

ESTUDO DA VARIABILIDADE DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE MISTURA DE SOLO RESIDUAL DA FORMAÇÃO GEOLÓGICA PALERMO E RESÍDUO DE POLIMENTO DE PORCELANATO FRENTE AO SOLO RESIDUAL *IN NATURA*

Luis Henrique Bernhardt (1), Christiane Ribeiro da Silva (2)

*UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1)luish.bernhardt@hotmail.com, (2)christiane@unesc.net*

RESUMO

Nos últimos anos, acompanhando a evolução industrial, a indústria cerâmica cresceu. Com isso, houve aumento na produção de porcelanatos impactando na geração de resíduos, principalmente no que se refere a fase de polimento, visto que, durante tal processo, cada peça perde, aproximadamente, 5mm de sua superfície. O resíduo de polimento de porcelanato, gerado na fase final de acabamento da peça, possui consistência de lama, com partículas de fração predominante de argila, conforme NBR 7181/2016. Neste contexto, a pesquisa teve como objetivo avaliar o comportamento geotécnico de misturas de solo residual da Formação Geológica Palermo com resíduo de polimento de porcelanato. O programa experimental contou com a elaboração de quatro misturas, nas porcentagens de 90/10, 80/20, 70/30 e 60/40 de solo e resíduo, respectivamente, e com ensaios de granulometria, índices de consistência, compactação, Índice de Suporte Califórnia, expansão e permeabilidade, realizados no Parque Tecnológico da UNESC. Os resultados demonstraram baixas variações quando comparados com o solo residual puro, uma vez que, mesmo adicionando 40% de resíduo, a classificação do material se manteve em A-7-5. Os resultados de permeabilidade também apresentaram poucas alterações, sendo destaque como menor valor $1,19 \times 10^{-6}$ obtido para a amostra de 90/10, apesar de todos os coeficientes, por si só, já se caracterizarem como de permeabilidade muito baixa. Quanto ao Índice de Suporte Califórnia e a expansão, as misturas de 90/10 e 60/40 indicaram uma possível aplicação como material para terraplenagem, mais especificamente como corpo de aterro. Deste modo, a adição deste tipo de resíduo, em termos geotécnicos, se mostrou benéfica, levando em consideração os resultados obtidos como um todo e, com isso, atingiu a proposta de valorizar a utilização deste material neste tipo de solo, se tornando uma alternativa ao uso até então exclusivo do material argiloso. Vale salientar que, para viabilizar o uso deste resíduo, são necessários ensaios complementares nos âmbitos químico e ambiental, considerados de extrema importância para elucidar tal capacidade de aplicação.

Palavras-Chave: Resíduo do polimento de porcelanatos. Formação Geológica Palermo. Permeabilidade

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é a maior consumidora de recursos naturais, contribuindo muito para a degradação do meio ambiente. Segundo Couto Neto (2007, p.16) “a gestão do meio ambiente tem sido um desafio atual e tema discutido sob o ponto de vista ambiental e econômico para indústrias, empresas e sociedade, deixando de ser considerado como custo”. O setor público e privado vem sendo pressionado para minimizar esses impactos causados a natureza.

Sabendo que a geração de resíduos acarreta a necessidade de tratamento e disposição em locais adequados, as indústrias e universidades vêm investindo em pesquisas com intuito de buscar soluções para o reaproveitamento destes materiais. O reaproveitamento de resíduos visa redução de impactos ambientais causados pela extração dos agregados, preservando, assim, os recursos naturais e aumentando a credibilidade perante o mercado consumidor.

Nos últimos anos, acompanhando a evolução industrial, a indústria cerâmica cresceu. De acordo com a Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres (ANFACER, 2018) atualmente o Brasil figura como o segundo maior mercado consumidor e produtor mundial de materiais cerâmicos incluindo porcelanatos polidos, sendo a região sul de Santa Catarina grande colaboradora para esses números. O aumento na produção de porcelanatos teve impacto na geração de resíduos, principalmente no que se refere a fase de polimento.

