### **4.1.6 Difração de raios X**

A Figura 4.6 mostra o gráfico com a identificação das fases cristalinas do RPP puro. As fases identificadas são compatíveis com os dados apresentados na literatura por Yunhong *et al.* (2014), Ji *et al.* (2015), Breitenbach (2013), Silva (2012), Santos (2008), Souza (2007), Marques *et al.* (2007), Ferraz (2007) e Pureza (2004). Como explicado no item 2.3.1 deste trabalho, as fases cristalinas usualmente encontradas pelos outros autores para o RPP apresentam quartzo, carbetto de silício, mulita e periclase (MgO). A periclase não foi encontrada para o RPP analisado e é consonante com os dados de FRX apresentados, o que parece confirmar que o abrasivo empregado na produção do porcelanato polido em Conde-PB não utiliza o cimento magnesiano como ligante das partículas de carbetto de silício. O quartzo e a mulita apresentados podem ser provenientes da peça de porcelanato desbastada, uma vez que o quartzo é utilizado como material de carga na produção cerâmica e a mulita é formada pela vitrificação do caulim durante a queima. O carbetto de silício, por sua vez, é oriundo do desgaste das cabeças

polidoras e confirma que este material cerâmico é o abrasivo utilizado no processo de polimento na referida indústria.

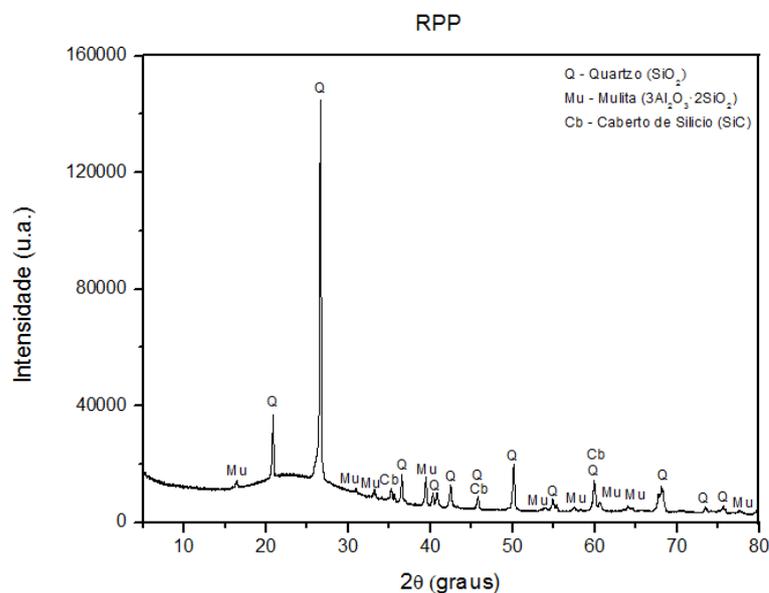


Figura 4.6 – DRX RPP puro.

Fonte: Do autor.

A Figura 4.7 mostra o DRX do solo puro, onde se observa que as fases predominantes são quartzo, caulinita e hematita e estas são correspondentes com os óxidos mostrados na análise de FRX e estão de acordo com a literatura para latossolos, como em Ker (1997). A sílica mostrada no FRX é apresentada em forma de quartzo e caulinita no DRX. A presença de caulinita, que é uma argila 1:1 (estável), mostra que este solo ainda está em evolução, tendo perdido sílica durante o processo de intemperismo, mas ainda com presença de material argiloso. A caulinita pode ter “encoberto” a presença de alumínio livre e, portanto, não foi possível perceber mineral gibbsita no DRX. A presença de hematita é correspondente com o fato de haver grande porcentagem de ferro fixado no solo laterítico pela lixiviação a que o material já esteve submetido.

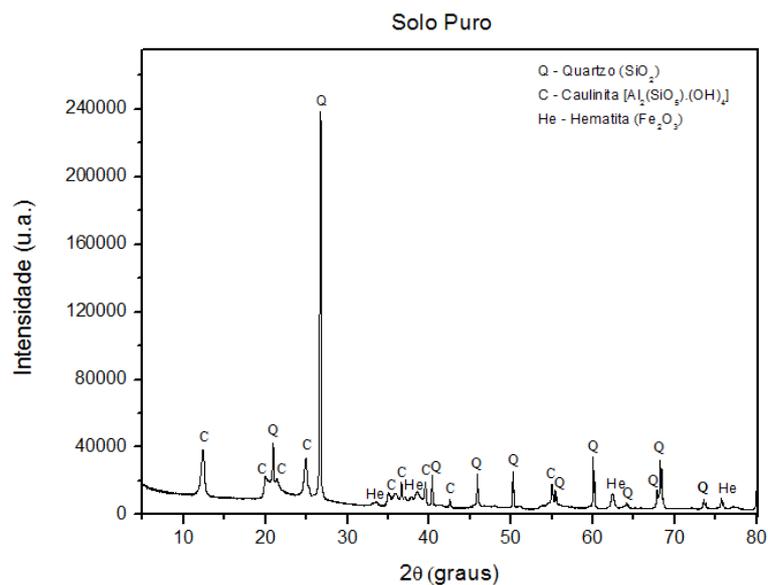


Figura 4.7 – DRX solo puro.

Fonte: Do autor.

O fato de alguns picos de hematita e caulinita no solo puro não estarem bem formados (se mostrarem ligeiramente arredondados) evidenciam que o material ainda está em processo de evolução e os cristais não estão bem formados.

A Figura 4.8 apresenta as fases cristalinas das misturas e mostra, novamente, o solo puro, para fins comparativos. É possível perceber que a adição do RPP provocou reduzida alteração do tipo de mineral presente nas misturas, de modo que, apenas para as Misturas de 10%, 15% e 20% houve incidência de Mulita, que estava presente apenas no RPP puro. Os picos presentes nas Misturas são bastante semelhantes com os presentes no solo puro, o que pode significar que a quantidade de RPP adicionada ainda não é capaz de influenciar, significativamente, o comportamento químico das Misturas.

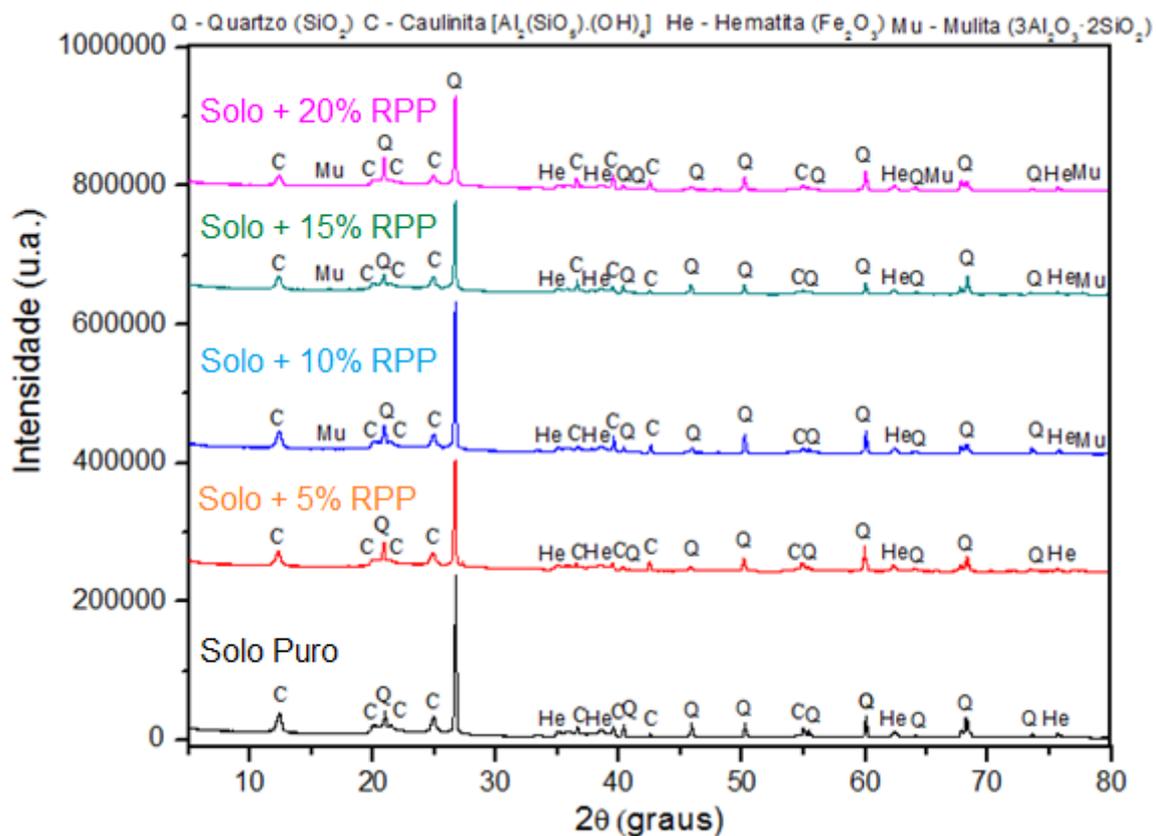


Figura 4.8 – DRX Solo puro e Misturas.

Fonte: Do autor.

#### 4.1.7 Microscopia Eletrônica de Varredura e EDS

A Figura 4.9 mostra imagens com ampliações de 150x de todos os materiais puros e das quatro misturas analisadas neste trabalho.

É possível identificar, a partir das imagens apresentadas, que o RPP puro apresenta maior quantidade de partículas com diâmetro reduzido do que o solo puro, o que está de acordo com os resultados dos ensaios de granulometria, e que, para maiores teores de RPP nas misturas, maior a quantidade de finos visíveis nas imagens de MEV. Também é possível verificar nas imagens que os finos do RPP são capazes de ocupar espaços vazios deixados pelas partículas do solo. Na Figura 4.9 (c), por exemplo, é possível perceber finos sobre ranhuras existentes na própria partícula do solo.

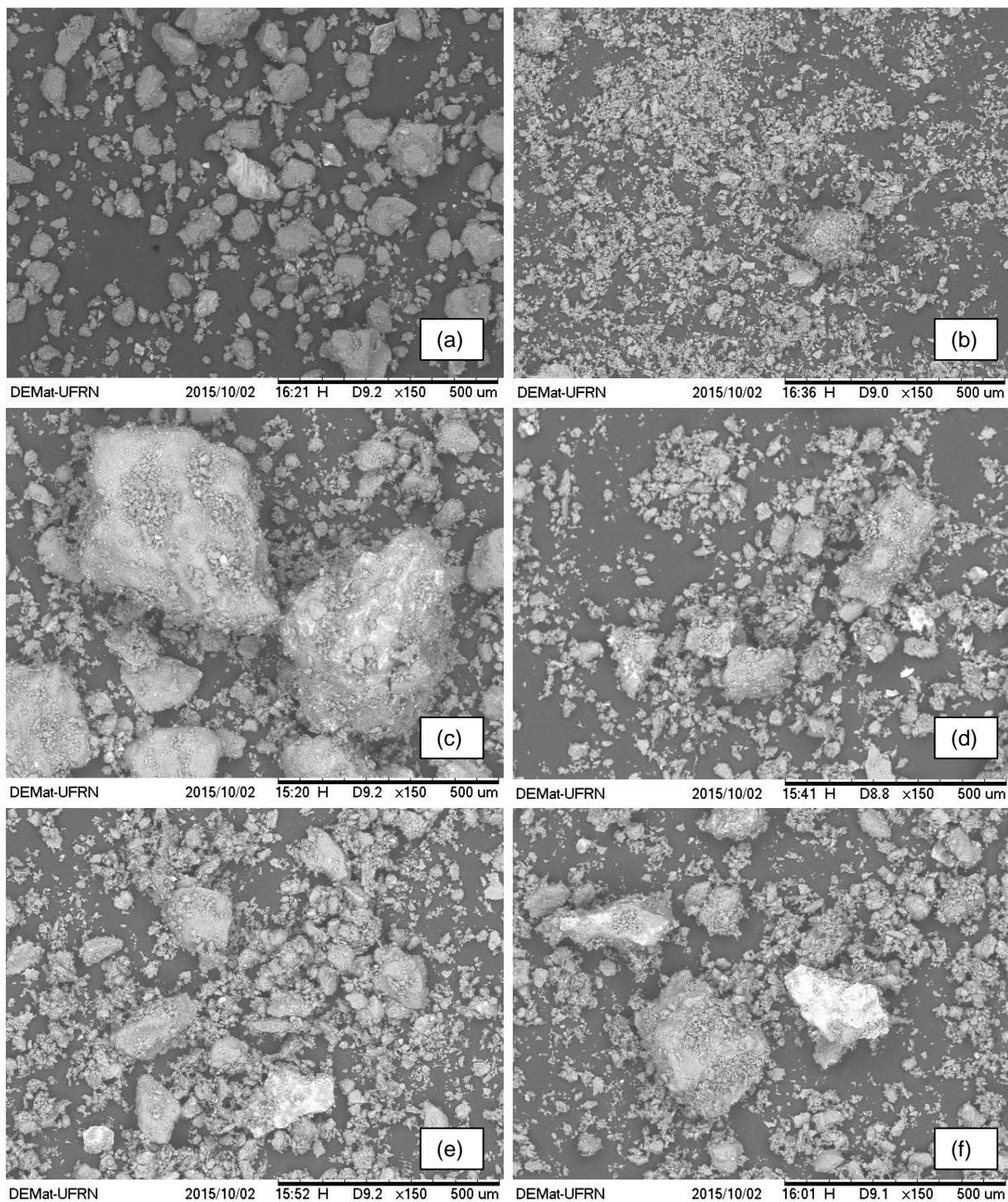


Figura 4.9 – Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras com aproximação de 150x. (a) Solo puro. (b) RPP puro. (c) Mistura 5%. (d) Mistura 10%. (e) Mistura 15%. (f) Mistura 20%.

