

# **CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE UM SOLO ARGILOSO ESTABILIZADO COM RESÍDUO DE RETIFICAÇÃO CERÂMICA PARA UTILIZAÇÃO EM PAVIMENTOS**

Gabriela Francisco Lino (1), Pedro Arns (2), Ingrid Milena Reyes Martínez Belchior (3)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense

(1) [gabriela.fino@hotmail.com](mailto:gabriela.fino@hotmail.com), (2) [par@unesc.net](mailto:par@unesc.net), (3) [ingridbelchior17@gmail.com](mailto:ingridbelchior17@gmail.com)

## **RESUMO**

Devido ao desenvolvimento urbano ter ocorrido de forma acelerada, houve um aumento crescente de geração de resíduos industriais e de serviço. Isto provocou a busca de meios e artifícios para o descarte adequado dos mesmos. O presente trabalho teve a finalidade de analisar o aproveitamento de um Resíduo de Retificação Cerâmica (RRC), como estabilizante de um solo de formação Geológica Palermo. Realizaram-se os ensaios de caracterização física e mecânica do solo no seu estado natural. Nos ensaios mecânicos de compactação, foram utilizadas as energias do Proctor Normal (PN) e Proctor Intermediário (PI), determinando-se a densidade máxima seca, umidade ótima, Índice de Suporte Califórnia (ISC) e a expansão. Na sequência, preparou-se as misturas solo/RRC, nos percentuais de 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 60% de RRC. Estas misturas foram submetidas ao ensaio de compactação na energia do PN, e misturas de 20%, 40%, 60% e 100% de RRC, foram submetidas a energia PI. Para a determinação do ISC, as misturas foram preparadas e compactadas na densidade máxima seca média e umidade ótima média, obtidas na energia do PN das misturas do presente trabalho. Com relação ao ISC, verificou-se que o mesmo foi crescente, atingindo seu valor máximo com a mistura de 20% de RRC, e a partir deste houve um decréscimo do seu valor. A expansão diminuiu em misturas com até 40% de RRC, e com dosagens superiores incrementou, até ultrapassar a expansão do solo natural. Os resultados apresentaram um comportamento diferente ao esperado, porém, observou-se que todas as misturas estudadas, compactadas aplicando a energia PI, e as misturas de 40% e 60% de RRC, aplicando a energia PN, podem ser utilizadas como material de subleito.

*Palavras-Chave: Estabilização. Solo. Resíduo de Retificação Cerâmica. Pavimentação*

## **1. INTRODUÇÃO**

Desde a época da revolução industrial, a partir do século XVIII, o desenvolvimento urbano e industrial foi se expandindo de maneira acelerada e iniciou-se a necessidade das

idades de elaborarem artifícios para a gestão de resíduos (ARAÚJO, 2016). Nas últimas décadas, a preocupação com meio ambiente marcou o início da moderna formulação da questão do ambiente global, e com isso as indústrias viram a necessidade de enquadrar-se em questões ambientais. (CHRISTÓFORI; DE OLIVEIRA; EMERICK, 2017).

No ramo da construção civil o cenário crescente de geração de resíduos não é diferente, mas torna-se ainda mais agravante quando percebe-se que nesse setor há o consumo de até 50% de todos os recursos minerais explorados no planeta (CARVALHO, 2013).

As políticas ambientais relacionadas ao tema devem voltar-se para o adequado manuseio, redução, reutilização, reciclagem e disposição desses resíduos, levando indústrias e universidades a estudarem soluções para o reaproveitamento dos mesmos (CASAGRANDE et al. 2008).

Inúmeros são os resíduos industriais gerados no Brasil e dentre eles encontra-se os resíduos derivados da indústria cerâmica (MODESTO et al. 2003). Os resíduos oriundos deste setor são originados em várias operações do processo de fabricação, sendo eles efluentes líquidos, emissões gasosas e rejeitos sólidos. (CARVALHO, 2013).

Ao contrário de outros campos produtivos, o ramo ceramista beneficia-se principalmente de matérias-primas naturais, onde o produto final obtido é constituído principalmente por transformações de compostos argilomineiras, como quartzo, feldspatos e calcários, tendo como vantagem o fato deste setor possuir grande parte de resíduos sólidos e passíveis de manipulação e transformação (MODESTO et al 2003).

