

## AVALIAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO SIMPLES E TRAÇÃO DE RESÍDUO DE ÁGATA ARTIFICIALMENTE CIMENTADO

ASSESSMENT OF COMPRESSIVE STRENGTH AND TENSILE STRENGTH OF ARTIFICIALLY CEMENTED AGATE RESIDUE

Márcio Felipe Floss<sup>1</sup>, Igor Marasini de Rezende<sup>2</sup>, Pedro Henrique Gelain Ferreira<sup>3</sup>, Antônio Thomé<sup>4</sup>, Nilo Cesar Consoli<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Doutor em Geotecnia, Universidade de Passo Fundo, RS. E-mail: mfloss@gmail.com

<sup>2</sup>Graduando em Engenharia Civil, Universidade de Passo Fundo, RS. E-mail: igormderezende@gmail.com

<sup>3</sup>Graduando em Engenharia Civil, Universidade de Passo Fundo, RS. E-mail: pedrogelainferreira@gmail.com

<sup>4</sup>Doutor em Geotecnia, Universidade de Passo Fundo, RS. E-mail: thome@upf.br

<sup>5</sup>Doutor em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS. E-mail: consoli@ufrgs.br.

### RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar o uso de uma metodologia racional de dosagem de solo/cimento, utilizando resíduo do beneficiamento de pedras semipreciosas, analisando o teor de cimento, porosidade e vazios/cimento, por meio de ensaios de resistência à compressão simples ( $q_u$ ) e tração ( $q_t$ ) de amostras do resíduo artificialmente cimentado. Um programa de ensaios de compressão simples e diametral, variando a porosidade ( $\eta$ ) e o teor de cimento ( $C$ ) foi realizado neste estudo. Verificou-se que uma função de potência se adapta bem como tendência para a variação dos valores de resistência à compressão não confinada, bem como para a variação do teor de cimento e da porosidade da mistura compactada. Mostrou-se, também, que a relação de vazios/cimento ( $\eta/Civ$ ) é um bom parâmetro para a avaliação da resistência à compressão simples e tração das amostras de resíduo/cimento, para todas as porosidades e teores de cimento. Também foi possível encontrar uma relação única entre a resistência à tração e a resistência à Compressão simples ( $q_t/q_u$ ), do material, independentemente da relação de vazios/cimento, resultando na relação de 0,14.

**Palavras-chave:** Solo-cimento; Resíduo de Ágata; Areia Fina; Resistência à Compressão Simples; Resistência à Tração.

### ABSTRACT

This study aims to evaluate the use of a rational dosage methodology of soil/cement using a semi-precious stones by product, analyzing the cement content, porosity and voids / cement through unconfined compressive strength ( $q_u$ ) and splitting tensile strength ( $q_t$ ) of an artificially cemented waste samples. A program test, varying the porosity ( $\eta$ ) and the cement content ( $C$ ) was used in this study. It was found that a power function adapts well to the unconfined compressive strength values as well as with increasing cement content and reducing the porosity of the compacted mixture. It was also shown that the ratio of voids / cement ( $\eta / Civ$ ) is a good parameter for evaluating the unconfined compressive strength and splitting tensile strength for by products / cement samples for all cement and porosity levels. It was also possible to find a unique relationship between ( $q_t/q_u$ ) of the material, regardless of empty relationship voids/cement, resulting in the ratio of 0.14.

**Keywords:** Soil-cement; Agate Residue; Fine Sand; Compressive Strength; Tensile Strength.

### 1 – INTRODUÇÃO

O aumento populacional, impulsionando o consumo exagerado de materiais naturais, tem levado a uma preocupação ambiental do destino dos resíduos gerados. No processo de beneficiamento de pedras preciosas são gerados resíduos os quais são, algumas vezes, depositados diretamente na natureza sem controle ou proteção ambiental. As alternativas de reuso existentes com aplicação na Engenharia Civil são várias, por exemplo, em camada compactada de solo-cimento. (THOMÉ *et al.* 2003; CONSOLI; CRUZ; FLOSS, 2010, 2011; DALLA ROSA; THOMÉ; DONATO, 2014). Essa técnica, utilizada mundialmente para o melhoramento de solos, se dá por meio da adição de cimento Portland na mistura de uma camada compactada de solo-cimento, sobre um solo de baixa resistência. Os casos propícios são os mais variados, por exemplo, na construção de bases para plataformas rodoferroviárias, camada de suporte para fundações

superficiais, no encapsulamento de solos contaminados e como barreiras de contenção de contaminantes.

