



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil  
Curso de Graduação em Engenharia Civil

---



**Iara Cota Pontes Soares**

**PARÂMETROS CHAVE PARA ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA DE MISTURAS  
DE SOLO ARENOSO, ARGILA E CIMENTO**

Ouro Preto,  
2023

Parâmetros chave para estimativa da resistência de misturas de  
solo arenoso, argila e cimento

Iara Cota Pontes Soares

Trabalho Final de Curso apresentado  
como parte dos requisitos para obtenção  
do Grau de Engenheiro Civil na  
Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 31/03/2023

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Felipe de Campos Loch – UFOP

Ouro Preto,

2023

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S676p Soares, Iara Cota Pontes.  
Parâmetros chave para estimativa da resistência de misturas de solo arenoso, argila e cimento. [manuscrito] / Iara Cota Pontes Soares. - 2023. 57 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Felipe de Campos Loch.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Solo-argila. 2. Solo - Porosidade. 3. estabilização química. 4. Solos - Teor de cimento. 5. Solo-cimento. 6. Feature Compression Know (Fck). I. Loch, Felipe de Campos. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



## FOLHA DE APROVAÇÃO

Iara Cota Pontes Soares

### Parâmetros chave para estimativa da resistência de misturas de solo arenoso, argila e cimento

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de engenheira civil

Aprovada em 31 de março de 2023

#### Membros da banca

Prof. Dr. Felipe de Campos Loch - Orientador(a) (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Prof. Dr. Adilson do Lago Leite - (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Prof. Me. Mateus Oliveira Xavier - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Prof. Dr. Felipe de Campos Loch, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 04/04/2023



Documento assinado eletronicamente por **Felipe de Campos Loch, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/04/2023, às 21:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0504412** e o código CRC **777DEAAD**.

*Dedico este trabalho aos meus pais e aos meus irmãos. Por todo apoio, incentivo e amor.*

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar minha gratidão aos meus amados pais, Graciana e Dunga, por todo o amor incondicional e encorajamento que me proporcionaram em cada etapa desta jornada acadêmica. Sem o carinho e o incentivo de vocês, esta conquista não seria possível.

Aos meus queridos irmãos, Ianne e Diego, quero agradecer por sempre acreditarem em mim e me apoiarem em todas as fases da minha vida. A presença e incentivo de vocês foram essenciais para a minha realização.

Ao Samuel, quero expressar minha profunda gratidão por sua paciência, amor e apoio constante. Você me deu a coragem e a confiança necessária para superar os desafios e alcançar esta conquista.

Não posso deixar de agradecer ao meu orientador, Felipe Loch, por sua orientação, conselhos e sugestões valiosas ao longo do processo de pesquisa e escrita. Sua ajuda e apoio foram fundamentais para o sucesso deste trabalho.

Por fim, agradeço aos membros da banca examinadora, Mateus Xavier e Adilson Leite, por dedicarem seu tempo e conhecimento para avaliar e contribuir para a qualidade deste trabalho.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para esta realização, meu muito obrigada.

## RESUMO

Neste estudo, foi analisado o desempenho da mistura solo-cimento-argila utilizando solo proveniente da Formação de Botucatu, com foco na resistência à compressão simples. Três variáveis independentes foram consideradas: teor de umidade, cimento e argila. Os resultados demonstraram alta resistência à compressão nas amostras de misturas solo-cimento-argila, alcançando valores de até 2,8 MPa para as amostras imersas em água e 8,3 MPa para as amostras não imersas. Verificou-se uma relação inversa entre a porosidade do solo e a resistência à compressão, indicando que a porosidade reduz a resistência. Além disso, o teor de cimento exerceu maior influência no aumento da resistência em comparação com o teor de argila. A relação vazios/cimento foi uma boa estimativa para a resistência à compressão do solo estudado, com ajuste para o expoente 0,26 para o solo classificado como areia siltosa ou argilosa em cada uma das três umidades de compactação. Entretanto, a metodologia proposta para prever a resistência à compressão das misturas SCA com base na porosidade e teor volumétrico de finos não apresentou resultado satisfatório. Em geral, verificou-se uma tendência de melhores resultados nas amostras compactadas com valores próximos ou iguais ao seu teor ótimo de umidade.

Palavras-chaves: Solo-cimento-argila; resistência à compressão; porosidade do solo; estabilização química; teor de cimento.