Fonte: Do autor.

A Figura 4.10 apresenta apenas o solo puro e o RPP puro em uma aproximação de 1000x, para que seja possível uma melhor análise da superfície do material.

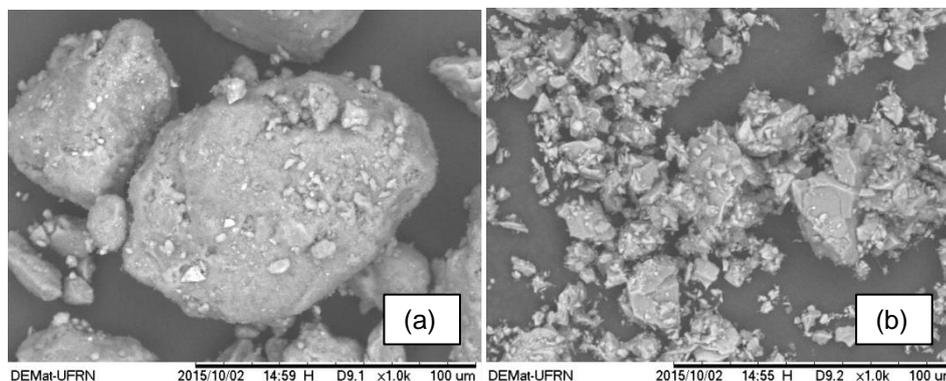


Figura 4.10 – MEV com aproximação de 1000x. (a) Solo puro. (b) RPP puro.

Fonte: Do autor.

Pelas imagens aproximadas percebe-se que o solo puro é composto por partículas com formato mais arredondado e poucos finos. Esta característica é compatível com os dados constantes na literatura sobre o intemperismo atuante em latossolos transportados, que provoca o desgaste superficial das partículas pela ação da água. O resíduo puro, por outro lado, apresenta grande quantidade de partículas com formato irregular e angular, em concordância com o que foi verificado por Santos (2008) e Breitenbach (2013). Esta característica é favorável para uma maior resistência ao cisalhamento deste material.

Foram realizadas análises de EDS nas amostras do MEV com a finalidade de verificar a compatibilidade com os resultados de FRX. As análises de EDS foram realizadas em toda a imagem com aproximação de 150x para o solo puro e as misturas e em aproximação de 2500x para o RPP puro. Também foram realizadas análises pontuais em regiões que se mostravam com maior brilho nas mesmas aproximações anteriores. Para todos os ensaios de EDS pontuais, verificou-se a presença principalmente de Silício, Alumínio e Ferro, o que é compatível com o ensaio realizado, dado que o feixe de elétrons tende a se fixar mais nos elementos

mais pesados e, portanto, apresentar maior brilho nestes pontos. Os resultados dos ensaios de EDS em toda a imagem estão sumarizados na Tabela 4.5 a seguir.

Uma análise dos dados da Tabela 4.5 mostra que, em geral, os componentes mostrados no FRX são compatíveis com os mostrados no EDS, sendo Silício, Ferro e Alumínio os preponderantes. Não se deve, no entanto, tomar os dados do EDS como verdade absoluta, uma vez que a análise foi feita apenas sobre uma pequena região e, portanto, situações como 0,00% de potássio para o RPP puro no EDS não expressa a realidade – no FRX observou-se um teor de 6,42%.

	<b>Solo Puro</b>	<b>Mistura 5%</b>	<b>Mistura 10%</b>	<b>Mistura 15%</b>	<b>Mistura 20%</b>	<b>RPP puro</b>
<b>Si (%)</b>	39,78	50,74	48,00	44,30	33,22	70,77
<b>Fe (%)</b>	20,63	11,30	10,64	17,03	32,92	1,14
<b>Al (%)</b>	29,54	27,76	26,13	22,98	19,36	16,96
<b>Ti (%)</b>	1,33	0,81	1,26	0,80	0,59	0,62
<b>Zr (%)</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Mg (%)</b>	3,73	4,31	5,49	5,79	5,48	2,36
<b>K (%)</b>	0,00	1,76	2,24	2,17	1,28	0,00
<b>Mn (%)</b>	0,00	0,16	0,00	0,09	0,00	0,00
<b>Na (%)</b>	4,94	2,88	5,78	6,38	6,88	6,66
<b>Ca (%)</b>	0,04	0,28	0,46	0,46	0,27	1,49

Tabela 4.5 – Resultados EDS

Fonte: Do autor.

#### 4.1.8 Compactação

As curvas de compactação obtidas para os materiais puros e para as misturas estão apresentadas na Figura 4.11 e os valores de massa específica seca máxima e umidade ótima estão indicados na Tabela 4.6 a seguir.

Para maiores porcentagens de resíduo na mistura, maior a umidade ótima, menor a massa específica seca máxima e mais abatida a forma da curva. Este comportamento é coerente com as curvas de compactação constantes na literatura, pois o RPP possui maior fração de finos do que o solo puro e, portanto, a quantidade de finos das misturas também é maior do que no solo puro. Os dados da

compactação obtidos para o RPP puro são compatíveis com os obtidos por Araujo e Costa (2015). Já os dados da compactação para o solo puro e a mistura de 10% apresentam-se bastante diferentes dos encontrados pelos mesmos autores, possivelmente porque o latossolo estudado foi coletado em local diferente.

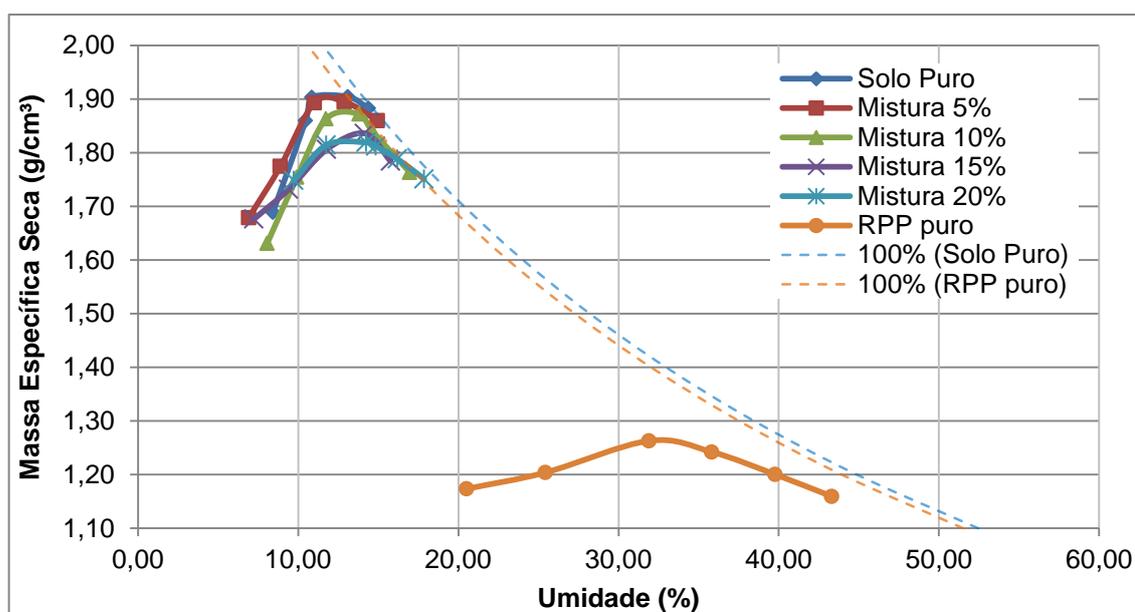


Figura 4.11 – Curvas de compactação.

Fonte: Do autor.

	Solo puro	Mistura 5%	Mistura 10%	Mistura 15%	Mistura 20%	RPP puro
$\rho_{dm\text{máx}}$ ( $\text{g/cm}^3$ )	1,94	1,91	1,90	1,85	1,82	1,27
$W_{\text{ót}}$ (%)	11,72	11,80	12,68	13,55	14,12	33,18

Tabela 4.6 – Dados da compactação.

Fonte: Do autor.

As misturas de 15% e 20% são as que apresentam valores significativamente diferentes do solo puro, o que pode ser um indicativo de que é para essas porcentagens que os efeitos da adição do RPP se tornam mais acentuados. O fato de as curvas de 15% e 20% serem as mais abertas dentre as misturas evidencia que a adição do RPP pode ser benéfica nessas porcentagens para efeitos de compactação, pois o controle do grau de compactação exigido, que é geralmente

baseado apenas na massa específica do material compactado, se torna menor do que para o solo puro (que tem uma curva mais fechada). A mistura de 5%, por outro lado, foi a que apresentou melhor compactação, com maior massa específica seca máxima e menor umidade ótima dentre as misturas, quase coincidindo com a curva de compactação do solo puro.

## 4.2 Ensaios de Resistência Mecânica

### 4.2.1 Cisalhamento Direto

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos para o ensaio de cisalhamento direto do solo puro, RPP puro e das misturas de 5%, 10% e 20% na condição inundada, por se tratar da situação onde o material compactado pode apresentar os menores valores de resistência (se comparado com a condição não inundada), dado que o objetivo da inundação é reduzir os efeitos da sucção matricial no material. Os corpos-de-prova foram moldados próximos da umidade ótima e na massa específica seca máxima, conforme apresentado na Tabela 4.7.

Material		Ensaio 1			Ensaio 2		
		50kPa	100kPa	200kPa	50kPa	100kPa	200kPa
Solo Puro	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,94	1,95	1,94	1,93	1,93	1,93
	$w_{ót}$ (%)	11,73	11,18	11,46	12,10	11,89	12,26
5%	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,91	1,91	1,91	1,91	1,92	1,91
	$w_{ót}$ (%)	11,85	11,56	11,74	11,90	11,38	12,33
10%	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,90	1,89	1,88	1,90	1,90	1,88
	$w_{ót}$ (%)	12,76	13,29	13,40	12,77	12,80	13,40
20%	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,83	1,82	1,76	1,83	1,81	1,77
	$w_{ót}$ (%)	13,54	14,27	16,05	13,84	15,01	15,57
RPP puro	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,28	1,27	1,28	1,28	1,28	1,32
	$w_{ót}$ (%)	32,64	32,85	32,16	31,71	32,02	28,04

Tabela 4.7 – Massa específica seca máxima e umidade ótima obtidas na moldagem de todos os corpos-de-prova de cisalhamento direto.

Fonte: Do autor.

A Figura 4.12 mostra as envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb obtidas a partir de uma linha de tendência linear de todos os pontos obtidos nas séries de ensaios de cisalhamento direto, para cada material estudado. Numa análise inicial é possível perceber que a resistência ao cisalhamento das misturas aparentemente decresce com o acréscimo de resíduo, sendo que apenas a mistura de 5% apresenta envoltória de ruptura similar ao do solo puro, comportamento compatível com as curvas de compactação mostradas no item 4.1.8 deste trabalho.

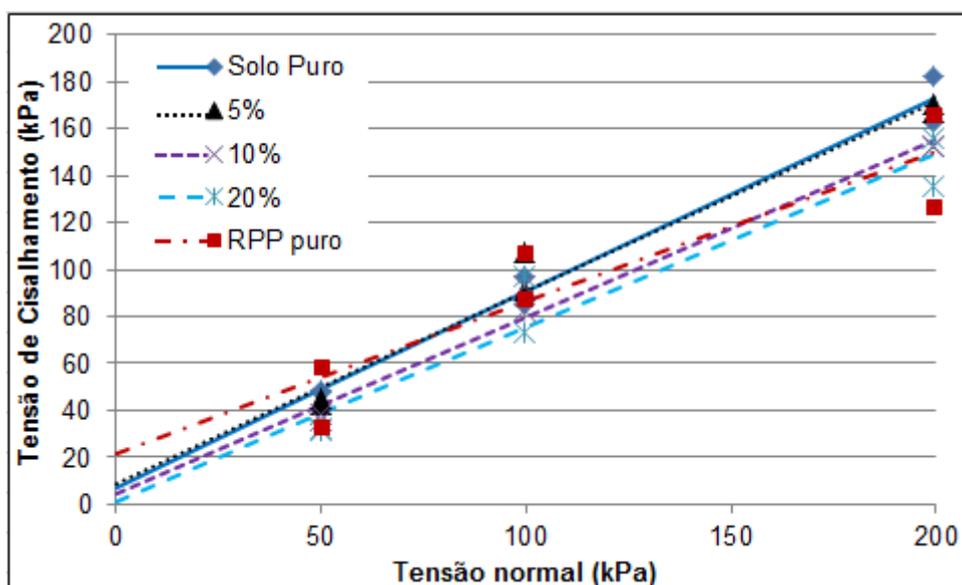


Figura 4.12 – Envoltórias de ruptura.