Segundo Araujo, Costa e Paulino (2016) cada peça cerâmica, depois do polimento, perde em torno de 5 mm de sua superfície, ocasionando a geração deste tipo de resíduo, denominado resíduo de polimento de porcelanato (RPP). O RPP possui consistência de lama, sendo composto por material pulverulento desprendido da peça cerâmica polida, material abrasivo gasto e, também, por água de resfriamento e lavagem (ARAUJO, 2016). Ele é gerado na fase de acabamento da peça. Deste modo resulta em um pó branco de granulometria fina e composição química variável. Estudos toxicológicos mostram que o resíduo pode ser usado, havendo restrições apenas para utilização do material puro (COSTA, 2010; SILVA; COSTA; MEDEIROS, 2016). Kummer *et al.* (2007) classifica o material através do ensaio de solubilização, como Classe IIA, norma NBR 10004. “Esta Norma classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde

pública, para que possam ser gerenciados adequadamente” (ABNT NBR 10004:2004, p.13).

Em virtude de sua classificação, o resíduo de polimento de porcelanato requer uma destinação final correta em aterros controlados. “Entende-se que a aplicação desse resíduo na área de solos seria de grande interesse, visto que obras com aterros movimentam grandes quantidades de material” (SILVA; COSTA; MEDEIROS, 2016, p.2). Neste contexto está a motivação do trabalho.

Solos são definidos como produto de decomposição de rochas, decorrentes de processos de intemperismo físico e/ou químico. É de suma importância a determinação das propriedades geotécnicas dos solos para conhecer o seu comportamento. Como são considerados materiais heterogêneos de comportamentos variados, necessitam análises para adequar e viabilizar o seu emprego em obras civis (SCARMAGNANI, 2013).

Ao longo desta pesquisa o resíduo de polimento de porcelanato foi misturado em solos argilosos oriundos da Formação Geológica Palermo, localizado na região de Criciúma/SC. Conforme Milani *et al* (2007, p.273), “a Formação Palermo compreende uma sucessão de siltitos e siltitos arenosos, cinza amarelados e, localmente arenitos finos em corpos de geometria lenticular”.

Segundo Sartor (2013, p.1), “a Formação Geológica Palermo é predominantemente composta por solos coesivos e com grande potencial impermeabilizante”. A permeabilidade pode ser entendida como a característica que o solo possui de permitir o escoamento da água através dele, o conhecimento da permeabilidade de um solo é de grande importância para saber lidar com diversas situações na engenharia. Um dos principais parâmetros físicos de um solo que controla a taxa de percolação é a condutividade hidráulica, também chamada de coeficiente de permeabilidade, geralmente expressa em cm/s. A condutividade hidráulica dos solos depende de alguns fatores, como: distribuição do tamanho de poros, viscosidade do fluido, distribuição granulométrica, índice de vazios, entre outros (DAS; SOBHAN, 2010). A Tabela 1 mostra os valores de condutividade hidráulica conforme as frações granulométricas constituintes dos solos.

Tabela 1: Valores Típicos da condutividade hidráulica dos solos saturados

Valores Típicos da condutividade hidráulica dos solos saturados	
Tipo de solo	k(cm/s)
Pedregulho limpo	100 - 1,0
Areia grossa	1,0 - 0,01
Areia fina	0,01 - 0,001
Areia com silte	0,001 - 0,00001
Argila	<0,000001

Fonte: DAS; SOBHAN, (2010)

O solo residual da Formação Geológica Palermo (SP) apresenta um coeficiente de permeabilidade em torno de $2,16 \times 10^{-6}$ cm/s. Existem duas maneiras para fazer os ensaios de permeabilidades: com permeâmetro de carga constante e com carga variável. Neste caso, como o coeficiente de permeabilidade do SP é considerado baixo em virtude de se tratar de um material de granulometria fina, a utilização do ensaio de carga constante é pouco precisa, logo foi utilizado o ensaio de carga variável ao longo desta pesquisa, regido pela NBR 14545/2000.

Com base no descrito acima, este estudo teve como objetivo principal estudar a variabilidade do comportamento geotécnico de mistura de solo residual da Formação Geológica Palermo e resíduo de polimento de porcelanato frente ao solo residual *in natura*. Como objetivos secundários, realizar ensaios de granulometria, limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) para obtenção do índice de plasticidade (IP), compactação, para obtenção da umidade ótima (ω_{ot}) e densidade seca máxima (DSM), Índice de Suporte Califórnia (ISC), expansão e, por fim, permeabilidade, visto que se tratam de informações relevantes para o entendimento dos resultados obtidos.