## ABSTRACT

In this study, the performance of the soil-cement-clay mixture was analyzed using soil from the Botucatu Formation, with a focus on compressive strength. Three independent variables were considered: moisture content, cement, and clay. The results showed high compressive strength in the soil-cement-clay mixture samples, reaching values of up to 2.8 MPa for samples immersed in water and 8.3 MPa for samples not immersed. An inverse relationship was found between soil porosity and compressive strength, indicating that porosity reduces strength. Additionally, the cement content had a greater influence on increasing strength compared to the clay content. The voids/cement ratio was a good estimate for the compressive strength of the soil studied, with an exponent adjustment of 0.26 for soil classified as silty or clayey sand at each of the three compaction moisture levels. However, the proposed methodology for predicting the compressive strength of SCA mixtures based on porosity and volumetric fines content did not yield satisfactory results. Overall, there was a tendency for better results in samples compacted with values close to or equal to their optimum moisture content.

Keywords: Soil-cement-clay; compressive strength; soil porosity; chemical stabilization; cement content.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Microestrutura da Baekma River Sand (a) não cimentada, (b) fracamente cimentada (c) medianamente cimentada e (d) fortemente cimentada de cimento. ....	20
Figura 2 – Relação encontrada por Consoli et al. (2007) a) expressa pela variação vazios/cimento e b) expressa pela variação porosidade/teor volumétrico de cimento. ....	21
Figura 3 – Relação entre a porosidade e a resistência à compressão simples. ....	23
Figura 4– Relação entre o teor de umidade e a resistência à compressão simples. ....	24
Figura 5– Relação entre o teor de cimento (C) e a resistência à compressão simples (qu). ....	25
Figura 6 – Curvas de compactação das misturas solo-cimento-argila. ....	30
Figura 7 – Etapas para as análises de dados desta pesquisa. ....	32
Figura 8 - Relação vazios/teor volumétrico de cimento na resistência à compressão simples pelos processos de ensaios com imersão para 7 dias de cura. ....	39
Figura 9 - Relação vazios/teor volumétrico de cimento na resistência à compressão simples pelos processos de ensaios com imersão para 28 dias de cura. ....	39
Figura 10 - Relação vazios/teor volumétrico de cimento na resistência à compressão simples pelos processos de ensaios sem imersão para 7 dias de cura. ....	40
Figura 11 - Relação vazios/teor volumétrico de cimento na resistência à compressão simples pelos processos de ensaios sem imersão para 28 dias de cura. ....	40
Figura 12 - Relação vazios/teor volumétrico de cimento na resistência à compressão simples pelos processos de ensaios com imersão para 7 dias de cura. ....	41
Figura 13 - Relação vazios/teor volumétrico de cimento na resistência à compressão simples pelos processos de ensaios com imersão para 28 dias de cura. ....	42
Figura 14 - Relação vazios/teor volumétrico de cimento na resistência à compressão simples pelos processos de ensaios sem imersão para 7 dias de cura. ....	42
Figura 15 - Relação vazios/teor volumétrico de cimento na resistência à compressão simples pelos processos de ensaios sem imersão para 28 dias de cura. ....	43
Figura 16 - Relação vazios/teor volumétrico de finos na resistência à compressão simples pelo processo de ensaios com imersão para 7 dias de cura. ....	46