Fonte: Do autor.

A Tabela 4.8 apresenta um resumo dos dados de resistência de ruptura obtidos. Os valores mostrados evidenciam que o resíduo puro é o material que apresenta maior intercepto de coesão, mas menor ângulo de atrito, dentre todos os estudados. Isso mostra que, apesar de possuir maior angularidade das partículas, conforme visto nas imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (item 4.1.7), a interação do resíduo com água pode ser mais influente para provocar aumento da coesão e reduzir o atrito entre as partículas. Como já previamente apresentado, a interação do resíduo com água provoca a formação de torrões de modo que, possivelmente, o resíduo passe a trabalhar não mais como partículas angulares individuais, mas como um torrão, de maior diâmetro, arredondado. Tais

torrões são difíceis de ser desfeitos pela compressão (das mãos ou de mão-de-graal), mas é possível que sejam mais facilmente desfeitos pela ação do cisalhamento. A partir do momento em que o RPP se encontra combinado com o solo, as partículas do resíduo podem se encontrar envolvidas pelas partículas do solo, formando nenhum ou poucos torrões.

<b>Material</b>	<b>c (kPa)</b>	<b><math>\phi</math> (°)</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>Solo puro</b>	7,0	39.8	0.984
<b>Mistura 5%</b>	9.1	39.1	0.975
<b>Mistura 10%</b>	4.5	37.0	0.981
<b>Mistura 20%</b>	1.2	36.6	0.940
<b>RPP puro</b>	21.5	32.9	0.851

Tabela 4.8 – Dados do cisalhamento direto.

Fonte: Do autor.

Uma análise específica dos valores apresentados na Tabela 4.8 mostra que a inserção de RPP no solo provocou uma tendência geral à redução nos valores de intercepto de coesão e de ângulo de atrito das misturas, mas, do ponto de vista prático de aplicações em geotecnia, e considerando o aspecto ambiental envolvido com esta pesquisa, estas reduções não inviabilizariam o uso do RPP para a execução de aterros compactados. Comportamento de diminuição de valores semelhante também foi identificado por Araujo e Costa (2014) e, para estes autores, houve apenas uma ligeira vantagem para uma mistura de 10% de RPP sobre as outras misturas. Isto pode ser explicado pelo fato de que, mesmo para a maior porcentagem de mistura (20%), a quantidade de solo presente é bem maior do que a quantidade de resíduo e, portanto, pode ser mais representativa para determinar o comportamento global de resistência das misturas.

Ainda que, em termos de valores, a mistura de 5% apresente maior coesão, é necessário certa cautela na análise dos dados. Os valores de coesão são muito pequenos e podem ter relação, inclusive, com o ajuste linear utilizado para a elaboração das envoltórias de ruptura. É possível, por exemplo, que as envoltórias do RPP puro e das misturas sejam mais bem ajustadas por meio de envoltórias curvas. Ademais, o RPP é um *resíduo* e, portanto, seus dados não devem ser

entendidos como seriam esperados para *solo*: há comportamentos que são inerentes a este material e que podem provocar desempenhos diferentes do esperado para um solo. Variabilidade semelhante ocorreu também nos valores de Índice de Plasticidade (item 4.1.4 deste trabalho) e pode significar que ocorrem reações químicas entre o RPP e o solo, ou ainda que sobre a superfície das partículas do resíduo haja cargas elétricas que alterem o comportamento das misturas, apesar de não haver evidências sobre o assunto na literatura utilizada. Ainda com relação aos dados da Tabela 4.8, ressalta-se que seriam necessários mais repetições do ensaio de cisalhamento direto do RPP puro para avaliar melhor a variabilidade do material.

Assim sendo, uma abordagem mais apropriada para a observação dos dados dos ensaios de cisalhamento direto desses materiais consiste na observação do comportamento da resistência como um todo, em lugar de avaliar os valores de intercepto de coesão e ângulo de atrito de forma independente. A Figura 4.13 mostra a variação da tensão de resistência ao cisalhamento direto máxima, em comparação com a proporção de resíduo utilizada nas misturas. Os valores da tensão de cisalhamento máxima são uma média entre as duas séries de ensaios realizadas e seus valores se apresentam normalizados em relação aos valores de resistência de pico ao cisalhamento do solo puro.

Pelo gráfico apresentado, é possível identificar que, para as três tensões normais adotadas no ensaio de cisalhamento direto, os maiores valores de resistência de pico foram alcançados pelo solo puro e pela mistura de 5% de modo que, para esta situação, a mistura de 5% se mostrou a mais resistente entre todas as misturas. É possível perceber também uma tendência dos valores de resistência diminuir, com o aumento da adição de resíduo, até à porcentagem de 20% analisada.

Como forma de identificar se o material de fato perde resistência com o acréscimo de resíduo, a Figura 4.14 mostra os dados já apresentados na Figura 4.13, acrescido dos valores de pico de resistência ao cisalhamento normalizados pelos valores do solo puro, de outro solo laterítico, constantes na literatura (Araujo e Costa, 2014). Pelo gráfico, nota-se que, novamente, ocorre uma tendência ao decréscimo na resistência ao cisalhamento direto com o aumento da adição de

resíduo, de forma que as menores adições de RPP alcançaram maiores valores de resistência ao cisalhamento.

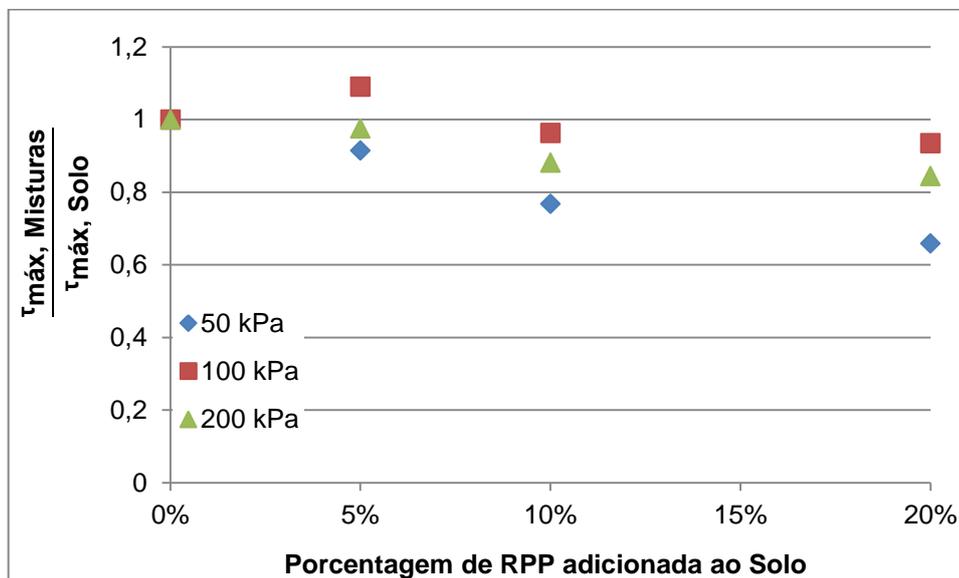


Figura 4.13 – Gráfico de Tensão de Cisalhamento Máxima normalizada do solo puro e das Misturas analisadas em função do teor de resíduo adicionado.

Fonte: Do autor.

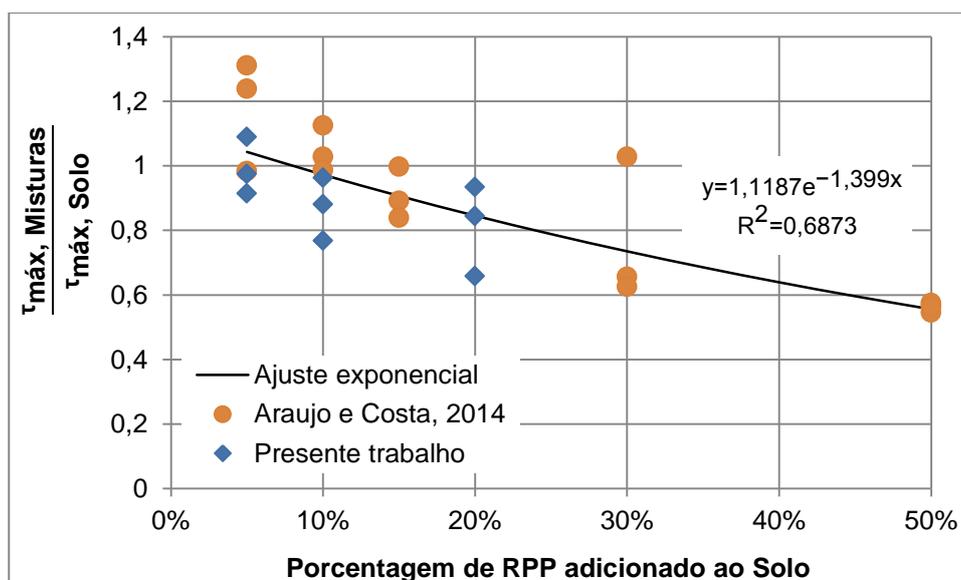


Figura 4.14 – Gráfico de Tensão de Cisalhamento Máxima normalizada do solo puro e das Misturas analisadas *versus* o teor de resíduo adicionado.

Fonte: Do autor.

A Figura 4.14 apresenta nitidamente que há uma grande variabilidade nos resultados de resistência encontrados, para todas as porcentagens de mistura estudadas, tanto nesta pesquisa quanto na pesquisa de Araujo e Costa (2014). Esta situação pode ser representativa, novamente, de que o resíduo possui um comportamento variável intrínseco, que se repetiu sempre que houve uso de água na preparação do material, como, por exemplo, nos resultados dos ensaios de Limites de Atterberg, nos valores de intercepto de coesão e na tensão de pico de resistência ao cisalhamento direto.

A realização de mais ensaios de cisalhamento direto por outros autores, a partir da adição de RPP em massa de solo seco, para as tensões normais de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa, pode auxiliar no melhor entendimento do comportamento geral de resistência ao cisalhamento desses materiais geotécnicos em contato com o resíduo. Tais valores, se adicionados aos pontos mostrados na Figura 4.14, poderão ajustar melhor a curva de tendência exponencial adotada, de modo a permitir uma preestimativa dos valores de resistência em trabalhos futuros.

De maneira geral, pode-se dizer que a adição de RPP ao solo provocou variações no comportamento das misturas na resistência ao cisalhamento, com certa variabilidade nos resultados, mas quaisquer porcentagens de mistura estudados neste trabalho poderiam ser aplicadas na compactação de aterros, a depender, principalmente, dos aspectos ambientais envolvidos, isto é, da reatividade do RPP em solo, e da quantidade de RPP disponível na região, bem como do carregamento esperado para o aterro. De todo modo, por apresentar maiores tensões de pico de resistência ao cisalhamento, em todas as tensões normais e em comparação com as outras misturas, elegeu-se, nesta pesquisa, a mistura de 5% como sendo a proporção a ser ensaiada para a determinação da capacidade de carga. Os gráficos referentes às deformações volumétricas dos materiais em cisalhamento direto inundado encontram-se no Anexo A.

#### **4.2.2 Prova de Carga em Placa**

Com base no que foi apresentado no item 3.5.2.1 deste trabalho, calculou-se a capacidade de carga teórica para o solo puro e para a Mistura de 5%, a ser

utilizada como base para o desenvolvimento do ensaio de prova de carga em placa. Os valores calculados e os respectivos parâmetros estão mostrados na Tabela 4.9. O valor da tensão admissível, calculado utilizando-se um fator de segurança de 3,0, também está mostrado na Tabela 4.9.

	Solo puro	Mistura 5%
<b>Coesão (kPa)</b>	6,98	9,10
<b>Ângulo de Atrito (°)</b>	39,8	39,1
<b>Modo de ruptura</b>	Geral	Geral
<b>N<sub>c</sub></b>	75,31	67,87
<b>S<sub>c</sub></b>	1,85	1,82
<b>N<sub>y</sub></b>	109,41	92,25
<b>S<sub>y</sub></b>	0,6	0,6
<b>B (m)</b>	0,3	0,3
<b>γ<sub>sat</sub> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	21	21
<b>σ<sub>r</sub> (kPa)</b>	1081	1216
<b>σ<sub>a</sub> (kPa)</b>	360	405

Tabela 4.9 – Valores e parâmetros utilizados para cálculo da capacidade de carga.

Fonte: Do autor.

As porcentagens obtidas por meio dos dados do controle de compactação da densidade *in situ* das camadas dos corpos-de-prova moldados estão apresentados na Tabela 4.10. É possível identificar que, de maneira geral, a compactação do aterro com a mistura de 5% apresentou menor grau de compactação do que o aterro de solo puro.