O Brasil encontra-se em um lugar de destaque no setor de revestimentos cerâmicos, sendo um dos grandes protagonistas internacionais, ocupando uma importante colocação no ranking mundial de produção e consumo e exportando para todos os continentes.

Conforme informações da Associação Nacional de Fabricantes de Cerâmica para Revestimento (ANFACER), a região de Criciúma, em Santa Catarina, que tem reconhecimento como polo internacional, concentra as maiores empresas brasileiras do ramo ceramista, sendo assim, uma região com potencial favorável para estudos abrangendo métodos de reutilizar os Resíduos de Retificação Cerâmica.

A estabilização de solos é uma alternativa para reutilizar resíduos industriais, uma vez que há a possibilidade de adicionar resíduos ao solo para corrigir ou modificar as características do mesmo, de modo a enquadrá-lo dentro de especificações construtivas

vigentes. De acordo com Azevedo (2010), a técnica de estabilização do solo por meio mecânico, consiste na correção da granulometria e plasticidade, a partir da adição e subtração de quantidades definidas de suas frações constituintes.

A partir disso, este trabalho tem como objetivo analisar a possibilidade da utilização do Resíduo de Retificação Cerâmica (RRC) como aditivo para estabilização de um solo. Através de ensaios de caracterização e ensaios mecânicos foram analisadas diferentes dosagens de RRC inseridas em um solo argiloso, com o fim de verificar se as misturas solo/RRC têm características adequadas para serem empregadas como materiais para subcamada de pavimentos flexíveis.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o comportamento geotécnico de um solo argiloso estabilizado com RRC, verificando através de ensaios as características físicas e geotécnicas de misturas de solo/RRC com o fim de procurar dosagens que cumpram com os requisitos técnicos para materiais de sub-base e subleito de pavimentos flexíveis.

### 2.2 OBJETIVO ESPECIFICO

Para a consecução do objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são propostos:

- Determinar as características físicas (granulometria, limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP)) do solo puro e de misturas solo/RRC;
- Determinar a umidade ótima de compactação e a densidade máxima seca do solo puro e das misturas solo/RRC, aplicando a energia de compactação Proctor Normal (PN).
- Determinar o Índice de Suporte Califórnia (ISC) e porcentagem de expansão das misturas solo/RRC, aplicando as energias de compactação Proctor Normal (PN) e Proctor Intermediária (PI);

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

Para este estudo, foram utilizados os seguintes materiais: solo de formação Geológica Palermo e Resíduo de Retificação Cerâmica (RRC), conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1: (a) solo de formação Geológica Palermo; (b) resíduo de retificação cerâmica (RRC)



(a)



(b)

#### 3.1.1 Solo

O solo utilizado nesta pesquisa foi o de Formação Geológica Palermo e oriundo do Parque Científico e Tecnológico (IPARQUE), da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), localizado no bairro Sangão do município de Criciúma. A região sul de Santa Catarina caracteriza-se por presença maciça de solos Formação Geológica Palermo. Segundo Sartor (2013), a espessura total dessa formação na região dos municípios de Criciúma e Forquilha chega a aproximadamente 92 metros.

De acordo com Rostirolla (2013), a Formação Geológica Palermo é caracterizada pela ocorrência de rochas sedimentares, onde nela são encontrados siltitos, siltitos arenosos,

predominando folhelhos silticos argilosos, os quais tendem a formar solos residuais dos tipos silto-argilosos e argilas siltosas, com coloração variando entre o cinza, amarelo e o roxo.

As propriedades físicas do solo estudado aplicando a energia PN são mostradas na Tabela 01.

Tabela 1: Caracterização solo natural

Características	Resultados
Limite de liquidez	59%
Limite de plasticidade	45%
Índice de plasticidade	14

### 3.1.2 Resíduo de retificação cerâmica (RRC)

O RRC é gerado no final da linha de produção de revestimentos cerâmicos. Nessa etapa final, rebolos diamantados de alta capacidade de remoção com ajuda de água trabalham sobre as laterais das peças para promover o seu perfeito esquadrejamento.