Embora a ruptura de solos em certos casos se dê em razão de tensões de tração são utilizados os ensaios de compressão simples para analisar a resistência de solos-cimento, por meio da variabilidade de teores de cimento e densidade das amostras e, assim, comparados com a resistência à tração de vários tipos de solos. (CLOUGH *et al.* 1981; CONSOLI; CRUZ; FLOSS, 2010; 2011)

Consoli *et al.* (2007) desenvolveram a primeira metodologia de dosagem racional para solo-cimento considerando a relação de índice de vazios/teor de cimento, por meio da porosidade da amostra em relação ao teor volumétrico de cimento, para avaliar a resistência à compressão simples de amostras de solo-cimento.

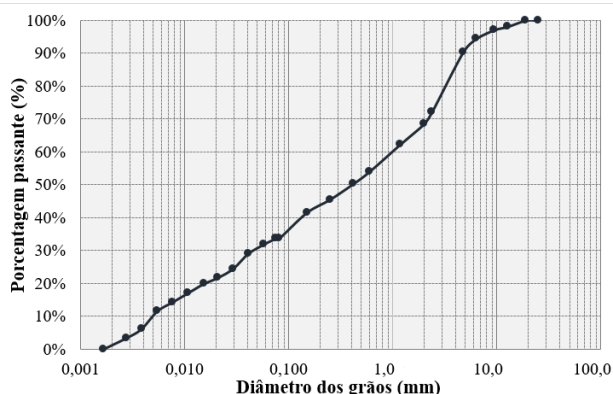
Este estudo tem por objetivo avaliar a resistência à compressão simples e tração, bem como a sua relação, por meio da variação do teor de cimento e porosidade em uma amostra de resíduo de Ágata. As contribuições deste estudo

permeiam a necessidade de se utilizar resíduos e diminuir os gastos de deposição e contaminações geradas a partir da deposição inadequada dos mesmos.

## 2 – MATERIAIS

O resíduo de Ágata utilizado no estudo é oriundo do beneficiamento de pedras semipreciosas, tendo sido obtido na região de Soledade, no sul do Brasil. Na Figura 1 é apresentada a curva granulométrica do material original.

Figura 1 – Curva granulométrica do resíduo



O resíduo foi lavado e peneirado, obtendo o material passante e retido nas peneiras 40 e 200 respectivamente. O material foi classificado (ASTM, 2010), como areia fina mal graduada, não plástica, com peso específico dos sólidos de 26,1 kN/m<sup>3</sup>.

Análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foram realizadas para analisar o formato de grão e os elementos químicos presentes em amostra do resíduo. O estudo foi realizado no Laboratório de Microscopia Eletrônica do Parque Científico e Tecnológico e Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, obtido a partir do MEV modelo VEGA 3, da Shimadzu. As amostras foram previamente secas e preparadas em *stubs*, tendo sido metalizados e recobertos por material condutor de Ouro.

A avaliação dos elementos químicos são apresentados na Figura 2, apresentando um elevado percentual de Silício (Si) e Oxigênio (O), caracterizado pelo mineral Quartzo presente na amostra. Na Figura 3 é apresentado o formato dos grãos com aumento de 200 vezes, caracterizando-se com formato angular das partículas.