	Solo Puro				Mistura 5%			
	1 (%)	2 (%)	3 (%)	Média	1 (%)	2 (%)	3 (%)	Média (%)
<b>Camada 1</b>	99,12	93,54	95,13	<b>95,93</b>	103,88	99,44	94,35	<b>99,22</b>
<b>Camada 2</b>	92,89	94,19	98,02	<b>95,03</b>	96,86	100,42	98,17	<b>98,48</b>
<b>Camada 3</b>	93,03	100,78	96,31	<b>96,71</b>	94,99	98,13	94,85	<b>95,99</b>
<b>Camada 4</b>	102,44	100,08	95,16	<b>99,23</b>	95,32	95,93	95,23	<b>95,49</b>
<b>Camada 5</b>	99,45	101,71	100,23	<b>100,46</b>	94,85	94,52	95,98	<b>95,12</b>
<b>Camada 6</b>	103,92	105,91	102,86	<b>104,23</b>	95,18	95,46	95,07	<b>95,24</b>

Tabela 4.10 – Porcentagens do controle de compactação das camadas.

Fonte: Do autor.

A Figura 4.15 apresenta o resultado da prova de carga em placa para o solo puro. Nela é possível perceber que não houve ruptura nítida nem ruptura física do material, sendo observada uma curva que se aproxima mais com o comportamento de um material que rompeu por ruptura por puncionamento do que por ruptura geral. De fato, ao final do ensaio, percebeu-se que a placa havia se deslocado perfeitamente no solo e que o solo adjacente estava, aparentemente, comprimido – Figura 4.16. Assim sendo, o valor da capacidade de carga calculado deveria incluir a redução nos parâmetros de coesão e ângulo de atrito, própria para ruptura por puncionamento.

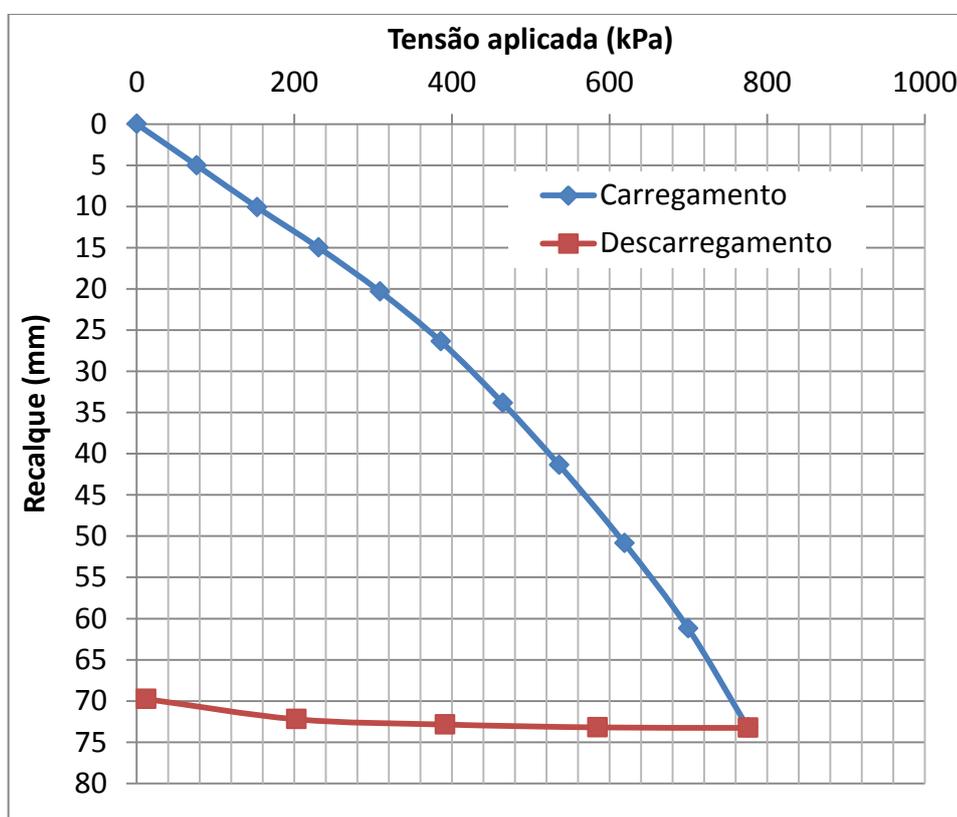


Figura 4.15 – Curva Tensão *versus* Recalque obtida para o ensaio de prova de carga em placa do solo puro.

Fonte: Do autor.

O formato da curva mostrado na Figura 4.15 evidencia que a ruptura foi do tipo convencional e que necessita de um critério arbitrado para a determinação real da tensão admissível. O primeiro critério adotado é o de o final da curva se

transformar numa reta (Terzaghi, 1943 *apud* Cintra *et al.*, 2011): o ponto de início desse trecho (aproximadamente em 620 kPa) é o ponto da tensão de ruptura e, assim, a tensão admissível é metade deste valor (310 kPa). Já o segundo critério adotado é o utilizado pela cidade de Boston, EUA, e determina que a tensão admissível tenha que ser o menor entre dois valores: i) a tensão tal que ocorra um recalque de 10 mm (160 kPa) ou ii) a metade da tensão tal que ocorra um recalque de 25 mm ( $360/2 = 180$  kPa).



Figura 4.16 – Afundamento da placa no aterro compactado com solo puro.

Fonte: Do autor.

Assim, a tensão admissível do aterro compactado com solo puro é de 160 kPa. Este valor mostra que a tensão admissível teórica foi superestimada. Se houvesse sido considerada a ruptura por puncionamento, a tensão admissível teórica seria subestimada, de apenas 75 kPa. Nascimento (2015) também executou ensaio de prova de carga em placa nas mesmas condições, com solo laterítico, e encontrou as mesmas disparidades entre os valores de capacidade de carga teórica e prática.

Procedendo-se da mesma forma, a Figura 4.17 mostra o resultado da prova de carga em placa para a Mistura de 5%. A tensão admissível pelo critério da reta

(Terzaghi, 1943 *apud* Cintra *et al.*, 2011) seria, aproximadamente, 330 kPa, enquanto que, pelo critério de Boston, seria ou 230 kPa ou 300 kPa. Selecionando-se o menor dos três valores, a tensão admissível do aterro compactado com a Mistura de 5% é de 230 kPa. Novamente, este valor é bem menor do que a tensão admissível calculada para uma ruptura geral, mas a curva tensão x recalque se mostra mais próxima da condição de ruptura por punção, comprovando-se pela deformação apresentada no material após a finalização do ensaio (Figura 4.18). Neste caso, a tensão admissível teórica para a condição de punção (87 kPa) também seria muito inferior ao valor obtido pelo ensaio.

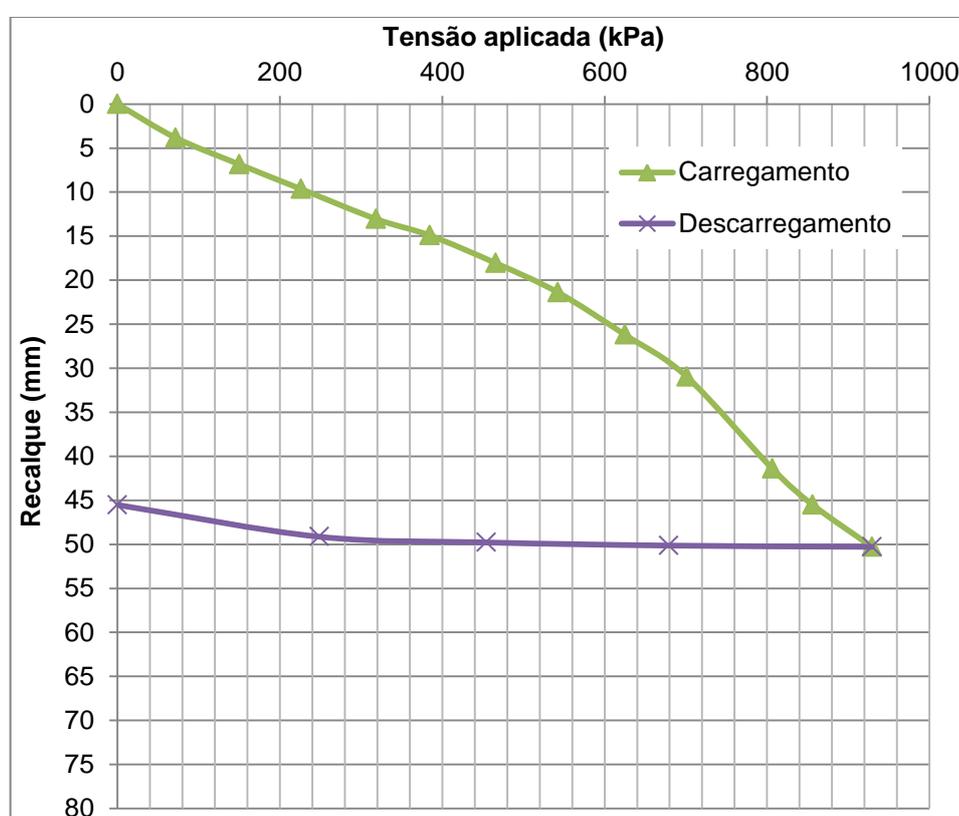


Figura 4.17 – Curva Tensão *versus* Recalque obtida para o ensaio de prova de carga em placa da Mistura de 5%.

Fonte: Do autor.

Uma comparação com os dados apresentados na Figura 4.15 e 4.17 mostra que, possivelmente, a inserção de resíduo no solo tenha provocado melhorias no comportamento geotécnico global do material. O aterro compactado com a mistura

não só atingiu uma tensão admissível 1,44 vezes maior do que a do solo puro, como também permitiu que o recalque alcançado durante o carregamento fosse menor. Percebe-se, por exemplo, que para a tensão máxima aplicada ao ensaio no solo puro, o recalque final foi de cerca de 73 mm, enquanto que, para a mesma tensão de 776 kPa, o recalque apresentado pela mistura foi apenas quase metade do recalque do solo, sendo o valor de 36 mm. Essa mesma conclusão pode ser obtida quando se comparam os valores do coeficiente de mola de ambos os materiais: o solo puro apresenta  $k_s = 16$  kPa/mm, enquanto a mistura de 5% apresenta  $k_s = 26$  kPa/mm.



Figura 4.18 – Afundamento da placa no aterro compactado com Mistura de 5%.

Fonte: Do autor.

É importante considerar, porém, que, apesar da variabilidade identificada na Figura 4.14, os resultados de capacidade de carga apresentados neste ensaio não parecem dispersos da condição prática de aplicação. Como apresentado por Silva (2005), Souza (2007), Purificação (2009), Carvalho (2013) e Yunhong *et al.* (2014), o RPP apresenta atividade pozolânica, isto é, possui elevado teor de sílica reativa com hidróxido de cálcio na presença de água. Estima-se, portanto, que o RPP tenha reatividade com a água, pois sua análise de FRX (item 4.1.5) mostrou alto teor de sílica e certo teor de cálcio. É possível, então, que as restrições impostas pela

dificuldade de moldar o corpo-de-prova de grandes proporções tenha permitido a ação da atividade pozolânica no ensaio de prova de carga em placa, dado que decorreram 48 horas entre o início da moldagem e o início da inundação, favorecendo o umedecimento (pela água da umidade ótima) e a secagem do material.

Assim, pode-se dizer que, pelos ensaios de prova de carga realizados, a Mistura de 5% apresenta uma capacidade de carga superior ao solo puro em cerca de 44%. A expectativa de uma capacidade de carga maior para a mistura do que para o solo puro é compatível com os valores teóricos obtidos no cálculo da tensão admissível dos materiais, mas é diretamente dependente de um tempo de espera (ou secagem) entre a moldagem e a inundação do corpo-de-prova.

## Capítulo 5

# Conclusões e Recomendações

### 5.1 Conclusões

Neste trabalho estudou-se a incorporação de resíduo gerado durante o processo de polimento de porcelanato (RPP), em solo, para aplicação em aterros compactados. A principal finalidade do trabalho foi a análise mecânica, química e mineralógica dos materiais, visando proporcionar uma destinação mais adequada ao resíduo, para que este não continue sendo descartado livremente em leiras a céu aberto.

Foram realizados diversos ensaios de caracterização geotécnica, química, mineralógica e de resistência mecânica no RPP puro, no solo puro e em quatro misturas de adição de RPP em massa seca de solo Puro (teores de 5%, 10%, 15% e 20%). A partir dos ensaios realizados, pode-se concluir que:

- O RPP é um material com partículas menos densas do que o solo puro, de modo que a massa específica do RPP puro foi de  $2,538 \text{ g/cm}^3$ , enquanto que, para o solo puro, este valor foi de  $2,600 \text{ g/cm}^3$ . As misturas apresentam valores de massa específica dos sólidos intermediários ao solo e ao RPP.
- O solo puro é uma areia argilosa, segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos, com quantidade de silte reduzida na sua distribuição granulométrica. O RPP puro, por outro lado, é um material composto apenas por partículas menores do que  $0,015 \text{ mm}$ , com maior constituição de fração equivalente a silte, e partículas uniformes. Todas as misturas solo-RPP foram classificadas como areia silto-argilosa.
- O RPP foi identificado como sendo um material medianamente plástico, mas a determinação do limite de plasticidade deste material foi dificultada, uma vez que o aumento da umidade no resíduo provoca a formação de torrões difíceis de serem desfeitos. O solo puro e as misturas são materiais aparentemente fracamente plásticos.