2.MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. MATERIAIS

O solo residual utilizado na pesquisa é argiloso (Formação Geológica Palermo), proveniente do I-Parque/UNESC (Universidade do Extremo Sul Catarinense). O local de coleta possui coordenadas 655498,26m E 6820738,21m S, Datum WGS84, localizado na cidade de Criciúma/SC. Para a caracterização das propriedades físicas e mecânicas do SP *in natura* foram coletados dados no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) do I-Parque/UNESC. Os resultados podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2: Caracterização física e mecânica do solo residual de Formação Geológica Palermo.

Parâmetro	Resultados
LL (%)	59
LP (%)	45
IP (%)	14
% passante nº200	97,22
HRB	A-7-5
$\omega_{ót}$ (%)	25,8
DSM (g/cm ³)	1,462
ISC (%)	5,80
Expansão (%)	5,50

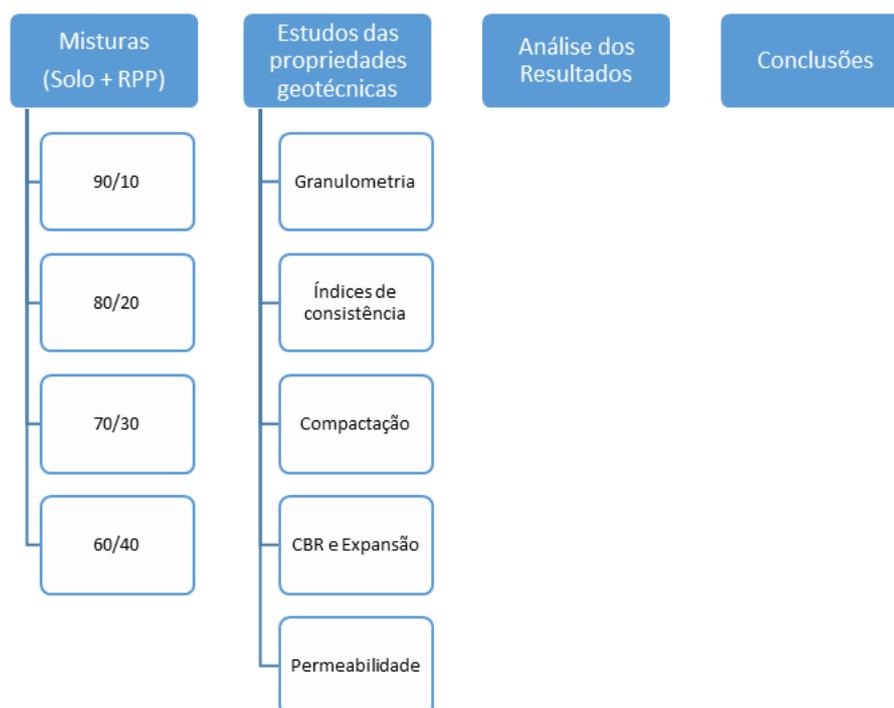
Fonte: LMS (2018).

Com relação ao resíduo de polimento de porcelanato (RPP), este foi cedido por uma indústria de revestimentos cerâmicos da região Sul do estado de Santa Catarina. Foram elaboradas quatro misturas de SP com RPP, nas porcentagens de 90/10, 80/20, 70/30 e 60/40 respectivamente. Esses números foram determinados e fundamentados em estudos que mostraram que valores acima destes citados acabaram por afetar as características do solo. Ainda, a presente pesquisa estudou valorizar a utilização deste material no solo.

2.2. METODOLOGIA

Para atingir o objetivo principal esta pesquisa seguiu a metodologia de execução apresentada na Figura 1, fluxograma de processos.

Figura 1: Fluxograma de processos.



Fonte: Autor, 2018.

Nos ensaios de compactação e ISC, foi utilizada energia de compactação Proctor Intermediário (PI). Quanto ao ISC e expansão, conforme norma NBR 9895:2016, os corpos de prova ficaram submersos durante quatro dias, nesse período foi observado a sua expansão. A permeabilidade foi realizada com carga variável, já que se trata de material de granulometria predominantemente fina. Os ensaios foram realizados conforme o que preconiza as normas apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1: Normas.

Ensaio	Norma
Granulometria	ABNT NBR 7181:2016 Versão Corrigida 2:2018
Limite de Liquidez	ABNT NBR 6459:2016 Versão Corrigida:2017
Limite de Plasticidade	NBR 7180/2016
Compactação	NBR 7182/2016
Índice de Suporte Califórnia (ISC)	ABNT NBR 9895:2016 Versão Corrigida:2017
Permeabilidade Carga Variável	NBR 14545/2000

Fonte: ABNT.