Figura 2 – Análise de EDS da amostra de resíduo

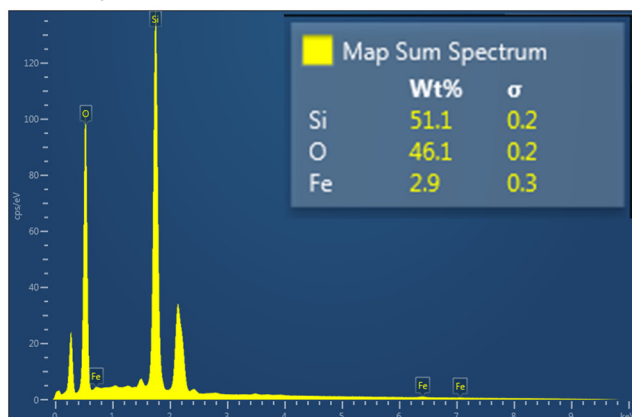
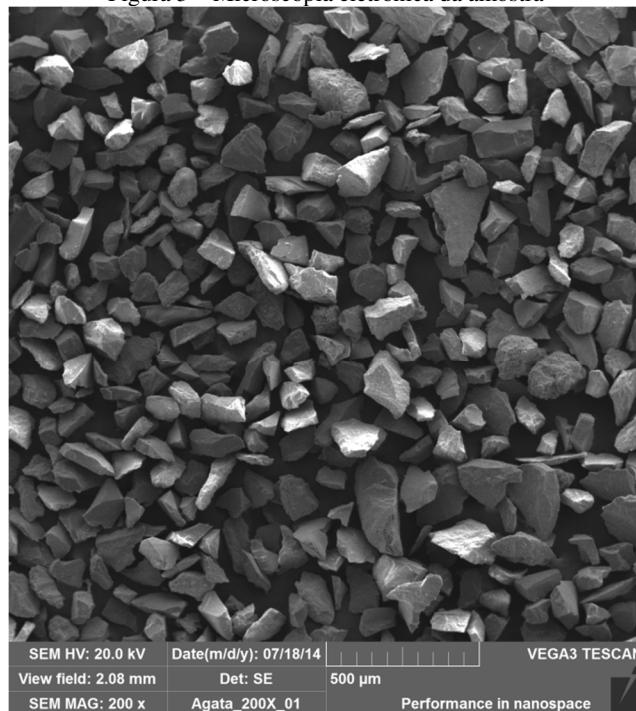


Figura 3 – Microscopia eletrônica da amostra



A análise mineralógica revelou que as partículas de areia são predominantemente de quartzo, com tamanho de grão equivalente à areia fina, com diâmetro médio efetivo ( $D_{50}$ ) de 0,19 milímetros, sendo o coeficiente de uniformidade e de curvatura de 2,33 e 0,89, respectivamente. Os índices de vazios mínimos e máximos são 0,65 e 0,95, respectivamente. Na Tabela 1 é apresentado o resumo dos índices físicos do material.

Tabela 1 – Índices físicos da areia fina de Ágata

Índices Físicos	Areia Fina de Ágata
Peso específico real dos grãos ( $\gamma_s$ )	26,1 kN/m <sup>3</sup>
Coefficiente de uniformidade (Cu)	2,33
Coefficiente de curvatura (Cc)	0,89
Diâmetro efetivo ( $D_{50}$ )	0,19 mm
Índice de vazios ( $e_{\text{máximo}}$ )	0,95
Índice de vazios ( $e_{\text{mínimo}}$ )	0,65

O agente cimentante utilizado foi cimento Portland de alta resistência inicial (CP-V - ARI). O ganho rápido de resistência permite utilizar como tempo de cura de sete dias. O peso específico dos grãos de cimento é 31,5 kN/m<sup>3</sup>.

Água destilada foi utilizada para a caracterização do material e para a moldagem dos corpos de prova para os ensaios de resistência à compressão simples e tração.

## 3 – METODOLOGIA

A seguir são apresentados os procedimentos utilizados para a execução do trabalho.

### 3.1 Moldagem e Cura dos Corpos de Prova

Depois de todos os materiais necessários para cada corpo de prova serem pesados, iniciou-se a mistura dos mesmos, primeiramente homogeneizando o resíduo com o cimento. Então adicionou-se a água e misturou-se novamente até adquirir a homogeneidade da amostra. A quantidade de cimento para cada mistura foi calculada com base na massa de resíduo seco e o teor de umidade. A amostra de 5 cm de diâmetro, por 10 cm de altura, foi em seguida compactada de forma estática em três camadas dentro de um molde tripartido cilíndrico, esscarificando o topo de cada camada. Depois do processo de moldagem, o corpo de prova foi imediatamente extraído do molde e foi medida a sua massa, diâmetro e altura com precisão de cerca de 0,01 g e 0,1 mm, respectivamente. As amostras foram, então, colocadas em sacos plásticos para evitar variações significativas de teor de umidade. As amostras foram curadas durante seis dias em câmara úmida a  $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar acima de 95%. As amostras foram consideradas aceitas quando atendessem as seguintes tolerâncias: diâmetro de  $\pm 0,5 \text{ mm}$  e altura de  $\pm 1 \text{ mm}$ ; e variação das resistências de  $\pm 10\%$  em relação à média da triplicata.