- As curvas de compactação do solo e das misturas se mostraram compatíveis com curvas de materiais mais granulares, uma vez que eram menos abatidas, com maiores valores de massa específica seca máxima e menores valores de umidade ótima, em comparação com o RPP puro. A mistura de 5% foi a que apresentou, dentre todas as misturas, o maior valor de massa específica seca máxima.
- A análise dos óxidos dos materiais permitiu classificar o solo puro como um latossolo, por seu alto teor de alumina e óxido de ferro e reduzido teor de sílica. O RPP puro apresentou teores de óxido de ferro e óxido de potássio maiores do que a literatura e óxido de magnésio inferiores aos verificados nas referências, possivelmente devido à coleta de matéria-prima em jazidas diferentes e à utilização de abrasivos oriundos de outras fontes, produzidos com cimento Portland.
- O RPP mostra características de pozolanas artificiais, uma vez que apresenta elevados teores de sílica ativa, associada com a presença de óxido de cálcio.
- A análise das fases cristalinas dos materiais se mostrou correspondente com os óxidos encontrados. O solo puro contém quartzo, caulinita e hematita e se mostra como um solo ainda em evolução. O RPP puro contém quartzo e mulita provenientes da peça desbastada e carbetto de silício proveniente do abrasivo desgastado. As misturas se mostram pouco influenciadas pela adição de RPP e apenas as misturas de 10%, 15% e 20% apresentaram mulita.
- A microscopia eletrônica de varredura mostrou que o solo puro apresenta baixa quantidade de partículas finas e maior parte das partículas com formato arredondado, enquanto o RPP é majoritariamente composto por finos e partículas irregulares e angulares. O formato das partículas do solo é compatível com o encontrado na literatura para solos lateríticos transportados. O formato das partículas do RPP é compatível com o observado por outros autores e possivelmente favorece um aumento na resistência ao cisalhamento deste material.
- O ensaio de cisalhamento direto foi realizado considerando-se a condição mais desfavorável de compactação do aterro, em que o material sofre inundação logo após a moldagem.

- O solo puro foi o material que apresentou maior ângulo de atrito interno, seguido pela mistura de 5%, mas não é possível afirmar que a adição de resíduo provocou mudanças significativas nos valores de ângulo de atrito das misturas. De todo modo, o solo puro e a Mistura de 5% foram os materiais que apresentaram as maiores tensões de pico resistentes ao cisalhamento, para todas as tensões normais aplicadas, de forma que, para as porcentagens de resíduo adicionadas às misturas, há uma tendência de decréscimo de tensão resistente com o aumento da adição do RPP.
- O RPP puro foi o material que apresentou maior valor de intercepto de coesão.
- A partir do ensaio de prova de carga em placa foi possível perceber que tanto o solo puro quanto a mistura de 5% apresentaram ruptura por puncionamento e as curvas obtidas nos ensaios mostraram ruptura do tipo convencional.
- Tanto os valores teóricos calculados como os valores reais obtidos para a capacidade de carga mostraram que a mistura de 5% apresentou maior capacidade de carga do que o solo puro, apresentando, também, menores recalques. Estes resultados foram possíveis, provavelmente, devido à atividade pozolânica do resíduo, pois houve 48 horas para que a reação ocorresse entre o início da moldagem e o início da inundação do corpo-de-prova.

Assim, entende-se que a adição do resíduo de polimento de porcelanato no solo estudado provocou certa melhoria nas propriedades geotécnicas do material e que, a menos que estudos ambientais adicionais mostrem alguma limitação no uso de maiores porcentagens de RPP, todas as misturas estudadas poderiam ser entendidas como materiais potenciais para a execução de aterros compactados.

## **5.2 Recomendações para pesquisas futuras**

O estudo apresentado neste trabalho foi uma investigação preliminar sobre a possibilidade de adição de resíduo de polimento de porcelanato em solo, para a execução de aterros compactados, sendo necessários mais estudos e ensaios para viabilizar o uso prático das misturas.

Assim, entende-se que mais ensaios de cisalhamento direto seriam necessários tanto para entender melhor o comportamento das misturas, quanto para verificar a variabilidade dos dados já obtidos para o resíduo puro. Ensaios de cisalhamento com diferentes dias de adensamento antes da inundação poderia possibilitar melhor verificação da ação pozolânica do resíduo. A execução do ensaio de cisalhamento direto para tensões normais menores do que 50 kPa e com múltiplos estágios de carregamento possibilitariam outras abordagens para o comportamento dos materiais puros e das misturas.

A realização de simulações numéricas, em consonância com uma análise estatística dos dados dos ensaios, seria importante para melhor compreensão do comportamento do material em mistura, bem como para valorização da aplicação em aterros.

Ensaios de adensamento e de expansão poderiam auxiliar no entendimento do comportamento geotécnico global dos materiais, além do que, por terem menor escala do que a prova de carga em placa, maior quantidade de ensaios poderia ser executada. Seria recomendável, no entanto, que mais ensaios de prova de carga também fossem realizados.

A fim de verificar o comportamento do resíduo em contato com a água, seria primordial o estudo de cargas elétricas e de propriedades hidráulicas do RPP e das misturas.

Sob o ponto de vista ambiental, também são necessários ensaios de contaminação (como lixiviação e solubilização) das misturas, a fim de verificar se o resíduo provoca impactos ambientais ao solo que inviabilizem seu uso em altos teores.

## Referências

- ABRELPE. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2014*. São Paulo, SP: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2014. 120pp.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *D3080*: standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. Pensilvânia, Estados Unidos: ASTM, 1998.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *D1143*: standard test methods for deep foundations under static axial compressive load. Pensilvânia, Estados Unidos: ASTM, 2007.
- ANFACER – Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres. *Setor de cerâmica*. Disponível em: <<http://www.anfacer.org.br/#!setor/c1v8u>>. Acesso em: 12 jan. 2015.
- ANICER – Associação Nacional da Indústria Cerâmica. *História da cerâmica*. Disponível em: <<http://portal.anicer.com.br/historia/>>. Acesso em: 12 jan. 2015.
- ARAUJO, S. C. J. F. N. Avaliação do emprego de resíduo de polimento de porcelanato em solo laterítico para pavimentação. 2014. 15pp. Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN. 2014.
- ARAUJO, S. C. J. F. N.; COSTA, C. M. L. Avaliação da resistência de misturas de solo e resíduo de polimento de porcelanato. In: XIV Congreso Colombiano de Geotecnia & IV Congreso Suramericano de Ingenieros Jóvenes Geotécnicos, 15-18 out. 2014, Bogotá, Colômbia. 6pp.
- ARAUJO, S. C. J. F. N.; COSTA, C. M. L. Avaliação do emprego de misturas de solo e resíduo de polimento de porcelanato para pavimentação. In: XV Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 15-18 nov. 2015, Buenos Aires, Argentina. 8pp.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6122*: projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6489*: prova de carga direta sobre terreno de fundação. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6459*: Solo – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6502*: Rochas e solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6508*: grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7180*: Solo – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7181*: Solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7182*: Solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10004*: resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10007*: amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13818*: placas cerâmicas para revestimento – especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

BERNARDÍN, A. M.; SILVA, M. J.; RIELLA, H. G. Characterization of cellular ceramics made by porcelain tile residues. *Materials Science and Engineering A*, n. 437, pp. 222-225, 21 jul. 2006. (2006a)

BERNARDÍN, A. M.; FELISBERTO, D. S.; DAROS, M. T.; RIELLA, H. G. Reaproveitamento de resíduos de polimento e de esmaltação para obtenção de cerâmica celular. *Cerâmica Industrial*, v. 11, n. 5/6, set./dez. 2006. (2006b).

BITTENCOURT, E. L.; BENICÁ, E. Aspectos superficiais do produto grês polido. *Cerâmica Industrial*, v. 7, n. 4, jul./ago. 2002.

BRASIL. Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

BREITENBACH, S. B. *Desenvolvimento de argamassa para restauração utilizando resíduo do polimento do porcelanato*. 2013. 180f. Tese (doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN. 2013.

CALLISTER Jr, W. D. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. Pp. 265-305.

CARVALHO, E. V. *Utilização do resíduo da retífica de cerâmica de revestimento na produção de concreto para pavimento intertravado*. 2013. 161pp. Dissertação (mestrado em Tecnologia e Inovação) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. 2013.

CERAMTEC. *Carbeto de Silício*. Disponível em: <<http://www.ceramtec.com.br/materiais-ceramicos/carboneto-de-silicio/>>. Acesso em: 25 mai. 2015.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. *Fundações diretas: projeto geotécnico*. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; TSUHA, C. H. C.; GIACHETI, H. L. *Fundações: ensaios estáticos e dinâmicos*. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Serviço nacional de levantamento e conservação de solos*. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS, 1982.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Critérios para distinção de classes de solos e de fases de unidade de mapeamento: normas em uso pelo SNLCS*. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS, 1988.

FELLENIUS, B. H. Test loading of piles and new proof testing procedure. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, v.101, n. GT-9, pp. 885-869, Set. 1975.

FERRAZ, A. V. *Reaproveitamento de subproduto industrial de polimento de porcelanato no desenvolvimento de novos materiais de interesse da indústria para redução de impacto ambiental*. 2007. 160f. Tese (doutorado em Ciência de Materiais) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE. 2007.

HANSEN, A. P.; SEO, E. S. M.; KULAY, L. A. Identificação de oportunidades de melhoria de desempenho ambiental em processo de produção de materiais cerâmicos via aplicação da técnica de avaliação de ciclo de vida (ACV). *Produção Online*, v. 10, n. 4, pp. 912-936, dez. 2010.

HECK, C. Gres porcelanato. *Cerâmica Industrial*, v. 1, n. 4/5, ago./dez. 1996.

JI, R.; ZHANG, Z.; HE, Y.; LIU, L.; WANG, X. Synthesis, characterization and modeling of new building insulation material using ceramic polishing waste residue. *Construction and Building Materials*, n. 85, pp. 119-126, mar. 2015.

KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma revisão. *Geonomos*, v. 5, n. 1, pp. 17-40, 1997.

KUMMER, L.; BASSETTI, F. J.; RIELLA, H. G.; AZEVEDO, J. C. R. Reutilização dos resíduos de polimento de porcelanato e feldspato na fabricação de novo produto cerâmico. *Cerâmica Industrial*, v. 12, n. 3, mai./jun. 2007.

MARQUES, L. N.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; SANTANA, L. N. L.; LIRA, H. L.; FERREIRA, H. C. Re-aproveitamento do resíduo do polimento de porcelanato para utilização em massa cerâmica. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v. 2, n. 2, pp. 34-42, 2007.

NASCIMENTO, P. R. F. B. *Capacidade de carga de misturas de solo laterítico e desbastes de pneus*. 2015. 160 pp. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN. 2015.

PELISSER, F.; STEINER, L. R.; BERNARDÍN, A. M. Recycling of porcelain tile polishing residue in Portland cement: hydration efficiency. *Environmental Science and Technology*, n. 46, pp. 2368-2374, 2012.

PUREZA, J. C. C. *Utilização de resíduos industriais de baixa granulometria em massas cerâmicas de argila vermelha: aspectos tecnológicos e ambientais*. 2004. 148pp. Dissertação (mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 2004.

PURIFICAÇÃO, E. B. *Estudo do uso de agregados reciclados de concreto e substituição do cimento por resíduo de polimento de porcelanato na produção de piso intertravado de concreto*. 2009. 104pp. Dissertação (mestrado em Construção

Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 2009.

RAMBALDI, E.; ESPOSITO, L.; TUCCI, A.; TIMELLINI, G. Recycling of polishing porcelain stoneware residues in ceramic tiles. *Journal of the European Ceramic Society*, n. 27, pp. 3509-3515, 2007.

ROSSO, J.; CUNHA, E. S.; ROJAS-RAMÍREZ, R. A. Características técnicas e polimento de porcellanatos. *Cerâmica Industrial*, v. 10, n. 4, jul./ago. 2005.

SANTOS, M. L. L. O. *Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil*. 2008. 165 pp. Tese (doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN. 2008.

SILVA, G. J. B. *Estudo do comportamento do concreto de cimento Portland produzido com a adição do resíduo de polimento de porcelanato*. 2005. 107pp. Dissertação (mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 2005.

SILVA, M. G. *Avaliação da incorporação combinada dos resíduos de cascalho de perfuração de poço petrolífero e de polimento do porcelanato em cerâmica vermelha*. 2012. 158pp. Tese (doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN. 2012.

SOUZA, P. A. B. F. *Estudo do comportamento plástico, mecânico, microestrutural e térmico do concreto produzido com resíduo de porcelanato*. 2007. 232 pp. Tese (doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN. 2007.

STEINER, L. R. *Efeito do resíduo do polimento de porcelanato como material cimentício complementar*. 2014. 128 pp. Dissertação (mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, SC. 2014.

TERZAGHI, K. *Theoretical soil mechanics*. Nova Iorque: John Wiley and Sons, 1943.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. *Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais*. Vol. 1. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

Worldwatch Institute. *Estado do mundo 2013: a sustentabilidade ainda é possível?* Salvador, BA: Uma ed., 2013. 247pp.