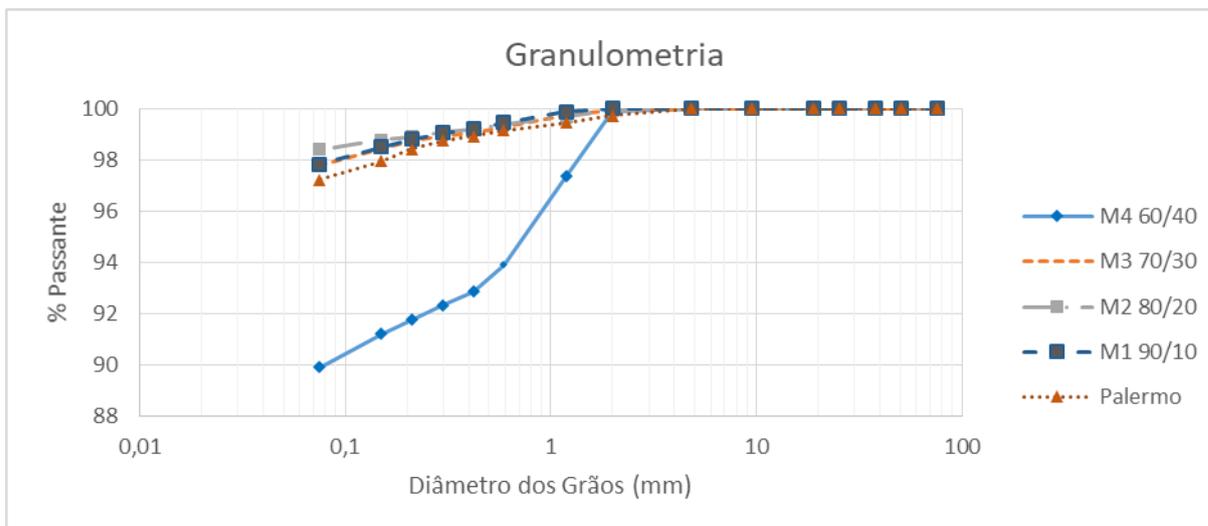
3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1. Granulometria

3.1.1 Granulometria por Peneiramento

Os resultados alusivos aos ensaios de granulometria por peneiramento segundo ABNT NBR 7181:2016 comprovaram a predominância de material fino (silte e argila) para todas as quatro misturas. Foram obtidos os valores passantes na peneira nº 200 (0,075 mm) de 97,83%, 98,39%, 97,80% e 89,9% para as misturas 90/10, 80/20, 70/30 e 60/40, respectivamente, conforme pode ser observado na Figura 2. Como a granulometria do solo *in natura* apresenta porcentagem de 97,22% de finos, foi possível notar pouca variação neste parâmetro nas misturas elaboradas. Para o caso específico da mistura 60/40, a variação na porcentagem passante na peneira nº 200 pode estar relacionada com a heterogeneidade do próprio solo. Quanto o resíduo *in natura*, este apresentou uma porcentagem passante na peneira nº 200 de 94,6% (SCHEFFER, 2017).

Figura 2: Granulometria por Peneiramento.



Fonte: Autor, 2018.

3.1.2 Granulometria a Laser

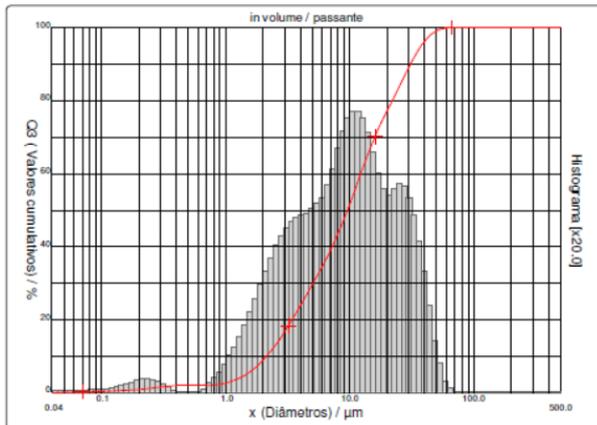
O ensaio de granulometria a laser foi realizado tanto para RPP quanto para as misturas. Este ensaio determinou o diâmetro médio das partículas passantes na peneira nº 200, ou seja, das de tamanho nominal inferior a 0,075 mm. A Figura 3 apresenta a curva de distribuição granulométrica a laser do RPP, sendo este, composto por partículas de fração predominante de argila, conforme NBR 7181/2016. Já as Figuras 4, 5, 6 e 7 mostram as curvas obtidas para as misturas. De acordo com os resultados temos que a adição do incremento do RPP tornou a granulometria das misturas mais fina. No Quadro 2 está apresentado os valores obtidos no ensaio de granulometria a laser para cada mistura e do RPP puro.