### 3.2 Ensaios de Compressão Simples

Ensaios de compressão simples (RCS), foram usados sistematicamente na maioria dos programas experimentais relatados na literatura, a fim de verificar a eficácia da estabilização com cimento ou para o acesso a importância dos fatores que influenciam na resistência de solos cimentados. Uma das razões para isto é a experiência acumulada com este tipo de teste para concreto. Os testes seguem a norma ABNT NBR 5739:2007), sendo simples e rápido, enquanto confiável e barato.

Depois da cura, as amostras foram submersas em um tanque de água por 24 h para a saturação. A temperatura da água foi controlada e mantida a  $23 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Imediatamente antes do ensaio, os corpos de prova foram removidos do tanque e secos superficialmente com um pano absorvente. Então, um ensaio de compressão simples foi realizado e a carga máxima registrada. Como critério de aceitação, foi estipulado que as resistências individuais de três amostras, moldadas com as mesmas características, não deveriam desviar-se mais de 10% da resistência média.

### 3.3 Ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Os ensaios de resistência à tração (RCD), seguiram a norma ABNT NBR 7.222:2011). A cura dos corpos de prova, a prensa automática e os critérios de aceitação das amostras foram os mesmos utilizados para os ensaios de compressão simples.

### 3.4 Planejamento Experimental

O planejamento foi executado de forma a avaliar a influência do teor de cimento, da porosidade e da relação

vazios/cimento, separadamente em relação à resistência à compressão simples e tração das amostras cimentadas.

As amostras foram moldadas com 3 índices de vazios distintos, 0,71; 0,80; e 0,89, correspondendo, respectivamente, à densidade relativa de 80, 50 e 20%, com o mesmo teor de umidade ( $\omega = 10\%$ ). Cada densidade foi moldada com seis diferentes teores de cimento: 1, 2, 3, 5, 7 e 9%. Os teores foram escolhidos seguindo experiência brasileira e internacional com solo-cimento, (por exemplo, MITCHELL, 1981; CONSOLI *et al.* 2007; CONSOLI; CRUZ; FLOSS, 2010, 2011; THOMÉ *et al.* 2005; FLOSS, 2012). Devido à dispersão típica dos resultados, tanto para os ensaios de tração e ensaios de compressão simples, um mínimo de três amostras foram ensaiadas para cada condição.

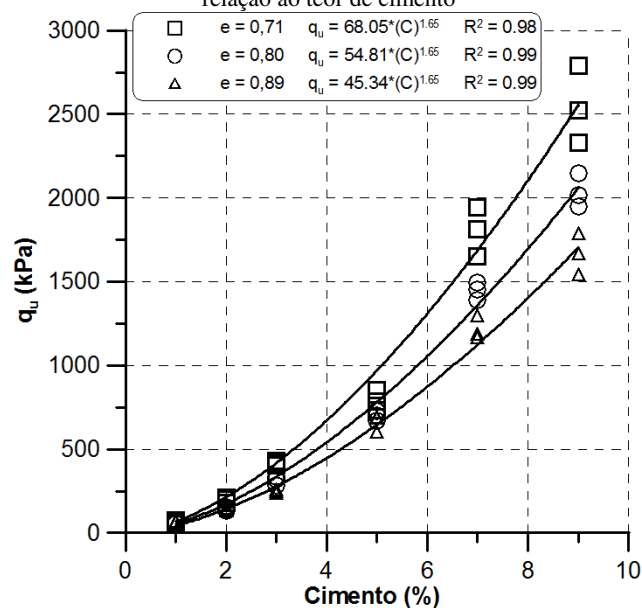
## 4 – RESULTADOS

Os resultados da pesquisa são apresentados a seguir.