YUNHONG, C.; FEI, H.; GUANG-LU, L.; LONGSHUO, X.; JIANLONG, H. Test research on effects of ceramic polishing powder on carbonation and sulphate-corrosion resistance of concrete. *Construction and Building Materials*, n. 55, pp. 440-446, jan. 2014.

## **Anexos**

## **Anexo A – Gráficos de Cisalhamento Direto**

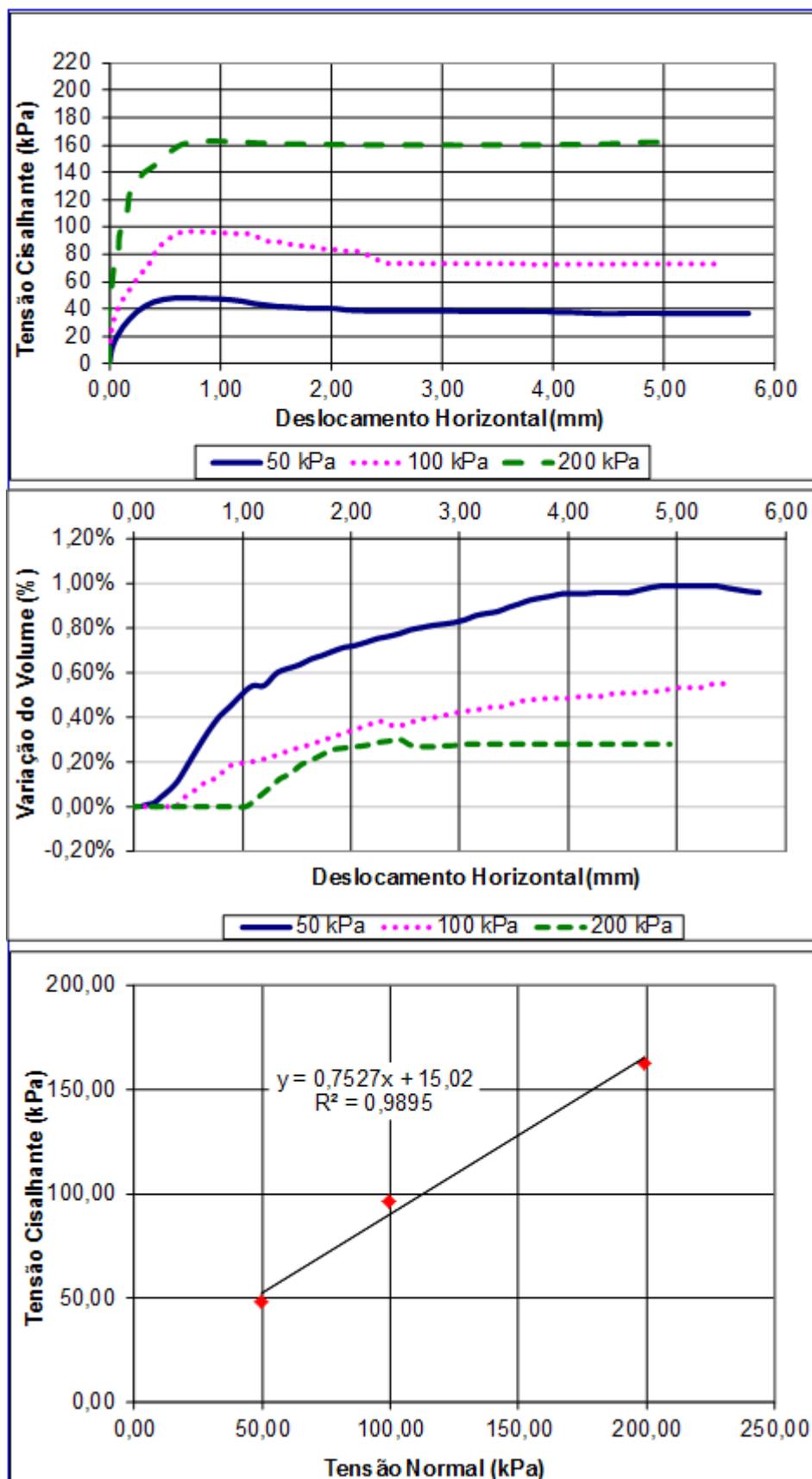


Figura A.1 – Gráficos de Cisalhamento Direto do solo puro – Ensaio 1.

Fonte: Do autor.

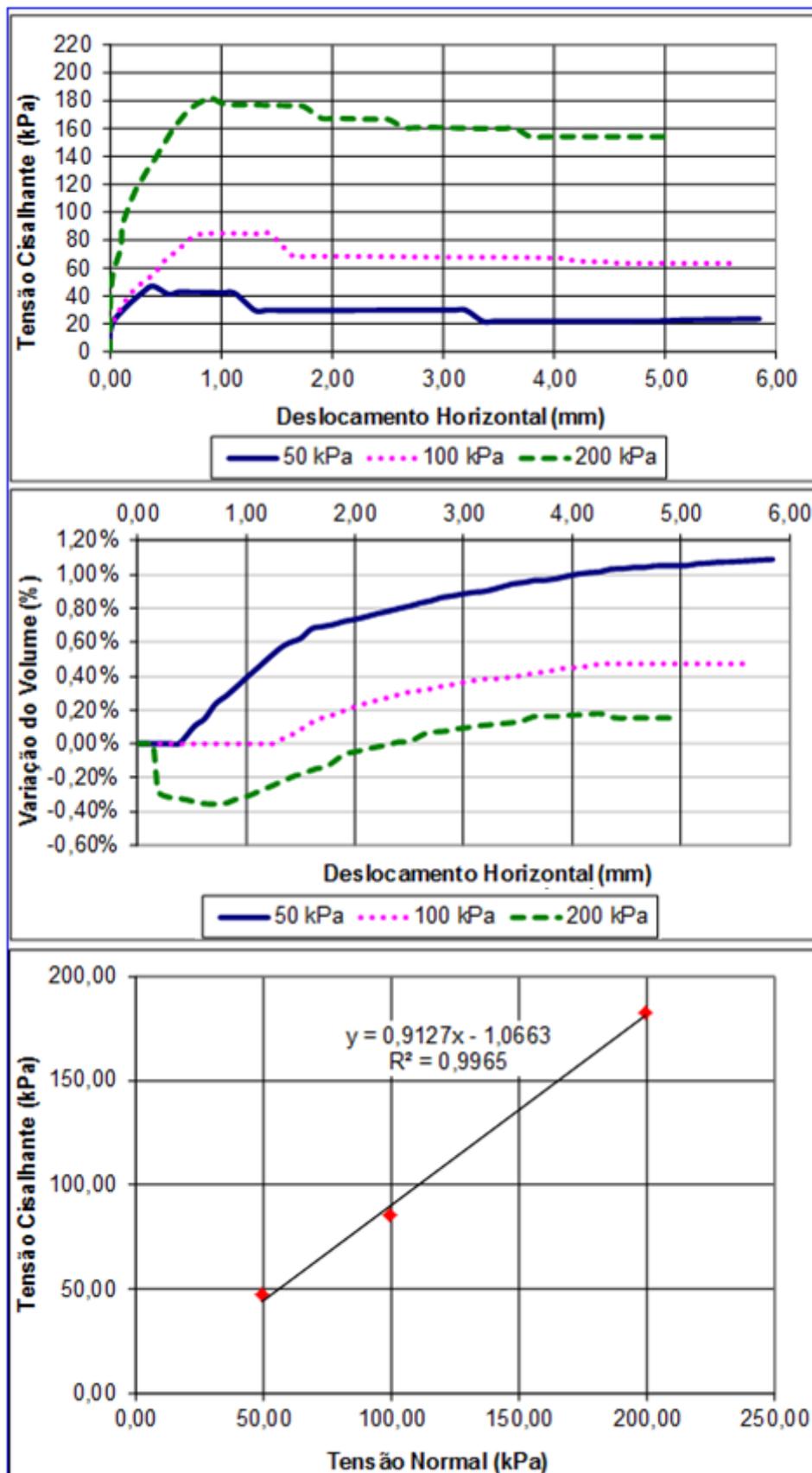


Figura A.2 – Gráficos de Cisalhamento Direto do solo puro – Ensaio 2.

Fonte: Do autor.

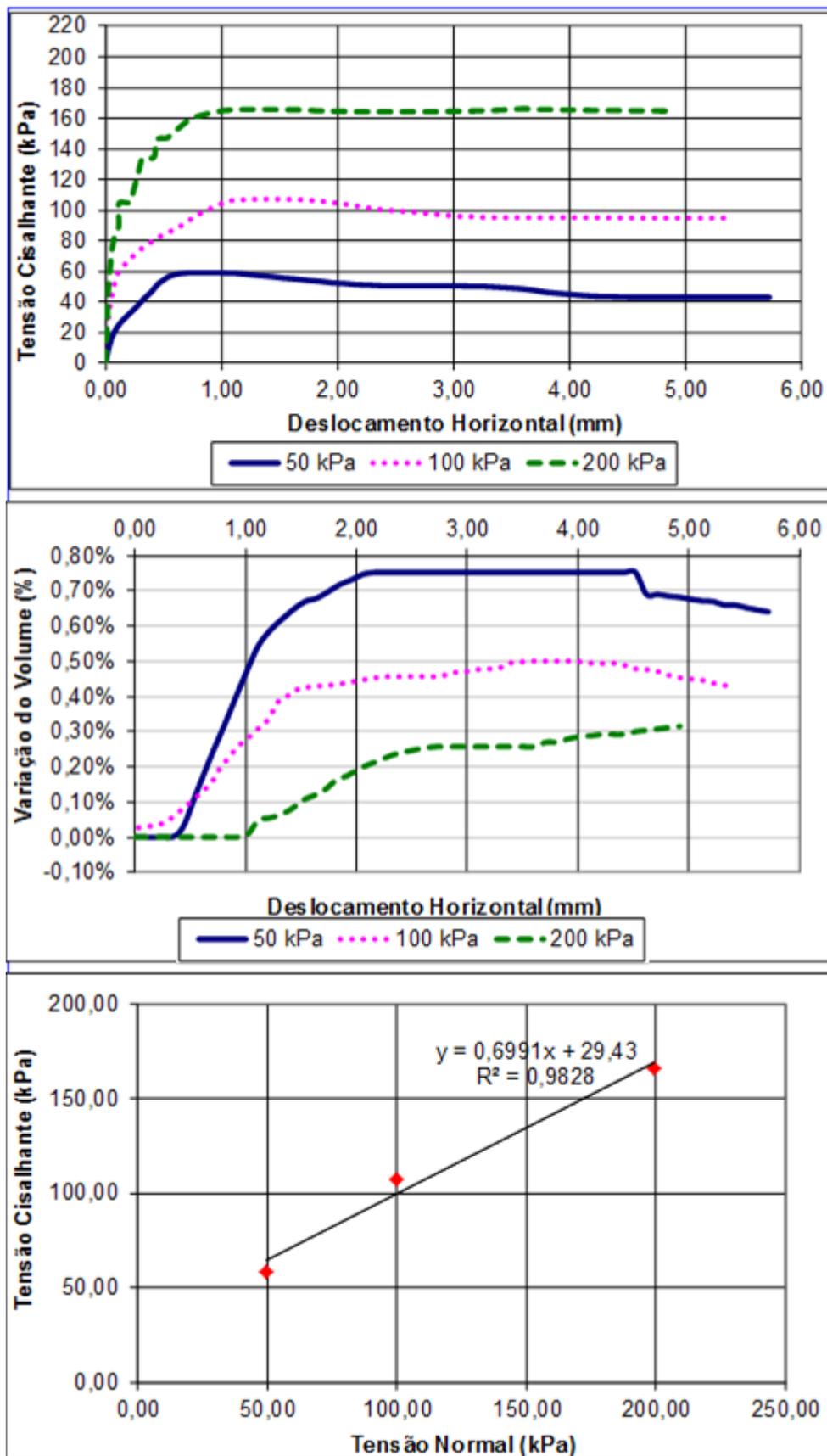


Figura A.3 – Gráficos de Cisalhamento Direto do RPP puro – Ensaio 1.

Fonte: Do autor.