Quadro 2. Quadro comparativo dos resultados de granulometria a laser.

Parâmetro	RPP	90/10	80/20	70/30	60/40
Granulometria a Laser	< 70 µm	< 70 µm	< 25 µm	< 25 µm	< 25 µm

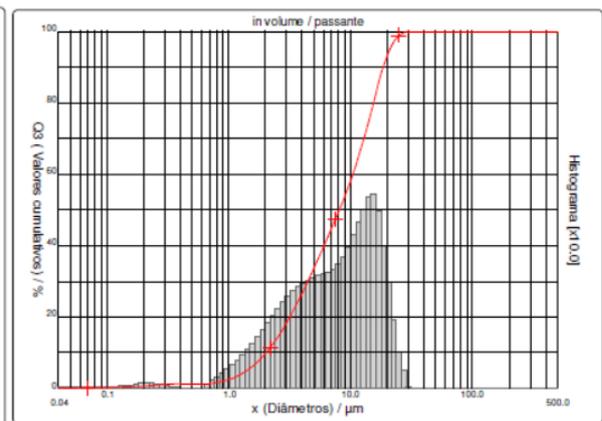
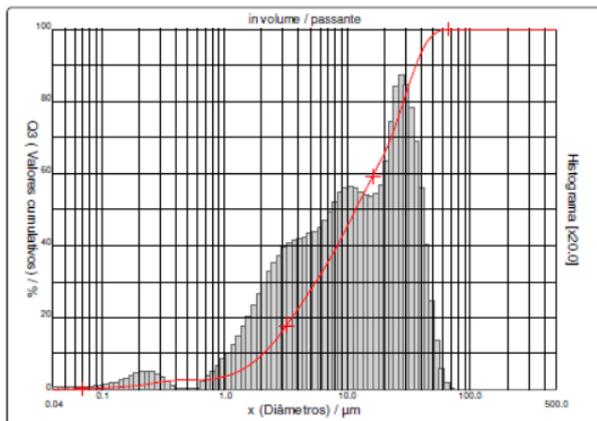
Fonte: Autor, 2018.

Figura 3: Granulometria a Laser RPP.



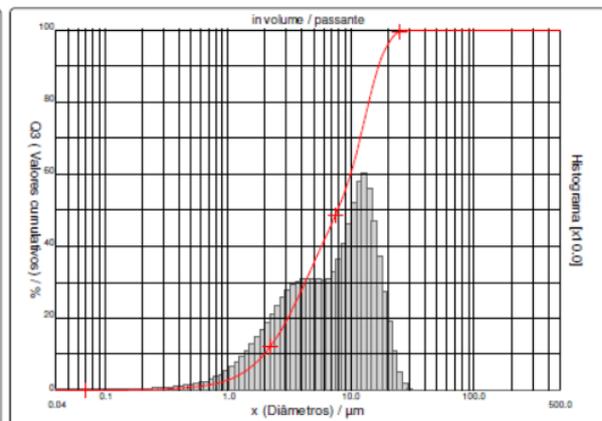
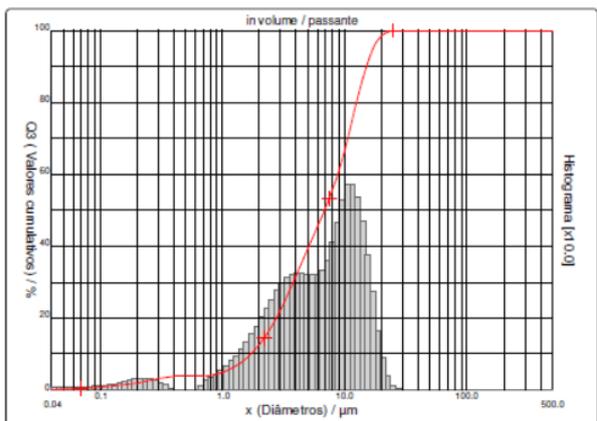
Fonte: Autor, 2018.

