



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Filipe Bruno dos Santos Silva

**AVALIAÇÃO DE MISTURAS DE SOLO E RESÍDUO DE POLIMENTO
DE PORCELANATO PARA EMPREGO EM OBRAS RODOVIÁRIAS**

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

Coorientador: Prof. D.Sc. Alexandre da Costa Pereira

Natal-RN

2016

Filipe Bruno dos Santos Silva

**AVALIAÇÃO DE MISTURAS DE SOLO E RESÍDUO DE POLIMENTO
DE PORCELANATO PARA EMPREGO EM OBRAS RODOVIÁRIAS**

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

Coorientador: Prof. D.Sc. Alexandre da Costa Pereira

Natal-RN

2016

Filipe Bruno dos Santos Silva

**AVALIAÇÃO DE MISTURAS DE SOLO E RESÍDUO DE POLIMENTO
DE PORCELANATO PARA EMPREGO EM OBRAS RODOVIÁRIAS**

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

Profa. D.Sc. Alexandre da Costa Pereira – Coorientador, IFRN

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

Prof. D.Sc. Jefferson Lins da Silva – Examinador Externo, USP

Natal-RN, Agosto de 2016.

AVALIAÇÃO DE MISTURAS DE SOLO E RESÍDUO DE POLIMENTO DE PORCELANATO PARA EMPREGO EM OBRAS RODOVIÁRIAS

Filipe Bruno dos Santos Silva

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

Coorientador: Prof. D.Sc. Alexandre da Costa Pereira

RESUMO

A gestão de resíduos sólidos tem se tornado um desafio constante na sociedade moderna devido ao avanço industrial. Esse cenário também é realidade nas indústrias brasileiras, incluindo as que produzem materiais cerâmicos. A etapa de polimento na produção do porcelanato em indústrias cerâmicas gera grandes quantidades de um resíduo composto por restos de peças cerâmicas, água e resquícios de discos abrasivos utilizados na etapa de polimento. Esse resíduo corresponde a um pó branco de granulometria fina e composição química variável, conhecido como Resíduo de Polimento de Porcelanato (RPP) e foi coletado em uma empresa localizada no município de Conde/PB. Neste trabalho, misturas de um solo areno-argiloso com o resíduo foram estudadas para uso em obras rodoviárias. Foram utilizadas diferentes dosagens de resíduo, especificamente, 0% (Solo Puro) 5%, 10%, 15%, 20% e 40% em relação à massa seca de solo. Os materiais foram analisados mediante a realização de ensaios para determinação de limite de liquidez e de plasticidade, granulometria conjunta e massa específica dos sólidos, foram realizados ensaios de compactação, ensaios para a determinação do ISC (Índice de Suporte Califórnia) e adensamento unidimensional. Realizou-se ainda uma prova de carga em placa no laboratório com a mistura de 10%. Em virtude da química do material, foi realizado ainda um estudo preliminar sobre a influência de atividade pozolânica nos resultados. Por fim, realizou-se uma análise de caráter ambiental, baseado na coleta e análise química de extrato solubilizado obtido a partir de uma

amostra de resíduo puro. Todos os ensaios de resistência mecânica foram desenvolvidos na condição inundada, a fim de minimizar possíveis influências de sucção matricial. A avaliação do índice de suporte Califórnia foi feita empregando-se energias de compactação normal e modificada. Os ensaios mostraram que houve uma redução da resistência média das misturas em comparação à resistência do solo puro. Para os ensaios de adensamento, foi observado que a mistura com 5% de adição de RPP apresentou uma menor deformação do que a amostra de solo puro para mesmos níveis de tensão, ao contrário das outras misturas que se mostraram mais deformáveis. A mistura de 10% apresentou na prova de carga em placa capacidade de carga inferior a apresentada pela mistura de 5% e pelo solo, com maiores valores de recalques para mesmos valores de tensão. Com todos os dados obtidos nesta pesquisa, pode-se dizer que, de forma geral, o resíduo não alterou de forma significativa o comportamento mecânico do solo para teores de até 10% de adição. Para valores acima disso, nota-se um pior desempenho mecânico, porém dependendo do uso, não impede sua aplicação, tornando todas as misturas estudadas potenciais materiais para execução de aterros compactados em obras rodoviárias. O solo puro e a mistura de 5% compactados na energia modificada podem ainda ser utilizados como material de sub-base para camadas de pavimento. As demais misturas podem ser utilizadas como reforço de subleito, caso o valor de ISC seja superior ao do subleito em questão. Em relação ao caráter ambiental da pesquisa, foi observado que para os parâmetros estudados, as concentrações obtidas estão abaixo dos limites sugeridos pela norma NBR 10004.

Palavras-chave: Resíduo de polimento de porcelanato; Índice de Suporte Califórnia; Aterros Rodoviários; Pavimentação, Capacidade de carga.

EVALUATION OF BLENDS OF PORCELAIN TILE POLISHING RESIDUE AND SOIL FOR USING IN ROAD CONSTRUCTION

Filipe Bruno dos Santos Silva

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

Coadvisor: Prof. D.Sc. Alexandre da Costa Pereira

ABSTRACT

The solid waste management has become a constant challenge in the modern society as a result of the increase in industrial production. This scenario is also a fact in Brazilian industries, including those producing ceramic materials. The polishing step in the production of porcelain tiles in ceramic industries produces large amounts of a residue consisting of ceramics remains, water and traces of abrasive discs used in the polishing step. This residue corresponds to a white powder of fine grain and variable chemical composition, known as Porcelain Tile Polishing Residue (RPP), and it was collected in a company located in Conde / PB. In this study, blends of a sandy-clayey soil and RPP were evaluated for use in road construction. Different dosages of residue were studied, specifically, 0% (pure soil) 5%, 10%, 15%, 20% and 40%, added in relation to the dry mass of soil. The materials were evaluated conducting tests to determine Atterberg limits, grain size distribution and specific solid weight. In addition, compaction tests, tests to determine the CBR (California bearing ratio) and oedometer consolidation tests were also carried out. A plate load test was also conducted in the laboratory with the 10% blend. Because of the chemistry of the material, a preliminary study was conducted on the influence of pozzolanic activity on the results. Finally, an environmental analysis was performed based on the collection and chemical analysis of solubilized extract obtained from a sample of pure residue. The mechanical tests were conducted under inundated conditions, in order to reduce the influence of soil suction. The evaluation of the

California Bearing Ratio was made using normal and modified proctor energy. The tests showed a reduction of the average resistance of the blends compared to that of the pure soil. For the consolidation tests, it was observed that the blend with 5% of RPP had a smaller deformation than the specimen of pure soil in the same stress values, unlike the others mixtures which were more deformable. The results of the plate load test showed that the 10% blend presented a lower bearing capacity than the pure soil and the 5% blend, with bigger settlements for the same stress values. Considering all the data obtained in this research, it can be said that the residue did not significantly change the mechanical behavior of soil to levels up to 10% of RPP. For higher values, there is a worse mechanical performance. However, depending on the intended use in road construction, this behavior does not preclude the application of mixtures with more than 10% of RPP. In fact, all studied mixtures can be considered as potential materials for road construction. The pure soil and 5% blend compacted using the modified energy can also be used as sub-base material for pavement layers. The other mixtures can be used as subgrade improvement layer, if their CBR value is higher than the subgrade in question. Regarding the chemical analysis of the solubilized extract of the residue, it was observed the concentrations of the studied parameters were below the limits suggested by Brazilian standard NBR 10004.

Keywords: Porcelain tile polishing residue; California Bearing Ratio; compacted fill; pavement; bearing capacity.

Agradecimentos

À professora Carina Costa não só pela ótima orientação, mas por toda a paciência e conselhos que foram essenciais para a realização desse mestrado.

Ao professor Alexandre Pereira, por toda colaboração oferecida para esse mestrado, sempre respondendo com muita atenção e prontamente as dúvidas.

Ao Departamento de Engenharia Civil da UFRN, representado pelos 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.

Aos professores Fagner França, atual chefe do laboratório de Mecânica dos Solos da UFRN; Maria del Pilar, que gentilmente contribuíram 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 Jefferson Lins da Silva por prontamente aceitar o convite para a Defesa e pelas contribuições vindouras para melhoria deste trabalho.

Aos técnicos de laboratório Anderson Dantas, João Batista e Sandro Ricardo, por toda a assistência prestada na execução dos ensaios, colaborando com o andamento da pesquisa.

Aos colaboradores e amigos Rafael Paulino, Daniel Braz e Guilherme Adler, por estarem sempre dispostos a ajudar no andamento da pesquisa, muitas vezes em horários não convencionais e atividades árduas.

Aos meus amigos do Mestrado, Duilio Marçal, Charles Chaves, Thiago Louzada, Victor Costa, Emanuel Erivan e Silvia Araujo que, ao longo desse período estiveram sempre dispostos a auxiliar nas obrigações do mestrado e nas tarefas da pesquisa.

Acima de tudo a minha família e amigos que sempre acreditaram no meu potencial e não mediram esforços para meu desenvolvimento como aluno e pessoa.

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

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Justificativa.....	2
1.2	Objetivo Geral	3
1.3	Objetivos Específicos.....	4
2	Revisão da Literatura	5
2.1	A indústria Cerâmica.....	5
2.1.1	Características do Porcelanato	7
2.1.2	Produção do porcelanato	9
2.2	Resíduo de polimento de porcelanato.....	15
2.3	Aplicação do resíduo na construção civil	20
2.4	Aspectos Ambientais.....	27
3	Materiais e métodos	30
3.1	Escolha do Solo	30
3.2	Resíduo de Polimento de Porcelanato	33
3.3	Características dos Materiais	34
3.3.1	Massa Específica dos Sólidos.....	34
3.3.2	Granulometria Conjunta	35
3.3.3	Limites de Atterberg	37
3.3.4	Fluorescência de raios X.....	38
3.3.5	Difração de raios X.....	39
3.3.6	Microscopia Eletrônica de Varredura	41

3.4	Programa Experimental.....	42
3.5	Caracterização da Mistura de 40%	45
3.5.1	Massa Específica dos Sólidos.....	45
3.5.2	Ensaio de Granulometria Conjunta	45
3.5.3	Limites de Atterberg	46
3.6	Ensaio de Compactação	46
3.7	Ensaio de Resistência Mecânica.....	47
3.7.1	Índice de Suporte Califórnia	47
3.7.2	Ensaio de Adensamento Unidimensional	49
3.7.3	Prova de Carga em Placa	51
3.8	Avaliação de Atividade Pozolânica do Resíduo	60
3.8.1	Ensaio de Índice de Suporte Califórnia	60
3.8.2	Adensamento Unidimensional.....	61
3.9	Coleta e Análise de Extrato Solubilizado.....	61

4 Resultados e Discussões 63

4.1	Caracterização da Mistura 40%	63
4.1.1	Massa Específica dos Sólidos.....	63
4.1.2	Granulometria Conjunta	64
4.1.3	Limites de Atterberg	65
4.2	Ensaio de Compactação	66
4.3	Ensaio de Índice de Suporte Califórnia	68
4.3.1	Energia Normal	68
4.3.2	Energia Modificada.....	74
4.4	Ensaio de Adensamento Unidimensional.....	77

4.5	Prova de Carga em Placa	82
4.6	Avaliação de Atividade Pozolânica do Resíduo	86
4.6.1	Ensaio de Índice de Suporte Califórnia	87
4.6.2	Adensamento Unidimensional.....	89
4.7	Coleta e Análise de Extrato Solubilizado.....	92

5 Conclusões e Recomendações..... 94

5.1	Conclusões	94
5.2	Recomendações para pesquisas futuras	97

6 Referências Bibliográficas..... 99

1 Introdução

Com a crescente necessidade de geração de infraestrutura à sociedade, a indústria da construção civil tem intensificado suas atividades, resultando em um aumento no consumo de materiais de construção e, conseqüentemente, dos recursos naturais. De acordo com Carvalho (2013), o setor da construção civil é responsável pelo consumo de cerca de 50% de todos os recursos minerais explorados no planeta. Decorrente desse processo, um dos temas em pauta na área da construção civil tem sido a destinação dos resíduos produzidos pela sua indústria. Essa situação é particularmente desafiadora para a indústria cerâmica, que consome grande quantidade de matéria-prima, em consequência, enorme quantidade de rejeitos também é gerada.

O Resíduo de Polimento de Porcelanato (RPP) é um material resultado da última etapa do processo de fabricação do porcelanato polido, cuja característica principal é sua baixa porosidade, sendo essa a fase de acabamento do material. Nela, o revestimento recebe um polimento que é realizado com discos diamantados e com tijolos abrasivos, a fim de retirar riscos e defeitos e dar brilho ao material.

Segundo Souza (2007), a composição química do resíduo de porcelanato é, portanto, constituída pela massa do próprio porcelanato e pelos resíduos gerados pelos utensílios de polimento. Com a popularização do porcelanato na construção civil, tem havido um aumento da sua produção, conseqüentemente, tornando a destinação do RPP uma atividade a ser desenvolvida pelas fábricas produtoras do material.

De acordo com a Anfacer (2012), o Brasil figura como o segundo maior produtor de revestimento cerâmico do mundo, ficando atrás apenas do grande mercado da China. Com a crescente demanda da utilização do revestimento porcelanato polido, a produção deste material vem tendo um aumento significativo, porém em contrapartida a esse crescimento, o cuidado e o estudo da destinação dos resíduos gerados pelo processo não acompanham o mesmo ritmo.

Uma das soluções conhecidas para o problema da destinação de resíduos provenientes da própria construção civil é a incorporação deste resíduo em misturas com matérias primas, para variados usos na construção civil. A destinação do RPP já vem sendo estudada em algumas aplicações para a engenharia, dentre as quais, podem ser citadas o uso em indústrias cimentícias e na própria indústria cerâmica. Destaca-se também o estudo realizado por Araujo (2014), onde os seus resultados mostraram o potencial do resíduo na aplicação para a pavimentação.

De forma a permitir uma possível destinação a esse resíduo, esta pesquisa estudou a incorporação do mesmo em solo a fim de compor misturas compactadas para emprego em obras rodoviárias.

A indústria produtora de materiais cerâmicos onde foi localizada a coleta do resíduo se situa em Conde-PB e tem alta produção diária, com cerca de 15.000 m² de produtos acabados prontos para serem comercializados, gerando cerca de 30 toneladas de resíduo nesse processo (Araujo, 2016).

Para este estudo foram fabricadas misturas, em teores baseados na adição do resíduo em massa de material seco do solo, contando com um grupo de controle (Solo Puro). Nesses materiais foram realizados ensaios de caracterização básica de solos além de ensaios de índice de suporte Califórnia, adensamento e prova de carga em placa de modo a avaliar o comportamento mecânico das misturas. Por fim foi feita uma análise de extrato solubilizado do resíduo.

1.1 Justificativa

Historicamente se tem dado ênfase aos aspectos de abastecimento em detrimento dos de coleta, e de ambos sobre os de destinação. Este cenário representa do ponto de vista ambiental, um quadro que pode se tornar preocupante, caso não se dê a devida importância à gestão de resíduos.

A coleta dos resíduos sólidos no Brasil ainda é precária quando comparado a outros países, e dentro desse cenário, o Nordeste ainda apresenta o pior índice

entre as regiões do país, com cerca de 80% de todo resíduo sólido coletado. Do resíduo sólido coletado, apenas 41,6% tem uma destinação final adequada (ABRELPE, 2014).

Uma indústria cerâmica consome grande quantidade de matéria-prima, conseqüentemente, como todas as indústrias, resíduos também são gerados. Os resíduos gerados são normalmente depositados a céu aberto e consistem das perdas do processo de fabricação. Estima-se que a cada três anos um hectare do solo seja ocupado por estes resíduos (Luckmann & Bernardin, 2006).

Visando fornecer mais uma opção na destinação do RPP, este trabalho busca analisar pontos importantes da sua aplicação em solos com destinação para aterros em obras rodoviárias. Alguns estudos na literatura mostram um bom potencial para o resíduo (Araujo, 2014; Araujo, 2016).

Do ponto de vista econômico, sabe-se que a geração de resíduos não aproveitados provoca gastos energéticos desnecessários, ocupando espaço sem finalidade, além de causar uma má impressão em seus clientes. Hoje em dia o reaproveitamento de resíduos na construção civil tem se mostrado uma saída economicamente viável para a destinação, reduzindo gastos com matéria prima e em alguns casos, gastos com transporte de material. No caso específico do RPP, este fica comumente armazenado em pátios nas próprias indústrias de produção.

1.2 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral analisar, principalmente, sob o ponto de vista de comportamento geotécnico, a possibilidade de incorporação de resíduo de polimento de porcelanato em um solo específico, para uso em aterros rodoviários.

1.3 Objetivos Específicos

O trabalho tem por objetivos específicos:

- Efetuar a caracterização geotécnica básica de uma mistura de solo e resíduo no que diz respeito à granulometria; plasticidade e massa específica dos sólidos.
- Avaliar comportamento mecânico do solo e misturas através de ensaios de compactação; adensamento e índice de suporte Califórnia.
- Avaliar a capacidade de carga de um sistema solo-RPP/placa por meio da execução de prova de carga, em laboratório, na condição inundada.
- Proceder a uma análise ambiental preliminar do resíduo através de coleta e análise de extrato solubilizado com base na NBR 10004.

2 Revisão da Literatura

2.1 A indústria Cerâmica

De acordo com Rosa & Peixoto (2003), a definição de cerâmica compreende todos os materiais inorgânicos e não-metálicos obtidos através de tratamento térmico em temperatura elevada. O resultado desse processo é um material refratário, ou seja, capaz de resistir à elevada amplitude térmica, mantendo sua integridade físico-química.

A indústria de revestimentos apresentou, no Brasil, um forte crescimento a partir dos anos 90, com maior foco de produção nas regiões sudeste e sul, tornando-se o segundo maior produtor e consumidor mundial de placas cerâmicas, superado, em termos de volume, apenas pelo imenso mercado chinês, conforme podemos observar na Figura 2.1, baseado em dados coletados entre os anos de 2009 a 2012.

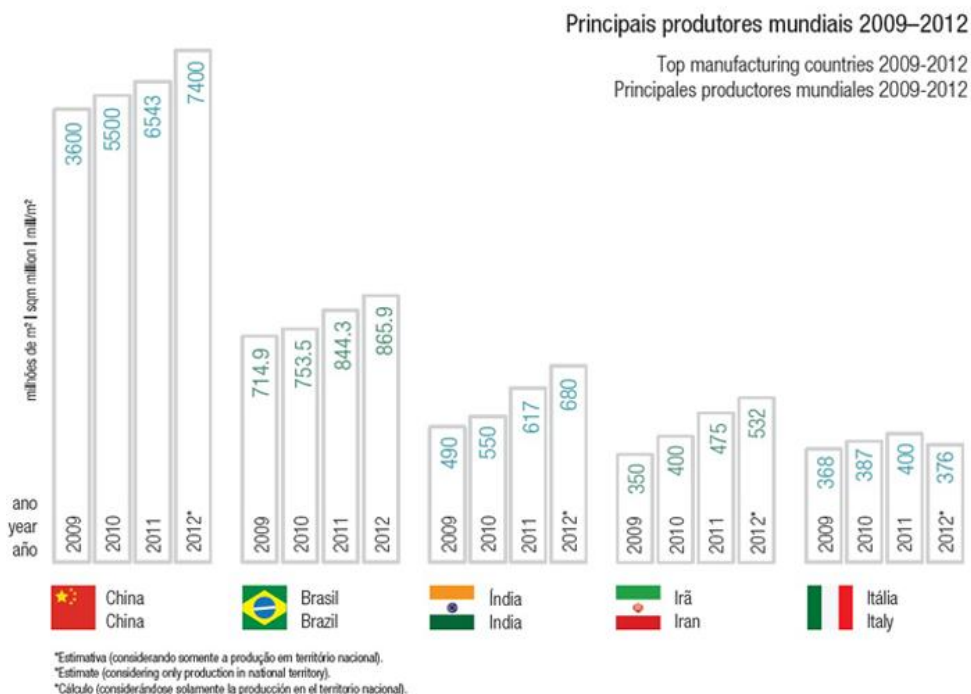


Figura 2.1 - Quadro de maiores produtores mundiais de revestimento cerâmico (Anfacer, 2012).

A cerâmica de revestimento, ou placa cerâmica, é um material utilizado na etapa de acabamento da construção civil. A atividade desse setor é responsável pela produção de material em forma de placas para diversas finalidades, tais quais: paredes, pisos, bancadas, piscinas, etc. De acordo com dados obtidos pela Anfacer (2010), a Figura 2.2 apresenta a distribuição das vendas em 2009 por tipos de placas comercializadas, divididas em quatro grupos: piso, parede, fachada e porcelanato. Nesse ano foi observada uma comercialização de 715 milhões de m² de revestimento cerâmico, sendo predominante o piso (486 milhões), seguido pelas placas de parede (172 milhões), pelo revestimento porcelanato (42 milhões) e pelas placas de fachada (15 milhões).

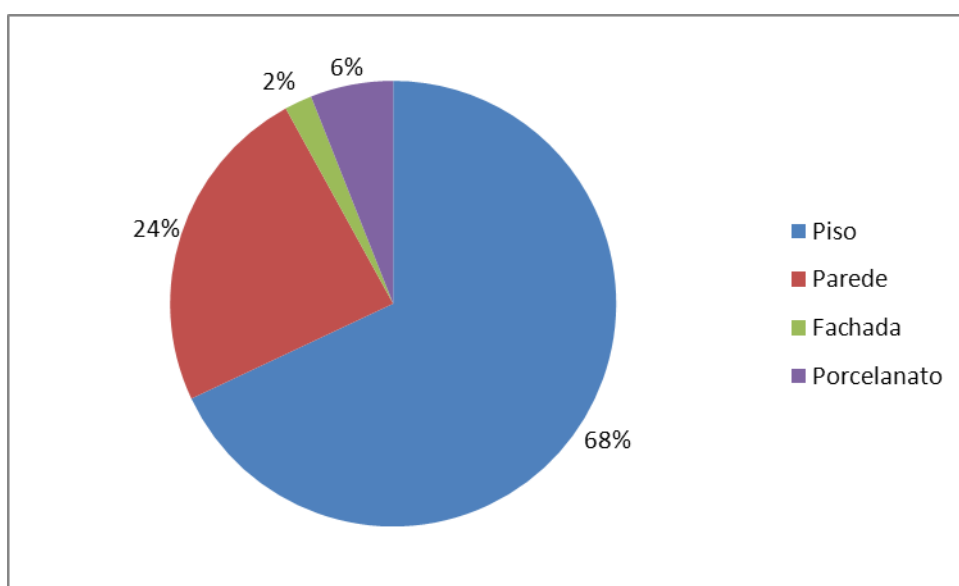


Figura 2.2 - Tipos de revestimentos cerâmicos comercializados em 2009 no Brasil (Anfacer).

A indústria cerâmica tem se tornado cada vez maior e mais importante para a construção civil, e dentre os seus diversos produtos, destacam-se os porcelanatos, que de acordo com Heck (1996) apresenta as seguintes vantagens: altíssima resistência à abrasão, resistência ao gelo, resistência a ácidos e álcalis,

uniformidade de cores, baixíssima permeabilidade, facilidade de manutenção e amplas possibilidades de composição, além do fator estético. Este material vem se destacando ultimamente no mercado, o qual em 1996, apenas uma empresa produzia o material no Brasil, e atualmente, várias empresas o produzem, chegando a uma produção de 33 milhões de m² no ano de 2006 (Marques *et al.*, 2007) e 42 milhões no ano de 2009 (Cabral Junior *et al.*, 2010), atualmente sendo responsável por volta de 10% de material de revestimento comercializado.

2.1.1 Características do Porcelanato

A norma ISO 13006/NBR13818 classifica os revestimentos cerâmicos a partir da sua absorção de água (Tabela 2.1), na qual o porcelanato é definido como um material prensado com absorção de água menor ou igual a 0,5%, grupo Bla.

Grupo	Absorção de Água (%)	Aplicações Residenciais
Bla	0,0 - 0,5	Pisos, Paredes - ambientes externos e internos (Porcelanato)
Blb	0,5 - 3,0	Pisos, Paredes - ambientes externos e internos (Grés)
Blla	3,0 - 6,0	Pisos, Paredes - ambientes externos e internos (Semi-Grés)
Bllb	6,0 - 10	Pisos, Paredes - ambientes externos e internos (Semi-Poroso)
BIII	Acima de 20	Paredes (Azulejo)

Tabela 2.1 - Classificação de revestimentos cerâmicos de acordo com a ISO 13006/NBR13818.

Pode-se dizer que as características de um material derivam tanto dos elementos que o compõem, quanto ao seu processo de fabricação. O porcelanato é

composto basicamente por uma mistura de argilas, feldspatos, areias feldspáticas e, as vezes, caulins, filitos e aditivos.

Os feldspatos são os responsáveis no processo de densificação das peças, desempenhando uma função de fundentes, contribuindo majoritariamente para as propriedades desejadas do porcelanato .

Os caulins são ricos em alumina, o qual no processo de queima pode fazer parte da reação de vitrificação formando vidros silico-aluminosos, ou formar a mulita com formato de agulhas, contribuindo para um aumento da resistência mecânica.

As argilas estão ligadas com a capacidade de conformação das peças, pois proporcionam plasticidade ao material.

Romero & Pérez (2015) observaram a composição do material e os seus efeitos nas propriedades da peça, citando que além dos materiais compostos no início do processo, a etapa de queima faz com que esses materiais reajam, formando novas fases cristalinas. A caulinita, ilita, minerais de feldspato e mica sofrem diferentes transformações. A mulita é um mineral a base de sílica que surge a partir da transformação da metacaulinita originada da perda de grupos de hidroxila da caulinita. O estudo aponta que a quantidade de mulita gerada está diretamente ligada a resistência mecânica do material.

Em relação à tipologia do porcelanato, Rosso *et al.* (2005) divide da seguinte forma:

- Monocolores: que são obtidos a partir da coloração da barbotina ou do pó atomizado;
- Granitados (Sal e Pimenta): são obtidos a partir da mistura de pós atomizados de diferentes cores (em processo automático que dosa as quantidades);
- Macrogranitados: são obtidos através da mistura de pós atomizados com grânulos de grandes dimensões (1 a 8 mm) coloridos;

- Duplo Carregamento: são obtidos através da mistura de pós micronizados de diferentes cores, que através de oportunos carregamentos nas prensas, são distribuídos casualmente, originando nuances superficiais;
- Sais Solúveis: consiste na decoração superficial do produto com sais que desenvolvem cor. Este tipo de decoração só é perfeitamente visível após o polimento.