Figura 17 - Relação vazios/teor volumétrico de finos na resistência à compressão simples pelo processo de ensaios com imersão para 28 dias de cura. ....	46
Figura 18 - Relação vazios/teor volumétrico de finos na resistência à compressão simples pelo processo de ensaios sem imersão para 7 dias de cura. ....	47
Figura 19 - Relação vazios/teor volumétrico de finos na resistência à compressão simples pelo processo de ensaios sem imersão para 28 dias de cura. ....	47
Figura 20 - Relação vazios/teor volumétrico de finos na resistência à compressão simples pelo processo de ensaios com imersão para 7 dias de cura para cada teor volumétrico (w) estudado. ....	48
Figura 21 - Relação vazios/teor volumétrico de finos na resistência à compressão simples pelo processo de ensaios com imersão para 28 dias de cura para cada teor volumétrico (w) estudado. ....	48
Figura 22 - Relação vazios/teor volumétrico de finos na resistência à compressão simples pelo processo de ensaios sem imersão para 7 dias de cura para cada teor volumétrico (w) estudado. ....	49
Figura 23 - Relação vazios/teor volumétrico de finos na resistência à compressão simples pelo processo de ensaios sem imersão para 28 dias de cura para cada teor volumétrico (w) estudado. ....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Expoente da relação $\eta/civ$ para diferentes tipos de solo.....	21
Tabela 2 – Porcentagens das frações granulométricas do solo. ....	28
Tabela 3 – Porcentagem das frações granulométricas da argila. ....	28
Tabela 4 – Índices físicos e limites de consistência. ....	29
Tabela 5 – Composição das misturas definidas para o estudo.....	29
Tabela 6 – Massa específica aparente seca e teor de umidade ótima para cada mistura SCA.....	30
Tabela 7 – Misturas definidas através do planejamento fatorial. ....	31
Tabela 8 – Composição das misturas SCA e resultados de resistência à compressão simples para 7 e 28 dias de cura – Com imersão.....	35
Tabela 9 – Índices físicos das misturas SCA – Com imersão.....	36
Tabela 10 - Composição das misturas SCA e resultados de resistência à compressão simples para 7 e 28 dias de cura – Sem imersão.....	37
Tabela 11 - Índices físicos das misturas SCA – Sem imersão.....	37
Tabela 12 – Teor volumétrico de cimento para cada mistura SCA .....	38
Tabela 13 – Resumo dos dados obtidos para o processo com imersão dos corpos de prova.....	44
Tabela 14 - Resumo dos dados obtidos para o processo sem imersão dos corpos de prova.....	44
Tabela 15 – Teor volumétrico de finos para cada mistura SCA.....	45

## LISTA DE SIGLAS

<b>ABCP</b>	Associação Brasileira de Cimento Portland
<b>ACI</b>	Instituto Americano de Concreto
<b>EMBRAPA</b>	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
<b>SUCS</b>	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
<b>AASTHO</b>	Associação Norte-Americana de Especialistas Rodoviários e de Transporte

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

$\rho$	massa específica do solo
$\rho_s$	massa específica dos sólidos
$\rho_d$	massa específica aparente seca
$w$	teor de umidade
$w_{ót}$	teor de umidade ótimo
$e$	índice de vazios
$\eta$	porosidade
$S_r$	grau de saturação
$\gamma_d$	peso específico aparente
$LL$	limite de liquidez
$LP$	limite de plasticidade
$IP$	índice de plasticidade
$TC$	tempo de cura
$C_{iv}$	teor volumétrico de argila
$A_{iv}$	teor volumétrico de argila
$qu$	tensão
$rc$	resistência à compressão
$R^2$	coeficiente de determinação
$SCA$	solo, cimento e argila
$S$	solo
$C$	cimento
$A$	argila

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Objetivo .....	17
1.1.1	Objetivos Específicos.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	Solos Artificialmente Cimentados .....	18
2.2	Metodologia Racional de Dosagem .....	19
2.3	Fatores que afetam a estabilização de solos cimentados .....	22
2.3.1	Porosidade.....	22
2.3.2	Teor de umidade .....	23
2.3.3	Teor de cimento .....	24
2.4	Misturas Solo-cimento-argila .....	26
3	METODOLOGIA .....	27
3.1	Materiais.....	27
3.1.1	Solo .....	27
3.1.2	Cimento .....	27
3.1.3	Bentonita.....	28
3.2	Caracterização dos Materiais .....	28
3.2.1	Granulometria do Solo .....	28
3.2.2	Índices físicos dos materiais .....	28
3.2.3	Definição das misturas .....	29
3.2.4	Planejamento Experimental das misturas SCA .....	31
3.3	Resistência à compressão simples.....	32
3.4	Correlações e definição dos parâmetros chave.....	32

3.5	Determinação do teor volumétrico de cimento.....	33
3.6	Determinação do teor volumétrico de finos.....	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
4.1	Misturas SCA com imersão .....	35
4.2	Misturas SCA sem imersão .....	36
4.3	Teor volumétrico de cimento .....	38
4.4	Influência do teor de umidade sobre o teor volumétrico de cimento ..	41
4.5	Teor volumétrico de finos .....	45
4.6	Influência do teor de umidade sobre o teor volumétrico de finos .....	47
5	CONCLUSÕES.....	50
	REFERÊNCIAS .....	52

## 1 INTRODUÇÃO

Do ponto de vista geotécnico, é comum que o solo natural não possua propriedades mecânicas adequadas para utilização em projetos de engenharia. Nesse cenário, segundo Ingles e Metcalf (1972), há três possibilidades de solução: aceitar o material com suas características naturais e adaptar o projeto; descartar o material local e substituí-lo; ou alterar as propriedades do solo para criar um material que atenda aos requisitos do projeto.