Figura 4 e 5: Granulometria a Laser, esquerda (90/10) e direita (80/20).



Fonte: Autor, 2018.

Figura 6 e 7: Granulometria a Laser, esquerda (70/30) e direita (60/40).



Fonte: Autor, 2018.

3.2. Índices físicos e de consistência e classificação dos solos

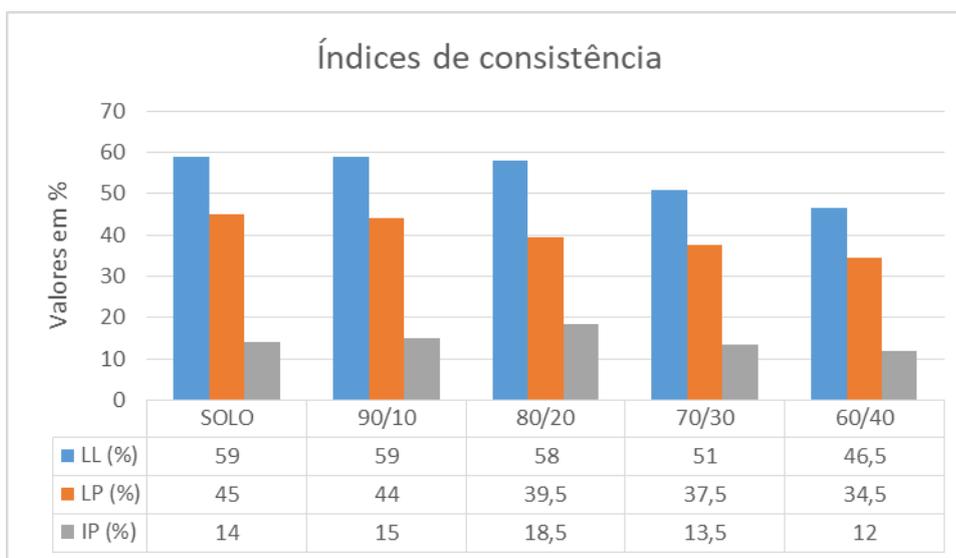
Com relação aos índices de consistência, estes seguem apresentados no Quadro 3. Apesar dos resultados do índice de plasticidade ter variado entre 12% e 18,5%, conforme a Figura 8, podemos observar que não houve mudanças significativas. Podemos analisar como forma positiva, pois mesmo adicionando 40% de RPP ao SP, este se manteve na mesma classificação pelo sistema *Highway Research Board* (HRB), sendo um A-7-5.

Quadro 3. Quadro comparativo dos resultados para índices de consistência e classificação dos solos.

Parâmetro	Solo Puro	90/10	80/20	70/30	60/40
LL(%)	59	59	58	51	46,5
LP(%)	45	44	39,5	37,5	34,5
IP(%)	14	15	18,5	13,5	12
Classificação HRB	A-7-5	A-7-5	A-7-5	A-7-5	A-7-5

Fonte: Autor, 2018.

Figura 8: Variação dos índices de consistência.



Fonte: Autor, 2018.