No mercado atual, o porcelanato é basicamente classificado como esmaltado ou técnico (polido), no qual o polido se trata do porcelanato mais liso, com mínima absorção de água (1% ou menos), já o esmaltado trata-se do porcelanato que recebe uma camada de esmalte como finalização, com o acabamento/estampa desejado.

2.1.2 Produção do porcelanato

Por ser um material de alta qualidade, o porcelanato necessita de um rigoroso processo de produção para atingir tais características, sendo um procedimento desgastante. A Figura 2.3 apresenta um fluxograma exemplificando a produção de um porcelanato polido.

Como já foi dito, as propriedades e características de um material dependem tanto dos materiais que o compõe quanto ao seu processo de produção, portanto é importante conhecer o método de criação a fim de conhecer o produto final.

Sánchez *et al* (2005) estudou as propriedades do porcelanato a partir de quantidades diferentes de quartzo na sua composição, além de variar também o tamanho das partículas e concluiu que a qualidade da superfície, envolvendo as propriedades mecânicas da peça, é inversamente proporcional a porosidade do material, também sofrendo influência da temperatura de queima, constatando que a superfície e as propriedades mecânicas do revestimento dependem predominantemente da sua microestrutura.

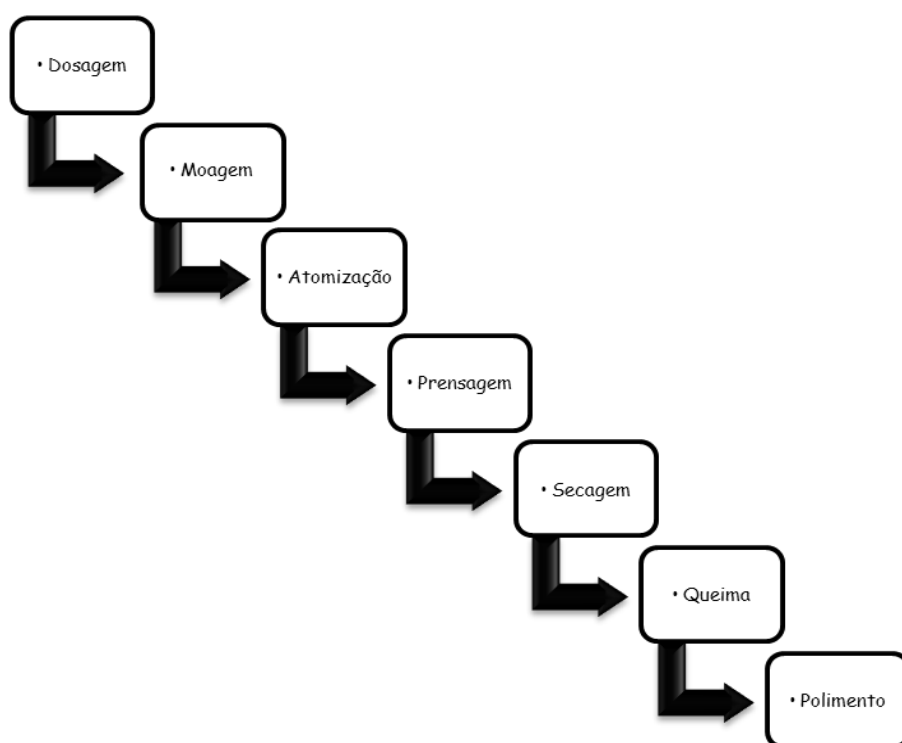


Figura 2.3 - Etapas de produção do porcelanato polido (Autor).

- **Dosagem:**

Após coleta das matérias-primas nas jazidas devidamente selecionadas, os materiais são dispostos em baias separadas. A etapa de dosagem é uma etapa preliminar, na qual consiste a preparação, mediante uma formulação pré-determinada, dos elementos que vão compor o produto final. Coletados nas baias, os materiais são devidamente pesado em balanças e seguem para o processo de moagem.

- **Moagem:**

A moagem por via úmida tem por objetivo diminuir o tamanho das partículas das matérias-primas envolvidas no processo e garantir a homogeneização da massa cerâmica dentro de uma distribuição granulométrica definida (Hansen, 2010).

O procedimento é realizado comumente por moinhos de bolas com grande dimensão, o qual tem objetivo de garantir a finura dos materiais por choque e atrito.

Uma moagem não eficiente, que não dê a finura necessária ao material, poderá comprometer a reatividade da massa durante a queima, podendo ocasionar o desprendimento de partículas durante a etapa de polimento, além, do afloramento de poros fechados à superfície, afetando as características mecânicas do porcelanato. Já no caso de uma moagem excessiva, pode haver o comprometimento da etapa de prensagem, resultando em peças com baixa densidade aparente e resistência mecânica a seco, além da excessiva retração linear das placas durante a queima.

Nessa etapa é necessário um controle sobre a velocidade de rotação das máquinas, com finalidade de dar a granulometria desejada da barbotina (matérias sólidas + água), atentando também para a densidade e viscosidade do material.

Amorós *et al.* (2006) estudou a diferença dos tamanhos de poros gerais em peças verdes, decorrente de diferentes condições de moagem, analisando as propriedades finais do material. Foram observadas quatro amostras que passaram por tempos de moagem diferentes (Tabela 2.2), nas quais foi observado que quanto maior o tempo de moagem menor seriam as partículas, menor a massa específica e mais poroso o material, apesar de possuir poros menores. Após o processo de queima, o que se observou foi que as amostras que possuíam poros maiores (menor tempo de moagem) dificultavam o processo de sintetização do material, necessitando de uma temperatura maior de queima para densificação da peça, gerando um produto com menor resistência a risco.

Mistura	Tempo de Moagem (min)	Resíduo com 40 μm (%massa)	ρ_s (kg/m^3)
R1	30	1.6 ± 0.2	1885 ± 4
R2	26	2.6 ± 0.2	1903 ± 5
R3	16	6.1 ± 0.3	1934 ± 3
R4	10	11.7 ± 0.5	1962 ± 2

Tabela 2.2 - Misturas preparadas em tempos de moagem diferentes (Amorós et al, 2006).

- Atomização:

A etapa de atomização tem como resultado o pó atomizado, que é obtido através da evaporação parcial da água contida na barbotina (resultado da etapa de moagem).

A barbotina obtida na etapa anterior é bombeada para um sistema dispersor, localizada no interior de uma câmara de secagem ventilada com ar aquecido a uma temperatura média de 500 a 600°C, evaporando quase que instantaneamente a água, separando o pó do ar quente e vapor de água para ser utilizado em seguida.

O processo de atomização influencia no formato, na umidade e no tamanho dos grânulos, podendo afetar a fluidez do pó e, conseqüentemente, o preenchimento do molde na prensa, que por sua vez pode alterar a resistência mecânica das peças, gerando problemas dimensionais e trincas durante a queima (Rosso *et al*, 2005).

- Prensagem:

A etapa de prensagem tem como objetivo a conformação do pó atomizado, dando as primeiras formas à peça propriamente dita, chamada de revestimento verde. Além da conformação do pó, essa etapa reduz a porosidade interna da peça.

A prensa exerce uma pressão específica de compactação que varia entre 40 e 50 Mpa (400 a 500 kgf/cm²). Tal pressão tem por finalidade realocar e deformar as partículas contidas na massa cerâmica, gerando um produto compacto e cru.

- Secagem:

Após o procedimento de prensagem, o revestimento verde sai com o mesmo teor de umidade da massa que o formou, logo a secagem é um processo térmico que visa à redução da quantidade de água que existe no revestimento, visando deixar um índice mínimo de umidade nas peças.

É nessa fase que as peças recebem as características superficiais, antes de entrarem no forno. Esse processo de secagem é contínuo e muito importante para a qualidade final do porcelanato (Souza, 2007).

- Queima:

A queima do material é responsável pela densificação do mesmo, onde a peça crua após secagem é levada a uma sequencia de fornos interligados, nos quais altas temperaturas devem garantir a completa densificação da massa.

A temperatura de queima depende do material, em alguns casos é utilizado fundentes juntamente com o produto com objetivo de diminuir a temperatura de queima, que vai variar das especificações do porcelanato desejado.

A etapa de queima é importantíssima para a formação do produto final, nela a maior parte do quartzo inicial permanece sem dissolver, mas a parcela que se dissolve forma a mulita, sendo importante para caracterização final da peça, determinando suas propriedades mecânicas e reduzindo a porosidade.

- Polimento:

No caso dos porcelanatos polidos, o polimento é a última etapa do seu processo de fabricação, a qual é responsável por dar acabamento à peça rústica, dando brilho e forma final ao revestimento.

Utiliza-se de um equipamento dotado de várias cabeças polidoras compostas de discos diamantados e tijolos abrasivos (Figura 2.4) que por atrito realiza o acabamento nas peças.



Figura 2.4 - Cabeças de polimento com tijolos abrasivos (Souza, 2007).

O polimento é um processo gradativo, no qual à medida que a peça passa pela máquina, os abrasivos utilizados no polimento apresentam granulometria mais fina, de forma a dar o brilho necessário à peça.

Na primeira parte, são utilizados abrasivos diamantados e magnesianos de granas grossas de forma a dar o acabamento inicial da peça, sendo o desgaste mais acentuado, dando um nivelamento ao revestimento, porém gera riscos na peça devido a grana dos abrasivos (100 a 200 mesh).

A segunda parte tem como objetivo reparar os riscos (ranhuras) deixados pelas cabeças polidoras iniciais, deixando a peça completamente lisa, são utilizadas granas de 240 a 700 mesh.

Não existindo mais riscos nas peças, a terceira etapa é o polimento propriamente dito. Utilizando granas de 800 a 3000 mesh, a peça começa a receber o brilho final.

É preciso ter um controle rigoroso nas matérias primas dos materiais utilizados nos abrasivos, sendo utilizados próprios materiais de origem cerâmica na fase de polimento. Estes materiais são compostos basicamente a base de carbeto de silício e cimento magnésiano.

Durante a etapa de polimento, é essencial a circulação de água nas câmaras polidoras, e segundo Rosso *et al.* (2005) é utilizada cerca de 4000L em uma unidade de polimento, sendo um valor considerado bastante elevado. A água é distribuída no processo com finalidade principal de diminuir o atrito entre os abrasivos e a peça, além de refrigerar o local do contato e remover os resíduos acumulados ao longo do procedimento que poderiam causar riscos ou arranhões nas peças. Como a quantidade de água utilizada é muito alta, existe a necessidade da recirculação em circuito fechado para reaproveitamento. Com isto, torna-se essencial um tratamento físico/químico na água para posterior decantação dos resíduos do polimento e filtro-prensagem.

Durante todo o processo de produção do porcelanato, é natural o desperdício de material devido ao próprio método de produção, porém é na fase de polimento

onde se concentra as maiores perdas, devido principalmente ao atrito entre as cabeças polidoras e o próprio revestimento.

Nessa etapa é gerado o resíduo de polimento de porcelanato, o qual no processo de reutilização da água é coagulado, floculado e filtrado, sendo despejado no pátio da própria fábrica ainda úmido (Figura 2.5), aguardando um destino final.



Figura 2.5 - Resíduo gerado logo após a etapa de polimento (Autor).

2.2 Resíduo de polimento de porcelanato

Com a crescente demanda da utilização do revestimento porcelanato polido na construção civil, a produção desse material vem tendo um aumento significativo, porém em contrapartida com esse crescimento, o cuidado e o estudo da destinação dos resíduos gerados pelo processo não acompanharam o mesmo ritmo, sendo este assunto mais tratado recentemente decorrente a preocupação que tem sido gerada com a quantidade de desperdício. Estima-se que sejam produzidas entre 30 e 35 toneladas de resíduo de porcelanato diariamente, apenas no Brasil (Souza, 2007).

O resíduo de porcelanato surge durante a fase de polimento do material, no qual a circulação de água carrega e despeja os resíduos desse processo em baias, sendo geralmente transportados a um pátio de estocagem (Figura 2.6), onde passam por um processo de secagem e são acumuladas até seu reaproveitamento. Normalmente o resíduo é estocado durante um período de tempo, sem controle ambiental algum, podendo causar danos a seres que venham a inala-lo, se tornando cada vez mais importante um estudo ambiental e toxicológico do material, assim como uma forma rápida de reaproveita-lo na própria construção civil.



Figura 2.6 - Pátio de estocagem do resíduo de polimento de porcelanato na própria fábrica (Autor).

O RPP já tem sua composição um tanto quanto definida, sendo formado pela massa porcelânica e pelo material abrasivo utilizado no processo de polimento, resultando em um pó branco de granulometria fina e composição química variável, dependendo dos materiais utilizados na produção tanto do abrasivo quanto da própria peça de revestimento.

A Tabela 2.3 mostra a caracterização química do resíduo do polimento de porcelanato estudado por diferentes autores.

Pesquisa	Componentes (%)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	Outros
Silva (2012)	59,92	24,26	1,29	8,41	2,25	*	*	3,87
Marques (2007)	55,16	18,75	0	10	0,54	0,8	0,17	14,58
Rambaldi (2007)	64,06	16,54	1,4	4,63	2,05	0,5	4,43	6,39
Bernardin (2007)	59,5	17,3	1,6	5,3	2,8	0,7	3,6	9,2
Silva (2005)	61,77	22,96	0,88	4,55	1,29	0,25	2,27	6,03

*não especificado, pode estar incluído em "Outros".

Tabela 2.3 - Elementos que compõem o RPP (Autor).

Pode-se observar que em todos os casos, o resíduo apresenta elevada quantidade de sílica, alumina e óxido de magnésio, além de certa quantidade de óxidos fundentes (CaO, K₂O, Fe₂O₃ e Na₂O).

A sílica é proveniente dos materiais que compõem a peça cerâmica e os abrasivos, a alumina é proveniente do porcelanato, já o óxido de magnésio está relacionado ao cimento cloro-magnésiano utilizado na fabricação do abrasivo. A quantidade de óxidos alcalinos e alcalinos terrosos presentes mostra que o sistema apresenta boa formação da fase vítrea.

A presença de óxidos fundentes no próprio resíduo mostra a possibilidade de utilizá-lo com esse mesmo propósito, diminuindo a temperatura de queima.

Marques *et al.* (2007) realizou ensaios de difração de raios x (Shimadzu, XRD 6000) no RPP, de forma a buscar conhecer os minerais presentes no resíduo, apresentada na Figura 2.7.

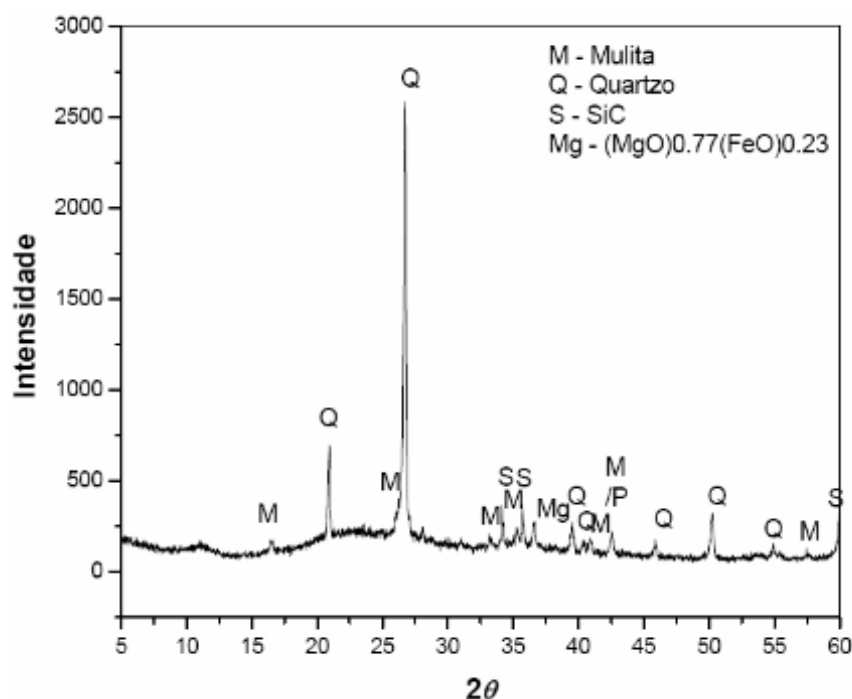


Figura 2.7 – Padrão de difração de raios X do resíduo do polimento de porcelanato (Marques *et al*, 2007).

Para Marques (2007), o resíduo apresenta como fases cristalinas: mullita, quartzo, carbetto de silício e periclase.

O quartzo é proveniente do porcelanato, da fração que permaneceu após a queima, a outra porção que sofreu processos químicos na queima pode ser observada na forma de mullita. Já a presença de carbetto de silício é oriunda do abrasivo. A periclase provém do cimento magnesiano utilizado na massa cerâmica.

Silva (2005) realizou uma microscopia eletrônica de varredura para analisar a morfologia das partículas do resíduo de polimento de porcelanato (Figura 2.8) e observou que o resíduo não apresenta uma forma definida, sendo bastante irregulares e angulosos, o que também caracteriza o próprio processo de polimento, no qual o atrito gera partículas deformadas.

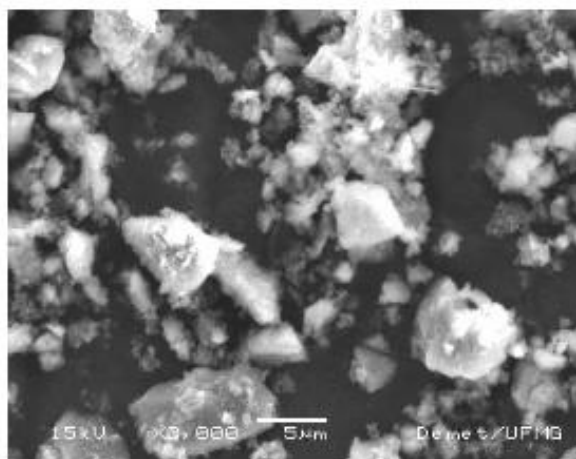


Figura 2.8 - Morfologia do grão de RPP aumentado 3000x (Silva, 2005).

Quanto ao tamanho das partículas, todos os autores encontraram que esse pó branco gerado se encontra quase em sua totalidade numa faixa entre 0,004 e 0,007mm, o que se formos comparar com a granulometria de solos, corresponderia a faixa de silte. Vale ressaltar que essa comparação deve ser feita apenas em caráter granulométrico, já que por ser um resíduo ele não se enquadra em características padrão para tipos de solos. A Figura 2.9 mostra curvas granulométricas que caracterizam o material.

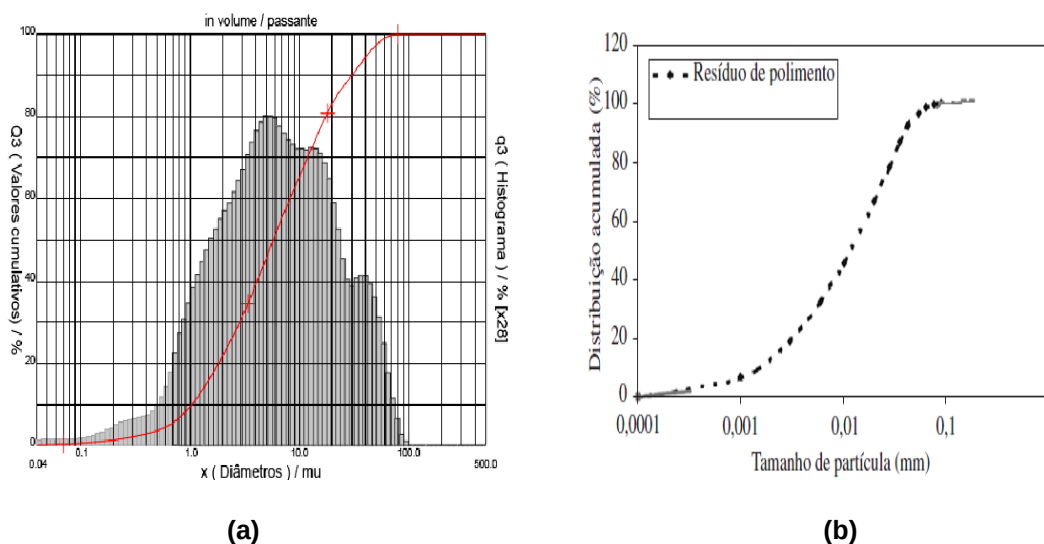


Figura 2.9 - Distribuição de tamanho de partículas do RPP por: (a) Marques, 2007; (b) Bernardin, 2007.

2.3 Aplicação do resíduo na construção civil

Junto com a revolução industrial, surge o conceito de reciclagem ou reaproveitamento de materiais, no qual a utilização de um material secundário, ou seja, reaproveitado, gera uma grande economia de energia quando comparado à produção primária, além de impedir um descarte de material a céu aberto.

A reciclagem de resíduos pela indústria da construção civil vem se consolidando como uma prática importante para a sustentabilidade seja atenuando o impacto ambiental gerado pelo setor ou reduzindo os custos.

No Brasil, quando comparado a países de primeiro mundo, a reciclagem de resíduos como materiais de construção é ainda inconvincente, com a possível exceção da intensa reciclagem praticada pelas indústrias de cimento e aço (Ângulo *et al.*, 2001), ultimamente tendo um pouco mais ênfase na parte de reutilização de materiais cerâmicos. Marciano & Khiara (1997) estimam que a indústria cimenteira economizou entre 1976 e 1995 cerca de 750 mil toneladas de óleo combustível queimando resíduos, como casca de arroz, serragem e pedaços de madeira, pó de carvão vegetal, pedaços de pneu e borracha, dentre outros, graças ao processo de reaproveitamento.

Dentre as inúmeras vantagens do reaproveitamento dos resíduos industriais, pode-se citar a diminuição do volume de resíduos enviados para aterros industriais, diminuindo assim os custos com destinação e transporte, a economia de energia e recursos naturais, além da melhoria da imagem da empresa frente ao mercado consumidor.

No que se diz respeito ao resíduo de polimento de porcelanato, inicialmente pouco se conhecia sobre e o resíduo acabava sendo despejado em leiras. Quando sua produção se tornou vultosa, a importância de se dar uma destinação e conhecer as propriedades do material se mostraram necessárias. Logo o mais lógico seria reutilizar o resíduo no próprio processo de produção do porcelanato. Contudo ao ser estudado, foi observado que o material apresenta componentes químicos que, se utilizados novamente na fabricação de porcelanatos, formam uma porosidade

intrínseca e indesejada, ocasionando uma expansão inadequada do material, se tornando difícil sua utilização no caso de produtos densos como o porcelanato.

A expansão ocorre devido à presença de partículas de carbetto de sílcio incorporadas no resíduo durante o processo de polimento. Esse elemento em determinada temperatura decompõe-se, gerando CO_2 . A formação de CO_2 dentro de um corpo cerâmico provocará uma expansão volumétrica, associada ao início da vitrificação do material cerâmico, tornando a superfície impermeável à passagem do gás resultante da decomposição para o exterior da peça.

Porém foi constatado que esse resíduo tinha potencial para ser aplicado em materiais menos densos, sendo assim uma destinação possível. Logo se estudou a sua utilização na própria indústria cerâmica.

Luckmann & Bernardin (2006) estudaram a utilização do RPP na obtenção de uma cerâmica celular. Sua aplicação varia desde um componente para preenchimento de lajes nas construções até a fabricação de divisórias com excelentes propriedades termo-acústicas. As propriedades do material obtido foram praticamente idênticas a de uma cerâmica celular comum.

Marques *et al* (2007) também estudou a utilização do resíduo como massa cerâmica, adicionando porcentagens diferente de resíduo numa massa destinada a formação de peças cerâmicas. No seguinte trabalho, foram adicionadas porcentagem de 1% (R1), 3% (R3) e 5% (R5) de RPP em relação à massa seca, e foram comparados a uma massa cerâmica comum (MC).

Como se pode observar na Figura 2.10, foi constatada uma tendência à diminuição de temperatura de queima quando comparados à absorção de água do material. Porém ao se analisar as misturas com a MC na mesma temperatura de queima, foi visto que a densidade se apresenta menor nas misturas.

Esses resultados evidenciam que há dois fenômenos interagindo durante a queima, um relacionado à presença de fase vítrea e fundentes no resíduo que diminuem a temperatura de queima, e outro relacionado à queima de carbetto com formação de CO_2 . O autor conclui então que a utilização de um ciclo de queima

rápida permita que haja a formação do CO₂ sem a presença de elevada quantidade na fase vítrea, diminuindo a diferença da porosidade da peça.

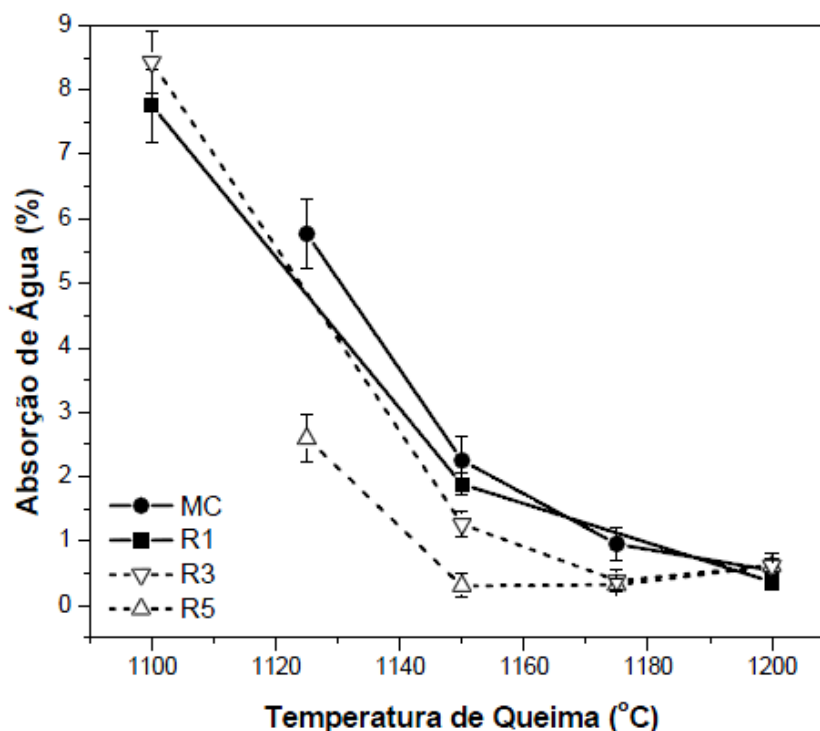


Figura 2.10 - Temperatura de queima por absorção de água das misturas e massa comum (Marques *et al*, 2007).

A aplicação do resíduo na própria massa cerâmica foi também analisada por Rambaldi *et al.* (2007), em que a massa foi dessa vez substituída por porcentagens de resíduo variando de 5 a 15%, observando assim diversas propriedades dos materiais. Podemos observar um resumo dos dados obtidos na Tabela 2.4. O autor concluiu que a mistura realizada com o teor de 15% de RPP mostrava os melhores resultados em uma avaliação geral.