De acordo com Leon (2018), a aplicação de técnicas de melhoramento de solos permite que os materiais disponíveis localmente sejam cada vez mais utilizados, o que contribui para uma economia de recursos financeiros e naturais. A adição de cimento é uma das metodologias para melhorar as propriedades físico-mecânicas dos solos, conforme indicado por Baldovino (2019).

A técnica solo-cimento é definida por Freire (1976) como a mistura de solo, cimento e água que, sob compactação com teor de umidade ótimo, desenvolve um material estruturalmente resistente, estável, durável e de baixo custo. No Brasil, o solo-cimento começou a ser aplicado em meados de 1940, por iniciativa da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e com autorização da Diretoria da Aeronáutica Civil para a construção da pista de circulação do aeroporto Santos Dumont, no Rio de Janeiro (PITTA, 1995).

O solo-cimento tem sido usado com sucesso na pavimentação, revestimentos de barragens de terra, como melhoria de solo para assentamento de fundações superficiais, em canais de irrigação, entre outros projetos civis (INGLES e METCALF, 1972; PORBAHA et al., 1998; SEGANTINI, 2000; THOMÉ et al., 2005). Fatores como teor de cimento ( $C_{iv}$ ), porosidade da mistura ( $n$ ), teor de umidade ( $w$ ) e tempo de cura ( $t_c$ ) influenciam significativamente o comportamento mecânico dos solos tratados com cimento (VENSON et al., 2022).

Várias pesquisas com solo-cimento (CONSOLI et al., 2007, 2010, 2011, 2016) e solo-cal (CONSOLI et al., 2009, 2012, 2014) foram realizadas na busca por métodos de dosagem baseados em critérios racionais. As pesquisas que adotaram a dosagem fundamentada na relação porosidade/teor volumétrico cimentício apresentaram resultados satisfatórios na estimativa da resistência de solos melhorados.

Nesta pesquisa, propõe-se um procedimento para analisar os índices físicos e a relação porosidade/teor volumétrico cimentício de misturas de solo-cimento-argila, usando como base de dados os valores de resistência à compressão obtidos por Loch (2019) através de ensaios experimentais. O objetivo é estabelecer correlações entre os índices físicos e a resistência à compressão, visando compreender o comportamento dessas misturas e os fenômenos envolvidos no processo.

## **1.1 Objetivo**

Através da análise do banco de dados experimentais obtidos por Loch (2019), avaliar a precisão da relação vazios/cimento na predição da resistência à compressão simples de misturas de solo-cimento-argila. O estudo utilizou solo arenoso com pequena adição de argila. Além disso, busca-se avaliar possíveis procedimentos de dosagem, com base nos índices físicos das misturas e nos resultados de resistência.

### **1.1.1 Objetivos Específicos**

- a) Coleta do banco de dados das composições das misturas solo-cimento-argila e dos respectivos valores de resistência a compressão simples obtidos por Loch (2019);
- b) Determinar os índices físicos das misturas solo-cimento-argila;
- c) Investigar e analisar qual a influência do volume de cimento, porcentagem de argila e teor umidade nas propriedades de resistência à compressão;
- d) Determinar a relação vazios/cimento e avaliar se a relação é válida para estimar a resistência à compressão das misturas de solo-cimento-argila;
- e) Propor novos modelos de previsão da resistência à compressão.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Solos Artificialmente Cimentados

A técnica de melhoramento do solo tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores, com o objetivo de otimizar a utilização de agentes cimentantes em diferentes tipos de solo. O termo "melhoria" refere-se ao tratamento de um maciço natural, visando aumentar a resistência do solo tratado por meio de procedimentos (SALES, 1998). Dessa forma, o resultado do melhoramento do solo é um novo material geotécnico, com propriedades que atendem às exigências do projeto.