O resíduo produzido nesta etapa final constitui-se por uma mistura de água, material cerâmico e esmalte, gerando uma pasta denominada “lodo de acabamento”, o qual segundo Carvalho (2013), após ser desidratado, é descartado diretamente em aterros classe IIA, apesar do seu potencial como matéria-prima alternativa para produção de novos materiais.

## 3.2 MÉTODOS

A metodologia utilizada abrangeu a caracterização física e mecânica dos materiais puros e de misturas de solo/RRC. Dentro da caracterização física foram realizados ensaios de granulometria e determinação das propriedades de plasticidade. Posteriormente, a caracterização mecânica consistiu em ensaios de compactação, aplicando as energias de

PN e PI, e na determinação do ISC e a porcentagem de expansão. As normas referentes a cada ensaio são expostas na Tabela 2.

Tabela 2: Normas ABNT utilizadas no preparo e realização dos ensaios

Título da norma	Código da norma
Preparação de amostras para ensaios de compactação e ensaios de caracterização	NBR 6457/2016
Análise granulométrica	NBR 7181/2016
Determinação do limite de liquidez	NBR 6459/2016
Determinação do limite de plasticidade	NBR 7180/2016
Ensaio de compactação	NBR 7182/2016
Índice de suporte Califórnia	NBR 9895/2016

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Em primeiro lugar foi avaliada a distribuição granulométrica dos materiais puros, solo e RRC. Devido ao RRC apresentar uma granulometria muito fina, optou-se por determinar a distribuição do tamanho dos grãos deste material através do uso de um Granulômetro Laser modelo CILAS 1064 Líquido, com capacidade de detecção de diâmetros entre 0,04  $\mu\text{m}$  - 500  $\mu\text{m}$ . A curva granulométrica correspondente ao RRC é mostrada na Figura 2. Observou-se que o RRC é composto, predominantemente, por partículas de diâmetros entre 1 e 10  $\mu\text{m}$ .

A granulometria do solo puro foi obtida através do método de peneiramento simples e está apresentada na Figura 3. O ensaio de peneiramento simples mostrou que o solo da Formação Geológica Palermo, utilizado neste estudo, é um solo predominantemente argiloso, pois 92,8% das partículas passaram na peneira No.200 (ou malha 0,074mm). Mesmo sendo um solo de granulometria fina, observou-se que o tamanho dos grãos do solo eram significativamente maiores que o tamanho dos grãos do RRC estudado.

Figura 2: Distribuição granulométrica do RRC obtida através de granulometria laser.