	σ (MPa)	E (GPa)	ρ_{bulk} (g/cm ³)
S	94.9 $\pm$ 5.0	72.9 $\pm$ 1.5	2.43
S5L	97.2 $\pm$ 5.9	64 $\pm$ 4.1	2.41
S10L	96.0 $\pm$ 4.3	66.4 $\pm$ 4.3	2.41
S15L	97.0 $\pm$ 4.1	64.9 $\pm$ 5.5	2.40

Tabela 2.4 - Propriedades físicas e mecânicas dos materiais pós-queima (Rambaldi et al, 2007).

Assim como na indústria cerâmica, estudos também foram feitos com intenção de reutilizar o resíduo em fábricas de cimento e concreto.

Silva (2005) estudou o comportamento do concreto de cimento Portland com adição do resíduo de polimento de porcelanato, no qual foram analisadas as principais características do concreto, como a resistência à compressão axial, resistência à tração e durabilidade.

A análise foi feita adicionando resíduo em relação à massa seca do cimento Portland, chegando as seguintes conclusões: as misturas com adição do resíduo apresentaram melhor consistência e uma menor exsudação. Foi observada atividade pozolânica no resíduo.

A adição do RPP aumentou a viscosidade do concreto no estado fresco, opondo-se ao movimento descendente das partículas mais pesadas e ascendentes da água, reduzindo, desta forma, a exsudação.

Quanto à resistência a compressão, a adição do RPP melhorou o desempenho do concreto para todos os teores em relação ao de referência. Quanto à resistência a tração, as amostras com 10% e 20% de adição de RPP apresentaram um aumento de resistência, com a amostra de 10% chegando a um ganho de 21,39% em relação ao concreto de referência.

Já na questão da durabilidade, foi observado que a adição de RPP diminui a porosidade do concreto, saindo de 15,63% para o concreto de referência, para 14,01% na amostra de 10% e 10,35% na amostra de 20%. O autor cita ainda que a amostra de 10% apresenta resultados mais satisfatórios para sua utilização.

A atividade pozolânica do resíduo também foi observada por Pelisser *et al.* (2012), que estudou a eficiência do resíduo em adição ao cimento Portland. O autor relata que misturas contendo o resíduo aumentou a resistência do concreto em até 50% em relação à resistência após 56 dias. Por um ensaio termogravimétrico, o autor percebeu que a portlandita (hidróxido de cálcio) presente no cimento reage com o cimento formado com a sílica do resíduo, formando silicatos de cálcio hidratados (CSH), caracterizando uma atividade pozolânica.

Steiner (2015) investigou a reutilização do RPP como material cimentício em argamassas e descobriu que além da grande economia de cimento graças à atividade pozolânica do resíduo, o RPP diminui a retração autógena do cimento, o que ele explica pelo fato da ação pozolânica do resíduo promover reações mais lentas no concreto, além de um fator que foi denominado de “autocura”, no qual o material pozolânico adsorve uma significativa quantidade de água em sua superfície, que é liberado para o meio ambiente durante a hidratação do cimento, evitando assim fissuras no concreto.

O uso do RPP na indústria cimentícia vem se mostrando um destino eficiente para o resíduo, podendo muitas vezes substituir grandes quantias de cimento e ainda assim melhorar o desempenho do concreto. Foi o que também comprovou Jacoby (2015), observando uma melhora de resistência no concreto com uma economia de 20% de cimento Portland. Porém o autor alerta para o uso do resíduo com agregados grosseiros, visto que a presença de materiais alcalinos no RPP, tais quais os óxidos de sódio e potássio, que possam vir a gerar uma reação álcali-sílica prejudicial ao concreto.

Apesar de alguns destinos terem sido encontrados para o resíduo de polimento de porcelanato, vale ressaltar que o volume de produção do resíduo é ainda muito alto em comparação a sua utilização como material de reuso.

Em relação à área de geotecnia, a utilização do resíduo como material de reciclagem ainda é inconclusiva, sendo pouco estudada na literatura até os dias de hoje.

Araujo (2014) pesquisou sobre o emprego de resíduo de polimento de porcelanato em solo laterítico para pavimentação. Neste trabalho, Araujo observou o comportamento do solo com adição de RPP em relação a sua massa em diferentes porcentagens, sendo elas: 0% (Solo Puro), 10%, 30%, 50% e para ensaios de compactação 100% (Resíduo puro). Os dados da compactação (Figura 2.11) nos mostra uma tendência de diminuição de peso específico com o aumento de porcentagem de RPP, devido à baixa densidade do material, e um aumento do valor de umidade ótima, além de uma tendência de abatimento da curva de compactação quanto mais a direita.

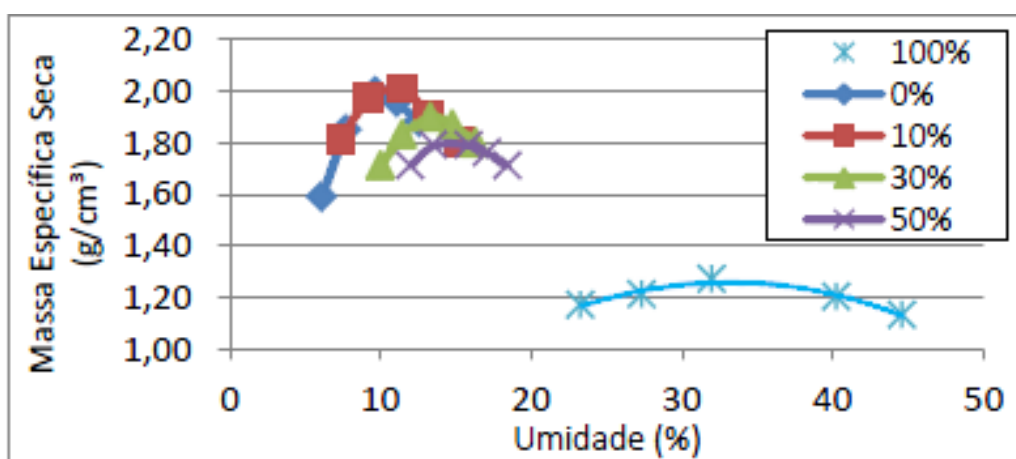


Figura 2.11 - Curvas de compactação (Araujo, 2015).

Quanto aos valores de CBR e expansão, foram realizados ensaios com a energia de compactação modificada e os resultados apresentados na Tabela 2.5.

Mistura Avaliada	ISC (%)	Expansão após 4 dias (%)
Solo Puro (0%)	19,48	0,0779
Solo + 10% RPP	43,59	0,0346
Solo + 30% RPP	26,91	0,0391
Solo + 50% RPP	21,79	0,087

Tabela 2.5 - Valores de ensaio de CBR (Araujo, 2014).

Com isso o autor conclui que os valores de expansão estavam dentro do limite sugerido pelo DNIT e que a mistura com adição de 10% do resíduo apresentou o resultado mais satisfatório, além de todas atingirem um valor maior de CBR.

Araujo (2016) estudou o comportamento geotécnico de misturas de solo com adição de RPP com ensaios de cisalhamento direto e prova de carga em placa.

Seus resultados mostraram que o resíduo puro apresenta maior intercepto de coesão que o solo e misturas e menor ângulo de atrito, sendo ainda o material com resultados mais variáveis. A Tabela 2.6 mostra os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento direto.

Material	c (kPa)	ϕ (°)	R²
Solo puro	7	39.8	0.984
Mistura 5%	9.1	39.1	0.975
Mistura 10%	4.5	37.0	0.981
Mistura 20%	1.2	36.6	0.940
RPP puro	21.5	32.9	0.851

Tabela 2.6 - Dados do cisalhamento direto (Araujo, 2016).

Foram realizados ensaios de prova de carga em placa com um solo genérico e com uma mistura de 5% de adição de RPP, que segundo o autor, mostrou melhores resultados nos ensaios de cisalhamento. O ensaio mostrou um aumento considerável de resistência para o solo com adição de resíduo, aumentando a tensão admissível em cerca de 1,44 vezes, diminuindo ainda os recalques do mesmo. O autor também cita a presença da atividade pozolânica do resíduo como possível motivo para aumento de resistência.

2.4 Aspectos Ambientais

O conceito de reutilização e de reciclagem vem sendo empregado como solução ao destino final da enorme quantidade de rejeitos gerados na maioria das indústrias. Contudo, deve-se ter o mínimo de cautela nessa prática. Estudos de caráter ambiental devem ser realizados para analisar cientificamente este potencial de reciclagem dos resíduos industriais, entre eles uma avaliação toxicológica.

A deposição indevida de resíduos industriais podem gerar inúmeros problemas ambientais, como contaminação do solo e agressão a vegetação presente no local. Com isso não se deve levar em consideração apenas o potencial de produção do resíduo, mas também o seu potencial agressor ao meio ambiente.

Com as crescentes restrições aos descartes de resíduos industriais, geradas por leis ambientais, juntamente com a conscientização ambiental da população, o número de indústrias em busca da correta destinação ou reaproveitamento dos rejeitos gerados em seu processo vem aumentando.

No Brasil, a norma NBR 10004 classifica os resíduos sólidos a partir de sua origem e sua periculosidade em relação aos padrões de qualidade do meio ambiente, os quais são divididos em perigosos e não perigosos e subdivididos em inertes e não inertes. E para sua validação ambiental, deve-se ser avaliados itens como: Inflamabilidade; Corrosividade; Reatividade; Toxicidade e Patogenicidade. Os anexos dessa norma apresentam-se na forma de tabelas que, a partir de ensaios como, por exemplo, de análise química de extratos solubilizados e lixiviados, apresentam limites para concentrações em mg/L de substâncias conhecidas.

O resíduo de polimento de porcelanato apesar de todos os estudos, ainda é um material recente no mercado, em processo de compreensão, portanto ao ser utilizado, é importante também uma análise ambiental do mesmo, assim como uma análise de desempenho.

Costa (2010), em sua dissertação de mestrado, fez um estudo ecotoxicológico para avaliação ambiental do resíduo de polimento de porcelanato. Foram realizados

ensaios de lixiviação com o resíduo puro e com amostras de tijolos produzidos com 1%, 3% e 5% de resíduo, no qual o extrato dos mesmos foi exposto juntamente com a presença dos organismos *Daphnia Magma* e *Eisenia Fetida*, uma espécie de crustáceo e minhoca, respectivamente. Além de um estudo sobre a germinação de sementes de rúcula com presença do resíduo. Os resultados do ensaio com o resíduo de polimento estão apresentados na Tabela 2.7, onde nenhum dos parâmetros analisados apresentou concentração acima do valor de referência da NBR 10004, segundo o autor.

Parâmetros	Resultado	V.R. - NBR 10.004 Anexo F	Limite de Detecção	Método
Arsênio (mg/L)	< 0,001	1,0	0,001	SM 3500 As
Bário (mg/L)	1,35	70,0	0,008	SM 3500 Ba
Cádmio (mg/L)	< 0,0001	0,5	0,0001	SM 3500 Cd
Chumbo (mg/L)	< 0,001	1,0	0,001	SM 3500 Pb
Cromo (mg/L)	0,013	5,0	0,001	SM 3500 Cr
Fluoreto (mg/L)	0,14	150,0	0,05	SM 4500 F-D
Mercúrio (mg/L)	< 0,0005	0,1	0,0005	SM 3112 B
pH	9,05	-	0,01	NBR 14339:1999
Prata (mg/L)	< 0,0001	5,0	0,0001	SM 3500 Ag
Selênio	< 0,001	1,0	0,001	SM 3500 Se

Tabela 2.7 - Análise do extrato de lixiviado, de acordo com NBR 10005/2004 (Costa, 2010).

Como conclusões, ele aponta que tanto os extratos lixiviados da amostra de resíduo puro, quanto os corpos de prova incorporados com o mesmo, não apresentaram toxicidade aguda além dos limites estabelecidos, onde no ensaio de letalidade do material, todos os indivíduos que foram expostos a 14 dias de contaminação do solo permaneceram vivos durante o processo. Porém na análise de toxicidade crônica, foi apresentado efeito do material sobre a longevidade, reprodução e crescimento do organismo na amostra contendo resíduo puro.

Quanto à avaliação realizada com sementes de rúcula, não foi observado nenhum efeito significativo na germinação destas. Porém houve um efeito negativo no crescimento delas na exposição de misturas com 50% e 100% do material. Esta consequência pode estar relacionada com a falta de nutrientes orgânicos na amostra.

Em relação à avaliação realizada com o organismo *Eisenia Fetida*, apenas a amostra de lodo bruto (100%) apresentou toxicidade, possivelmente devido à ausência total de nutrientes.

O trabalho de Costa (2010) mostra a importância de uma avaliação ambiental, tanto quanto mecânica, na aplicação de um resíduo.

Kummer *et al.* (2007) estudaram a mistura de resíduo de feldspato com o resíduo de porcelanato na produção cerâmica em três proporções (25%, 50% e 75% de resíduo de porcelanato), queimando as cerâmicas em temperaturas diferentes (1100°C, 1150°C e 1200°C). Ao realizar testes de solubilização com as formulações, observou que as amostras de 50%, queimada a 1200 °C, e a de 75%, queimada a 1100 °C, não apresentaram inertização, classificando os materiais como Classe IIa, conforme a NBR 10004/2004. Já em todas as outras formulações, as misturas foram classificadas como Classe IIb (Inerte). O parâmetro que enquadrou as misturas como não-inerte foi o alumínio, ocorrendo a solubilização do mesmo acima do limite apresentado em norma.

3 Materiais e métodos

3.1 Escolha do Solo

O solo utilizado para análises referentes a esta pesquisa é procedente da área rural de São José do Mipibu, região metropolitana de Natal – RN. A Figura 3.1 mostra um registro aéreo do local, cujas coordenadas geográficas são 6°04'48.6"S 35°13'32.9"W. A jazida em questão tem sido explorada com finalidade para aterros rodoviários na região. A escolha deste solo se deu baseado em sua similaridade com jazidas localizadas na região de Conde-PB, local onde é produzido o resíduo de polimento de porcelanato.



Figura 3.1 - Georeferencial da jazida de extração de solo, coordenadas: 6°04'48.6"S 35°13'32,911W. Imagem obtida com o Google Earth.

Por ser uma jazida visivelmente bastante explorada, nota-se que há uma região mais elevada, a qual havia sido escavada por retroescavadeiras, tendo parte do material se acumulado em uma área frontal. A Figura 3.2 mostra o perfil do solo e

o local onde foi realizada a coleta e a Figura 3.3 mostra a execução da retirada do solo.



Figura 3.2 - Perfis do solo no local da coleta (Autor).



Figura 3.3 – Ilustração do momento da coleta (Autor).

A Figura 3.4 apresenta uma comparação granulométrica realizada entre o solo coletado e com solos obtidos a partir de um material remanescente das obras de adequação de capacidade da rodovia BR-101/PB, próximo à localização da fábrica que produz o resíduo, em Conde-PB. A Figura 3.4 mostra que o solo de referência se assemelha a amostras de solos coletadas próximas a fábrica (Solo Conde 1 e 2), quanto a sua granulometria, essa semelhança se torna interessante pelo fato da economia gerada pela destinação do resíduo a solos próximos a fábrica onde é gerado.

A Tabela 3.1 apresenta ainda, a comparação entre os valores de Limites de Atterberg para essas mesmas amostras.

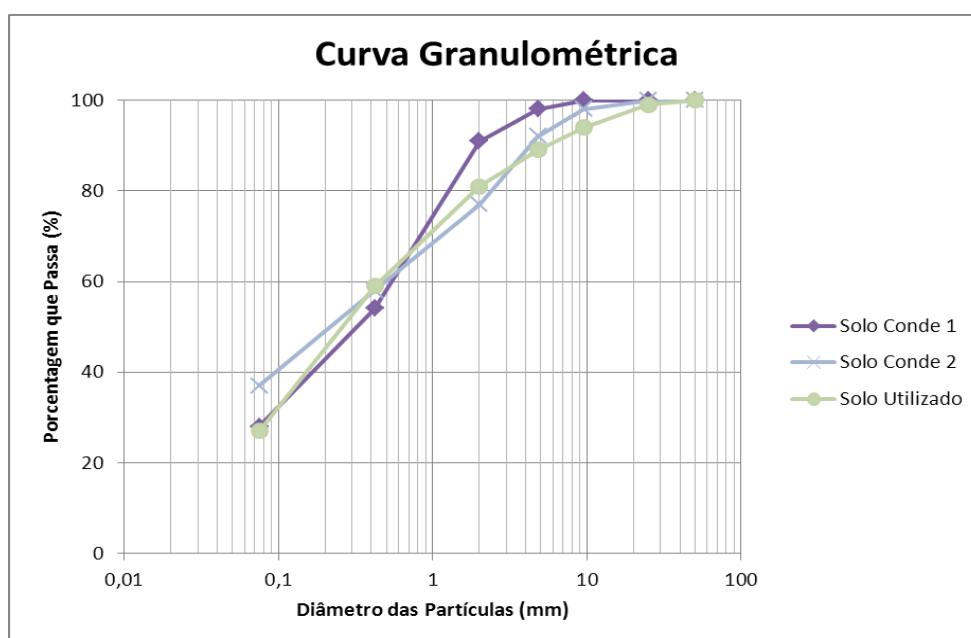


Figura 3.4 - Curvas granulométricas do Solo utilizado na pesquisa e Solos de referência em Conde-PB (Autor).

	Solo Utilizado	Solo Conde 1	Solo Conde 2
Média LL (%)	26,7	25	32
Média LP (%)	17,7	19	18
Média IP (%)	8,9	6	14

Tabela 3.1 - Valores médios de LL, LP e IP para o solo utilizado em pesquisa e o solo de conde.

3.2 Resíduo de Polimento de Porcelanato

O resíduo utilizado nesta pesquisa foi coletado em uma fábrica produtora do revestimento localizada em Conde-PB. A produção de porcelanato vem se intensificando e com ela a geração de resíduos. Souza (2007) relata uma produção entre 30 a 35 toneladas de lama por dia nesta fábrica. Segundo informações da própria fábrica, já existe um programa de reutilização do resíduo na sua indústria cimentícia, porém a quantidade de material a ser reaproveitado ainda é pequena comparada a sua produção.

A coleta foi realizada no momento de produção da fábrica, com o resíduo recém-formado. O RPP é despejado (Figura 3.5), ainda extremamente úmido, devido à circulação de água utilizada no processo. Ao acumular certa quantidade, uma retroescavadeira o reloca para um pátio próximo, a fim de esperar sua destinação.



Figura 3.5 - Montante de RPP logo após descarte (Autor).

A coleta se realizou seguindo as orientações da norma NBR 10007 (ABNT, 2004). Dividiu-se o montante em três camadas, – Topo, meio e base –, conforme indicado na Figura 3.5. O material foi coletado por meio de pás igualmente nos três

níveis e armazenado em sacos, devidamente identificado com a camada, autor da coleta, número sequencial do saco e data da coleta. Ao ser armazenado em laboratório, o resíduo foi então retirado dos sacos e homogeneizado.

3.3 Características dos Materiais

Araujo (2016) realizou a caracterização dos materiais usados nesta pesquisa, assim como as misturas (5%,10%,15% e 20%), essa que será descrita a seguir.

3.3.1 Massa Específica dos Sólidos

A Tabela 3.2 indica os valores de Massa Específica dos Sólidos dos materiais puros e misturas.

Material	Massa Específica dos Sólidos (g/cm ³)
Solo puro	2,6
Solo + 5% RPP	2,595
Solo +10% RPP	2,588
Solo + 15% RPP	2,577
Solo + 20% RPP	2,566
RPP puro	2,538

Tabela 3.2 - Valores de Massa Específica dos Sólidos de cada material (Araujo, 2016).

Observa-se uma tendência de diminuição da Massa Específica dos Sólidos com o aumento da quantidade de resíduo, sendo o solo o material mais denso (2,6 g/cm³) e o resíduo puro o material menos denso (2,538 g/cm³).

3.3.2 Granulometria Conjunta

O solo em questão foi analisado tanto na condição natural quanto passado completamente na peneira de abertura 4,75mm, devido à necessidade para utilização nos ensaios de adensamento, já que este ensaio é realizado em um anel com dimensões reduzidas. As duas curvas são apresentadas na Figura 3.6.

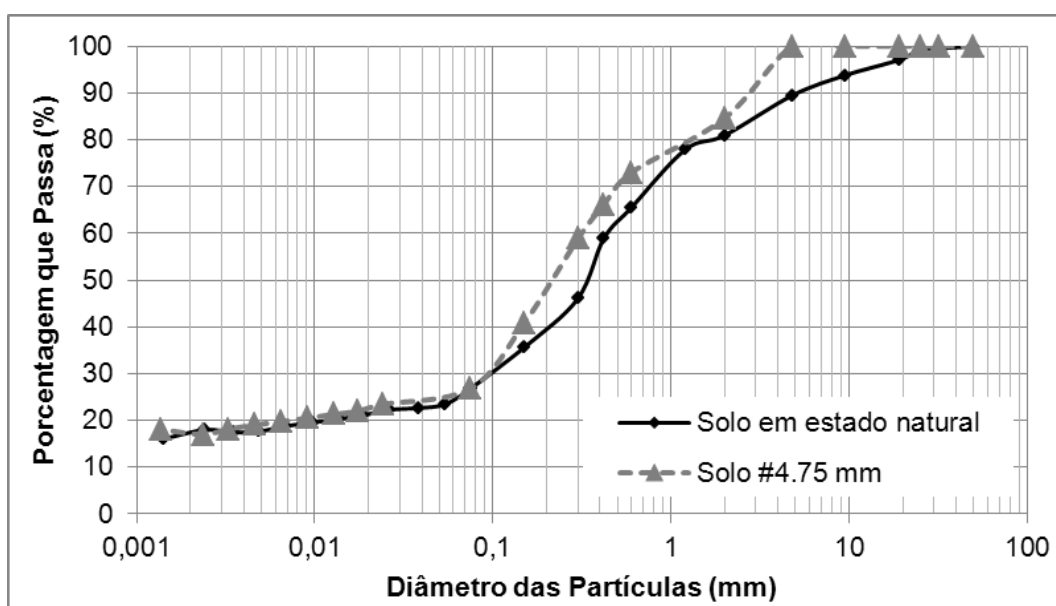


Figura 3.6 - Curva granulométrica do solo puro em estado natural, destorroado e do solo puro passado na peneira #4,75 mm (Araujo, 2016).

A granulometria do RPP precisou ser realizada com e sem a utilização de defloculante, justificados por uma possível interação química entre o resíduo e o defloculante, gerando torrões que não foram completamente desfeitos no processo de peneiramento. Os resultados estão representados na Figura 3.7.

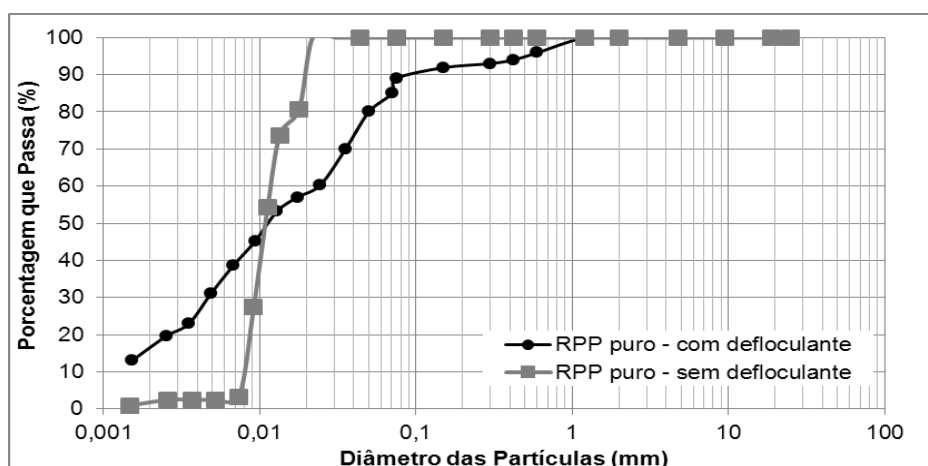


Figura 3.7 - Curva granulométrica do RPP puro, destorreado, com uso de defloculante (hexametáfosfato de sódio), conforme recomendação da respectiva norma e sem defloculante (Araujo, 2016).

A Figura 3.8 mostra os ensaios de granulometria conjunta com defloculante para as misturas (5,10, 15 e 20%) de solo com adição de resíduo.

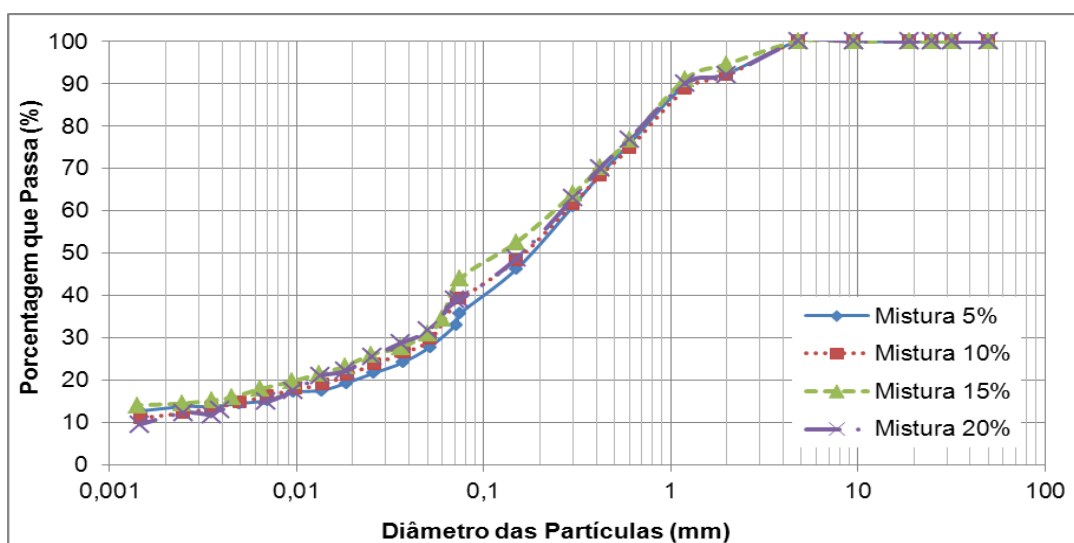


Figura 3.8 - Curva granulométrica das misturas de 5%, 10%, 15% e 20% de adição de RPP em massa seca de solo (Araujo, 2016).

Em geral as curvas granulométricas mostram que a adição de resíduo não é suficiente para causar grandes alterações na distribuição granulométrica do material,

porém se observa uma tendência de deslocamento para a esquerda das curvas com o aumento do teor de resíduo.