### 4.1 Efeito do Teor de Cimento nas Resistências à Compressão Simples e Tração

Na Figura 4 é mostrado o gráfico referente à relação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em função do teor de cimento ( $C$ ), considerando os três índices de vazios estudados. Percebe-se que o teor de cimento tem um grande efeito sobre a resistência à compressão na mistura de cimento e resíduo, em que uma pequena adição de cimento é suficiente para gerar um ganho significativo na resistência. As linhas mostradas na Figura 4 são as melhores linhas de tendência, o que demonstra que a função de potência se adapta bem à relação  $q_u$  versus  $C$ .

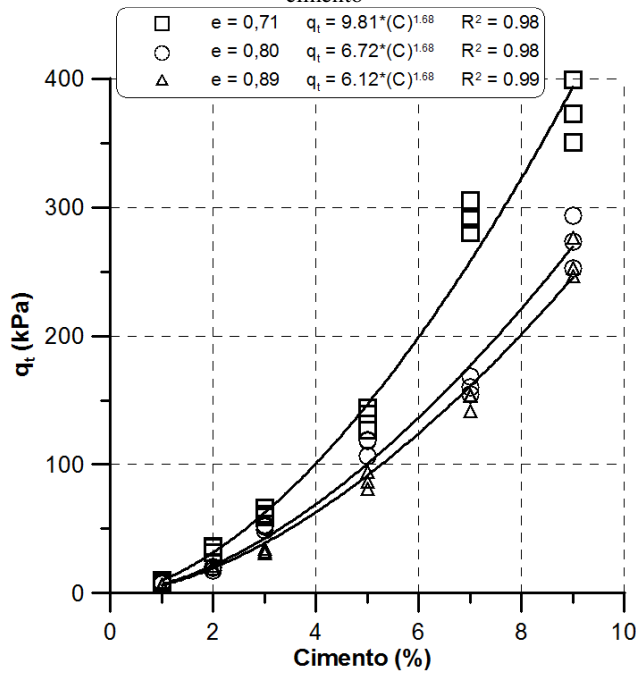
Figura 4 – Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cimento



A resistência à tração ( $qt$ ) variando com a quantidade de cimento é mostrada na Figura 5. Com um padrão semelhante aos ensaios de resistência à compressão simples,

uma função de potência também se encaixa bem com a relação  $q_t$  versus  $C$ .

Figura 5 – Variação da resistência à tração em relação ao teor de cimento



#### 4.2 Efeito da Porosidade nas Resistências à Compressão Simples e Tração

Nas Figuras 6 e 7 são apresentadas a resistência à compressão simples e tração, respectivamente, em relação à variação da porosidade das amostras. Em ambos os casos, nota-se a diminuição das resistências em decorrência do aumento da porosidade dos corpos de prova, com linhas de tendência, se adaptando mais uma vez à função de potência, na análise do resíduo-cimento.