O solo-cimento é uma mistura de solo, cimento e água em proporções definidas, conforme estabelecido pelo Instituto Americano de Concreto (ACI, 2009) e pela NBR 12253, norma brasileira que regulamenta a dosagem de solo-cimento para pavimentos. De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), os pavimentos com base ou sub-base de solo-cimento são utilizados no Brasil desde 1939, quando a ABCP se juntou ao Departamento Nacional de Estradas e Rodagens (DNER) para construir a estrada Caxambu-Areias. Desde então, mais de 25.000 km de pavimentos foram executados com essa solução em todo o país (ABCP, 2009).

No entanto, o uso de solo-cimento não se limita à pavimentação e é amplamente utilizado em diversas aplicações, incluindo proteção e construção de taludes, reforço em aterros, contenção em escavações, prevenção de liquefação em areais, fabricação de blocos de alvenaria para construção civil, construção de túneis, fundações para prevenir retração, dilatação e recalques, bem como para a construção de radier para estruturas leves, entre outras aplicações (INGLES e METCALF, 1972; ACI, 2009).

Os efeitos da cimentação são determinados não apenas pela interação aglomerante e solo, mas também pelas propriedades do próprio cimento. Sendo assim, a estabilização com cimento é adequada para uma ampla variedade de solos, incluindo materiais granulares, siltosos e argilosos (LEON, 2018). No entanto, Ingles e Metcalf (1972) observam que a estabilização é mais eficaz em solos arenosos com boa graduação e plasticidade média a baixa, devido à facilidade de mistura, baixos teores de aditivos necessários e maiores resistências obtidas.

As reações de hidratação e pozolânicas são as duas reações químicas básicas responsáveis pela estabilização com cimento. De acordo com Leon (2018), em solos granulares sem a presença de argila ou pozolanas, a cimentação ocorre por meio dos produtos gerados na hidratação e hidrólise do cimento, o que promove a cimentação dos grãos nos pontos de contato. A eficiência da cimentação é maior quando a distribuição granulométrica do solo é melhor, o índice de vazios é menor e há um maior número de contatos entre as partículas.

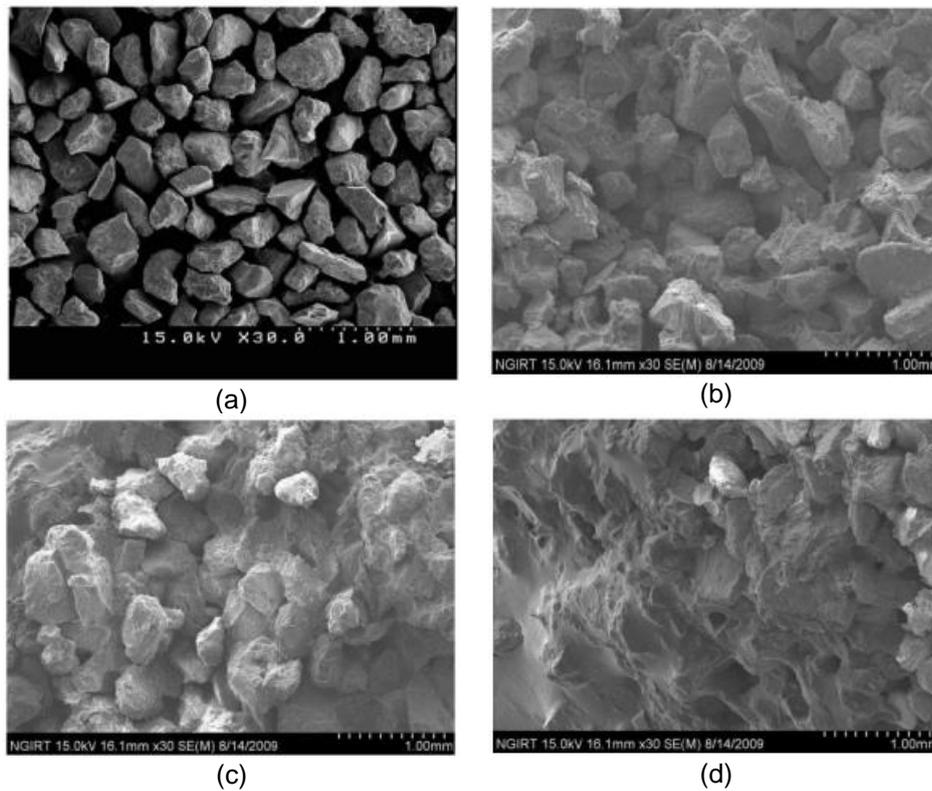
Chang e Woods (1992) descrevem o comportamento das areias cimentadas em três estágios distintos, dependendo do grau de cimentação. No primeiro estágio, de cimentação fraca, o cimento cobre parcialmente a superfície de alguns grãos, promovendo uma cimentação inicial. No segundo estágio, de cimentação intermediária, já ocorre uma cimentação significativa dos pontos de contato entre as partículas e o cimento preenche parcialmente alguns vazios do solo. No último estágio, o cimento preenche grande parte dos vazios do solo e, como a maioria das ligações químicas já foi estabelecida, torna-se difícil distinguir as partículas de solo dos produtos cimentantes.