A Tabela 3.3 apresenta as frações de tipo de solo baseados nas faixas de diâmetro encontrada nas curvas, além de classificar os materiais puros e misturas de acordo com a classificação do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

	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%
Pedregulho	19,06%	15,41%	0,00%	0,00%	7,57%	7,98%	5,32%	7,90%
Areia Grossa	15,39%	11,58%	4,06%	0,00%	16,60%	17,22%	17,93%	15,23%
Areia Média	29,94%	32,26%	4,04%	0,00%	29,55%	26,40%	24,14%	28,09%
Areia Fina	12,19%	13,95%	11,90%	0,00%	18,43%	18,67%	21,58%	17,06%
Silte	5,42%	9,79%	66,99%	97,54%	14,07%	17,46%	16,50%	19,41%
Argila	18,00%	17,01%	13,02%	2,46%	13,78%	12,28%	14,53%	12,31%
Classif. SUCS	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 3.3 - Resumo dos dados de granulometria conjunta (Araujo, 2016).

3.3.3 Limites de Atterberg

A Tabela 3.4 mostra um resumo dos materiais estudados para os limites de Atterberg e Índice de Plasticidade (IP).

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

Tabela 3.4 - Valores dos limites de Atterberg e Índice de Plasticidade das amostras (Araujo, 2016).

Os resultados desse ensaio mostra que os valores de coeficiente de variação para o resíduo são mais altos quando comparado às outras misturas.

Analisando os valores de Índice de Plasticidade, Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade, é visto que não há um padrão de crescimento ou de decréscimo em relação ao teor de resíduo. Portanto, a influência da adição do resíduo no solo puro, para esse ensaio, se torna difícil de determinar, se tornando inconclusivo.

3.3.4 Fluorescência de raios X

A Tabela 3.5 apresenta os resultados do ensaio FRX das amostras.

	Solo puro	Mistura 5%	Mistura 10%	Mistura 15%	Mistura 20%	RPP puro
SiO₂	38,12%	39,24%	43,61%	45,25%	49,16%	62,57%
Fe₂O₃	29,19%	28,12%	26,39%	24,23%	19,80%	5,53%
Al₂O₃	28,15%	25,94%	22,39%	22,09%	21,92%	18,71%
TiO₂	2,03%	1,93%	1,73%	1,67%	1,46%	0,97%
ZrO₂	0,17%	0,32%	0,69%	1,03%	1,50%	0,91%
MgO	0,20%	0,77%	0,91%	1,02%	1,09%	1,20%
K₂O	0,10%	2,64%	2,82%	3,10%	3,35%	6,42%
MnO	0,04%	0,10%	0,16%	0,27%	0,31%	1,04%
Na₂O	2,00%	0,80%	0,87%	0,77%	0,60%	0,02%
CaO	0,00%	0,14%	0,43%	0,57%	0,81%	2,63%

Tabela 3.5 - Resultados FRX (Araujo, 2016).

Com base no que foi estudado na literatura, os valores obtidos são bastante compatíveis, com exceção dos valores de teor de óxido de magnésio e óxido de ferro. Como foi dito anteriormente, o percentual de MgO apresentado no resíduo é oriundo do tipo de cimento utilizado na massa cerâmica, o que nos leva a hipótese que o cimento utilizado nesse caso não era magnesiano. Tal suposição concorda ainda com o fato da presença de óxido de titânio, impureza comumente encontrada no cimento Portland. Já os valores de óxido de ferro se apresentam maiores do que os observados na literatura, incluindo de trabalhos realizados com resíduos provenientes da mesma fábrica (Souza, 2007; Silva, 2012). Araujo (2016) acredita que esta diferença se justifica a uma utilização de matéria prima proveniente de uma jazida diferente, o que mudaria a coloração da peça devido ao teor de óxido de ferro.

Quanto ao solo puro, observa que os valores são compatíveis com características de latossolos. No caso deste seria um solo laterítico em formação, visto que ainda possui um teor de sílica relativamente alto em relação ao de alumina, o qual iria perder ao longo do processo de intemperização.

3.3.5 Difração de raios X

A Figura 3.9 apresenta o gráfico com a identificação das fases cristalinas do RPP puro utilizado nesta pesquisa. Nele se pode observar uma semelhança com os apresentados na literatura, com exceção da presença da periclase. Como foi observada nos ensaios de FRX, a quantidade de óxido de magnésio é menor quando comparado a outros trabalhos, remetendo-se ao fato da produção ter sido realizada com um cimento não magnesiano, explicando a não presença da periclase no resultado do ensaio apresentado.

A Figura 3.10 mostra as fases cristalinas das misturas e do solo puro, no qual se observa que a adição de RPP pouco influência no tipo de material presente no solo, sendo que apenas nas misturas de 10%, 15% e 20% aparecem a Mulita, elemento presente no RPP.

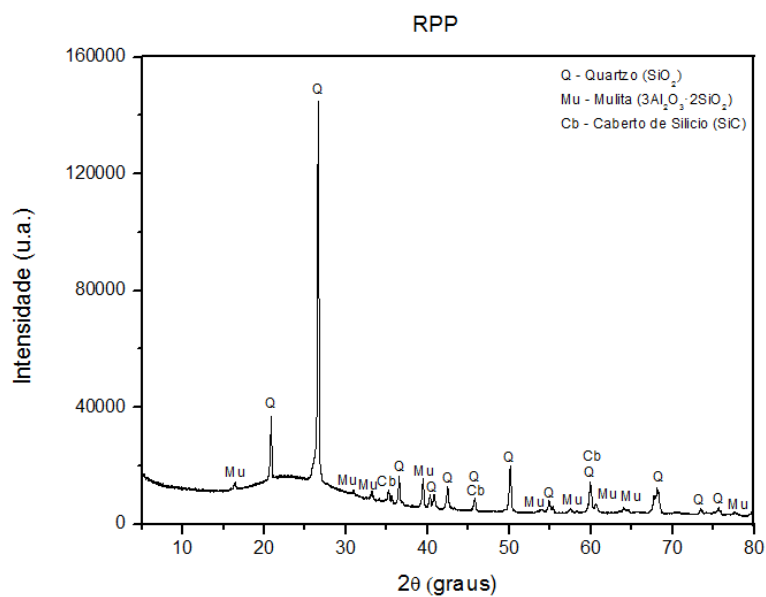


Figura 3.9 - DRX resíduo puro (Araujo, 2016).

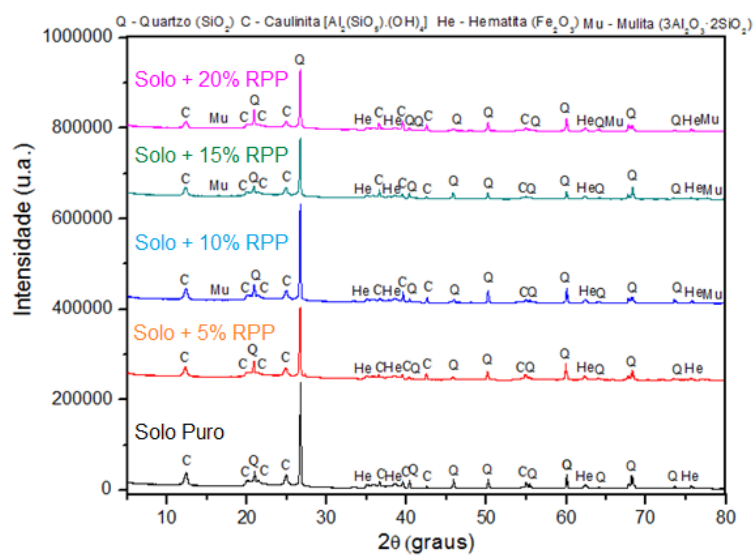


Figura 3.10 - DRX Solo puro e Misturas (Araujo, 2016).

3.3.6 Microscopia Eletrônica de Varredura

Com objetivo de conhecer o aspecto físico das partículas dos materiais puros e misturas, foi realizado um ensaio de MEV, apresentado na Figura 3.11.

Na imagem atenta-se ao fato das partículas de RPP serem realmente de menor dimensão que o solo puro, as quais chegam, nas misturas, a preencher vazios presentes no solo.

Pode-se observar ainda que as partículas do resíduo apresentam uma forma mais irregular e angular que o solo, que por sua vez é composto por partículas mais arredondadas e poucos finos.

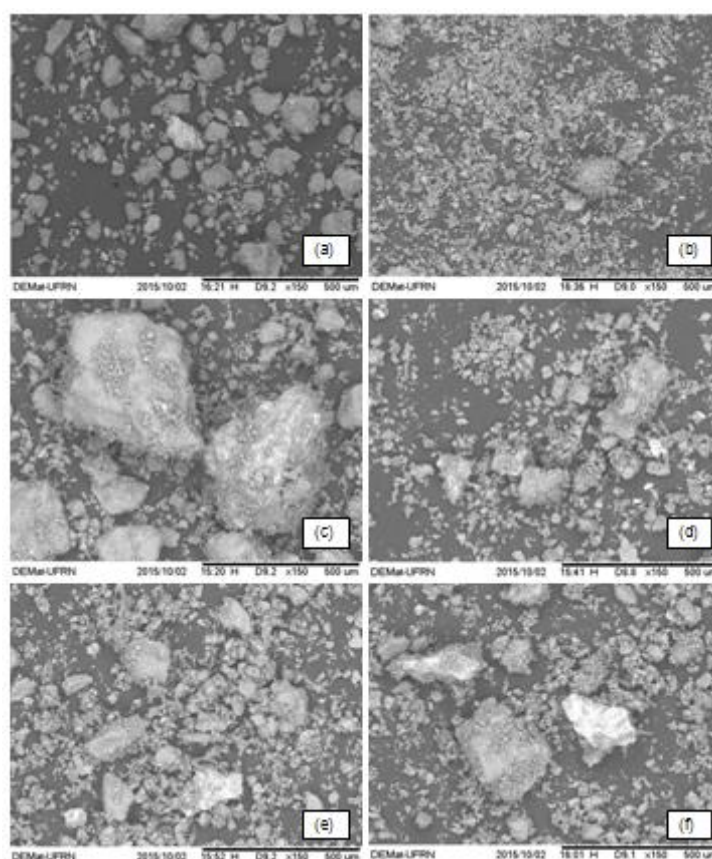


Figura 3.11 - Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras com aproximação de 150x. (a) Solo puro. (b) RPP puro. (c) Mistura 5%. (d) Mistura 10%. (e) Mistura 15%. (f) Mistura 20% (Araujo, 2016).

3.4 Programa Experimental

Neste trabalho, foram realizadas cinco misturas de resíduo de polimento de porcelanato com o solo proposto, além da amostra de referência, de solo puro, com as seguintes proporções de resíduo (X) para o solo em relação à massa seca: X = 0% (solo puro), X = 5%, X = 10%, X = 15%, X = 20% e X = 40%, além do valor de 100% (Resíduo Puro) que foi utilizado em alguns casos específicos. Estes valores foram determinados baseados em estudos da literatura que mostram que valores superiores acabam por afetar demais as características do solo, conforme foi observado no item dois desta pesquisa. As misturas foram realizadas por meio de adição de resíduo em relação à massa de solo e não por substituição, conforme indicado na Equação 3.1.

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

$\chi\%$ sendo a porcentagem de resíduo a ser adicionada ao solo, m_{sRPP} é a massa seca do RPP e m_{sSolo} a massa seca do solo.

Ao analisar os resultados, foi feita uma triagem buscando obter a melhor porcentagem de RPP a ser aplicada, baseando essa escolha não só em características mecânica das misturas, mas também no seu potencial de reciclagem, enfatizando o caráter ambiental da pesquisa.

A Figura 3.12 detalha os ensaios realizados nessa pesquisa, separados por dosagem, e a Tabela 3.6 apresenta um quantitativo de ensaios realizados. Foi realizado o máximo de repetições possíveis buscando avaliar o efeito da variabilidade nos resultados dos ensaios.

Ensaio	Quantidade de ensaios							
	Teor de RPP							Total
	Solo Puro	5%	10%	15%	20%	40%	RPP puro	
Massa Específica dos Sólidos	-	-	-	-	-	3	-	3
Granulometria Conjunta	-	-	-	-	-	1	-	1
Limite de Liquidez	-	-	-	-	-	3	-	3
Limite de Plasticidade	-	-	-	-	-	3	-	3
Compactação: Energia Normal	2	2	2	2	2	2	-	12
Compactação: Energia Modificada	1	1	1	-	-	1	-	4
Índice de Suporte Califórnia: Energia Normal	5*	6*	3	3	3	9*	-	29
Índice de Suporte Califórnia: Energia Modificada	3	3	3	-	-	3	-	12
Adensamento Unidimensional	3	5	5	-	3	3	-	19
Prova de Carga em Placa	-	-	1	-	-	-	-	1
Coleta de Extrato Solubilizado	-	-	-	-	-	-	1	1

*A quantidade faz referência também a ensaios realizados com tempo de secagem.

Tabela 3.6 - Quantitativo de ensaios para presente pesquisa (Autor).

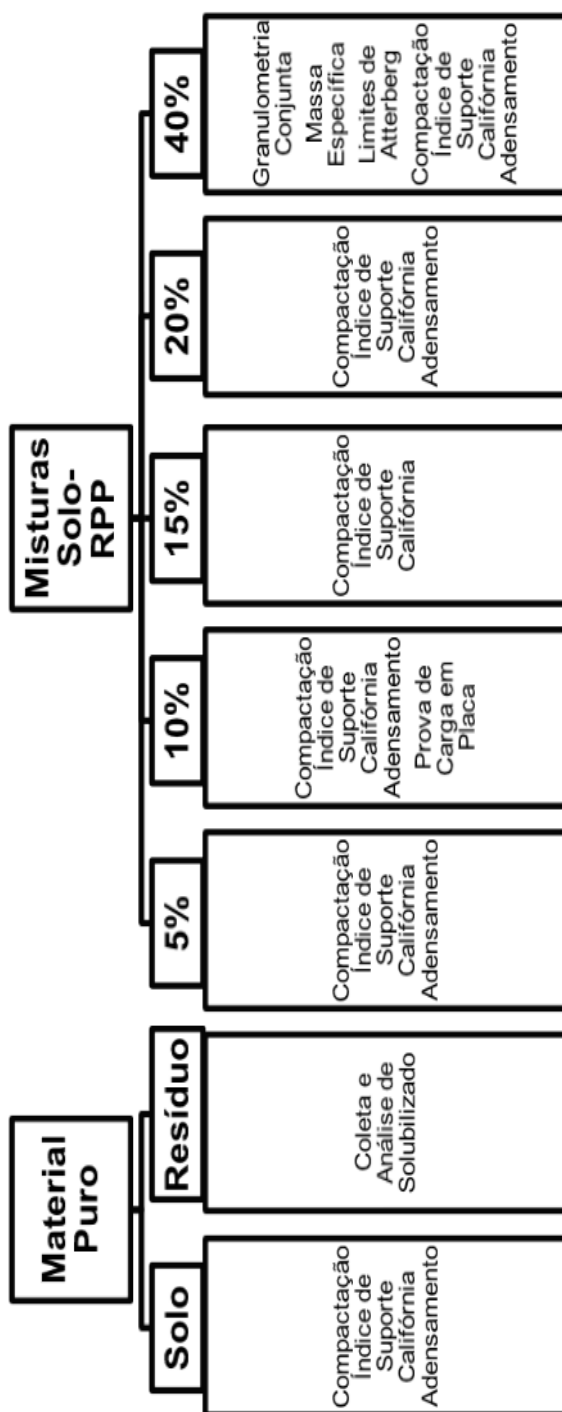


Figura 3.12 - Programa Experimental (Autor).

3.5 Caracterização da Mistura de 40%

Neste estudo houve a necessidade de utilizar um valor de teor de resíduo superior aos adotados por Araujo (2016), a fim de melhor comparar o comportamento mecânico das misturas.

Para caracterizar a mistura de 40% de adição de RPP foram realizados ensaios de Granulometria Conjunta, Massa Específica dos Sólidos e Limites de Atterberg, seguindo instruções da norma NBR 6457 (ABNT, 1986).

3.5.1 Massa Específica dos Sólidos

Seguindo os procedimentos da norma NBR 6508 (ABNT, 1984), 100g do material é separado e imerso em água destilada por aproximadamente 12 horas. A amostra então é levada para um dispersor durante 15 minutos e transferida para um picnômetro de 500 ml para, a vácuo, realizar a remoção de bolhas de ar. Em seguida a amostra deverá passar por um processo de secagem em estufa a aproximadamente 105 °C, para ai então ser determinada a massa de sólidos por pesagem.

3.5.2 Ensaio de Granulometria Conjunta

O ensaio de granulometria conjunta foi realizado por peneiramento e sedimentação, seguindo os procedimentos da norma técnica NBR 7181 (ABNT, 1984).

O ensaio consiste em utilizar o solo a ser analisado, previamente seco ao ar livre e destorroado com o auxílio de um almofariz e mão de gral. Com posse das leituras do ensaio, pode-se construir a curva granulométrica do material.

3.5.3 Limites de Atterberg

O ensaio de limite de liquidez é realizado no aparelho de Casagrande, onde para um determinado teor de umidade, é analisado o número de golpes para que uma ranhura do material se feche, para determinada repetições do ensaio. Um gráfico é realizado de teor de umidade por numero de golpes, no qual realizado de acordo com a NBR 6459 (ABNT, 2016), se pega o valor de teor de umidade referente a 25 golpes para determinar o LL.

O ensaio de limite de plasticidade consiste, em se determinar o teor de umidade do solo quando uma amostra começa a fraturar ao ser moldada com a mão sobre uma placa de vidro, na forma de um cilindro com cerca de 10 cm de comprimento e 3 mm de diâmetro, seguindo a norma NBR 7180 (ABNT, 2016).

Após obtenção do LL e LP, determina-se o Índice de Plasticidade, que consiste na diferença entre esses dois valores.

3.6 Ensaios de Compactação

Foram realizados ensaios de compactação com energia Proctor Normal e modificada para o solo puro e misturas, sem reuso do material, em cilindro grande, seguindo os procedimentos da NBR 7182 (ABNT, 1986) para obtenção das curvas de compactação para as amostras.

Para a escolha inicial de se realizar ensaios com a energia normal de compactação, se frisa a grande quantidade de ensaios realizados nesta pesquisa, no qual a escolha da energia proctor normal acaba facilitando uma maior quantidade de repetições.

Devido à necessidade de se observar a aplicação na pavimentação, posteriormente foram realizados ensaios com energia modificada com o solo puro e

as misturas que apresentaram os melhores resultados (5%,10% e 40% para comparação).

A escolha de ter realizado sem reuso se dá pelo fato de existir uma quantidade suficiente de material para tal, não alterando assim as propriedades granulométricas do solo e misturas por causa dos golpes.

Após os processos de destorroamento e uniformização da umidade, a amostra é colocada em um cilindro, sendo submetida a cinco camadas de compactação com 12 golpes, ou 55 no caso da energia modificada, de um soquete com massa de 4,5 kg por camada. Após esse processo, é determinado o teor de umidade de compactação, a partir da massa específica do corpo de prova. A fim de se obter valores tanto no ramo seco quanto no ramo úmido e próximo ao ponto de umidade ótima.

Os resultados do ensaio são dados em gráficos de peso específico seco (kN/m^3) por teor de umidade (%), onde será analisada a influência do resíduo no grau de compactação do solo.

3.7 Ensaios de Resistência Mecânica

Com o objetivo de avaliar a aplicação do resíduo em um solo destinado a obras rodoviárias, como por exemplo, uma possível aplicação em camadas de pavimento, foram realizados ensaios de Índice de Suporte Califórnia. E para avaliar de forma complementar a compressibilidade do solo e das misturas, foram realizados ensaios de adensamento unidimensional e prova de carga em placa.

3.7.1 Índice de Suporte Califórnia

O ensaio para determinar o Índice de Suporte Califórnia consiste na determinação da relação entre a tensão necessária para produzir uma penetração

de um pistão num corpo de prova do solo, e a tensão necessária para produzir a mesma penetração numa brita padronizada. Através do corpo de prova preparado pode-se efetuar ainda o ensaio de expansão, que é feito observando a expansão do solo em água num período de 96h inundado, conforme ilustrado na Figura 3.13. A norma que rege esse ensaio é a NBR 9895 (ABTN, 1987).

Este ensaio é o que fornece os resultados mais utilizados para a caracterização de solos quanto a sua aplicação em pavimentos, no qual existem critérios de aceitabilidade dos materiais para utilização em aterros rodoviários.

Seguindo a recomendação do Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), inicialmente todos os pontos utilizados para formar a curva de compactação foram submetidos aos ensaios de ISC para obtenção da sua curva. Após isso foram realizados 3 ensaios com o valor de umidade ótima e massa específica seca máxima de cada mistura, a fim de avaliar os resultados nesta condição de ISC considerando a variabilidade dos resultados.

Foram realizados ensaios para o solo e todas as misturas na energia normal de compactação e posteriormente na energia modificada para o solo puro e as misturas de 5%, 10% e 40%.



(a)



(b)

Figura 3.13 – (a) Ensaio de penetração sendo executado, (b) Medição da expansão do solo submerso por meio de relógios comparadores (Autor).

3.7.2 Ensaios de Adensamento Unidimensional

Para os ensaios de adensamento unidimensional, foram seguidos os procedimentos ditos pela NBR 12007 (ABNT, 1990).

As amostras foram compactadas no próprio anel metálico, com dimensões de 20 mm de altura e 50 mm de diâmetro, com a umidade ótima e a massa específica seca máxima determinadas pelo ensaio de compactação. Compactou-se o material em três camadas, escarificadas entre elas, sem reuso de material. Ilustra-se o resultado na Figura 3.14.



Figura 3.14 - Anel metálico para ensaio de adensamento em processo de moldagem (Autor).

Após a moldagem, o anel é alocado na célula de adensamento e levado a prensa. Inicialmente usou-se uma carga de 5 kPa para assentamento da máquina por 10 minutos. A Figura 3.15 mostra o ensaio em andamento.



Figura 3.15 - Ensaio de adensamento (Autor).

Posteriormente foram realizados estágios de carga iniciando com 10 kPa e sempre dobrando a tensão até o valor de 640 kPa. Para cada estágio de carga, com auxílio de um relógio comparador, ou extensômetro, foram anotados valores de recalques no corpo de prova em tempos determinados por norma.

3.7.3 Prova de Carga em Placa

Com objetivo de observar de forma mais acurada o comportamento mecânico da mistura de 10% em ensaios para maiores dimensões e condições mais próximas de campo, foi realizado um modelo de aterro. Neste aterro, realizou-se um ensaio de prova de carga baseando-se nos procedimentos adotados por Nascimento (2015) e adotando recomendações da norma NBR 6489 (ABNT, 1984).

Por já se ter os ensaios de prova de carga em placa para o solo puro e para a mistura de 5%, realizadas por Araujo (2016), a mistura de 10% foi escolhida levando em consideração que teores maiores possivelmente obteriam resultados inferiores de capacidade de carga.

A prova de carga foi realizada no laboratório de Mecânica de Solos da UFRN, em uma caixa de aço reforçado, com faces removíveis montadas através de parafusos, com dimensões de 1,40 m x 1,40 m x 0,75 m. O aterro compactado, conta com 0,60m de profundidade, dividido em seis camadas de 0,10m. A compactação foi feita utilizando um soquete de concreto de seção quadrada com peso de 0,2 kN, respeitando os dados obtidos pelo ensaio de compactação na umidade ótima e massa específica seca máxima na energia Proctor Normal. A Figura 3.16 mostra a compactação com o malho em andamento, na qual foram realizados cerca de 1000 golpes por camada.



Figura 3.16 - Execução da compactação do aterro (Autor) .

Ao iniciar o ensaio, foi determinada a umidade inicial tanto do resíduo quanto do solo, para calcular a massa seca dos materiais, de forma a realizar a mistura de 10%, assim como a quantidade de água necessária para atingir a umidade ótima. Para cada camada, a mistura foi feita com auxílio de uma betoneira, na qual era adicionado cerca de 40 kg de material por vez, misturado por cerca de 30 segundos e despejado em um carro-de-mão, conforme pode se observar na Figura 3.17, sendo posteriormente distribuído dentro da caixa metálica, até atingir a massa correspondente ao volume relativo a uma camada com 0,10m de altura, a fim de alcançar o valor de massa específica obtido no ensaio de compactação. O solo era devidamente espalhado dentro da caixa e antes da aplicação dos golpes eram retiradas três amostras para verificação de umidade.



Figura 3.17 - Betoneira utilizada na execução do ensaio (Autor).

O controle da altura de cada camada foi feito através de um gabarito de madeira, mensurando a altura dos quatro cantos da caixa e do centro, buscando deixar o mais próximo de 10 cm possível. Para cada camada foi verificada a densidade *in-situ* em três pontos distintos, alternando as posições entre as camadas, como foi sugerido por Nascimento (2015). Também foi feita uma verificação da umidade após a compactação. Após as análises o material era recolocado onde foi retirado, e recompatado.

Após o término da compactação, foi feita a inundação da caixa, com objetivo de reduzir os efeitos da sucção matricial do aterro. Para facilitar e acelerar o processo de inundação seguiu-se o procedimento indicado por Nascimento (2015), criando-se 12 furos verticais até a base da caixa metálica, realizados com auxílio de um trado manual, espaçados conforme ilustra a Figura 3.18, e mantendo-se sempre uma lâmina d'água acima do aterro. A inundação ocorreu por 72 horas, seguida de uma drenagem de 24h. A Figura 3.19 apresenta o aterro em processo de inundação, assim como exibe a disposição dos furos executados.

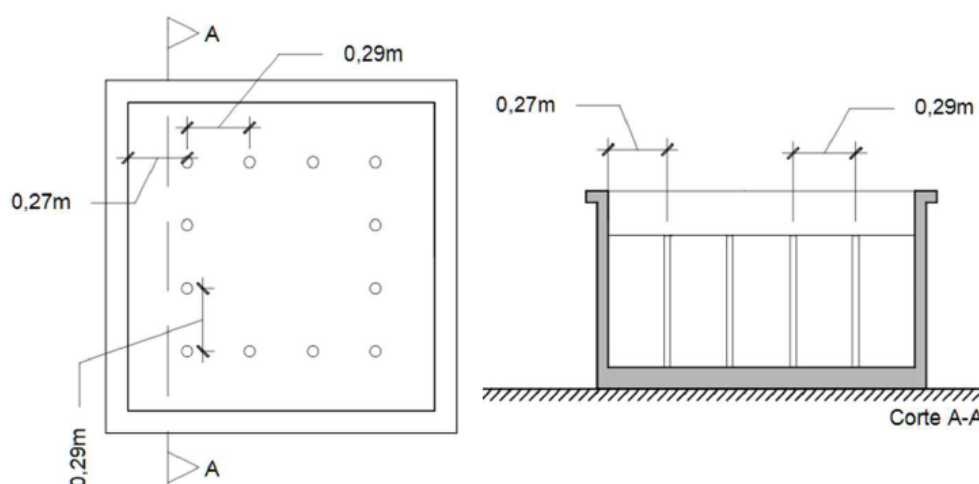


Figura 3.18 - Posição dos furos verticais realizados para acelerar inundação (Araujo, 2016).