Figura 6 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade

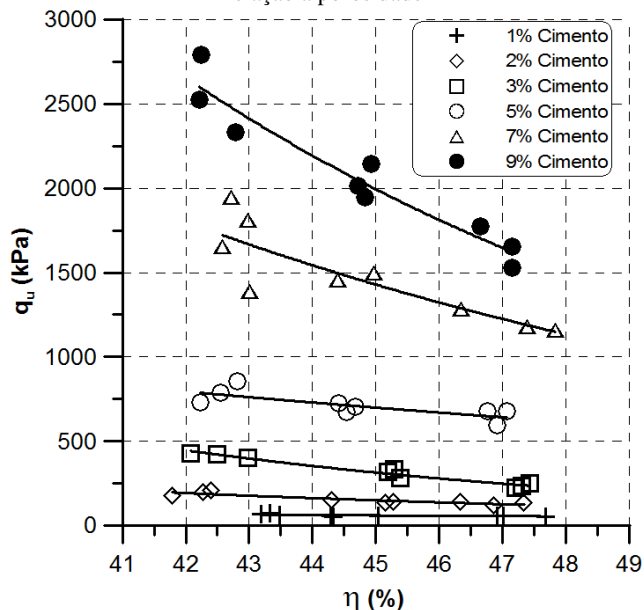
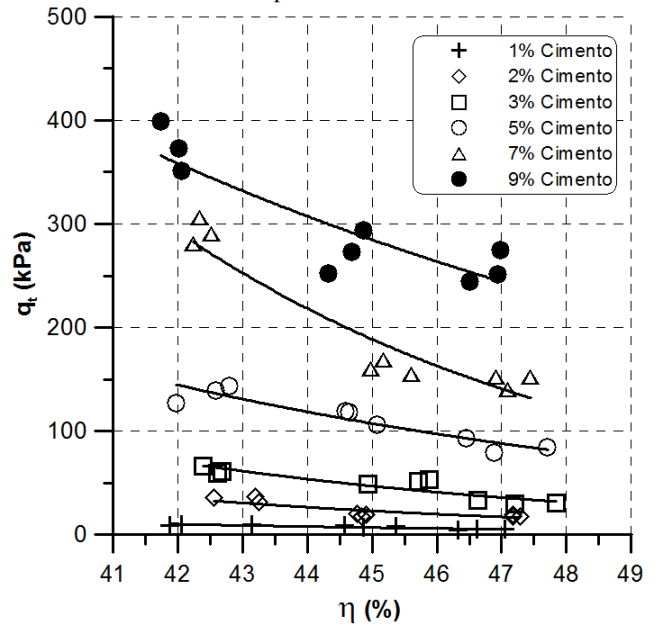


Figura 7 – Variação da resistência à tração em relação à porosidade



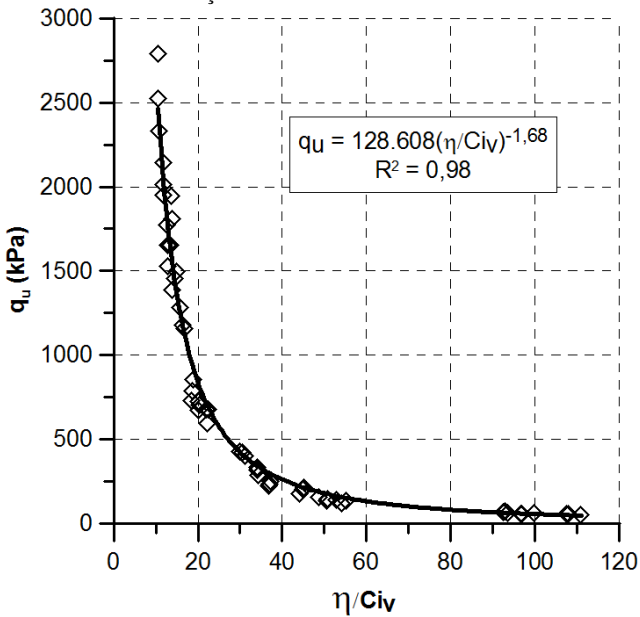
#### 4.3 Efeito da Relação Vazios/Cimento nas Resistências à Compressão Simples e Tração

Nas Figuras 8 e 9 são apresentadas as resistências à compressão simples e tração em relação à variação do fator vazios/cimento ( $n/C_{iv}$ ) [expressa como porosidade ( $n$ ) dividido pelo teor volumétrico de cimento ( $C_{iv}$ ), este último expresso como uma porcentagem do volume de cimento sobre volume total da amostra], definida pela Equação (1)

$$\frac{\eta}{C_{iv}} = \frac{\left(\frac{Vv}{V_{total}}\right)}{\left(\frac{Vc}{V_{total}}\right)} = \frac{Vv}{Vc} \quad (1)$$

Em que:  $Vv$  = volume de vazios (água + ar) da amostra;  $Vc$  = volume de cimento da amostra; e  $V_{total}$  = volume total da amostra.