Park (2010) realizou um estudo sobre a resistência à compressão simples de amostras de areia do rio Baekma cimentadas e submetidas a ciclos de molhagem. Através desse estudo, foi possível observar a microestrutura de uma areia mal graduada com poucos finos e diferentes teores de cimento, ilustrando as características descritas por Chang e Woods (1992) em três estágios de cimentação, como apresentado na Figura 1.

## **2.2 Metodologia Racional de Dosagem**

A primeira e principal metodologia racional de dosagem para misturas solo-cimento foi apresentada por Consoli et al. (2007) levando em consideração a relação vazios/cimento ( $\eta/Civ$ ) definida como a porosidade da mistura compactada dividida pelo teor volumétrico de cimento, para a estimativa da resistência à compressão de misturas solo-cimento (SC). Esse método leva em consideração os vazios presentes na amostra de SC e o teor volumétrico de agente cimentante, visando obter uma proporção ideal para alcançar uma maior resistência mecânica.

Figura 1 – Microestrutura da Baekma River Sand (a) não cimentada, (b) fracamente cimentada (c) medianamente cimentada e (d) fortemente cimentada de cimento.



Fonte: Park (2010).

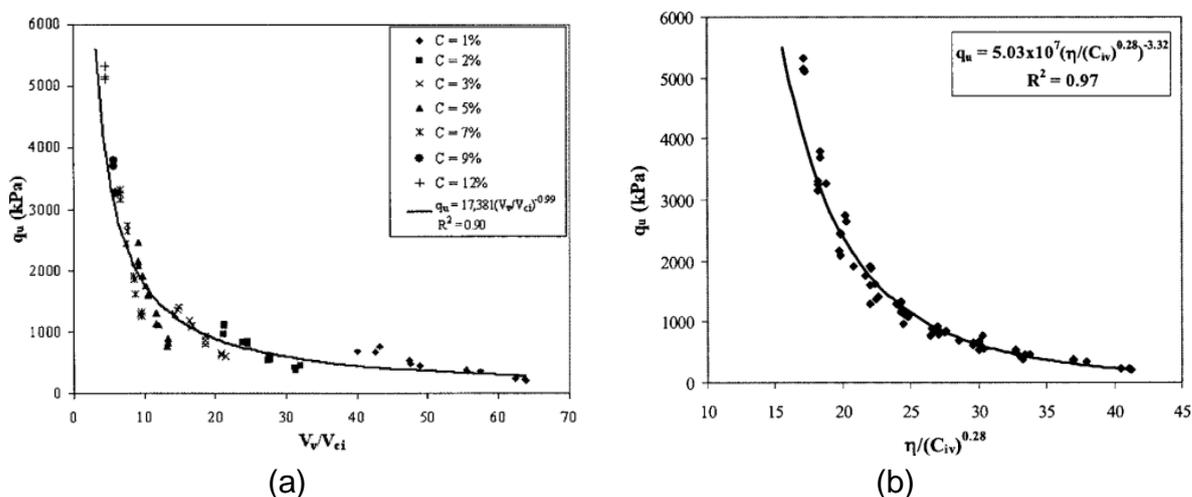
O parâmetro proposto por Consoli et al. (2007) é semelhante à Equação 1 apresentada por Larnach (1960, citado por Foppa, 2005), onde  $Vv$  = Volume absoluto de vazios – ar – água;  $Vci$  = volume absoluto de cimento;  $\eta$  = Porosidade e  $Civ$  = teor volumétrico de cimento.