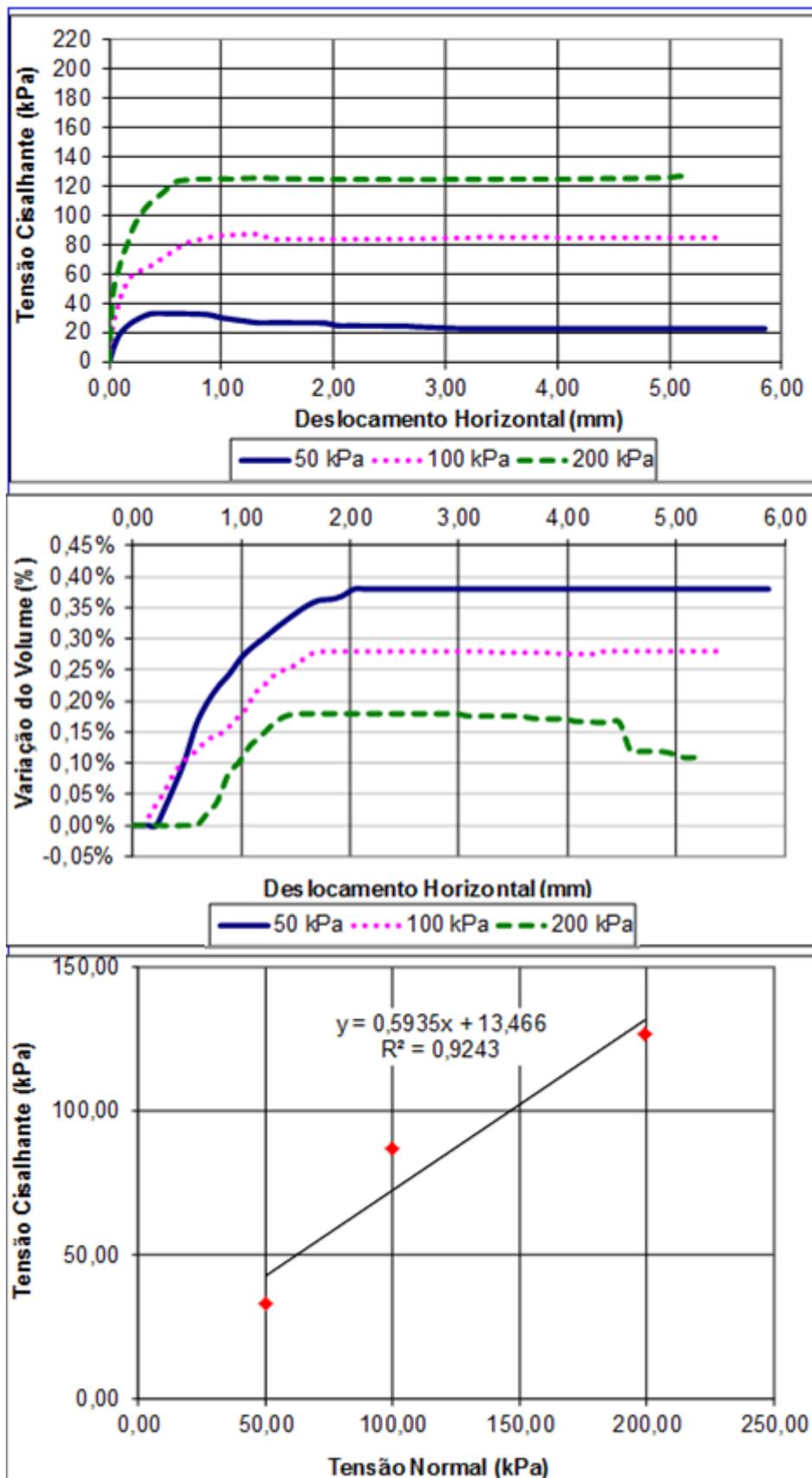


Figura A.4 – Gráficos de Cisalhamento Direto do RPP puro – Ensaio 2.

Fonte: Do autor.

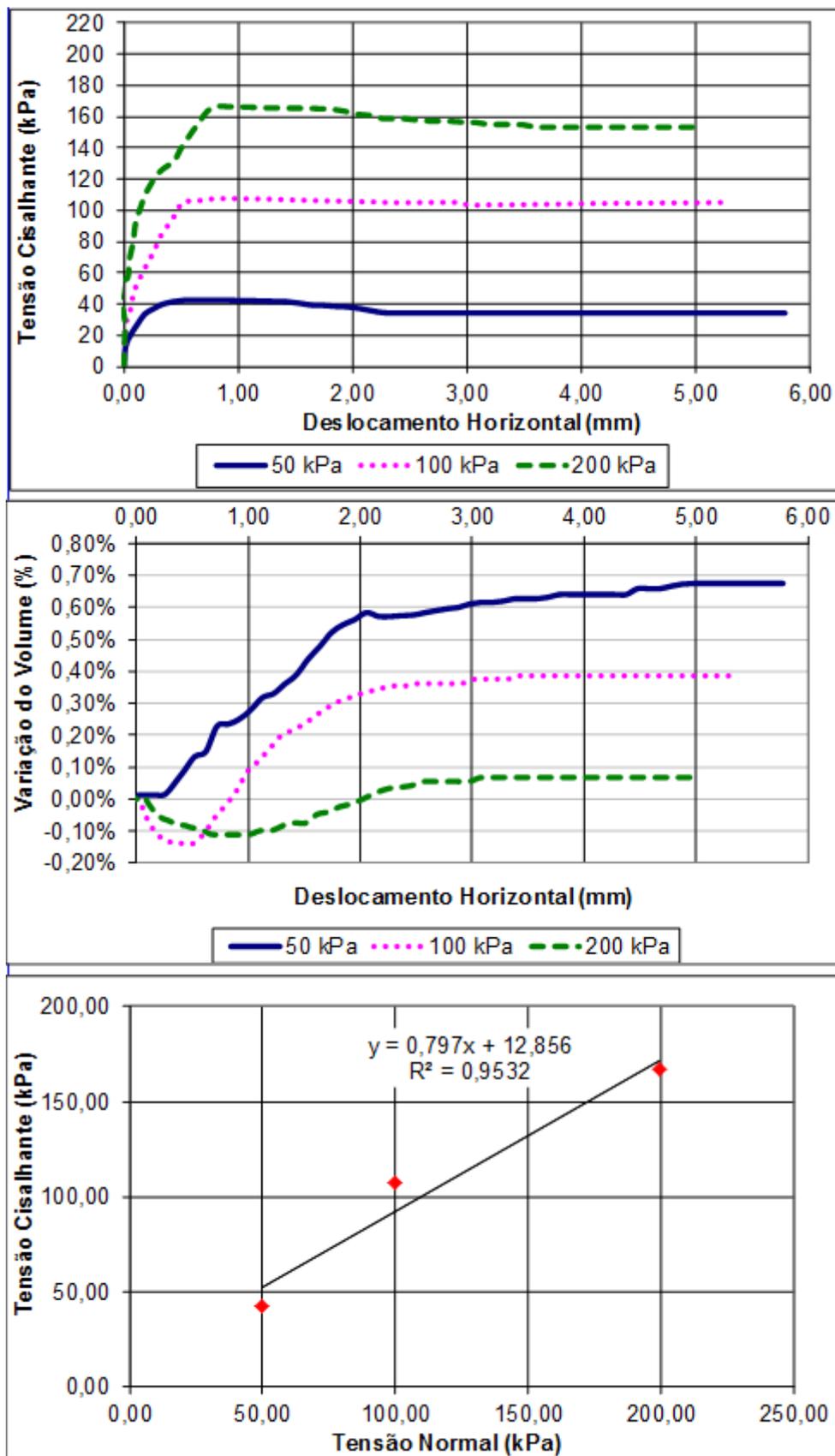


Figura A.5 – Gráficos de Cisalhamento Direto da Mistura de 5% – Ensaio 1.

Fonte: Do autor.

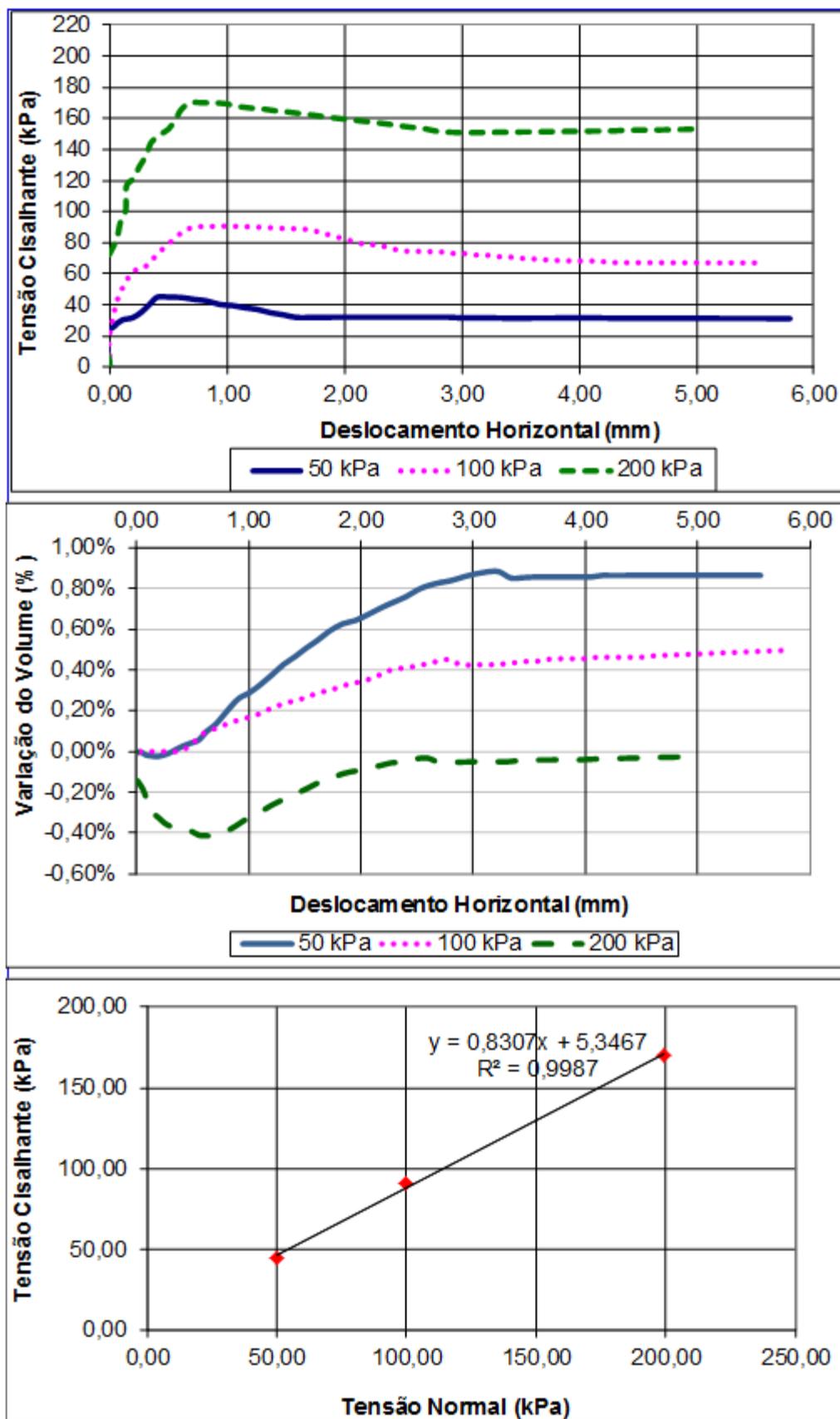


Figura A.6 – Gráficos de Cisalhamento Direto da Mistura de 5% – Ensaio 2.

Fonte: Do autor.

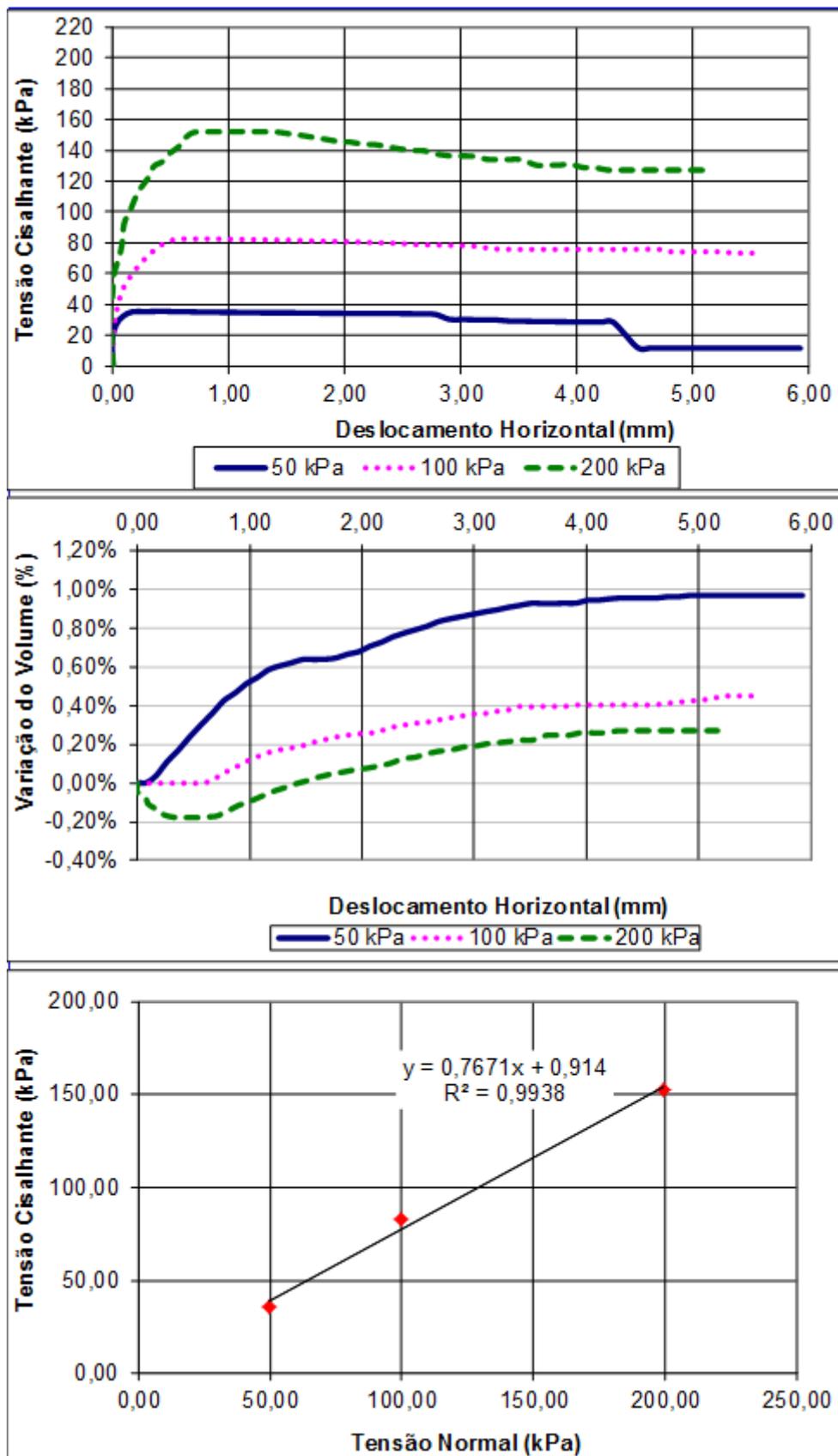


Figura A.7 – Gráficos de Cisalhamento Direto da Mistura de 10% – Ensaio 1.