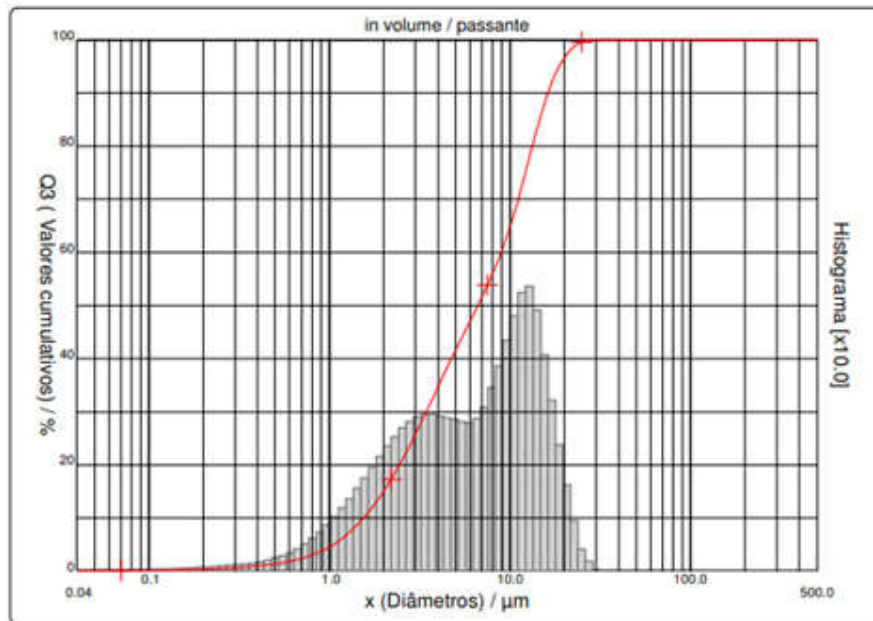
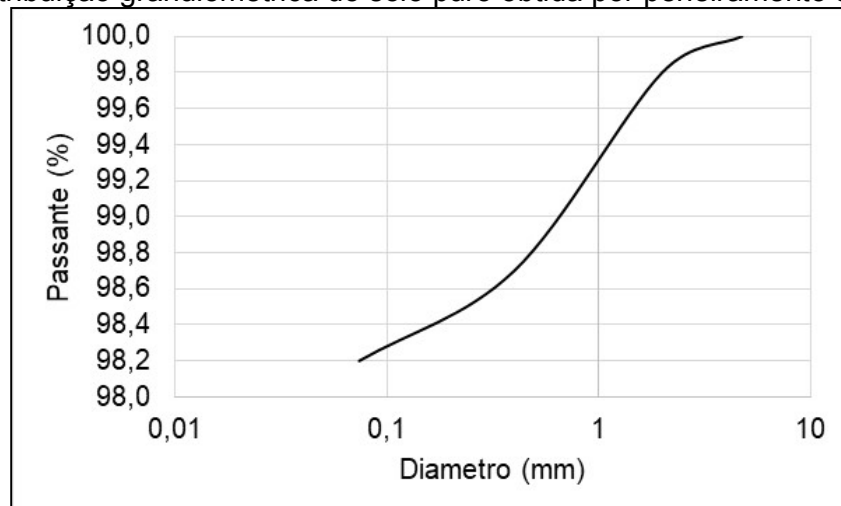


Figura 3: Distribuição granulométrica do solo puro obtida por peneiramento simples.



Em relação a avaliação da plasticidade, o RRC apresentou grande dificuldade para ser moldado, o que impossibilitou determinar propriedades de plasticidade, como o limite de liquidez e limite de plasticidade, deste material. Portanto, somente foi possível determinar os parâmetros de plasticidade para o solo puro e para a mistura com menor porcentagem de RRC (10%), como mostrado na Tabela 3. Observou-se que quando inserido a

porcentagem do resíduo no solo natural, os valores para plasticidade diminuíram, pelo possível motivo de que o RRC é um material sem propriedades plásticas.

Tabela 3: Propriedades física do solo puro e da mistura com 10% de RRC

Propriedade	Solo Puro	RRC 10%
Limite de liquidez (LL)	66	55
Limite de plasticidade (LP)	45	36
Índice de Plasticidade (IP)	21	19

A redução da plasticidade como efeito da inserção do RRC no solo indicou que este material pode ser utilizado para melhorar o comportamento de solos altamente plásticos, de forma similar aos estabilizantes químicos como a cal.

#### 4.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Na caracterização mecânica foram determinadas a umidade ótima de compactação e a densidade máximas seca (DMS) de amostras compactadas aplicando a energia PN. A Figura 4 mostra a DMS obtida com a variação da porcentagem de RRC nas misturas com solo. Observou-se que a densidade atingiu um pico de  $1,39 \text{ g/cm}^3$ , mas em geral a DMS não pareceu se modificar significativamente pelo incremento de porcentagem de RRC nas misturas de solo/RRC. Em média a densidade máxima de compactação obteve um valor de  $1,34 \text{ g/cm}^3$ .

Igualmente, a umidade ótima de compactação não apresentou significativa variação pelo incremento na dosagem de RRC. Como mostrado na Figura 5, a umidade ótima de compactação, em média, teve um valor de 32% e não teve variações significativas para as diferentes dosagens de RRC nas misturas.

Considerando que tanto a DMS como a umidade ótima de compactação não apresentaram variações significativas nas diferentes misturas de solo/RRC, optou-se por preparar as amostras para determinação do ISC e da expansão, usando os valores médios da DMS e da umidade ótima de compactação.