Figura 3.19 - Material devidamente compactado e inundado (Autor).

Após drenagem da água, por um período de 24h, iniciou-se a preparação para o ensaio propriamente dito, com a montagem dos equipamentos na caixa. O esquema apresentado na Figura 3.20 mostra todos os aparelhos utilizados para realização do ensaio.

Uma placa metálica de 0,30m de diâmetro foi fixada no centro do solo aterrado, com objetivo de distribuir homogeneamente as cargas aplicadas no sistema para o solo, foi nivelada com auxílio de um nível de bolhas, para certificar seu posicionamento, uma fina camada de material granular foi posicionada sob a placa com objetivo de assentar melhor a peça. A escolha do tamanho da placa foi feita em função do tamanho do modelo reduzido, a fim de evitar o efeito de borda e adotando um bulbo de tensões de duas vezes o diâmetro da placa circular, no qual a placa com diâmetro de 0,30 m se adapta melhor as dimensões da caixa, além de simular a pegada de um pneu sobre o aterro.



Figura 3.20 - Elementos do ensaio: (a) Viga de madeira para referência. (b) Relógio comparador. (c) Base magnética do relógio. (d) Placa Metálica. (e) Macaco Hidráulico. (f) Célula de Carga. (g) Tarugos metálicos para conectar a célula ao pórtico de reação. (h) Pórtico de reação, fixado nas paredes da caixa.

Sobre a placa metálica, foi centralizado um macaco hidráulico, de acionamento manual, com alcance de até 0,2 m. Sobre o macaco hidráulico foi posicionada a célula de carga com capacidade de 500 kN. Um pórtico foi posicionado acima deste conjunto, fixado nas paredes da caixa metálica por meio de parafusos. A função do pórtico é fornecer uma reação a esse sistema de carregamento, transferindo o valor aplicado ao solo aterrado. Após a montagem dos aparelhos, foi necessário utilizar tarugos metálicos rígidos de forma a conectar o sistema macaco hidráulico + placa + célula de carga ao pórtico de reação. Após o início da aplicação da carga, os valores foram transferidos pela célula de carga a um computador, por meio de um sistema de aquisição de dados denominado *Spider*, de fabricação da HBM. Um software chamado *Catman*, em um computador, recebia os dados e os compilava em um único arquivo, mostrando a aplicação da carga ao longo do tempo.

Para complementar os dados de carga, foram obtidos dados do recalque do solo, estes conseguidos através de leituras em extensômetros com resolução de 0,01 mm e curso total de 50 mm. Os relógios estavam conectados ao macaco hidráulico por meio de bases magnéticas, e apoiados sobre vigas de referência. Para a execução do ensaio, dois operadores eram necessários, visto que um era responsável por controlar a aplicação da carga através do macaco hidráulico e outro por anotar as leituras de recalque.

De modo a se obter uma melhor leitura e comparação de dados, os procedimentos de execução de ensaio da prova de carga foram feitos de forma análoga à Araujo (2016). Quando se diz respeito às recomendações da norma, algumas adaptações foram necessárias, como por exemplo, a dimensão da placa utilizada foi menor, para as dimensões serem mais compatíveis com o tamanho da caixa. O estágio de carregamento não foi determinado a partir da diferença de leitura de recalques, como sugerido na norma, mas sim com um tempo fixo para cada estágio.

O ensaio foi do tipo rápido, seguindo uma proposição de Fellenius (ASTM D1143, 2007) para provas de carga estáticas em estacas. Para esse tipo de ensaio,

o importante é que cada estágio de carga tenha a mesma duração, independente do recalque obtido. Neste ensaio o intervalo de tempo para cada estágio foi de 15 min, com leituras nos extensômetros nos seguintes intervalos: 0 min, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min e 15 min, seguindo assim para o próximo estágio.

A norma sugere que o critério de parada seja 25 mm ou o dobro da tensão admissível prevista. A norma também sugere que o estágio de carregamento tem que ser realizados em tensões de, no máximo, 20% do valor de tensão admissível. Porém como os valores teóricos apontavam uma capacidade de carga bem menor do que as obtidas para o solo puro e a mistura de 5%, definiu-se que o ensaio seria feito utilizando estágios de 550 kPa, de forma análoga aos ensaios de solo puro e mistura com 5%, em 9 estágios de carregamento e 4 estágios de descarregamento equiespaçados para melhor compilação dos dados.

3.7.3.1 Estimativa da Capacidade de Carga

A estimativa da capacidade de carga foi determinada com base nos valores obtidos por meio da equação de Terzaghi, com a proposição de Vesic (Cintra *et al.*, 2011), expressa na Equação 3.2.

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

Para utilizar esta equação, são necessários os dados de intercepto de coesão “c” e ângulo de atrito do material, estes foram obtidos por Araujo (2016) através de ensaios de cisalhamento direto. “N_c”, “N_q” e “N_γ” são fatores de capacidade de carga, obtidos através do ângulo de atrito do material; “S_c”, “S_q” e “S_γ” são chamados fatores de forma, os quais são baseados apenas na forma da fundação. No caso deste trabalho foi considerado circular, visto o formato da placa metálica; “q” é o

valor de sobrecarga externa, que foi considerado igual a zero, visto que não foi considerado valor de sobrecarga externa; “B” é o diâmetro do elemento de fundação; “ γ ” é o valor de peso específico do solo.

Para esta formulação, é possível calcular a capacidade de carga tanto para a ruptura geral quanto para a local e por puncionamento. Enquanto no cálculo para ruptura geral são utilizados os resultados obtidos no ensaio de cisalhamento direto, para o resultado da capacidade de carga para ruptura por puncionamento é necessário fazer uma redução desses valores, alterando também assim os valores tabelados. Já para a ruptura local, usam-se valores médios entre os outros dois métodos de ângulo de atrito e intercepto de coesão.

Se considerar o artifício apresentado por Cintra *et al.* (2011), mostrado na Figura 3.21, com os dados obtidos no ensaio de cisalhamento, o solo sofreria uma ruptura geral, porém é citado no trabalho de Araujo (2016) que os ensaios de prova de carga em placa para o solo puro e para as misturas de 5% apresentaram ruptura por puncionamento, logo os dois métodos foram calculados, porém como também foi observado no trabalho supracitado, os resultados para puncionamento não representaria o comportamento do solo na prática.

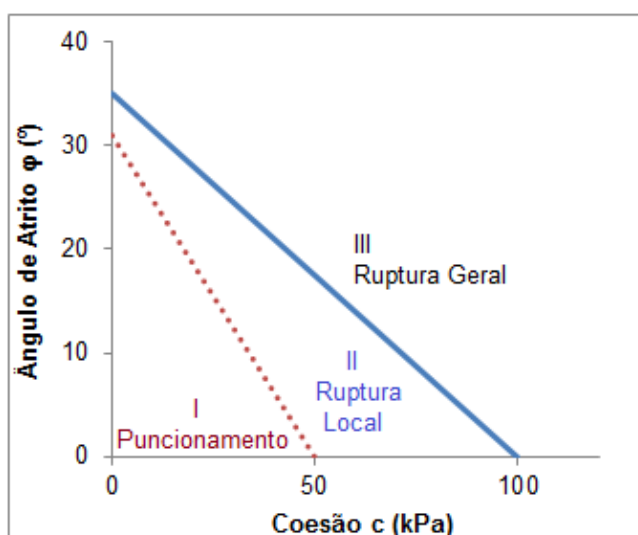


Figura 3.21 - Modos de ruptura para solos c - Φ (Adaptado de Cintra *et al.*, 2011).

Depois de calculado o valor de capacidade de carga, como sugere a norma NBR 6122, o valor de tensão admissível é obtido sobre um fator de segurança global igual a 3,0 quando não se tem informações prévias sobre o ensaio.

A partir disso, foram calculadas as capacidades de cargas teóricas do solo tanto para ruptura geral quanto por puncionamento, utilizando valores obtidos por Araujo (2016) em ensaios de cisalhamento direto. A Tabela 3.7 apresenta os parâmetros utilizados e valores calculados, considerando a não existência de sobrecarga ($q=0$).

Tipo de Ruptura	Solo + 10% de RPP	
	Geral	Puncionamento
Coesão (kPa)	4,5	3
Ângulo de Atrito (°)	37	26,68
N_c	55,63	23,94
S_c	1,77	1,55
N_y	66,19	14,47
S_y	0,6	0,6
B (m)	0,3	0,3
γ_{sat} (kN/m³)	21	21
σ_r (kPa)	568,19	138,77
σ_a (kPa)	189,4	46,26

Tabela 3.7 - Valores e Parâmetros utilizados no cálculo da capacidade de carga (Autor).

Quando os resultados são comparados aos valores obtidos pelo cálculo teórico de Araujo (2016) para a mistura de 5% também utilizando fator de segurança igual a 3, nota-se que o valor cai drasticamente, o qual a tensão admissível para 5% na ruptura geral calculada foi de 405 kPa e caiu para 189,4 kPa na mistura com 10%, representando uma queda de aproximadamente 55% do valor.

3.8 Avaliação de Atividade Pozolânica do Resíduo

Conforme estudado na literatura, a atividade pozolânica vem sendo amplamente verificada na utilização do RPP, principalmente em utilizações para produção de concreto. Contudo na área de mecânica dos solos ainda não foi comprovado o comportamento desse material em relação à atividade pozolânica. Araujo (2016) sugeriu que em alguns resultados seus, a ação da atividade pozolânica poderia estar afetando o comportamento do material. Logo este trabalho visa fazer uma avaliação preliminar do comportamento pozolânico do resíduo.

Como se é conhecido, a atividade pozolânica é o processo no qual substâncias constituídas de sílica (silicatos) e alumina (aluminatos), em presença de água, reagem formando silicatos de cálcio hidratados que possuem composição química muito variada e são representados genericamente por C-S-H. Estes compostos geram algumas ligações interpartículas, que resulta no endurecimento da pasta, no caso do concreto, onde é mais observada. Estudos apontam que essas reações de hidratações ocorrem algumas horas após o processo, diminuindo consideravelmente o ritmo com o tempo.

De modo que o resíduo utilizado nessa pesquisa é gerado a partir de uma massa cerâmica, composta por cimento, é natural que exista silicatos em sua composição, se tornando natural esse efeito na presença de água, fato que foi muito observado em trabalhos na literatura que utilizou o RPP em corpos de prova de concreto. O ensaio de FRX apresentado no item 3.3.4 mostra que o resíduo utilizado nessa pesquisa apresenta alto teor de sílica e certo teor de cálcio.

3.8.1 Ensaios de Índice de Suporte Califórnia

Para visualizar a ação da atividade pozolânica do resíduo nas misturas, foi necessário deixar a mistura solo + RPP em um período de secagem, para que o efeito pudesse ser alcançado. A mistura então foi compactada seguindo os

parâmetros de umidade ótima e massa específica seca máxima, e após a compactação do material nos moldes, alguns corpos de prova foram deixados em processo de secagem por dois dias e outros por dez dias. Após este processo, os ensaios seguiram de forma análoga aos anteriores.

Para os ensaios de 2 dias foram utilizados amostras com 5% de adição de RPP e 40% de adição, sendo esta última a que possivelmente teria maior potencial de se observar efeito da atividade pozolânica do resíduo. Para cada dosagem e condição de ensaio, o ensaio foi repetido três vezes de modo a obter um resultado mais representativo. O motivo pela escolha de apenas 2 misturas seria que esse é um estudo precursor, além do fato de serem ensaios mais demorados, levando em consideração o espaço de tempo limitado para execução da presente pesquisa.

Para os ensaios de 10 dias foi escolhido o valor que mais obteve alteração em 2 dias, a amostra com 40% de resíduo.

3.8.2 Adensamento Unidimensional

De forma análoga ao ensaio de Índice de Suporte Califórnia com espera, o ensaio de adensamento foi realizado da seguinte forma: após moldagem no anel dos corpos de prova, estes passaram por processo de secagem durante 2 dias antes de dar continuidade normal ao ensaio.

No caso do adensamento, os ensaios com espera foram realizados com 5% e 10% de adição de RPP, pela facilidade de comparação com, além dos ensaios de adensamento sem espera, os ensaios da prova de carga em placa.

3.9 Coleta e Análise de Extrato Solubilizado

Para o resíduo, foi realizada a coleta e análise química do extrato solubilizado, para analisar os aspectos prejudiciais de sua aplicação, seguindo

orientações das normas: NBR 10004 (ABNT, 2004) e NBR 10006 (ABNT, 2004). O ensaio consiste no extrato do material após sete dias, a temperatura de 25°, de 250g do resíduo com adição de 1 000 ml de água destilada.

O Anexo G da norma NBR 10004/2004 mostra os limites em mg/L das concentrações permitidas para um resíduo sólido.

A coleta do extrato foi realizado pelo laboratório de química ambiental do Centro de Tecnologias do Gás & Energias Renováveis.

4 Resultados e Discussões

4.1 Caracterização da Mistura 40%

A seguir serão apresentados dados da caracterização do solo com adição de 40% de resíduo de polimento de porcelanato, complementando os dados de caracterização das outras misturas, necessário para entender o comportamento das mesmas ao longo dos ensaios propostos.

4.1.1 Massa Específica dos Sólidos

O resultado do ensaio da determinação da Massa Específica dos Sólidos está apresentado na Tabela 4.1.

Material	Massa Específica dos Sólidos (g/cm ³)
Solo + 40% RPP	2,552

Tabela 4.1 - Resultado da Massa Específica dos Sólidos (Autor).

O resultado do ensaio mostra que o material segue a tendência apresentada por Araujo (2016), que mostra que a adição de resíduo ao solo gera uma propensão a diminuição da massa específica dos sólidos, mostrando que o resíduo é um material mais leve. O valor encontrado se apresenta inferior ao valor do solo + 20% de RPP (2,566 g/cm³) e superior ao do resíduo puro (2,538 g/cm³).

4.1.2 Granulometria Conjunta

A Figura 4.1 apresenta a curva granulométrica da mistura de 40%, juntamente com as curvas do solo puro e resíduo de polimento de porcelanato realizadas por Araujo (2016).

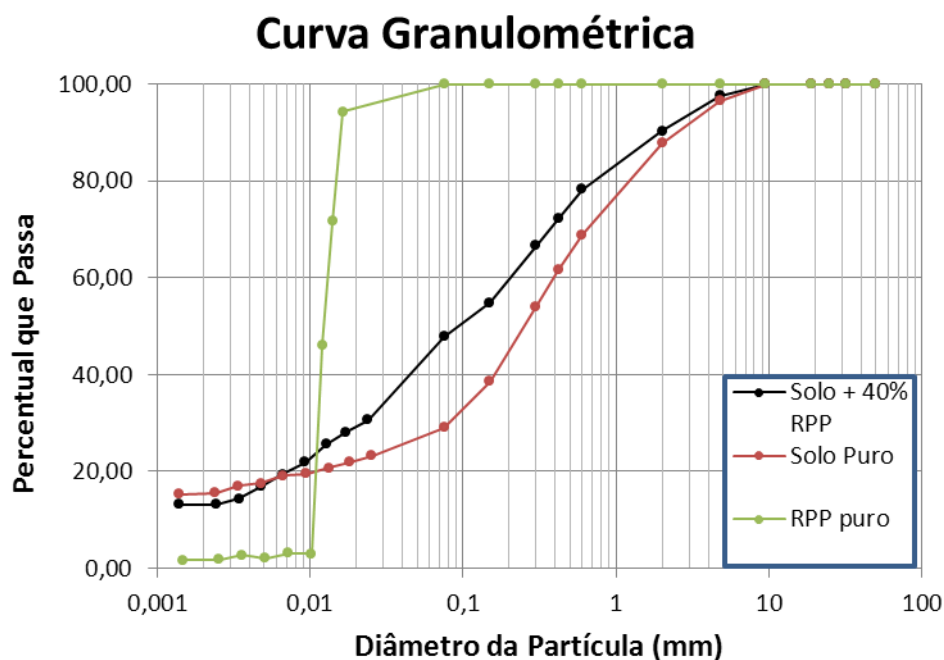


Figura 4.1 - Curvas Granulométricas do Solo Puro, Resíduo Puro e Solo com adição de 40% de resíduo (Autor).

Como se pode observar, a mistura assume uma curva intermediária em relação aos materiais puros, sendo mais próximo do solo puro, que se mostrou mais influente no comportamento da mistura. A grande presença de material de diâmetro equivalente ao silte faz com que a curva da mistura de 40% se desloque um pouco para a esquerda, quando comparada à curva do solo puro.

Mesmo assim, a mistura é classificada pelo SUCS como SC, ou areia argilosa, assim como o solo puro.

4.1.3 Limites de Atterberg

A Tabela 4.2 apresenta os valores médios de Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e Índice de Plasticidade para as amostras com 40% de adição de RPP, obtidos a partir de 3 amostras diferentes.

Material	Média LL (%)	Média LP (%)	IP (%)
Solo +40% RPP	25,2	17,6	8,6

Tabela 4.2 - Resultados dos ensaios de Limites de Atterberg (Autor).

Pelo ensaio obtido, é visto que o material se classificaria como medianamente plástico pelo seu valor de IP. Apesar de o material ser considerado medianamente plástico, houve certa dificuldade na moldagem do material para os ensaios, visto que sua alta quantidade de resíduo fazia com que ao entrar em contato com água, formasse torrões que atrapalhavam a execução.

Comparando os resultados obtidos com as outras misturas realizadas por Araujo (2016), apresentados no item 3.3.3, se observa que não existe um padrão claro no comportamento do solo com adição do resíduo, com os resultados apresentando grandes variações e se tornando inconclusivos na classificação dos materiais quanto aos Limites de Atterberg. Salienta-se que para esses ensaios, erros de operação do ensaio são muito comuns, e quando são realizadas por operadores diferentes, essas chances tendem a aumentar.

O valor médio de LL se apresentou maior do que todas as outras misturas, sendo inferior apenas ao valor do solo puro e do resíduo puro, já o valor médio do LP se mostrou um valor intermediário aos obtidos para outras misturas e materiais puros. Com os dados de IP e conhecendo a fração de finos da mistura pode-se

calcular o valor do Índice de atividade da argila presente. O IA obtido equivale a 0,61, estando dentro da faixa de argila inativa em relação ao solo.

4.2 Ensaios de Compactação

As curvas de compactação realizadas com o solo puro e as misturas na energia proctor normal estão apresentadas na Figura 4.2. Os valores de massa específica aparente seca máxima e umidade ótima, obtidos a partir do ensaio, são mostrados na Tabela 4.3.

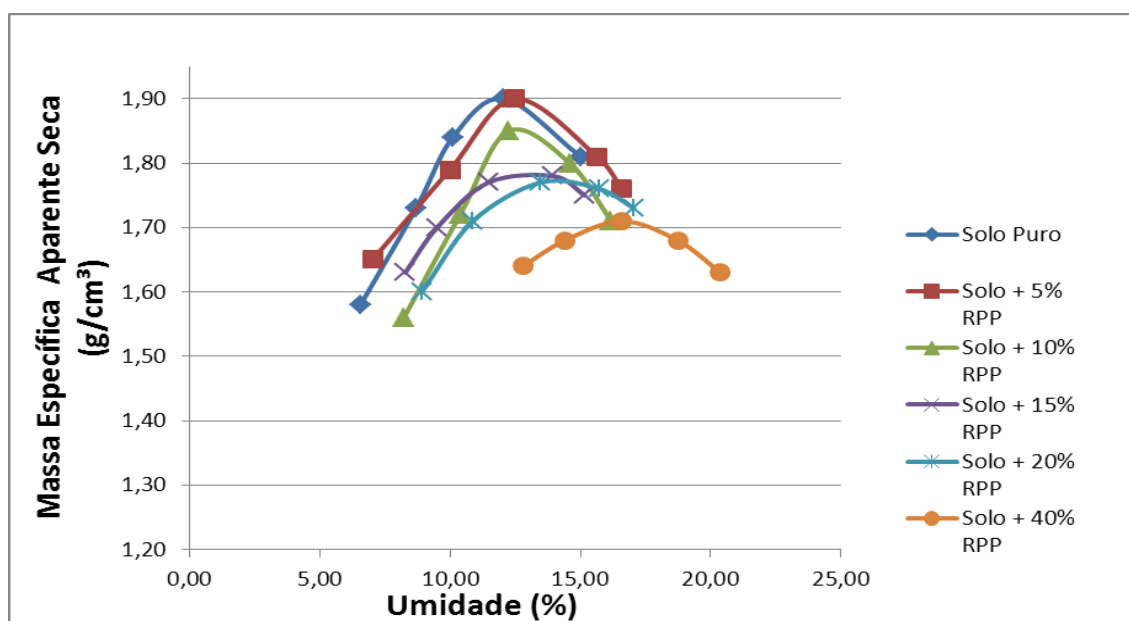


Figura 4.2 - Curvas de Compactação do solo e misturas (Autor).

	Solo puro	Mistura 5%	Mistura 10%	Mistura 15%	Mistura 20%	Mistura 40%
$\rho_{\text{dmáx}} (\text{g/cm}^3)$	1,90	1,90	1,86	1,78	1,77	1,71
$W_{\text{ót}} (\%)$	11,95	12,45	12,60	13,40	14,56	16,60

Tabela 4.3 - Resumo de valores do ensaio de compactação (Autor).

O gráfico mostra que quanto maior a adição de resíduo, maior será o valor de umidade ótima e menor sua massa específica seca máxima, além da curva se tornar mais abatida quanto mais a direita. O valor de massa específica seca da Mistura com 5% apresentou o mesmo valor da do solo puro, mostrando que a adição do resíduo não apresentou tanta influência no comportamento do solo. A partir da mistura de 15% se podem observar diferenças mais significativas quando comparadas ao solo puro. Com o fato da curva de compactação ir se tornando mais suave quanto mais a direita, com isso pode-se admitir que este fator auxilia no controle de compactação do material, já que a massa específica máxima varia menos para diferentes umidades. Quando comparados com os resultados obtidos por Araujo e Costa (2015), o comportamento das curvas se assemelham bastante, com exceção dos valores de massa específica seca máxima, que no caso dos referidos autores, o valor de massa específica seca máxima obtida para a mistura de 10% foram superiores ao solo puro, essa diferença provavelmente se deu pela diferença de solos nos dois trabalhos, já que no trabalho supracitado teria uma granulometria menos argilosa, sendo complementada pela adição do resíduo. Os valores de compactação obtidos por Araujo (2016) apresentam valores de umidade ótima ligeiramente menores e massa específica seca um pouco maiores, apesar de seguir a mesma tendência.

A Figura 4.3 mostra o comportamento da umidade ótima e da massa específica seca máxima com a adição do teor de resíduo. A partir dos pontos foi possível traçar uma linha de tendência com regressão linear para melhor visualização desse comportamento.

Nesses gráficos é possível observar que tanto para umidade ótima quanto para massa específica, a adição de resíduo faz com que a mistura se comporte de uma forma praticamente linear, mostrando um desempenho definido com a adição de RPP, apesar do resíduo não ter um comportamento característico de um solo.

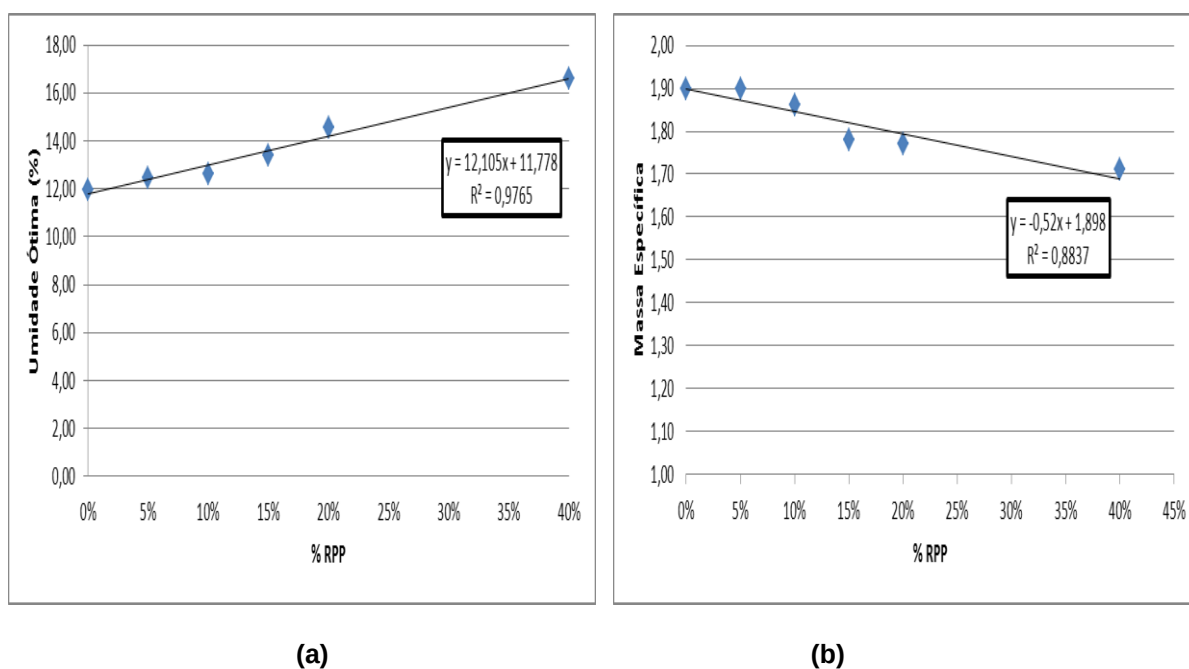


Figura 4.3 - Linhas de tendência para umidade ótima (a) e massa específica seca máxima (b) x porcentagem de resíduo (Autor).

4.3 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia

4.3.1 Energia Normal

Neste tópico são apresentados os resultados para o ensaio de índice de Suporte Califórnia, realizados com o solo puro, e as misturas de 5%, 10%, 15%, 20% e 40%. Todos os corpos de prova preparados para os ensaios de compactação foram inundados de modo a obter a curva de ISC e os valores de expansão para os mesmos. Para avaliar a variabilidade dos resultados, foram feitos três pontos de ISC apenas na umidade ótima e massa específica seca máxima de cada mistura e do solo.