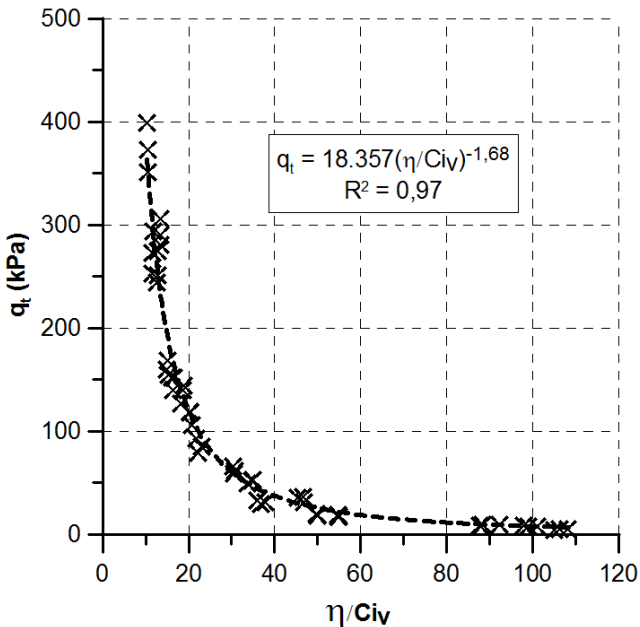
Figura 8 – Variação da resistência à compressão simples em relação ao fator vazios/cimento



Os dados apresentados na Figura 8 apresentam uma boa correlação ( $R^2 = 0,98$ ) entre  $\eta/C_{iv}$  e a resistência à compressão simples ( $q_u$ ) da amostra de resíduo-cimento estudada [ver Equação (2)], demonstrando assim que a normalização citada resulta em uma ótima ferramenta para a análise dos resultados.

$$q_u (kPa) = 128.608 \left[ \frac{\eta}{C_{iv}} \right]^{-1,68} \quad (2)$$

Figura 9 – Variação da resistência à tração em relação ao fator vazios/cimento

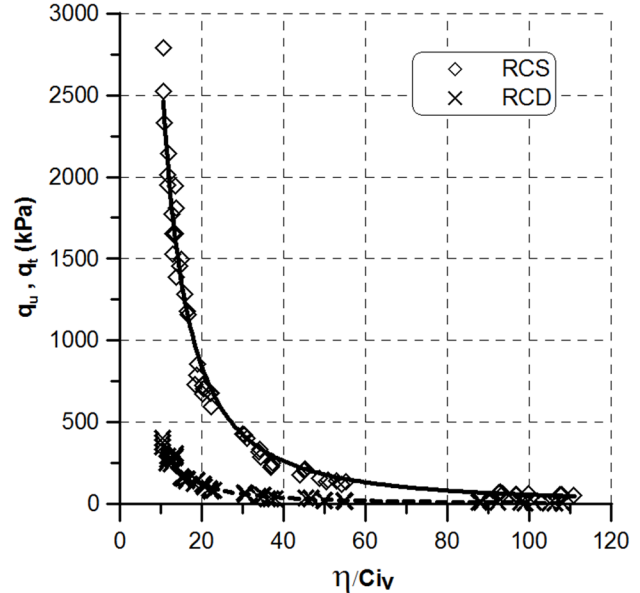


Na Figura 9 nota-se, também, uma boa correlação ( $R^2 = 0,97$ ) entre a relação ( $\eta/C_{iv}$ ) e a resistência à tração ( $q_t$ ) da amostra de resíduo-cimento [ver Equação (3)].

$$q_t (kPa) = 18.357 \left[ \frac{\eta}{C_{iv}} \right]^{-1,68} \quad (3)$$

Na Figura 10 há um resumo de todos os resultados apresentados nas Figuras 8 e 9. Ao analisar a Figura 10, bem como as equações (2) e (3), pode ser visto que apresentam tendências bastante similares.

Figura 10 – Variação de ambas as resistências à compressão simples e tração em relação ao fator vazios/cimento



A fim de verificar se a relação  $q_t/q_u$  também pode ser utilizada para a mistura de resíduo e cimento, assim como já foi utilizada em outros estudos para solo-cimento, (CONSOLI; CRUZ; FLOSS, 2010), a Equação (3) é dividida pela Equação (2), que produz a relação apresentada na Equação (4)

$$\frac{q_t}{q_u} = \frac{18.357 \left[ \frac{\eta}{C_{iv}} \right]^{-1,68}}{128.608 \left[ \frac{\eta}{C_{iv}} \right]^{-1,68}} = 0,14 \quad (4)$$