3.2. Compactação, ISC e expansão

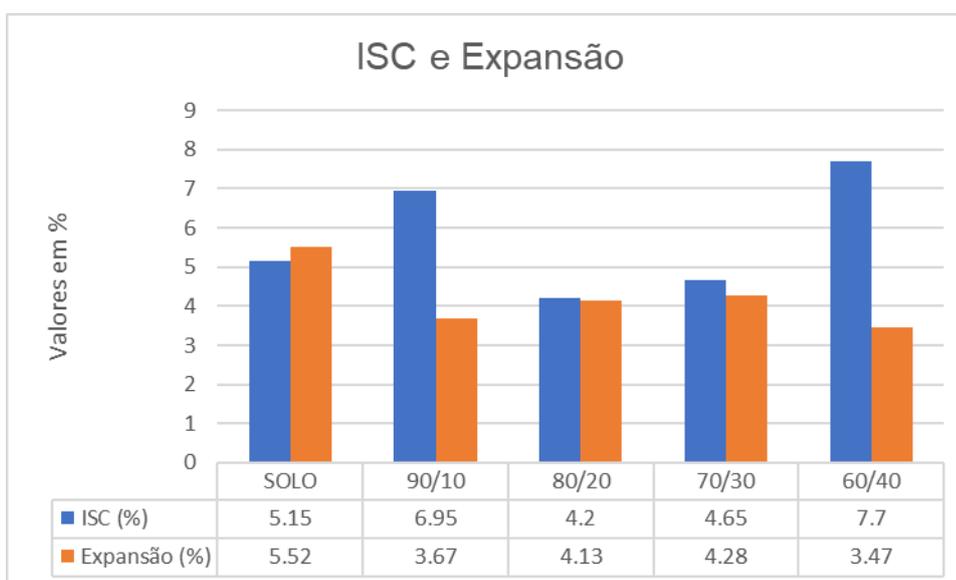
Os limites de Atterberg, estão correlacionados com a umidade da amostra, parâmetro importante no processo de compactação. O Quadro 4 apresenta os dados de compactação, DSM e w_{ot} , ISC e expansão, para todas as misturas enquanto que a Figura 9 apresenta o gráfico de barras para a variação de ISC e expansão.

Quadro 4. Quadro comparativo dos resultados de compactação, ISC e expansão das amostras.

Parâmetro	Solo Puro	90/10	80/20	70/30	60/40
DSM (g/cm ³)	1,45	1,46	1,43	1,43	1,39
ω _{ot} (%)	25,35	25,35	26,05	26,1	27,05
ISC (%)	5,15	6,95	4,2	4,65	7,7
Expansão (%)	5,52	3,67	4,13	4,28	3,47

Fonte: Autor, 2018.

Figura 9: Variação dos valores de ISC e expansão para o solo e para as misturas.



Fonte: Autor, 2018.

O aumento da umidade ótima e a redução da densidade seca máxima pode ser atribuído ao aumento da fração de partícula de argila, conforme a NBR 7181/2016, devido a adição do RPP. A expansão e o ISC obtidos, mostraram que as amostras 90/10 e 60/40 apresentam valores interessantes, podendo ser empregados como parte do corpo de aterro em projetos de terraplenagem. De acordo com a Norma DNIT 108/2009 (2009, p.3), “para a execução do corpo de aterro é necessário capacidade de suporte adequada com $ISC \geq 2\%$ e $expansão \leq 4\%$ ”.

3.3. Permeabilidade

A concepção dos resultados de permeabilidade para a condição do solo natural da Formação Geológica Palermo frente a permeabilidade obtida com as novas misturas

é considerada de extrema importância para este trabalho. O Quadro 5 apresenta os resultados obtidos para o coeficiente de permeabilidade para ambas as misturas.

Quadro 5. Quadro comparativo dos resultados de permeabilidade.

Parâmetro	Solo Puro	90/10	80/20	70/30	60/40
Permeabilidade (cm/s)	$2,16 \times 10^{-6}$	$1,19 \times 10^{-6}$	$2,35 \times 10^{-6}$	$2,25 \times 10^{-6}$	$2,88 \times 10^{-6}$

Fonte: Autor, 2018.

Com base no quadro, é possível observar poucas mudanças no coeficiente de permeabilidade, destacando o menor valor de $1,19 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ obtido para a amostra de 90/10. Vale ressaltar que todos os coeficientes, por si só, já caracterizam uma condição de permeabilidade baixa para as amostras devido a predominância de finos nas composições. Como mostram os resultados acima, a adição de 40% do RPP no solo se mostrou benéfica, levando em consideração que pouco alterou nos resultados da pesquisa mesmo substituindo o material SP em 40%. Os valores de permeabilidade associados aos demais resultados obtidos ao longo desta pesquisa, mostram uma possível alternativa ao uso, até então exclusivo, do material argiloso. No entanto, vale salientar que, para a aplicação desta proposta, serão ainda necessários ensaios no âmbito químico e ambiental, além da análise do módulo de resiliência.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como considerações finais desta pesquisa, temos

- Os resultados alusivos aos ensaios de granulometria comprovaram a predominância de material fino (silte e argila) para todas as misturas, podendo notar pouca mudança em relação a quantidade de finos do solo puro.
- Apesar dos resultados do índice de plasticidade ter variado entre 12% e 18,5%, não foram observadas mudanças significativas nestes parâmetros, sendo que, tanto as misturas quanto o solo puro, mantiveram a mesma classificação pelo sistema *Highway Research Board* (HRB), A-7-5.
- Embora todos os coeficientes de permeabilidade, por si só, já caracterizarem condições de permeabilidade baixa para todas as misturas devido a

predominância de finos nas composições, pode-se destacar o menor valor de $1,19 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ obtido para a amostra 90/10.