A Figura 4.4 mostra as curvas obtidas com os resultados de expansão a partir dos ensaios de compactação e a Figura 4.5 mostra os valores médios para umidade ótima e massa específica seca máxima, para cada porcentagem de resíduo.

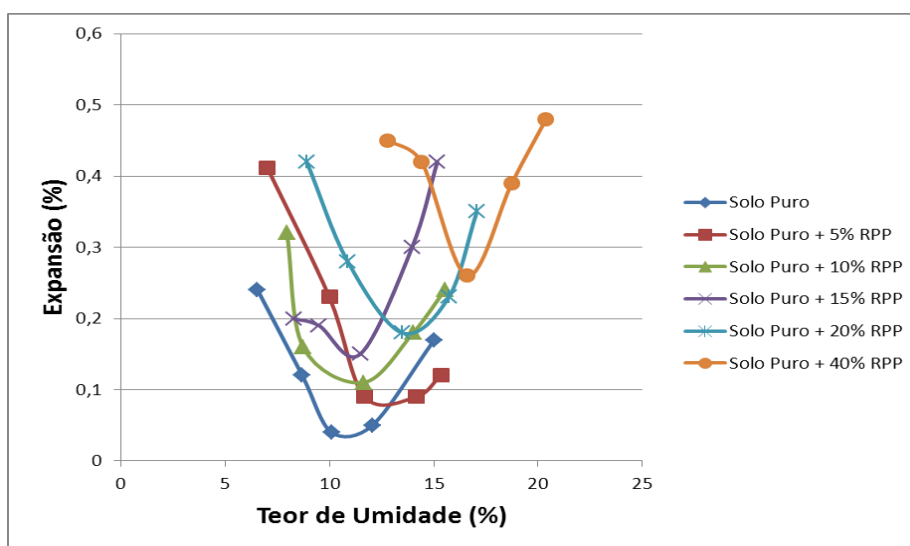


Figura 4.4 - Curvas de Expansão (Autor).

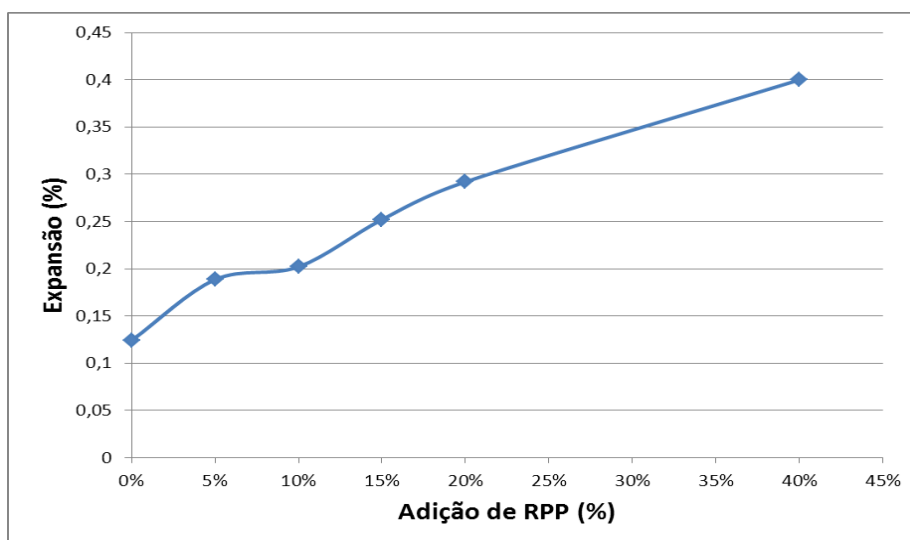


Figura 4.5 - Comportamento médio da expansão com material preparado na umidade ótima e massa específica seca máxima (Autor).

O potencial de expansão do solo está atrelado principalmente ao arranjo estrutural de seus argilominerais, nos quais grupos como os das esmectitas apresentam expansividade maior que os outros. Argilas expansivas são extremamente imprevisíveis e devem ser evitadas ao máximo para utilização em obras de pavimentação. Nos gráficos obtidos, observa-se que para todas as curvas,

o ponto para umidade ótima corresponde ao menor valor de expansão para cada caso. É notável ainda uma tendência de aumento de expansão à medida que há um acréscimo no valor de resíduo na mistura, apontando que o resíduo seja um material mais expansivo que o solo. O valor de expansão de 0,12% no solo puro passou para 0,40% na mistura com 40% de resíduo.

Ao comparar os resultados obtidos de expansão em presença de água obtidos com os valores limites sugeridos pelo Manual de Pavimentação do DNIT (2006), permite-se observar que nem o solo nem as misturas são materiais muito expansivos. Todos estão aptos a serem utilizados em qualquer camada do pavimento se considerar apenas os limites de expansão. A norma sugere que materiais para base tenham valor de expansão menor que 0,5%, já para as outras camadas o valor deve ser inferior a 1%.

A Figura 4.6 apresenta as curvas dos ensaios ISC realizados após o ensaio de compactação inicial.

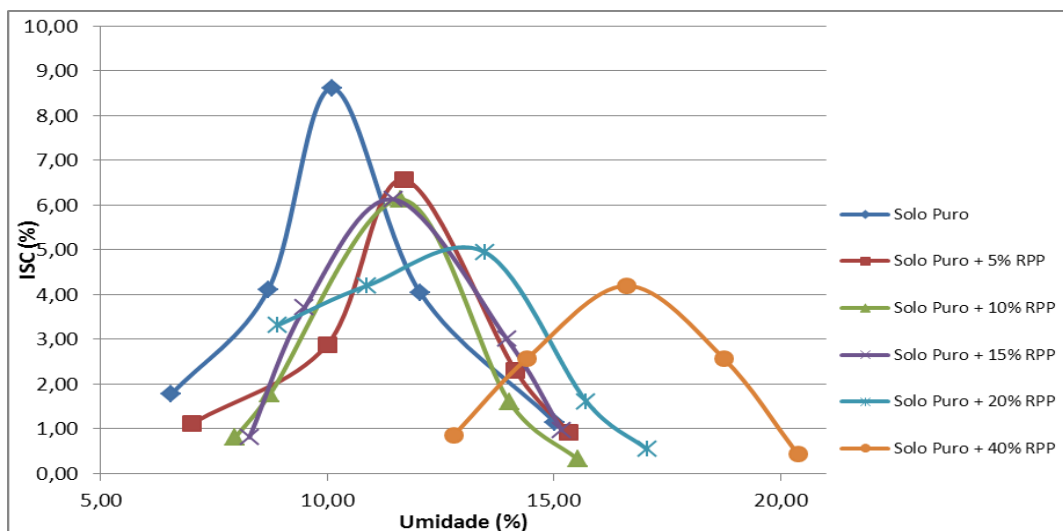


Figura 4.6 - Curvas de ISC para energia proctor normal (Autor).

Teoricamente, as curvas de ISC deveriam seguir o mesmo formato da curva de compactação, visto que quanto mais próximo da umidade ótima, maior deveria ser o valor de ISC do material. O que se observa nesse ensaio é que as curvas se

assemelham às curvas de compactação, com um pico acentuado nos valores mais próximos à umidade ótima.

A Tabela 4.4 resume os resultados obtidos em todos os pontos de Índice de Suporte Califórnia realizados nos ensaios com energia proctor normal, considerando valores próximos aos da umidade ótima e da massa específica seca máxima, utilizando amostras cujos valores destoavam em até 0,5% da umidade ótima e 0,02 g/cm³ da massa específica.

Mistura	Umidade Ótima (%)	Peso Específico (g/cm ³)	Valor de ISC (%)			
			CP1	CP2	CP3	ISC _{medio} (%)
0%	11,95	1,9	8,61	7,51	8,06	8,06
5%	12,45	1,9	6,25	9,04	6,57	7,29
10%	12,6	1,86	5,81	6,13	8,61	6,85
15%	13,4	1,78	6,13	5,27	8,61	6,67
20%	14,56	1,77	8,61	4,95	4,84	6,13
40%	16,6	1,71	4,2	4,95	6,57	5,24

*CP - Corpo de Prova

Tabela 4.4 - Quadro de valores para ISC na unidade proctor normal (Autor).

Observando os resultados, nota-se que os valores de ISC médios tendem a diminuir um pouco à medida que se aumenta a quantidade de resíduo presente na mistura, apesar de alguns pontos nas misturas apresentarem valores superiores à média do solo puro, por exemplo. Essa variabilidade na utilização do resíduo também foi observada por Araujo (2016), e pode ser justificada pela dificuldade de trabalhabilidade do material, sua aptidão em formar torrões na presença de água acaba dificultando processos do ensaio, como por exemplo, a homogeneização do material antes da execução da compactação.

Analisando os resultados em si e o que eles representam para aplicabilidade do material em pavimentação, nota-se que os resultados variam entre

aproximadamente 8% para o solo puro e 5% para a mistura de 40%. Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), recomenda-se para material de base um ISC maior que 60% e para sub-base um material com ISC superior a 20%. Os valores encontrados nesses ensaios viabilizam a utilização dos materiais para reforço do subleito, desde que o valor seja superior ao ISC do mesmo e para o próprio subleito, caso seja superior a 2%. Vale ressaltar que essa análise vale apenas para quando o solo e as misturas forem utilizados na energia normal.

A Figura 4.7 mostra um gráfico de dispersão com todos os pontos utilizados no ensaio. A Figura 4.8 mostra os valores médios para estes pontos, na qual foi obtida uma linha de tendência por meio de regressão linear cuja equação está representada na figura, juntamente com o coeficiente de determinação (R^2).

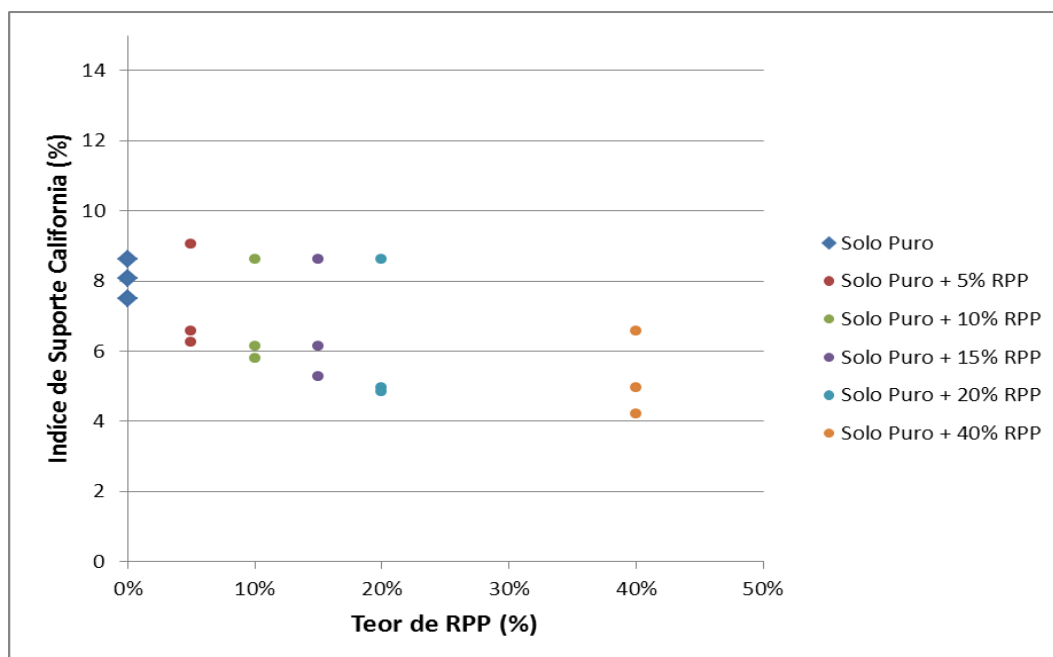


Figura 4.7 – ISC versus teor de RPP para todos os ensaios realizados na energia proctor normal (Autor).

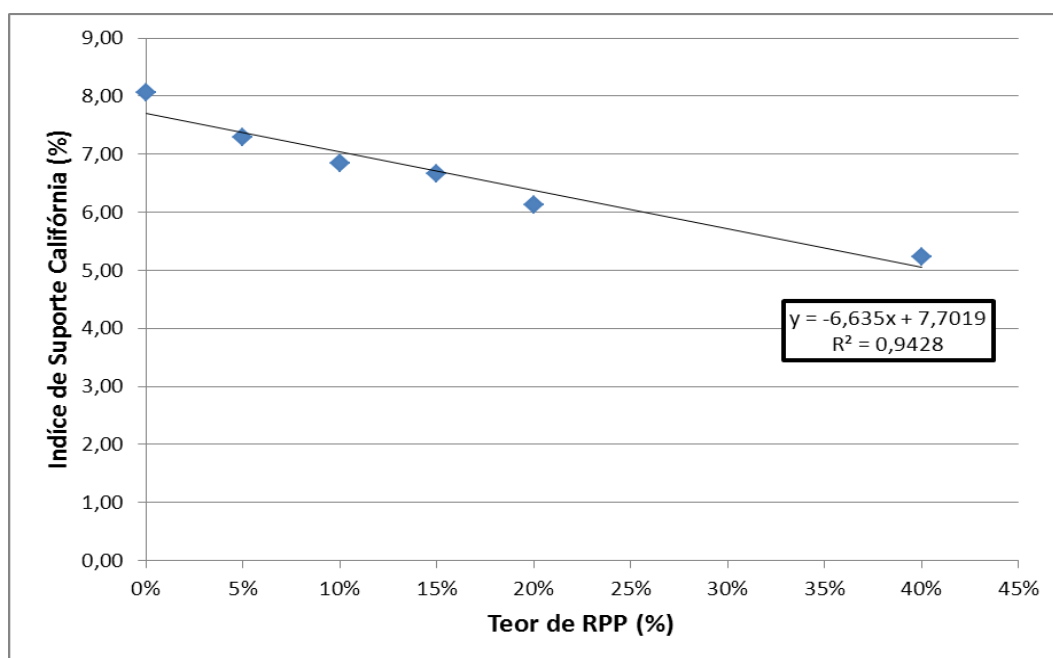


Figura 4.8 - Linha de Tendência para valores médios (Autor).

Na Figura 4.7 é possível observar a existência de variabilidade dos resultados que é maior para as misturas do que no caso do solo puro. A necessidade de consideração da variabilidade do resíduo nos resultados de ensaios com misturas de solo e RPP já havia sido identificada por Araújo (2016). Embora tenha sido encontrado um maior valor de resistência para um dos corpos de prova da mistura de 5%, percebe-se uma tendência de diminuição do valor de ISC com o aumento do teor de resíduo. Esse aspecto pode ser compreendido com maior clareza mediante observação da Figura 4.8.

No caso de adição de 20% de resíduo, o material apresentou 80% da resistência do solo puro (perda de 20% de resistência). Para 40% de resíduo, a mistura mostrou uma resistência aproximadamente igual a 60% da resistência do solo puro (perda de 40%). Ou seja, em termos de valores médios, o valor do teor de resíduo corresponde à expectativa de diminuição da resistência do material em relação ao solo puro. Apesar da diminuição, os valores obtidos não apresentam diferenças muito significativas nos valores de ISC do ponto de vista prático.

Considerando o aspecto do benefício ambiental de reutilização do resíduo, todas as misturas poderiam substituir o solo puro em aterros rodoviários, já que apresentaram ISC superior a 2% e baixa expansão. As misturas com teores mais baixos de resíduo (5% e 10%) apresentam ainda maior possibilidade de utilização como reforço de subleito. Essa afirmação baseia-se no fato da menor redução de resistência das misturas 5% e 10% e do comportamento mostrado por essas misturas nos ensaios de compactação (que apresentaram alterações menos significativas em relação ao comportamento do solo).

4.3.2 Energia Modificada

As curvas de compactação referentes aos ensaios realizados com a energia modificada, obtidas para o solo puro e as misturas de 5%, 10% e 40% estão apresentadas na Figura 4.9. Os valores de massa específica seca máxima e umidade ótima estão indicados na Tabela 4.5 a seguir.

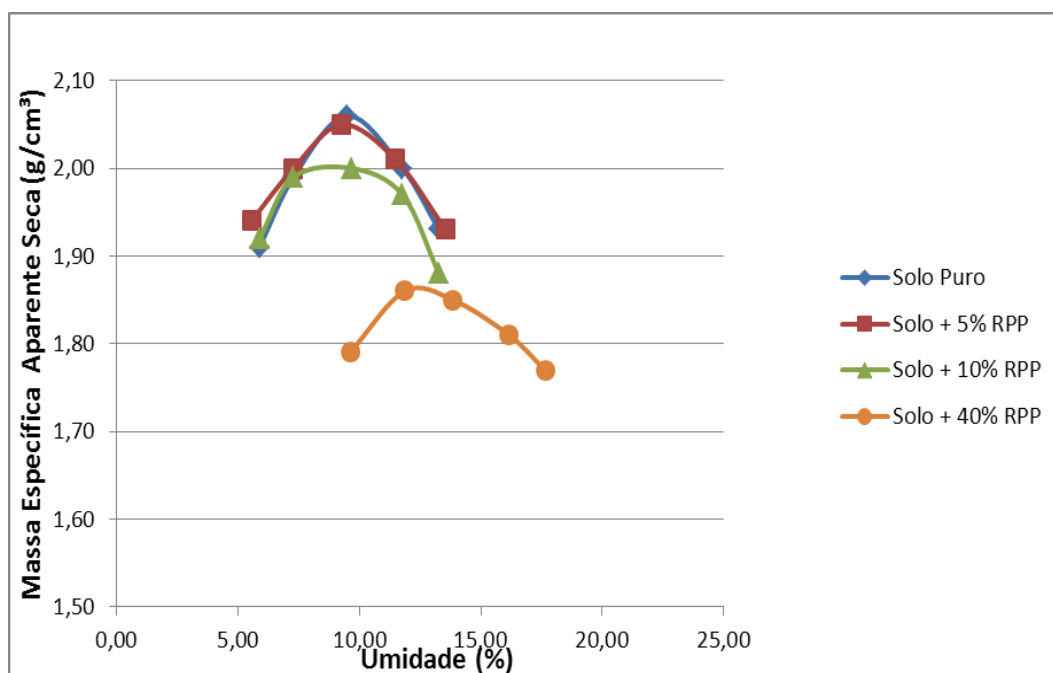


Figura 4.9 - Curvas de Compactação para energia modificada (Autor).

	Solo puro	Mistura 5%	Mistura 10%	Mistura 40%
$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	2,06	2,05	2,01	1,86
$W_{\acute{o}t}$ (%)	9,05	9,25	9,6	12,45

Tabela 4.5 - Resumo de resultados para compactação na energia modificada (Autor).

Os resultados obtidos seguem o mesmo padrão observado na energia normal, apenas com valores de umidade ótima menores e massa específica seca máxima maiores. Os dados obtidos foram necessários para realizar os ensaios de Índice de Suporte Califórnia na energia modificada, cujos resultados estão expressos na Tabela 4.6.

	Valor de ISC (%)			
Mistura	CP 1	CP 2	CP 3	ISCmedio (%)
0%	22,17	20,13	21,15	21,15
5%	22,12	21,15	19,86	21,04
10%	18,3	20,88	19,05	19,41
40%	13,99	16,14	13,88	14,67

Tabela 4.6 - Resumo de resultados dos ensaios ISC (Autor).

Como esperado, os valores obtidos foram maiores com o aumento de energia. É possível observar que segundo as recomendações do DNIT (2006), o solo puro pode, por uma pequena margem ser utilizado como material de sub-base, caso seja compactado na energia modificada, assim como a mistura de 5% que possui um valor médio praticamente igual ao solo puro, porém ainda superior aos 20% sugerido pelo DNIT. O fato de o solo possuir um valor médio de ISC ligeiramente superior ao recomendado para sub-base faz com que a mistura de 10%

mesmo não possuindo uma queda considerável no valor (0,92 do ISCmedio do solo puro) não atinja o valor mínimo de 20%, o que pode levar a conclusão que caso o solo possuísse um valor significativamente superior a esta margem, as misturas também seriam viáveis para tal uso. A mistura com maior teor de resíduo apresenta um valor significativamente menor, seguindo a tendência observada nos ensaios com energia proctor normal.

A Figura 4.10 apresenta os valores obtidos para as misturas em função do resultado médio de ISC para o solo puro, para as duas condições de energia, assim conhecendo um comportamento referente à adição de resíduo de polimento de porcelanato até a porcentagem de 40% nas duas energias. É possível observar que houve uma redução de cerca de 35% do valor de ISC para a mistura de 40% em ambos os casos (energias normal e modificada). A Tabela 4.7 mostra os valores que representam a linha de tendência gerada a partir regressão linear dos pontos obtidos na figura.

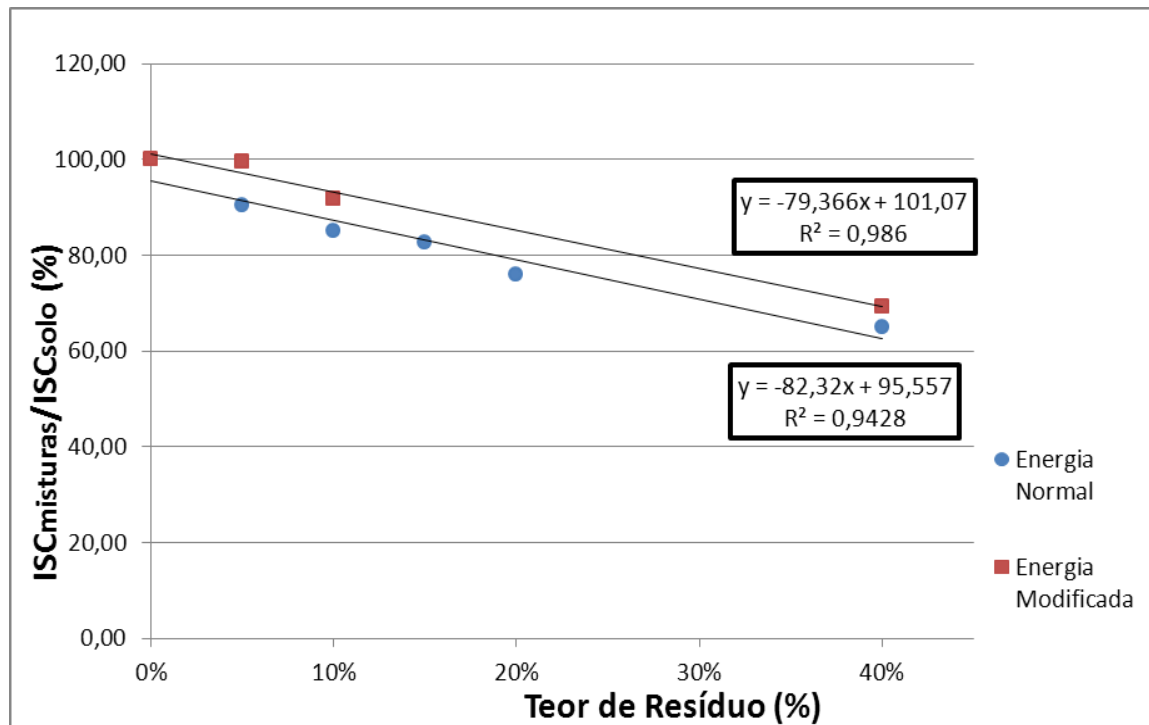


Figura 4.10 - Valores de ISCmisturas/ISCsolo (Autor).

Parâmetros obtidos nos ajustes lineares Energia Normal Energia Modificada		
Coefficiente Angular	-79.366	-82,32
Coefficiente Linear	101,07	95,557
Coefficiente de Determinação (R²)	0,986	0,9428

Tabela 4.7 - Parâmetros das retas obtidas por uma linha de tendência (Autor).

Ao analisar os resultados, é possível afirmar que embora os valores de ISC sejam maiores para a maior energia, o comportamento dos resultados tanto dos ensaios na energia normal quanto na modificada seguem tendências semelhantes com relação ao decréscimo da resistência com o aumento do teor de resíduo. As linhas de tendência para valores da energia normal e modificada apresentam um coeficiente linear com o sinal negativo mostrando que as retas sofrem decréscimo. Os valores de coeficientes de determinação (R^2) para as linhas de tendências são superiores a 0,9 em ambas, com um valor brevemente inferior na linha de tendência com valores na energia normal, que pode ser explicado pelo fato de por serem valores menores, sua variação tende a ser mais expressiva. De modo geral, a Figura 4.10 permite prever o comportamento de uma mistura com determinado teor de resíduo para este solo.

4.4 Ensaio de Adensamento Unidimensional

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos no ensaio de Adensamento Unidimensional para o solo puro e as misturas de 5%, 10%, 20% e 40%, na condição saturada.

A Tabela 4.8 apresenta os valores de umidade ótima e massa específica seca máxima na moldagem dos corpos de prova.

	Material	Amostras			
		CP1	CP2	CP3	Média
Solo	γ_d (g/cm ³)	1,91	1,9	1,88	1,90
	$w_{ót}$ (%)	11,88	11,77	12,01	11,89
5%	γ_d (g/cm ³)	1,91	1,91	1,89	1,90
	$w_{ót}$ (%)	12,15	12,2	12,33	12,23
10%	γ_d (g/cm ³)	1,88	1,87	1,86	1,87
	$w_{ót}$ (%)	12,76	12,66	12,44	12,62
20%	γ_d (g/cm ³)	1,8	1,78	1,77	1,78
	$w_{ót}$ (%)	14,09	14,27	15,01	14,46
40%	γ_d (g/cm ³)	1,7	1,71	1,71	1,71
	$w_{ót}$ (%)	16,91	16,77	16,53	16,74

Tabela 4.8 - Dados obtidos na moldagem dos corpos de prova (Autor).

A Figura 4.11 apresenta uma compilação dos gráficos de deformação específica em função do logaritmo da tensão aplicada das amostras estudadas (valores médios).

Ao se analisar o resultado, nota-se que há uma tendência do material se deformar mais para os mesmos valores de tensão com o acréscimo de teor de resíduo em sua composição, com exceção para a mistura de 5%, que apresentou um comportamento menos compressível que o solo puro, o que pode sugerir que a para este solo, a adição de 5% do resíduo, cuja granulometria apresenta um material quase em sua totalidade presente na faixa correspondente a um silte, seja o teor ideal para transformar a mistura em um material melhor graduado. A adição de teores superiores a esse pode tornar a porcentagem de finos do material elevada, já que o próprio solo é considerado um material areno-argiloso, com cerca de 23% de material fino, prejudicando suas propriedades mecânicas. Todos os ensaios foram realizados até o estágio de carga de 640 kPa, o que é considerado um valor elevado na prática para solos para aterros rodoviários. Para esta tensão, a mistura de 5% apresentou uma deformação específica de 4,45%; já o solo puro apresentou uma deformação superior, de 5,2%; enquanto a mistura de 40% que foi a com maior teor de resíduo apresentou uma deformação à tensão de 640 kPa de 9,6%. As misturas

de 10% e 20% apontaram valores intermediários ao do solo puro e a mistura de 40%.