Pela Equação 4 percebe-se que a relação  $q_t/q_u$  é um escalar para a mistura resíduo-cimento, sendo independente das variáveis estudadas, porosidade, teor de cimento, ou até mesmo a relação vazios/cimento. Assim, nota-se que a resistência à tração é diretamente proporcional à resistência de compressão simples, sendo validado para toda a variação de relação de vazios e teor de cimento estudado no presente programa de investigação. Como consequência, é possível concluir que, da mesma forma que esta metodologia de dosagem racional já foi validada para solo-cimento, também pode ser validada para o uso de resíduo-cimento.

Considerando, ainda, o efeito de diferentes variáveis, o estudo pode ser centrado na resistência à tração e obter os valores de resistência à compressão simples, uma vez que eles estão intimamente relacionados por meio de um escalar, sendo o oposto também verdadeiro (0,14 para o resíduo-cimento estudado neste trabalho).

## CONCLUSÕES

A partir dos dados apresentados, as seguintes conclusões podem ser feitas:

- O aumento do teor de cimento da mistura aumenta ambas as resistências;
- A redução em porosidade da mistura compactada aumenta tanto a resistência à tração, como a resistência à compressão;
- O índice de vazios/cimento ( $\eta/C_{iv}$ ) também se mostrou um parâmetro adequado para avaliar tanto a resistência à tração ( $qt$ ), como à compressão simples ( $qu$ ) quando utilizado em amostras de resíduo-cimento; e
- A relação  $qt/qu$  é um escalar (0,14) para a mistura de resíduo e cimento avaliados neste estudo, sendo independente o fator vazios/cimento analisado.
- Em suma, metodologias de dosagem baseadas em critérios racionais podem ser utilizadas tanto em estudos de solo-cimento, como neste caso de resíduo-cimento.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**. Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222**. Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASTM – American Society of Testing and Materials. **D 2487-06**. Standard classification of soils for engineering purposes. West Conshohocken, PA, 2010.

CLOUGH, G. W.; SITAR, N.; BACHUS, R. C.; RAD, N. S. Cemented sands under static loading. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 107, n. 6, p. 799-817, 1981.

CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. Key parameters for strength control of artificially cemented soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 133, n. 2, p. 197-205, 2007. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:2\(197\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:2(197)).

CONSOLI, N. C.; CRUZ, R. C.; FLOSS, M. F. Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 136, n. 5, p. 759-763, 2010. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000278](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000278).

CONSOLI, N. C.; CRUZ, R. C.; FLOSS, M. F. Variables Controlling Strength of Artificially Cemented Sand: Influence of Curing Time. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. 5, p. 692-696, 2011. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000205](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000205).

DALLA ROSA, F.; THOMÉ, A.; DONATO, M. **Análise da viabilidade técnica da aplicação do resíduo da rolagem de pedras preciosas em estruturas de pavimentos urbanos**. In: Léo Afraneo Hartmann, Juliano Tonezer da Silva, Maciel Donato (Org.). Tecnologia e inovação em gemas, joias e mineração. 1ª ed. Porto Alegre: IGEO, UFRGS, v. 01, p. 91-98, 2014.

FLOSS, M. F. **Parâmetros de controle da resistência e rigidez de solos granulares artificialmente cimentados**. Tese (Doutorado) em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre, 2012.

MITCHELL, J. K. Soil improvement – State-of-the-art report. Proceedings, **10<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden, p. 509-565, 1981. PMID:16661947 PMCID:PMC427521.

THOMÉ, A.; DALLA ROSA, F.; FLOSS, M. F.; BENEDETTI, D. Análise do potencial de utilização do resíduo da rolagem de pedras semipreciosas na estabilização de solos. In: **IV Simpósio Brasileiro de Geossintéticos e V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental**, Porto Alegre, RS, 2003. PMCID:PMC290286.

THOMÉ, A.; DONATO, M.; CONSOLI, N. C.; GRAHAM, J. Circular footings on a cemented layer above weak foundation soil. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 42, n. 6, p. 1569-1584, 2005. <http://dx.doi.org/10.1139/t05-069>.