Fonte: Do autor.

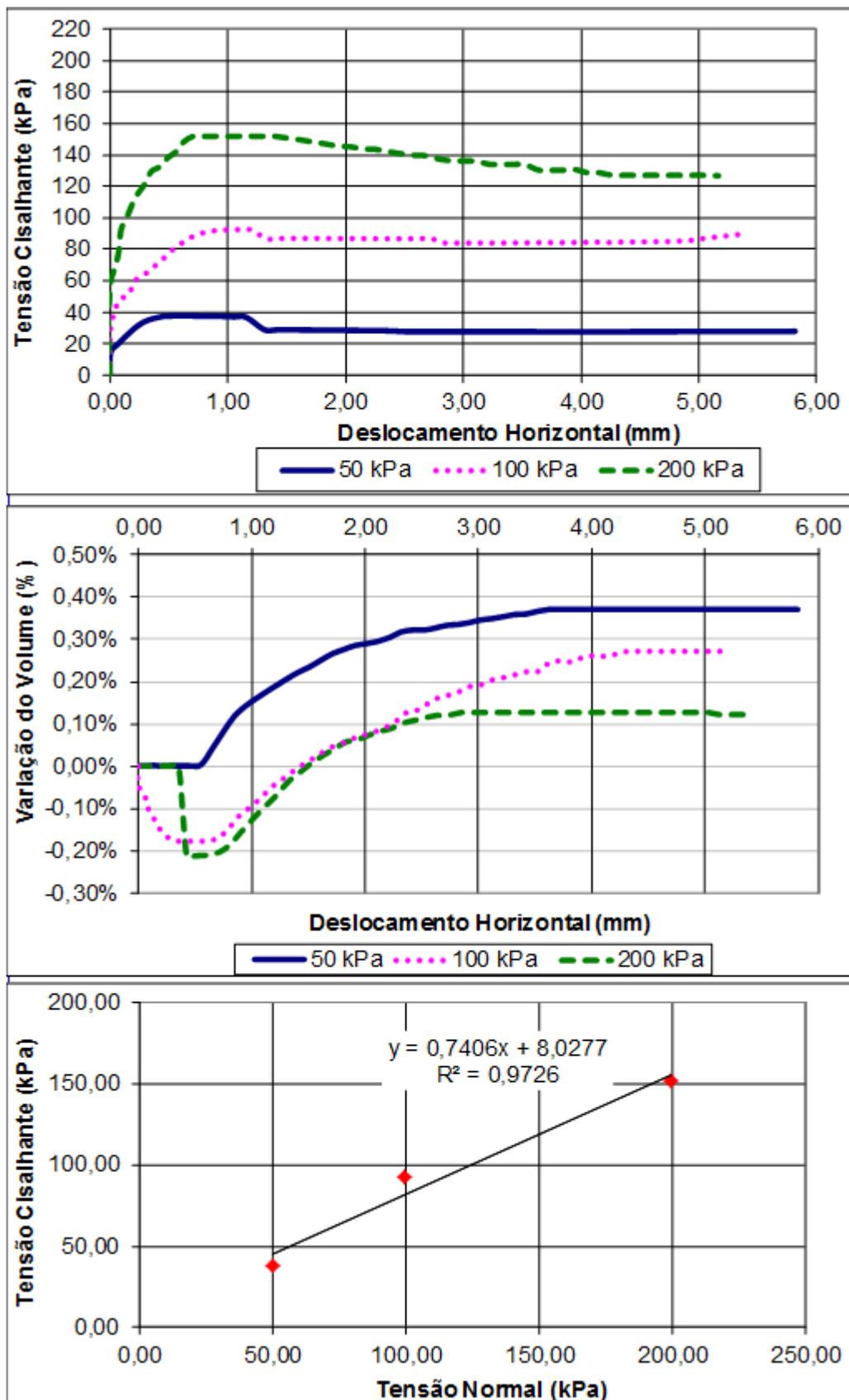


Figura A.8 – Gráficos de Cisalhamento Direto da Mistura de 10% – Ensaio 2.

Fonte: Do autor.

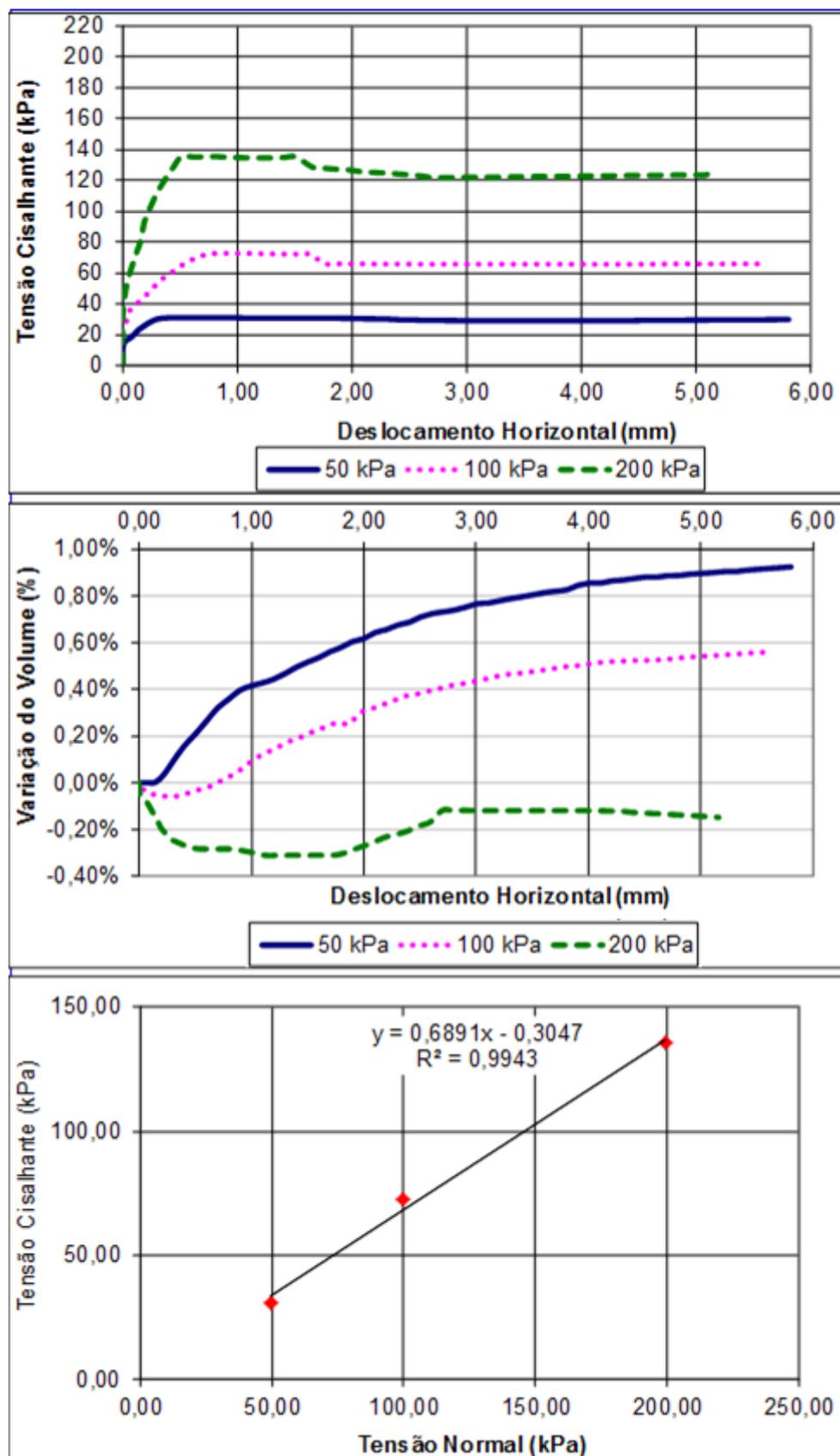


Figura A.9 – Gráficos de Cisalhamento Direto da Mistura de 20% – Ensaio 1.

Fonte: Do autor.

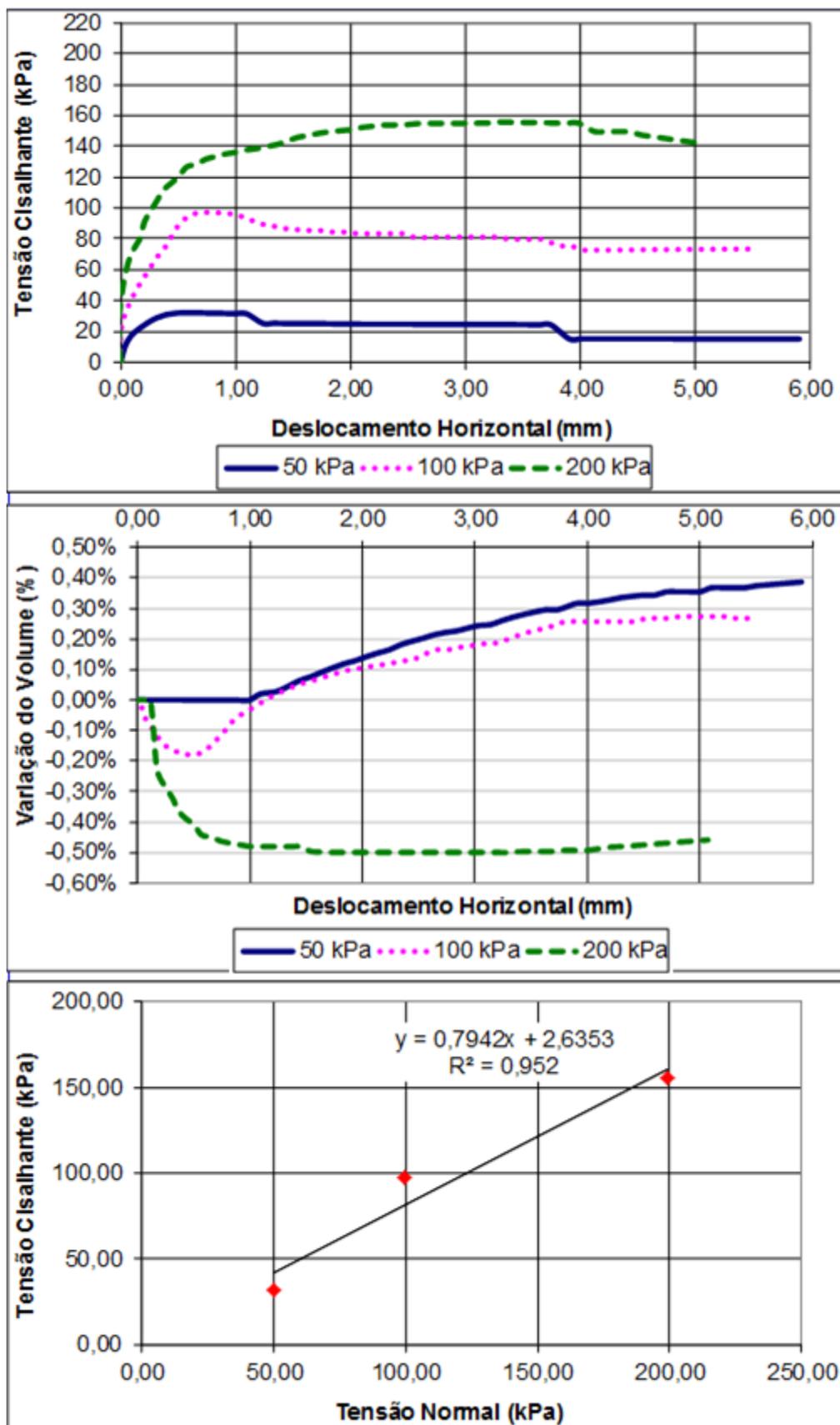


Figura A.10 – Gráficos de Cisalhamento Direto da Mistura de 20% – Ensaio 2.

Fonte: Do autor.