A Figura 4.12 retrata os gráficos de índice de vazios em função do logaritmo da tensão aplicada, obtidos a partir do ensaio de adensamento. A Tabela 4.9 apresenta valores obtidos a partir do gráfico mostrado na Figura 4.12.

	Solo puro	Mistura 5%	Mistura 10%	Mistura 20%	Mistura 40%
Índice de Compressão (Cc)	0,05	0,047	0,057	0,09	0,113
Índice de Recompressão (Cr)	0,007	0,013	0,007	0,02	0,023

Tabela 4.9 - Dados obtidos a partir do ensaio de adensamento (Autor).

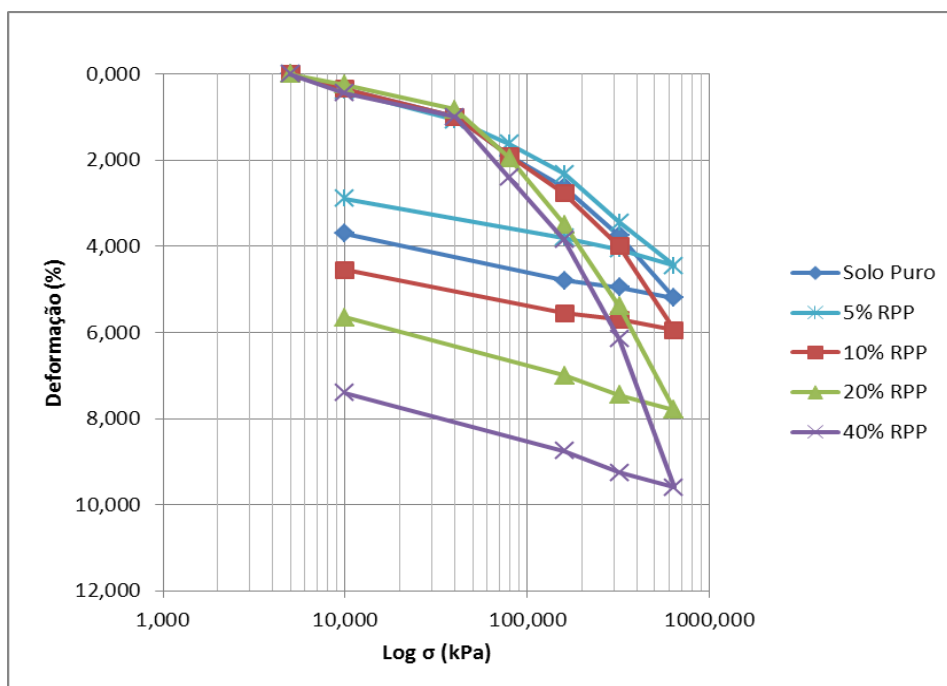


Figura 4.11 - Curvas Deformação *versus* logaritmo da tensão aplicada(Autor).

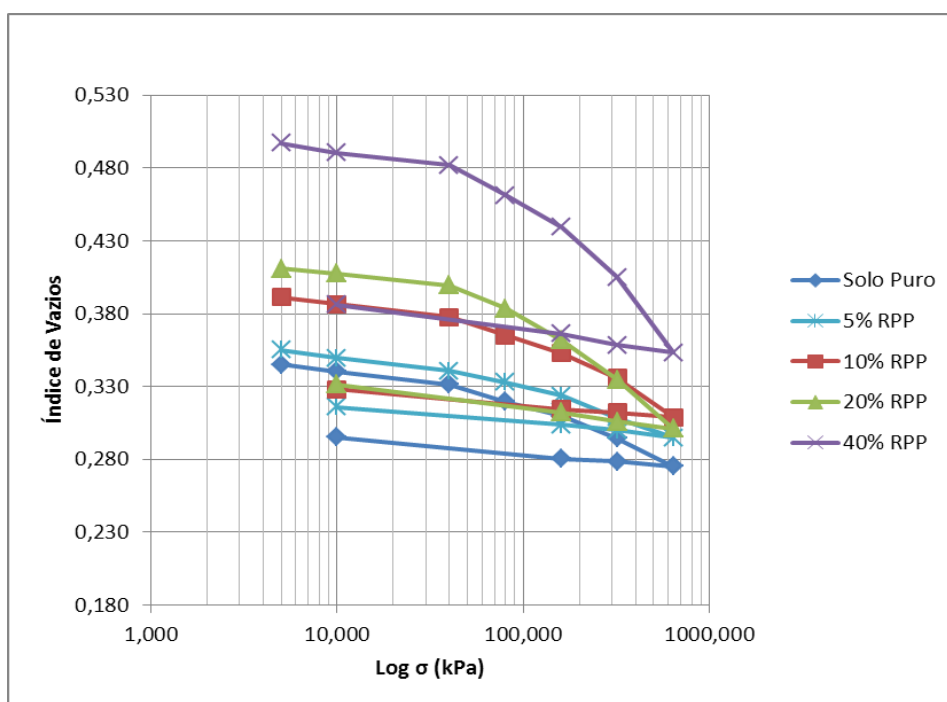


Figura 4.12 - Curvas Índice de Vazios *versus* logaritmo da tensão aplicada (Autor).

O índice de compressão indicado na Tabela 4.8 representa a relação entre a variação do índice de vazios de dois pontos da reta virgem da curva e a variação do logaritmo de duas pressões correspondentes aos mesmos pontos. O menor valor obtido foi para a mistura de 5%, que obteve um valor muito próximo ao solo puro, o que implica afirmar que sua curva é menos íngreme que as demais, na qual seu índice de vazios altera menos para uma determinada variação de tensão que as outras misturas. Já o coeficiente de recompressão é calculado de forma análoga entre dois pontos da parte de recompressão da curva e seu valor está relacionado com o comportamento da mistura no descarregamento.

Em busca de analisar a influência do resíduo na estabilização dos recalques ao longo do tempo, a Figura 4.13 e Figura 4.14 mostram a relação entre deformação específica, dada em porcentagem, e a raiz do tempo em dois estágios de cargas intermediários (40 kPa e 320 kPa, respectivamente).

Pode-se observar que em ambos os estágios o comportamento das misturas é influenciado pelo comportamento do próprio solo, em que suas curvas se

assemelham a do mesmo, indicando que o resíduo não gera uma influência significativa na estabilização dos recalques ao longo do tempo.

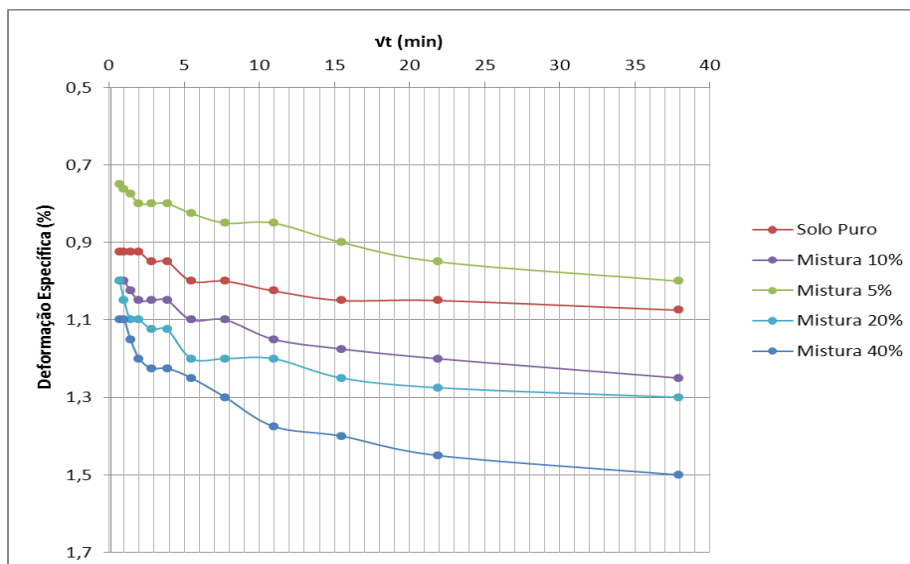


Figura 4.13 - Relação de deformação específica ao longo do tempo para o estágio de 40 kPa (Autor).

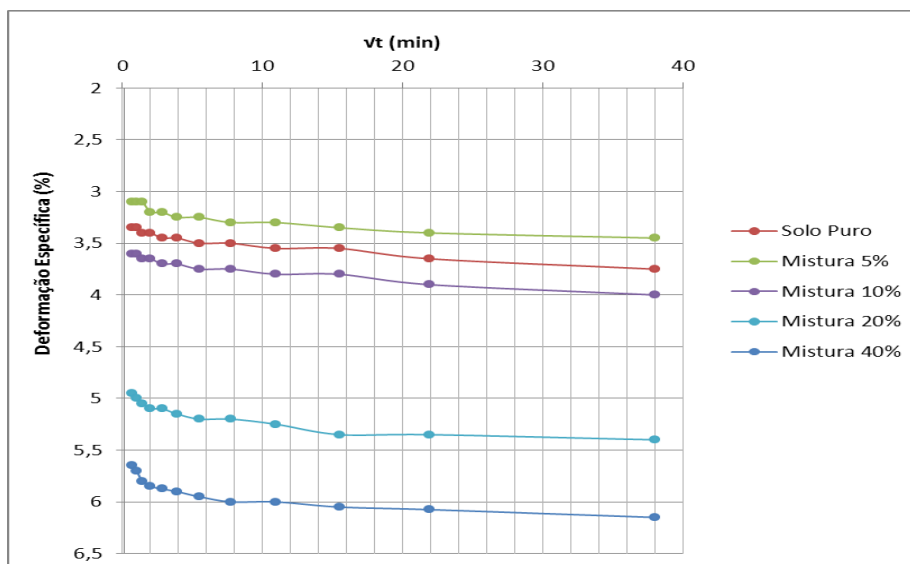


Figura 4.14 - Relação de deformação específica ao longo do tempo para o estágio de 320 kPa (Autor).

4.5 Prova de Carga em Placa

A Tabela 4.10 apresenta as porcentagens obtidas através do controle de compactação da densidade *in situ* das camadas na execução da prova de carga.

Solo + 10 % RPP				
	1 (%)	2 (%)	3 (%)	Média
Camada 1	95,74	95,12	95,13	95,33
Camada 2	96,56	95,97	98,02	96,85
Camada 3	95,44	94,97	96,31	95,57
Camada 4	96,88	98,65	95,16	96,90
Camada 5	99,45	96,61	96,02	97,36
Camada 6	97,44	98,38	97,78	97,87

Tabela 4.10 – Grau de compactação das camadas (Autor).

De modo geral, se pode dizer que o grau de compactação foi razoável, no qual todas as camadas apresentaram grau de compactação superior a 95%, mínimo requerido para aterros.

Ao ser executado o ensaio, foi observado que o solo apresentou uma ruptura por puncionamento, caracterizada por deslocamentos significativos da base para baixo, mantendo seu prumo, evidenciando uma ruptura por puncionamento. A Figura 4.15 mostra o estado do aterro após o ensaio, pode-se observar, junto às bordas, a tendência do solo de acompanhar o recalque da placa.



Figura 4.15 - Ruptura do Solo (Autor).

A Figura 4.16 mostra o resultado da prova de carga em placa para a mistura com adição de 10% de resíduo de polimento de porcelanato.

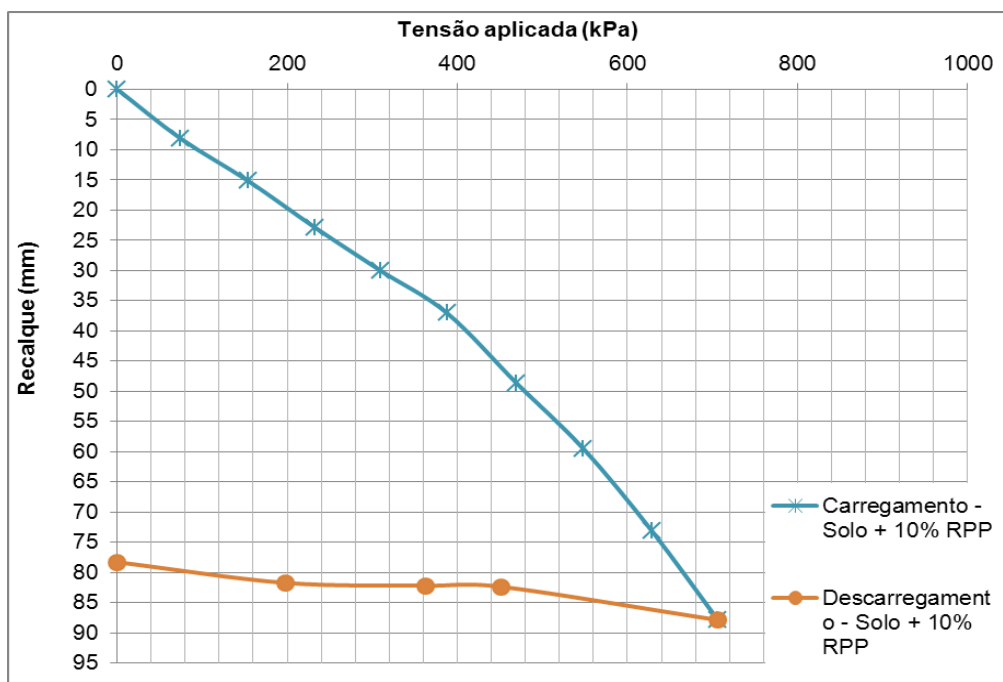


Figura 4.16 - Curva tensão x recalque obtida através do ensaio de prova de carga em placa para a mistura de 10% (Autor).

Ao se obter a curva, alguns critérios de determinação da tensão admissível foram adotados. O primeiro critério é o de o final da curva se transformar numa reta (Terzaghi, 1943 *apud* Cintra *et al.*, 2011), no qual o ponto de início desta reta seria a tensão de ruptura, e a tensão admissível metade deste valor. O segundo critério analisado foi o de Boston, que determina que a tensão admissível seja a menor entre dois valores: a tensão tal que ocorra um recalque de 10mm ou a metade da tensão tal que ocorra um recalque de 25mm. A Tabela 4.11 apresenta um comparativo das tensões admissíveis obtidas pelo método teórico e obtidos pelos critérios após obtenção das curvas, em comparação com os resultados obtidos por Araujo (2016) para ensaios com o solo puro e mistura com 5% de adição de RPP.

	Tensão admissível (kPa)			
	Teórico - Ruptura Geral (Eq. 3.2)	Teórico - Ruptura Puncionamento	Boston	Terzaghi (1943)
Solo Puro	360	92,07	160	310
Mistura 5%	405	105,49	230	330
Mistura 10%	189,4	46,25	100	260

Tabela 4.11 - Valores obtidos para tensão admissível (Autor).

Adotando o menor valor, a tensão admissível para a mistura de 10% seria 100 kPa, valor obtido pelo critério de Boston. Este valor mostra que se for considerado o cálculo teórico para ruptura geral, o valor obtido seria superestimado. Por outro lado, se considerarmos a tensão admissível teórica obtida considerando uma ruptura por puncionamento, temos um valor subestimado, de apenas 46,25 kPa.

Quando comparado aos resultados obtidos por Araujo (2016), se observa que os dados do cisalhamento direto foram coerentes, já que o resultado da prova de carga acompanhou, mesmo que em escalas diferentes, os resultados obtidos a partir do cálculo teórico, mostrando que por mais que um método seja mais conservador

que outro, a mistura de 5% sempre apresenta valores superiores ao solo puro e a mistura de 10%, respectivamente.

A Figura 4.17 apresenta as curvas de tensão *versus* recalque para as três situações.

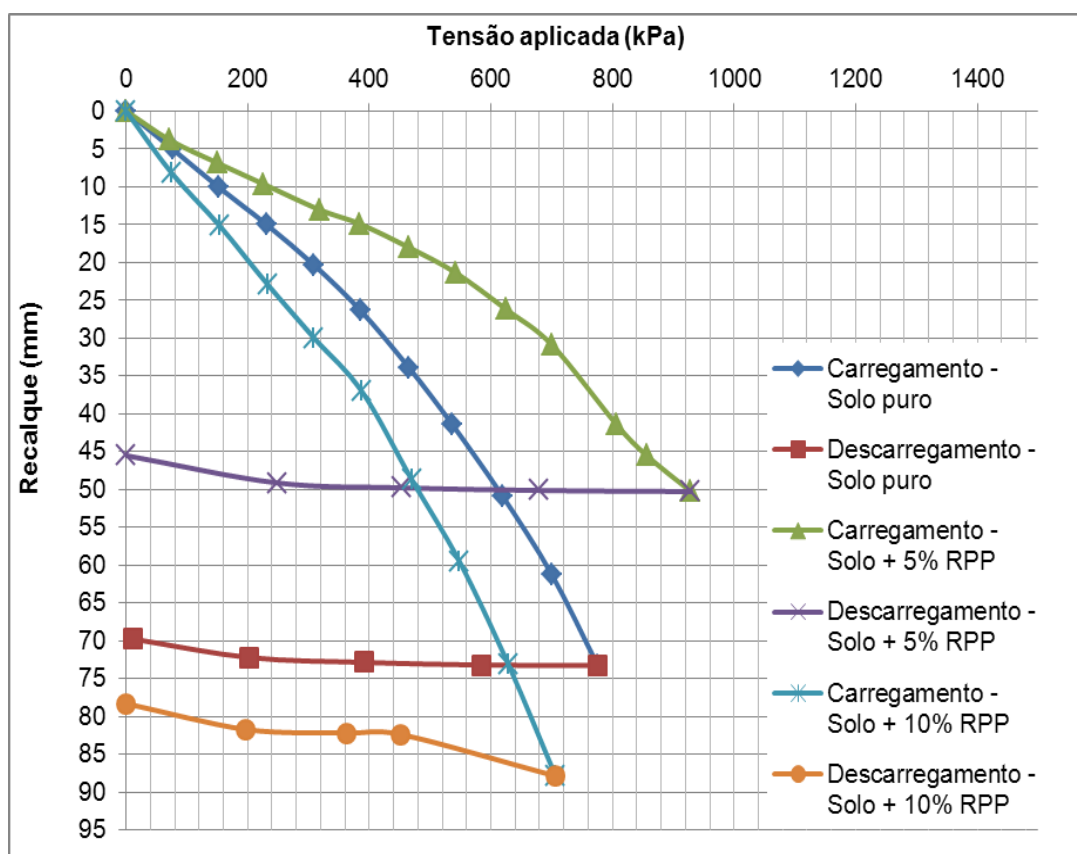


Figura 4.17 - Curvas Tensão versus Recalque para o solo puro e misturas de 5% e 10% (Autor).

Ao analisar os dados obtidos, é possível observar que em comparação ao solo puro, a mistura de 5% apresentou um aumento de 1,44 vezes na tensão admissível, porém ao realizar-se o ensaio com a mistura de 10%, nota-se que o valor obtido corresponde a 0,625 vezes do obtido para o solo puro. Quanto aos recalques, para o mesmo valor de tensão aplicada, obtém-se valores superiores de recalque para a mistura de 10% e menores valores para a mistura de 5%. Essa

conclusão também pode ser observada comparando o coeficiente de recalque dos materiais: o solo puro apresenta $k = 16 \text{ kPa/mm}$, enquanto a mistura de 5% apresenta $k = 26 \text{ kPa/mm}$ e a mistura de 10% mostra um $k = 9,8 \text{ kPa/mm}$. Araujo (2016) cita o efeito de atividade pozolânica do resíduo para justificar o aumento de sua capacidade de carga, visto que para o ensaio de prova de carga em placa utilizando a mistura de 5%, houve um tempo de secagem maior do material antes da inundação, período este no qual poderiam ter ocorrido reações na mistura que culminasse no aumento de resistência. Ao comparar o resultado da prova de carga em placa com resultados obtidos nos ensaios de adensamento unidimensional presente neste trabalho nota-se que para deformação, há uma coerência que aponta que a mistura com 5% possa apresentar um comportamento menos compressível que o solo puro, levando em consideração a variabilidade dos ensaios.

Como foi observado no capítulo dois deste trabalho, diversos autores notaram a influência da atividade pozolânica no comportamento do resíduo, a grande maioria em estudos de concreto. Não se pode afirmar ainda seu comportamento em relação a estudos com solo, já que são processos diferentes. Em concreto, no geral, o material é estudado em processo de secagem, já em estudos geotécnicos, os estudos ainda são feitos com material completamente saturado, o que pode afetar o efeito da atividade pozolânica.

4.6 Avaliação de Atividade Pozolânica do Resíduo

Com intuito de avaliar um possível efeito de atividade pozolânica influenciando nos resultados de caráter mecânico das misturas, foram realizadas amostras que reproduzem o mesmo tempo de secagem feito na prova de carga em placa, ensaio este que segundo Araujo (2016) pode ter sido influenciado por tal interação.

4.6.1 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia

A Tabela 4.12 apresenta um resumo dos resultados realizados com as misturas de 5% e 40% para dois dias de secagem. Apresenta ainda os resultados para 40% em dez dias de secagem. Os ensaios foram realizados na energia proctor normal.

Corpo de Prova	ISC (%)		
	2 dias de secagem		10 dias de secagem
	Mistura 5%	Mistura 40%	Mistura 40%
CP 1	6,57	6,66	6,13
CP 2	6,35	8,34	6,57
CP 3	6,35	6,57	7,64
ISC médio	6,42	7,29	6,78

Tabela 4.12 - Resultado de ensaios ISC com tempo de secagem (Autor).

Para 2 dias de secagem, ao se comparar os valores obtidos com os ensaios de Índice de Suporte Califórnia conforme apresentado no item 4.3 do presente trabalho, nota-se que para a mistura de 5% há uma pequena diminuição de valores, na qual o valor de ISC médio cai cerca de 10% (7,29 para 6,42) na amostra sem secagem em relação a amostra com dois dias de secagem. Essa diminuição do valor poderia ser explicada pela própria heterogeneidade do solo e a variabilidade de resultados na presença do resíduo, assim como observado em outros ensaios. Para a mistura com 40% ocorreu um aumento no valor médio obtido, no qual o valor médio, sem secagem, apresentado no item 4.3 (5,24) obtém um aumento de 37% de seu valor. Como a amostra com adição de 40% de resíduo possui o maior teor de RPP dentre as misturas, teoricamente o efeito da atividade pozolânica teria mais influência em seus resultados.

A Figura 4.18 mostra em um mesmo gráfico, valores de ISC com e sem espera.

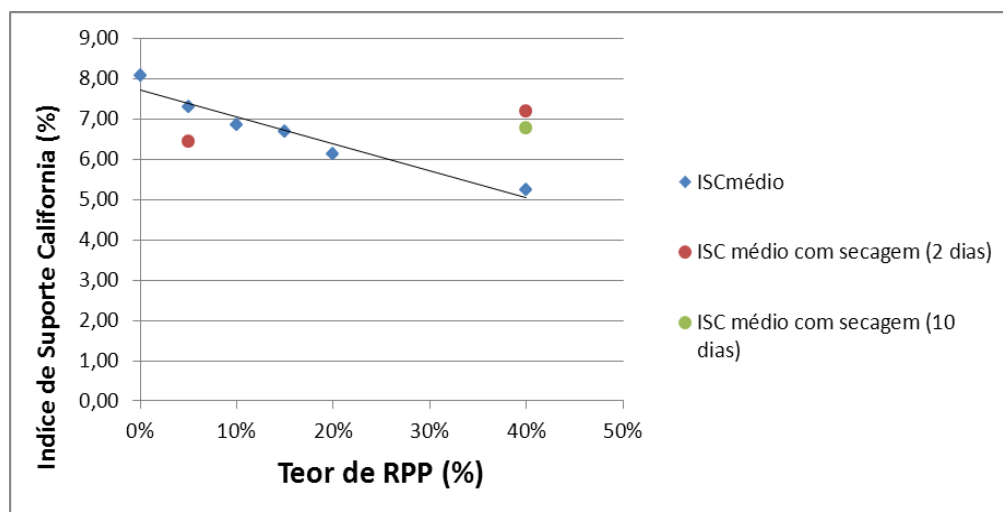


Figura 4.18 - Gráfico comparativo de ensaios com e sem período de secagem (Autor).

Nessa figura pode-se observar que a mistura com adição de 40% de resíduo em período de secagem obtém valores de ISC maiores do que as misturas de 10%, 15% e 20%, indo contra o comportamento esperado pela linha de tendência, apesar da influência da variabilidade do material, o crescimento observado foi significativo, sugerindo que realmente exista algum fator ou interação entre os materiais que ocorreu durante o período de secagem, aumentando a resistência da mistura.

Ao se analisar a mistura de 40% com um período maior de secagem (10 dias), é observado que o valor obtido é ligeiramente inferior ao analisado com apenas dois dias de espera, o que sugere que quaisquer que sejam as interações ocorrendo no material no período de secagem, teriam maior efeito nos primeiros momentos. O aumento de resistência observado por Araujo (2016) se deu, possivelmente em um período de apenas 24h de secagem, que resultou, segundo o mesmo, em um valor superior ao esperado.

4.6.2 Adensamento Unidimensional

Para avaliação da atividade pozolânica no ensaio de adensamento, foi observado apenas o comportamento do corpo de prova em relação à deformação. As Figuras 4.19 e 4.20 apresentam a comparação entre as curvas de tensão *versus* deformação das misturas com e sem tempo prévio de secagem. É possível observar que em ambos os casos houve uma ligeira diminuição da deformação do material para os mesmos valores de tensão máxima nas amostras com um período prévio de secagem. A mistura de 5% é o material que apresentou menor deformação dentre os estudados, logo uma melhora neste valor pode ser considerado ainda um resultado significativo. Este efeito que pode ser observado se assemelha ao percebido por Araujo (2016) nos resultados de prova de carga em placa, sugerindo que haja sim alguma interação entre o resíduo e o solo ocorrendo.

No caso observado por Araujo (2016), deve-se levar em consideração também a dimensão da amostra, visto que o referido autor identificou uma possível ação de atividade pozolânica em um ensaio de prova de carga em placa, cujas dimensões da amostra eram 1,40m x 1,40m x 0,60m, logo a amostra com 5% mesmo possuindo pouco resíduo, teve mais volume para reagir com água, secando mais lentamente, podendo ter apresentado uma influência da atividade pozolânica nos resultados mais expressiva, ao contrário do que foi observado neste trabalho para a amostra de 5% no ensaio de ISC com cilindro grande (115 mm de altura; 150 mm de diâmetro) que não apresentou melhora na resistência e no ensaio de adensamento uma melhora não tão expressiva quanto a observada pelo autor.