Figura 4: Densidade Máxima de Compactação (DMS) para amostras com diferente dosagem de RRC compactadas na energia Proctor Normal.

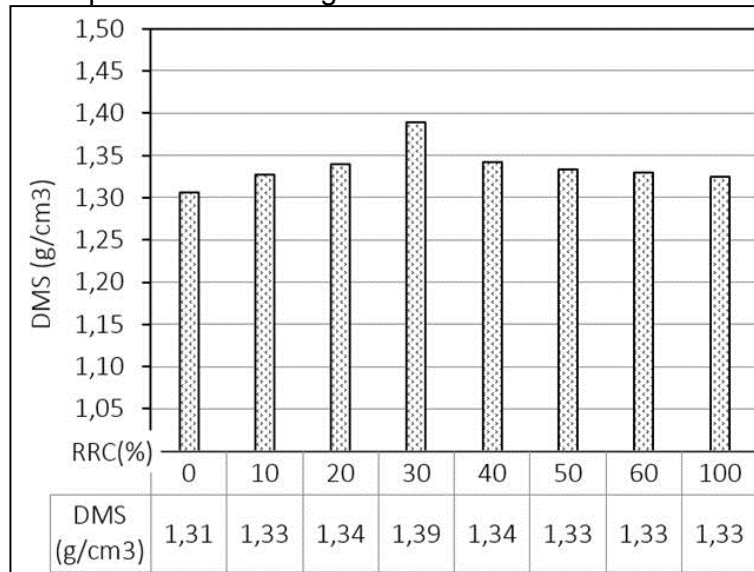
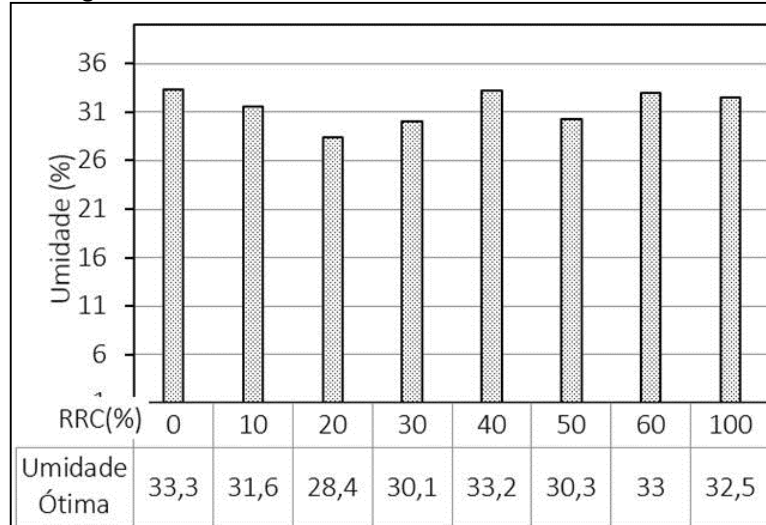


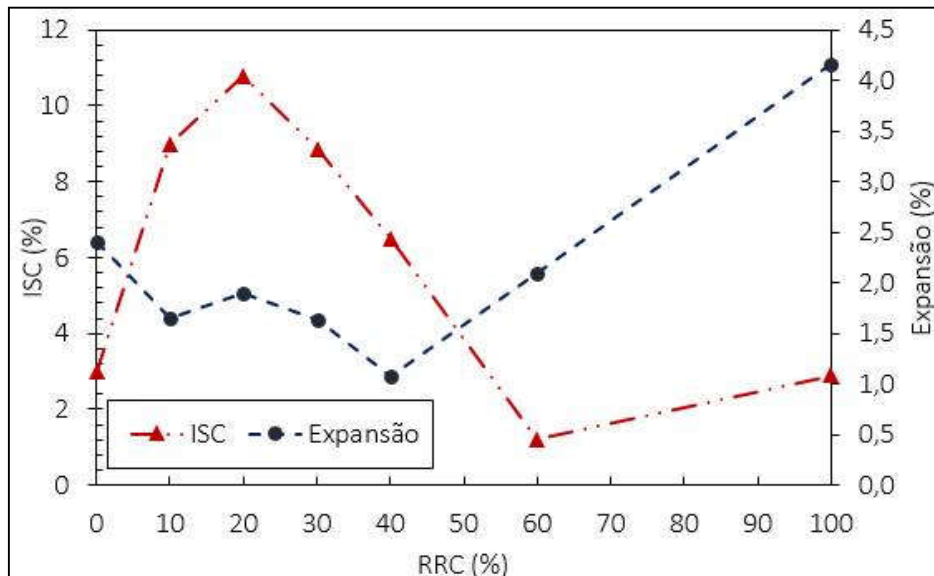
Figura 5: Umidade ótima de compactação para amostras com diferente dosagem de RRC compactadas na energia Proctor Normal.