- A expansão e o ISC obtidos mostraram que as amostras de 90/10 e 60/40 apresentaram valores interessantes, surgindo como uma possível alternativa para emprego como parte do corpo de aterro em projetos de terraplenagem, uma vez que atenderam parâmetros da Norma 108/2009 DNIT, em termos exclusivamente geotécnicos.
- Com o aumento das porcentagens de resíduo no solo, foi observado o aumento da umidade ótima e a redução da densidade seca máxima, que pode ser atribuído ao aumento da fração de argila, causado pelo incremento RPP ao solo.
- Em termos do objetivo do trabalho, a variabilidade do comportamento geotécnico foi “mínima”, mas para questões de valorização do resíduo, pode ser considerado benéfico. Isto ocorre, pois, os acréscimos estudados foram de até 40% de resíduo, resultando em menor extração de solo.
- Tendo em vista que a eficiência do comportamento estrutural de camadas de subleito está diretamente ligada com o conhecimento do módulo de resiliência recomenda-se estudo deste parâmetro como sugestão de trabalho futuro.
- Para viabilizar o uso deste resíduo apresentado nesta pesquisa, são necessários ensaios complementares nos âmbitos químico e ambiental, considerados de extrema importância para elucidar tal capacidade de aplicação, ficando assim, como sugestões para trabalhos futuros.

5. REFERÊNCIAS

ANFACER. **História da Cerâmica**. Disponível em:
<<http://www.anfacer.org.br/historia-ceramica>>. Acesso em: 22 mar. 2018.

ARAUJO, Silvia Cristina Justo Fernandes Nobre de. **Análise de microestrutura e de características geotécnicas de misturas de resíduo de polimento de porcelanato e solo**. 2016. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

ARAUJO, Silvia Cristina Justo Fernandes Nobre de; COSTA, Carina Maia Lins; PAULINO, Rafael de Medeiros. Avaliação química e mineralógica de Resíduo de Polimento de Porcelanato para viabilidade de uso para execução de aterros compactados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18, 2016, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2016. p. 1 - 6.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: resíduos sólidos: classificação**. Rio de Janeiro, p. 71, 2004.

COSTA, Cristina Henning da. **Estudo ecotoxicológico para valorização do resíduo produzido no processo de polimento de piso porcelanato na indústria cerâmica**. 2010. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

COUTO NETO, Alair Gonçalves. **Construção civil sustentável: avaliação da aplicação do modelo de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil do SINDUSCON-MG em um canteiro de obras - um estudo de caso**. 2007. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

DAS, Braja M.; SOBHAN, Khaled. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 8. ed. [s. L.]: Cengage Learning, 2010. Noveritis do Brasil.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 108: Terraplenagem - Aterros - Especificação de Serviço**. Rio de Janeiro, 2009. 13 p.

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

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G., SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A. e FRANÇA, A. B. (2007) **Bacia do Paraná**. In: Cartas Estratigráficas. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287, mai/nov. 2007.

SCARMAGNANI, Jakson Alexandre. **Análise das propriedades mecânicas de um solo da formação palermo estabilizado mecanicamente**. 2013. 15 f. TCC Graduação (Curso de Engenharia Civil), Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma.

SARTOR, Ronan Rosso. Análise da Permeabilidade de Solos da Formação Palermo para Utilização em Selos de Impermeabilização em Áreas Degradadas pela Mineração de Carvão. 2013. 17 f. TCC (Graduação em Engenharia Civil). Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma.

SCHEFFER, Carlos Alexandre. **INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE RESÍDUO DE POLIMENTO DE PORCELANATO NAS PROPRIEDADES DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS**. 2017. 24 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Unesc – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2017.

SILVA, Filipe Bruno dos Santos; COSTA, Carina Maia Lins; MEDEIROS, Guilherme Adler Aciole. Avaliação do Índice de Suporte Califórnia de Misturas de Solo e Resíduo de Polimento de Porcelanato. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18, 2016, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2016. p. 1 - 6.