$$\frac{Vv}{Vci} = \frac{\frac{Vv}{Vtotal}}{\frac{Vci}{Vtotal}} = \frac{\eta}{Civ} \quad (\text{Equação 1})$$

Consoli et al. (2007) apresentaram um estudo sobre a resistência à compressão simples ( $q_u$ ) em relação a relação vazios/cimento ( $Vv/Vci$ ), conforme ilustrado na Figura 2a. Observou-se uma correlação significativa entre os dados, no entanto, os pesquisadores notaram que pontos com a mesma relação vazios/cimento, mas obtidos a partir de diferentes combinações de teor de cimento e peso específico aparente seco, apresentaram resistências diferentes. Eles perceberam que a taxa de

crescimento da resistência à compressão simples em relação ao volume de vazios ( $Vv$ ) e ao volume de cimento ( $Vci$ ) era substancialmente diferente. Para lidar com essa discrepância, os pesquisadores aplicaram um expoente (0,28) ao volume de cimento na equação 1 supracitada, obtendo assim uma boa correlação e redução na dispersão, conforme mostrado na Figura 2b.

Figura 2 – Relação encontrada por Consoli et al. (2007) a) expressa pela variação vazios/cimento e b) expressa pela variação porosidade/teor volumétrico de cimento.



Os autores ainda sugerem que o expoente de 0,28 é função do tipo de solo utilizado, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Expoente da relação  $\eta/civ$  para diferentes tipos de solo.

Solo	Expoente	Referência
Areia Siltosa do Porto	0,21	Consoli et al. (2011)
Areia Argilosa Botucatu Caulim	0,28	Consoli et al. (2010)
	0,35	Consoli et al. (2011)
Areia uniforme de Osório	1,00	Consoli et al. (2010)

Fonte: Da autora.

Portanto, segundo Leon (2018), a equação que rege a curva de dosagem de cada solo segue o formato explicitado pela Equação 2, em que A, B e k são constantes de ajuste obtidas para cada material, considerando o máximo coeficiente de correlação ( $R^2$ ).

$$q_u = A \left( \frac{\eta}{Civ^k} \right)^B \quad \text{(Equação 2)}$$

O parâmetro ( $\eta/Civ^k$ ) permite compatibilizar os efeitos da porosidade e do teor volumétrico de cimento, possibilitando fazer compensações entre os valores de  $\eta$  e  $Civ$  a fim de controlar os valores de resistência do material. Leon (2018) explica a influência da constante k da seguinte forma:

a) se  $k = 1$ : há variações proporcionais nos parâmetros  $\eta$  e  $Civ$  onde o valor da resistência à compressão simples se mantém constante, ou seja, ambos os parâmetros exercem uma influência de mesma magnitude;

b) se  $k > 1$ : a influência do teor volumétrico de cimento ( $Civ$ ) exerce maior influência na resistência à compressão simples do que a porosidade, de tal forma que um aumento na porosidade é capaz de ser compensado com um incremento proporcionalmente menor no teor de cimento;

c) se  $k < 1$ : a porosidade ( $\eta$ ) exerce maior atuação na resistência à compressão simples do que o teor volumétrico de cimento, de tal forma que um aumento na porosidade necessita de um incremento proporcionalmente maior no teor de cimento, a fim de compensar o aumento dos vazios devido à falta de compactação e manter a resistência constante.

## **2.3 Fatores que afetam a estabilização de solos cimentados**

Entre tantos fatores que podem contribuir para o parâmetro de resistência do solo cimentado, serão destacados nos próximos itens os efeitos que cada parâmetro – porosidade, teor de umidade e teor de cimento, exerce isoladamente sobre a resistência à compressão simples.