A Figura 6 mostra resumidamente a variação do ISC e da expansão para misturas de solo com diferentes porcentagens de RRC e compactadas na energia PN. Observou-se que o ISC melhorou com as adições de até 20% de RRC, e com dosagens superiores a 20%,

houve um decréscimo do ISC, inclusive atingindo um valor inferior ao do solo natural quando a dosagem de RRC chegou no valor de 60%.

Figura 6: ISC e Expansão para misturas de solo com diferentes porcentagens de RRC.



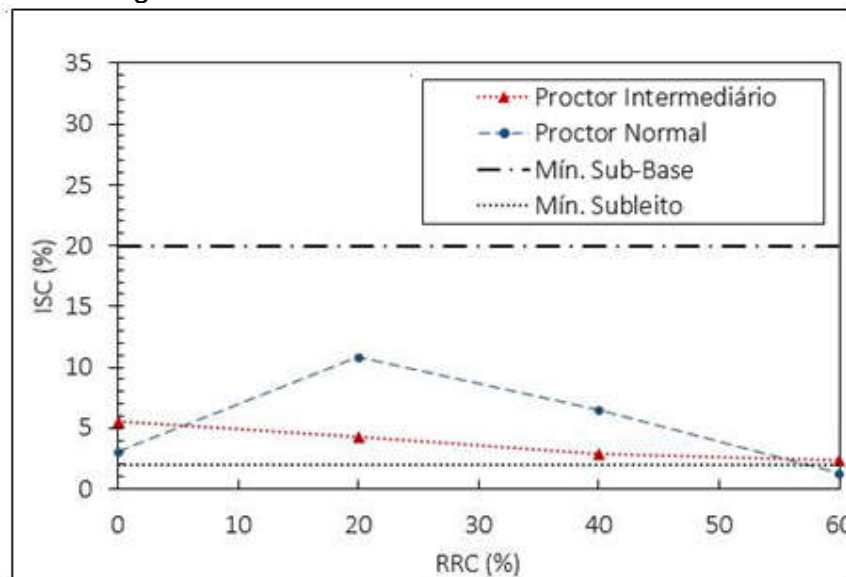
O incremento no valor do ISC nas misturas com até 20% de RRC pode ser atribuído a um melhoramento granulométrico que o resíduo conseguiu fazer dentro da mistura quando utilizado em baixas porcentagens. Essa capacidade está relacionada ao tamanho dos grãos do resíduo estudado, pois como foi visto nos ensaios de caracterização física, os tamanhos dos grãos do RRC eram muito menores que os grãos do solo, facilitando o entrosamento das amostras de solo e conseqüentemente a resistência. Para altas porcentagens de RRC, era esperado uma queda no valor do ISC, pois o RRC natural possui baixo valor de capacidade de carga (ver resultado para 100% RRC).

Os resultados do ensaio da determinação da expansão mostraram que adições de até 40% de RRC diminuem o comportamento expansivo do solo. De acordo com os resultados dos ensaios de caracterização, o RRC foi classificado como um material não plástico, o que propiciou a diminuição das propriedades plásticas e conseqüentemente refletiu na diminuição da expansividade do solo.

Dosagens maiores de 40% de RRC aumentaram a expansão, superando até a expansão do solo natural. As misturas com RRC superiores a 60%, apresentaram alta expansividade, provavelmente, relacionado ao fato de o solo não conseguir interagir com altas porcentagens de resíduo, devido a isso, essas misturas tiveram características mais próximas das correspondentes ao resíduo na sua forma pura.