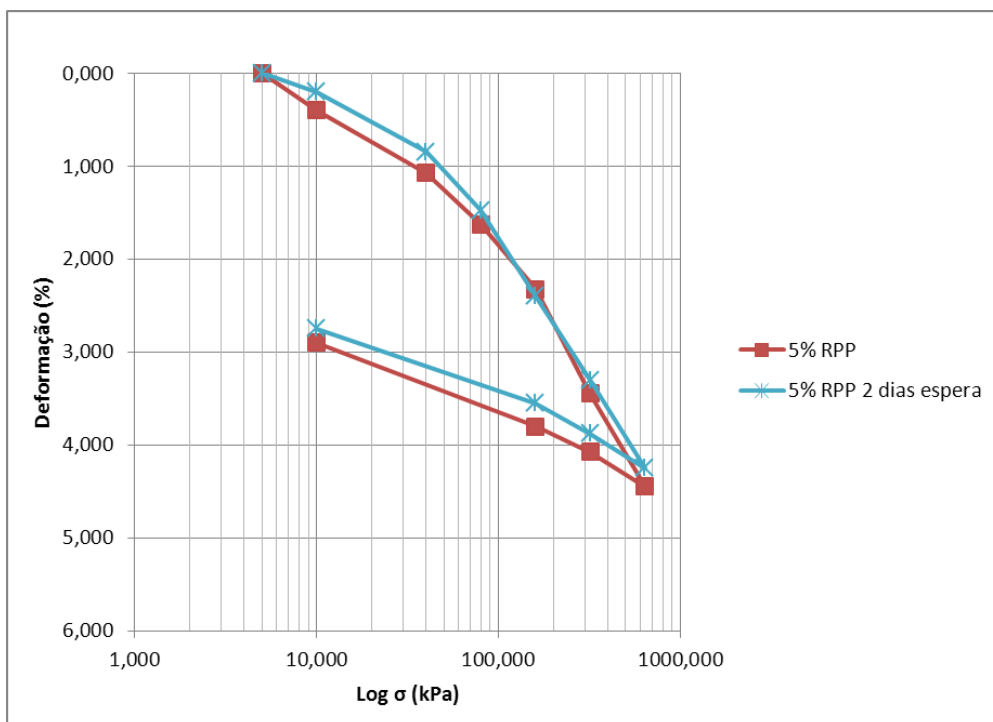


Figura 4.19 - Curva tensão x deformação para a mistura de 5% (Autor).

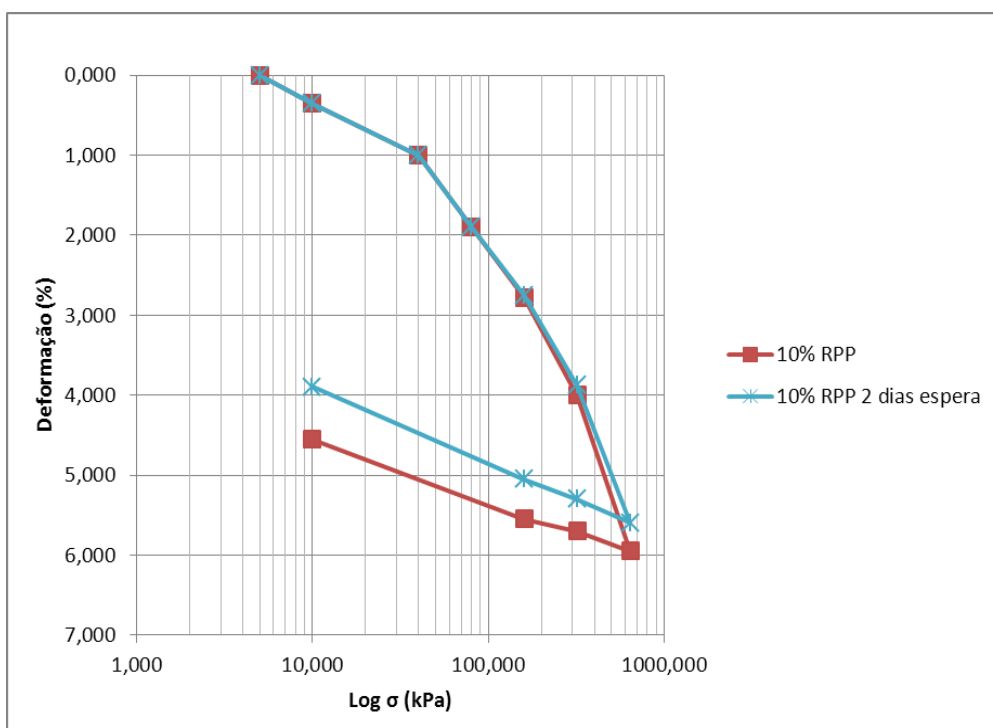


Figura 4.20 - Curva tensão x deformação para a mistura de 10% (Autor).

Para melhor entendimento do que isso pode representar, podem-se comparar os dados da prova de carga em placa com os do adensamento, levando em conta que deformação e recalque são grandezas relacionadas. A Figura 4.21 mostra as curvas de tensão x deformação para as misturas de 5% e 10% com e sem o período prévio de secagem, juntamente com a curva para o solo puro, de forma a melhor comparação com o resultado da prova de carga.

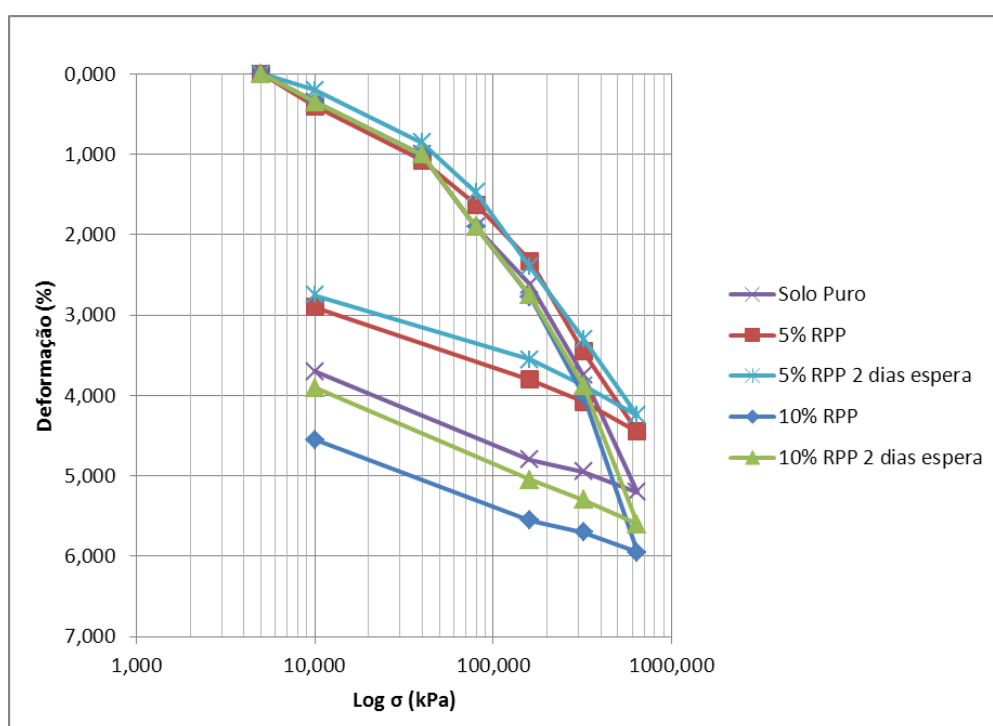


Figura 4.21 - Curvas de tensão x deformação (Autor).

Ao se comparar as curvas obtidas com os ensaios de prova de carga em placa (Figura 4.17), as curvas mostram um comportamento semelhante. Tanto no ensaio de prova de carga quanto no de adensamento, a mistura com adição de 5% de RPP apresentou um comportamento menos deformável do que o solo puro, o que não ocorreu para as outras misturas. Mesmo com a suposta melhora provocada pelo período de secagem, a mistura com 10% de resíduo ainda se mostra um

material mais deformável que o solo. É importante levar em consideração a variabilidade nesse caso, visto que a prova de carga por ser um ensaio de grande porte, só foi realizado uma vez para cada mistura, o qual por maior que tenha sido o controle, ainda está sujeito a uma faixa de variabilidade de resultados. Apesar dos dados darem a impressão que exista um fator influenciando no resultado, não se pode afirmar que seja efeito exclusivo da atividade pozolânica, é importante levar em conta a variabilidade de resultados, no qual uma futura análise estatística dos dados poderá esclarecer melhor a relação dos resultados.

4.7 Coleta e Análise de Extrato Solubilizado

Os resultados obtidos no ensaio de extrato de solubilizado do resíduo puro estão apresentados na Tabela 4.13.

O ensaio também definiu o pH do resíduo, classificado como 8, ou seja, uma base muito fraca, próximo ao que define um material neutro (7).

Parâmetro	Resultado (mg/L)	Valor limite - NBR 10004 (mg/L)	Incerteza (mg/L)
Alumínio (Al)	< 0,006	0,2	N.A.
Ferro (Fe)	< 0,3	0,3	N.A.
Manganês (Mn)	< 0,001	0,1	N.A.
Sódio (Na)	98,4	200	± 0,3
Zinco (Zn)	< 0,03	5,0	N.A.

Tabela 4.13 - Resultados do ensaio de extrato de solubilizado (Autor).

Os resultados apresentados em mg/L mostram que o resíduo está dentro dos limites apresentados em norma para todos os parâmetros estudado, em alguns com uma margem de segurança bastante significativa.

Os resultados que aparecem como valor “menor que”, corresponde a concentrações abaixo do limite de quantificação do equipamento.

A concentração de Alumínio encontrada foi muito inferior ao valor limite, preocupação observada por Kummer *et al.* (2007), que utilizou o resíduo juntamente com um resíduo de feldspato para formar uma massa cerâmica. O que pode apontar que os valores elevados da concentração de alumínio observados pelo referido autor podem ser proveniente do resíduo de feldspato utilizado na mistura, e não do RPP.

Costa (2010) obteve um valor de 9,05 para o pH do resíduo de polimento utilizado em sua pesquisa, o que também caracteriza uma base fraca, assim como apontada neste trabalho.

O ensaio mostra que para os parâmetros estudados, o resíduo não possui restrição de utilização para ser utilizado puro, então é possível concluir que para as suas misturas, só ocorrerá um valor de concentração superior ao permitido, caso o solo seja impróprio para o uso, o que não limita a utilização do resíduo. Porém, esse ensaio não é suficiente para afirmar que o resíduo é totalmente seguro, estudos adicionais de caráter ambiental, como estudos toxicológicos, são necessários para avaliar todos os aspectos de sua utilização.

5 Conclusões e Recomendações

5.1 Conclusões

Neste presente trabalho foi estudada a adição de resíduo de polimento de porcelanato (RPP) a um solo com a finalidade de sua aplicação em aterros compactados e obras rodoviárias. Com o propósito de avaliar a incorporação do resíduo, foi realizada uma série de ensaios de caráter mecânico dos materiais visando viabilizar uma destinação adequada para o resíduo que possui uma produção em larga escala e apesar de já existirem alguns processos de reutilização do mesmo, ainda não supre a demanda.

Para esta pesquisa foi adicionada a uma massa de solo teores de 5%, 10%, 15%, 20% e 40% de resíduo. A caracterização das amostras de 5, 10, 15 e 20% assim como a do solo puro foi realizada por Araujo (2016) e seus dados utilizados neste trabalho. Logo, no presente trabalho foi realizada a caracterização da mistura com adição de 40% de RPP e ensaios de comportamento mecânico para todas as misturas e o solo puro. A partir destes ensaios, pode-se concluir que:

- A mistura de 40% apresentou um valor de massa específica de $2,552 \text{ g/cm}^3$, obtendo um valor intermediário ao solo puro ($2,600 \text{ g/cm}^3$) e ao resíduo puro ($2,538 \text{ g/cm}^3$).
- A mistura de 40% apresenta uma curva granulométrica similar a do solo puro, ligeiramente à esquerda, devido ao acréscimo de finos obtidos pela adição de resíduo. Sua classificação no Sistema Unificado de Classificação dos Solos é SC, ou areia argilosa, com grande presença de partículas com granulometria equivalente ao silte, sempre levando em conta a ressalva que o resíduo pode não se comportar como um solo.
- A mistura com adição de 40% de RPP foi classificado como um material medianamente plástico, porém foi dito como um resultado não confiável, visto

que o ensaio apresentou uma série de dificuldades como a formação de torrões do material na presença de água, e a mudança de operador quanto aos ensaios realizados por Araujo (2016), nos quais não foi possível se identificar um padrão no comportamento das misturas em relação aos Limites de Atterberg.

- As curvas de compactação obtidas para o solo e misturas estudadas tanto na energia proctor normal quanto na modificada mostram que o solo puro apresenta um valor de umidade ótima menor e massa específica seca máxima maior que todas as misturas, as quais seguem uma tendência de acréscimo da primeira e decréscimo da segunda.
- O solo e as misturas apesar de apresentaram um teor considerável de finos, não são materiais com elevada expansão em presença de água, sendo a mistura com 40% a que apresentou maior valor médio de expansão, 0,4%, o que é menos da metade do limite apresentado pelo DNIT para utilização em sub-base de pavimentos (1%). Estes valores são ainda menores para compactações próximas a umidade ótima dos materiais.
- Em ensaios de Índice de Suporte Califórnia para o solo e as misturas, realizados na energia normal, o valor médio para o solo puro apresentou o maior valor (8,06%), enquanto as misturas obtiveram um padrão de decréscimo em relação ao acréscimo de teor de resíduo, chegando ao valor de 5,24% para a mistura de 40%.
- Os valores obtidos para a energia normal, tanto para o solo quanto para a mistura foram considerados baixos para aplicação em pavimentação, visto que para um material de sub-base o mínimo indicado pelo DNIT seria 20%, deixando os materiais como opção apenas para reforço de subleito caso o valor de ISC do mesmo seja inferior.
- O ensaio de ISC para energia modificada realizado com o solo e as misturas de 5%,10% e 40% apresenta uma tendência similar ao realizado com a energia normal, no qual o solo apresenta um valor de ISC superior ao das misturas (21,15%), em comparação ao valor obtido para a mistura de 5%

(21,04%), para a de 10% (19,41%) e para a mistura de 40% (14,67%). Os valores mostram que até 10% de adição de RPP o valor de ISC obtido corresponde a 92% do valor obtido para o solo puro, e que os resultados do solo puro e mistura de 5% são similares e ambos são aptos a serem utilizados em sub-bases de pavimentos.

- O ensaio de adensamento unidimensional aponta que os valores com maior teor de resíduo se deformam mais para mesmos estágios de carga, com exceção da mistura de 5% que mostrou ser o material que menos deformou, sugerindo que esse teor seja um teor ideal para complementar a granulometria do solo.
- A partir do ensaio de prova de carga em placa foi possível observar que a mistura de 10% apresentou ruptura por puncionamento, assim como o solo puro e a mistura de 5%.
- A mistura de 10% apresentou tanto nos cálculos teóricos quando no ensaio de prova de carga em placa capacidade de carga inferior do que a mistura de 5% e o solo, apresentando ainda maiores valores de recalques para mesmos valores de tensão.
- Ensaio com o extrato lixiviado mostrou que para os parâmetros estudados, o material não apresenta riscos a saúde, visto que as suas concentrações foram avaliadas dentro dos limites sugeridos em norma.
- Ensaio de ISC na energia normal, cujo procedimento foi alterado, havendo um período de secagem do material entre sua compactação e inundação, mostraram que para a mistura com maior presença de resíduo, foi obtido um valor médio de ISC superior às amostras sem secagem, o que pode apontar que a mistura sofreu alguma interação interna durante este período.
- Para o ensaio de adensamento unidimensional, os dados mostram que para as misturas de 5% e 10%, o processo de secagem melhorou seus desempenhos, obtendo deformações menores do que as amostras feitas por procedimento padrão.

Com todos os dados obtidos nesta pesquisa, pode-se dizer que de forma geral, o resíduo não altera de forma significativa o comportamento do solo para teores de até 10% de adição, com a mistura de 5% apresentando em alguns casos resistência superior ao do solo puro, assim como observado por Araujo (2016) nos ensaios de prova de carga em placa e cisalhamento direto. Para valores acima disso, nota-se uma pequena queda em seu desempenho mecânico, porém dependendo do uso, não se torna um valor significativo, tornando todas as misturas aqui estudadas potenciais materiais para execução de aterros compactados, visto que todas apresentaram um valor superior a 2% de ISC, valor recomendado pelo DNIT. O solo puro e a mistura de 5% compactados na energia modificada podem ser utilizados como material de sub-base, visto que superam o valor de 20% sugerido pelo DNIT para tal camada. As demais misturas podem ser utilizadas, ainda, como reforço de subleito, caso o seu valor de ISC seja superior que o do subleito em questão.

5.2 Recomendações para pesquisas futuras

O estudo aqui apresentado fez uma avaliação inicial da incorporação do resíduo de polimento de porcelanato em um solo para analisar seu comportamento em caráter geotécnico para aplicação em obras rodoviárias. Para a viabilização desse destino ainda são necessários mais estudos que comprovem e afirmem, de fato, o potencial do material.

Do ponto de vista rodoviário, seria interessante a realização de ensaios com misturas envolvendo outro tipo de solo, para poder analisar a integração do resíduo com o mesmo e comparar sua influência nos resultados, assim como ensaios na energia intermediária e com teores diferentes, para complementar os dados.

Uma maior quantidade de repetições dos ensaios de prova de carga em placa seria necessária para encontrar um padrão no comportamento mecânico do material frente a esse tipo de solicitação.'

A realização de uma análise estatística dos dados dos ensaios seria importante para uma compreensão mais precisa do comportamento das misturas, bem como para dar confiabilidade aos dados.

Apesar dos ensaios apontarem a ação da atividade pozolânica nas misturas, salienta-se que esta é apenas uma avaliação inicial, a qual precisa de uma investigação mais aprimorada com a finalidade de comprovar seu efeito.

Do ponto de vista ambiental, seria interessante uma pesquisa completamente voltada para este tópico, visto que se trata de um material ainda pouco conhecido, analisando de uma forma mais abrangente sua nocividade a seres vivos.

É interessante lembrar que para aplicação em obras rodoviárias, os parâmetros estudados nessa pesquisa não são suficientes para utilização das misturas, pois seria interessante analisar o comportamento do resíduo em larga escala, como por exemplo, em pistas experimentais, para observar sua trabalhabilidade e aspectos como, por exemplo, erosão do aterro compactado, dentre outros.

6 Referências Bibliográficas

ABNT (2010) NBR 6122 – Projeto e Execução de Fundações. Rio de Janeiro, Brasil, 33p.

ABNT (1986) NBR 6457 - Amostras de Solo –Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização. Rio de Janeiro, Brasil, 09p.

ABNT (2016). NBR-6459: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Método de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 06p.

ABNT (1984). NBR-6489: Prova de carga direta sobre terreno de fundação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 02p.

ABNT (1984). NBR-6508 - Grãos dos Solos que Passam na Peneira de 4,8mm – Determinação da Massa Específica. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 08p.

ABNT (2016) NBR-7180. Solo – Determinação do limite de plasticidade. Método de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 03p.

ABNT (1984) NBR-7181. Análise Granulométrica. Método de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 13p.

ABNT (1986) NBR-7182. Solo – Ensaio de Compactação. Método de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 10p.

ABNT (1987) NBR-9895. Solo – Índice de Suporte Califórnia. Método de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 14p.

ABNT (2004) NBR-10004. Resíduos Sólidos – Classificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 71p.

ABNT (2004) NBR-10006. Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 3p.

ABNT (2004) NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 21p.

ABNT (1990) NBR-12007. Solo Ensaio de adensamento Unidimensional. Método de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 13p.

ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2014. São Paulo, SP: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2014. 120 p.

ANFACER – Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica Para Revestimentos. Disponível em: <http://www.anfacer.org.br> e acessado em 10/03/2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *D1143*: standard test methods for deep foundations under static axial compressive load. Pensilvânia, Estados Unidos: ASTM, 2007.

Amorós, J.L.; Orts, M.J.; García-Ten, J.; Gozalbo, A.; Sánchez, E. (2006) Effect of the green porous texture on porcelain tile properties. *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 27, p. 2295-2301.

Ângulo, S.C.; Zordan, S.E.; John, V.M. (2001) Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem de Resíduos na Construção Civil. IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na construção civil – materiais reciclados e suas aplicações. CT206 – IBRACON. São Paulo.

Araujo, S.C.J.F.N. (2014) Avaliação do Emprego de Resíduo de Polimento de Porcelanato em solo Laterítico para Pavimentação. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 15 p.

Araujo, S. C. J. F. N. (2016): Análise de Microestrutura e de Características Geotécnicas de Misturas de Resíduo de Polimento de Porcelanato e Solo. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 100 p.

Araujo, S. C. J. F. N. & Costa, C. M. L. (2015): 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, p. 212-219.

Bernardin, A. M.; Silva, M. J.; Riella H.G. (2006): Characterization of cellular ceramics made by porcelain tile residues. *Materials Science and Engineering*, vol. 437, n. 2, p. 222-225.

Bernucci, L.B.; et al.(2010): Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras, 504p.

Cabral Junior, M.; Boschi, A.O.; Motta J.F.M.; Tanno, L.C.; Sintoni A.; Coelho, J.M.; Caridade, M. (2010): Panorama e Perspectivas da Indústria de Revestimentos Cerâmicos no Brasil. *Cerâmica Industrial*, vol. 15, n. 3, p. 7-18.

Carvalho, E.V. (2013): Utilização do Resíduo da Retífica de Cerâmica de Revestimento na Produção de Concreto para Pavimento Intertravado. Dissertação de mestrado em Tecnologia e Inovação, Universidade Estadual de Campinas. 161 p.

Cintra, J.C.A.; Aoki, N.; Albiero, J.H. (2011): Fundações Diretas: Projeto Geotécnico. São Paulo: Oficina de Textos, 134 p.

Costa, C.H. (2010) Estudo Ecotoxicológico para Valorização do Resíduo Produzido no Processo de Polimento de Piso Porcelanato na Indústria Cerâmica. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 153 p.

DNIT (2006) Manual de pavimentação 3 ed. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, Brasil, 274p.

Gerab, A.T.F.S.C. (2014) Utilização do Resíduo Grosso do Beneficiamento da Scheelita em Aplicações Rodoviárias. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 106 p.

Hansen, A.P.; Seo, E.S.M.; Kulay, L.A.; (2010) 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). *Revista Produção Online*, v. 10,n.4 p.912-936.

Heck, C. (1996): Gres Porcelanato. *Cerâmica Industrial*, n. 01, p. 21-24.

Jacoby, P.C.; Pelisser, F. (2015) Pozzolan effect of porcelain polishing residue in Portland cement. *Journal of Cleaner Production*, vol. 100, p. 84-88.

Kummer, L.; Bassetti, F.J.; Riella, H.G.; Azevedo, J.C.R. (2007): Reutilização dos Resíduos de Polimento de Porcelanato e Feldspato na Fabricação de Novo Produto Cerâmico. *Cerâmica Industrial*, vol. 12, n. 3, p. 34-38.

Luckmann, G.; Bernardin, A.M.; (2006) Utilização de Resíduos de Polimento de Porcelanato para Obtenção de Cerâmica Celular. Curso em Tecnologia e Cerâmica. Centro Universitário de Brusque – Unifebe.

Marciano, E.; Kihara, Y. (1997): *World Cement. Looking Green*, vol. 28, n. 4, p. 82-88.

Marques, L.N.; Menezes, R.R.; Neves, G.A.; Santana, L.N.L.; Lira, H.L.; Ferreira, H.C. (2007): Reaproveitamento do resíduo do polimento de porcelanato para utilização em massa cerâmica. *Revista Eletrônica de Materiais*, v. 2.2, p.34-42.

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

Nogami, J.S.; Villibor, D.F. (1995): Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. São Paulo: Villibor, p. 240.

Pelisser, F.; Steiner, L.R.; Bernardin, A.M. (2012) Recyclin of Porcelain Tile Polishing Residue in Portland Cement: Hydration Efficiency. *Environmental Science & Technology*, v. 46, p.2368-2374.

Prado, J.R.; Cabral, I.L.L.; Silva A.P.M.; Solorzano, P.E.M.; Albuquerque A.P.A. (2014): Caracterização de Material Laterítico do Planalto e Chapada dos Guimarães – MT por EDX, XRD e Espectroscopia Mössbauer. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, vol. 15, n. 4, p. 619-637.

Purificação, E.B. (2009) 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. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 103 p.

Rambaldi, E.; Esposito, L.; Tucci A.; Timellini, G. (2007): Recycling of polishing porcelain stoneware residues in ceramic tiles. *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 27, n. 12, p. 3509-3515.

Romero, M.; Perez, J.M. (2015) Relation between the microstructure and technological properties of porcelain stoneware. A review. *Materiales de Construcción*, vol. 65,n.320 p. 2-15.

Rosa, S.E.S.; Peixoto, G. B. T. (2003): O segmento de Cerâmica para Revestimentos no Brasil. *BNDES Setorial*, n. 18, p. 221-236.

Rosso, J.; Cunha, E. S.; Rojas-Ramires R.A.; (2005): Características técnicas e polimento de porcelanatos. *Cerâmica Industrial*, vol. 10, n. 4, p. 1-10.

Sanchéz, J.L.; Ibañez, M.J.; García-Ten, J.; Quereda, M.F.; Hutchings, I.M.; Xu, Y.M. (2005) Porcelain tile microstruture: Implications for polished tile properties. *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 26, p. 2533-2540.

Silva, G.J.B. (2005) Estudo do Comportamento do Concreto de Cimento Portland produzido com a Adição do Resíduo de Polimento do Porcelanato. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 138 p.

Silva, M.G. (2012) Uso combinado dos resíduos de cascalho de perfuração de poço de petróleo e de polimento de porcelanato em cerâmica vermelha. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 92 p.

Steiner, L.R.; Bernardin, A.M.,; Pelisser, F. (2015) Effectiveness of ceramic tile polishing residues as supplementary cementitious materials for cement mortars. *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 4, p. 30-35.

SNV – Sistema Nacional de Viação. Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/sistema-nacional-de-viacao> e acessado em 21/12/2015.

Souza, P.A.B.F. (2007) Estudo do comportamento plástico, mecânico, microestrutural e térmico do concreto produzido com resíduo de porcelanato. Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 208 p.

Toledo, A.L.L. (2014) Comportamento Geotécnico de Misturas de Solo e Resíduos de Perfuração Onshore. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 85 p.