Com o objetivo de verificar se as misturas de solo/RRC poderiam ser utilizadas para fins rodoviários, procedeu-se a verificação e comparação do comportamento do ISC e da expansão em amostras compactadas com energias de compactação diferentes. A Figura 7 mostra os valores de ISC obtidos para amostras compactadas com a aplicação das energias de compactação PN e PI nas dosagens de 0%, 20%, 40% e 60% de RRC. Os resultados mostraram um comportamento diferente ao esperado, pois todas as misturas, exceto a mistura contendo 60% de RRC, compactadas na energia PI, obtiveram valores de ISC inferiores que as amostras compactadas com uma energia menor (Proctor Normal).

Figura 7: Variação do ISC em misturas de solo com diferentes porcentagens de RRC compactadas nas energias Proctor Normal e Proctor Intermediária



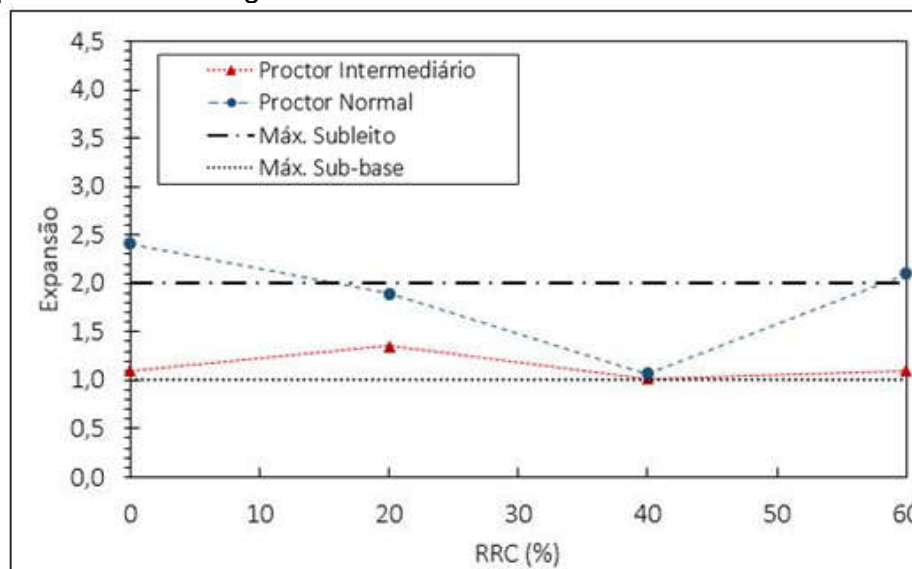
Devido à grande heterogeneidade dos componentes do RRC, estes resultados inesperados poderiam ser explicados considerando que o resíduo utilizado nas amostras

compactadas na energia PN possuíam uma composição química diferente ao resíduo usado nas amostras compactadas na energia PI, uma vez que, o RRC desse estudo foi fornecido em duas amostras diferentes pela Poligress. O estudo da composição química do RRC está fora do escopo deste estudo.

Porém, do ponto de vista geotécnico e analisando apenas o ISC, observou-se que todas as misturas estudadas aplicando a energia PI, poderiam ser utilizadas como material de subleito. Quanto as misturas estudadas aplicando a energia PN, somente a mistura contendo 60% de RRC, não atendeu o quesito para utilização como subleito. Com relação a aplicabilidade destas misturas como material de sub-base, nenhuma das misturas atendeu ao requisito de ISC mínimo de 20%, portanto, estas misturas não devem ser aplicadas para este fim ao menos que sejam tratadas com um agente estabilizante adicional como a cal, por exemplo.

Enquanto ao quesito da expansão, observou-se na figura 8 que a aplicação de uma energia de compactação maior conseguiu reduzir os valores de expansão das diferentes misturas. Amostras com 20% e 60% de RRC compactadas na energia PN registraram expansões muito próximas do limite estabelecido para material de subleito, e com o incremento da energia de compactação (para energia PI) estas misturas ficaram visivelmente aptas para serem usadas como material de subleito.

Figura 8: Variação da expansão em misturas de solo com diferentes porcentagens de RRC compactadas nas energias Proctor Normal e Proctor Intermediária



Ao analisar simultaneamente os resultados de expansão e ISC, todas as misturas com a aplicação da energia de compactação PN e PI, obtiveram expansões maiores que as permitidas para material de sub-base de pavimentos, fato que impossibilitou a utilização do RRC para este fim. Porém, as misturas compactadas com a energia PI, atendem o quesito para material de subleito, que exige expansões menores de 2% e ISC maiores de 2%. Com a utilização da energia PN, somente as misturas contendo 20% e 40% RRC, atenderam aos quesitos para material de subleito.

## 5. CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos nesse trabalho, pode-se concluir que:

- Em geral a adição de porcentagens de RRC no solo não modifica significativamente a densidade máxima seca e umidade ótima de compactação feitas a partir do ensaio de compactação Proctor Normal;
- Ocorre um aumento no ISC com porcentagens de até 20% de RRC, atribuído a um melhoramento granulométrico que o resíduo consegue fazer dentro da mistura em baixas porcentagens;
- O RRC é um material não plástico, devido a isso, sua mistura com o solo propícia a diminuição das propriedades plásticas e conseqüentemente isso se reflete na diminuição da expansividade do solo;
- Os resultados obtidos foram diferentes dos esperados, porém, observa-se que todas as misturas estudadas, compactadas aplicando a energia PI, e as misturas de 20% e 40% de RRC, aplicando a energia PN, podem ser utilizadas como material de subleito, pois apresentam um ISC acima do mínimo requerido bem como expansão abaixo do mínimo exigido.

## 6. TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo poderia ser complementado com os seguintes tópicos de investigação:

- Influência da adição de diferentes estabilizadores químicos, como cimento e cal nas misturas de solo/RRC estudadas, aplicando inclusive diferentes tempos de cura.
- Efeito da inserção de RRC no comportamento mecânico de solos predominantemente arenosos.
- Análise microscópica e mineralógica do efeito da inserção do RRC como agente estabilizador de solos.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, Silvia Cristina Justo Fernandes Nobre de. **Análise de microestrutura e de características geotécnicas de misturas de resíduo de polimento de porcelanato e solo**. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895: Solo – Índice de Suporte Califórnia**. Rio de Janeiro, 2016.
- AZEVEDO, André Luis Cairo de. Estabilização de solos com adição de cal: um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal. 2010.

CARVALHO, Eduardo Viviani de et al. Utilização do resíduo da retífica de cerâmica de revestimento na produção de concreto para pavimento intertravado. 2013.

CASAGRANDE, Marcos Cardoso et al. Reaproveitamento de resíduos sólidos industriais: processamento e aplicações no setor cerâmico. **Cerâmica Industrial**, v. 13, n. 1/2, p. 34-42, 2008.

CERÂMICA brasileira é destaque, pelo segundo ano consecutivo, no maior festival de design do mundo. 2016. Disponível em: <<http://www.anfacer.org.br/single-post/2016/04/13/CERÂMICA-BRASILEIRA-É-DESTAQUE-PELO-SEGUNDO-ANO-CONSECUTIVO-NO-MAIOR-FESTIVAL-DE-DESIGN-DO-MUNDO>>. Acesso em: 26 mar. 2018.

CHRISTÓFORI, João Batista; DE OLIVEIRA, Patrycia Pansini; EMERICK, Larícia Olaria. SUSTENTABILIDADE NA DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Revista Univap**, v. 22, n. 40, p. 636, 2017.

HISTÓRIA DA CERÂMICA. Disponível em: <<http://www.anfacer.org.br/historia-ceramica>>. Acesso em: 24 mar. 2018

MODESTO, C. et al. Obtenção e caracterização de materiais cerâmicos a partir de resíduos sólidos industriais. **Cerâmica Industrial**, v. 8, n. 4, p. 14-18, 2003.

ROSTIROLLA, Rafael Casagrande. Determinação dos parâmetros físicos e mecânicos dos solos da Formação Palermo e Rio Bonito do município de Criciúma-SC. 2013.

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.