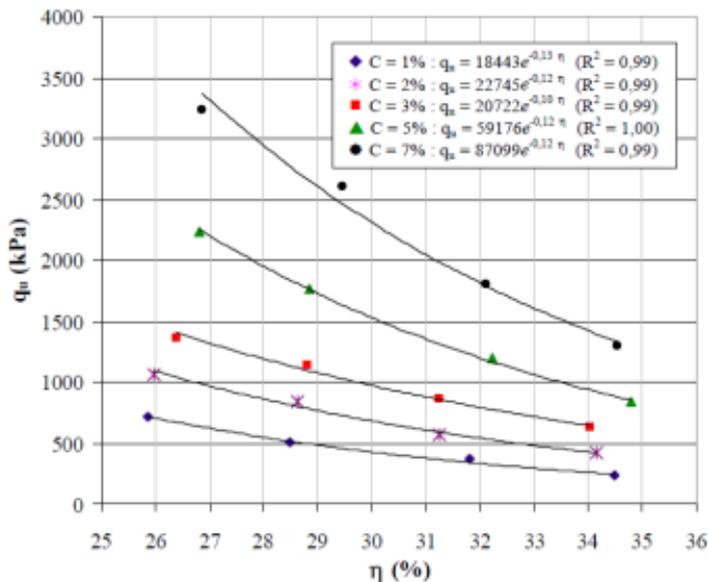
### **2.3.1 Porosidade**

Segundo Felt (1955), os valores de resistência a compressão simples aumentam frente ao aumento da densidade da mistura, mantendo-se o teor de umidade constante. O autor ainda constatou que as misturas apresentam características satisfatórias quando compactadas no teor de umidade ótimo e massa específica máxima do ensaio de compactação.

Durante o estudo realizado por Foppa (2005), foi possível verificar que pequenas reduções na porosidade, refletem em um aumento significativo na resistência à compressão simples, principalmente em corpos de prova com teores de

cimento maiores. Esse comportamento pode ser observado na Figura 3 e justificado devido a redução da porosidade resultar em um número maior de contatos entre as partículas.

Figura 3 – Relação entre a porosidade e a resistência à compressão simples.



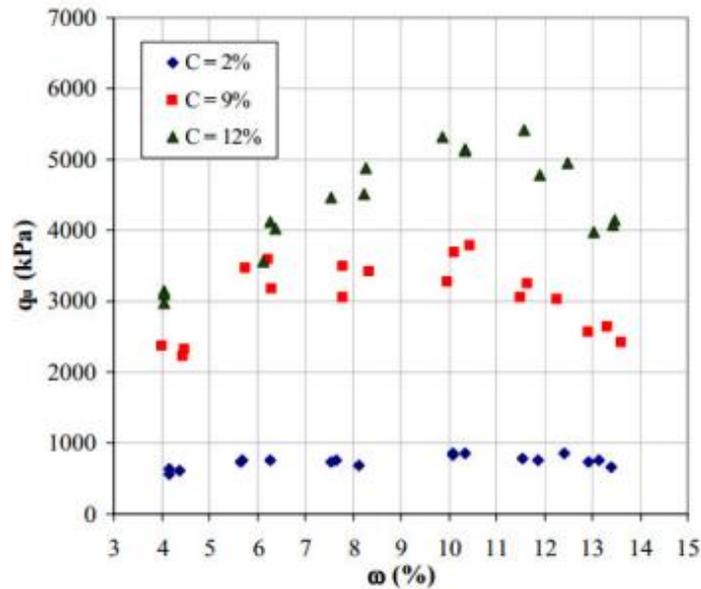
Fonte: Foppa, 2005.

O efeito benéfico em termos de aumento da resistência com a diminuição da porosidade para um mesmo teor de cimento, tem sido reportado em diversos trabalhos (INGLES e METCALF, 1972; NÚNEZ, 1991; FOPPA, 2005; LOPES JUNIOR, 2007; DALLA ROSA, 2009a). Segundo Rosa (2013), esse aumento de resistência à compressão simples, pode ser justificado pelo maior número de contatos entre as partículas existentes, tornando a cimentação mais efetiva. Além desse aspecto, a maior capacidade de distribuição de tensões no interior da amostra, bem como a maior capacidade de mobilização de atrito nas porosidades mais baixas também contribuem para o ganho de resistência do material.

### 2.3.2 Teor de umidade

Foppa (2005) observou que, fixando-se o peso específico, tem-se um pequeno aumento da resistência com o aumento do teor de umidade até um valor a partir do qual a resistência decresce (Figura 4). O autor verificou que o teor de umidade que gerou maior resistência é ligeiramente inferior (tramo seco) ao teor ótimo obtido no ensaio de compactação.

Figura 4– Relação entre o teor de umidade e a resistência à compressão simples.



Fonte: Foppa (2005).

Similarmente, Carraro (1997) avaliou que mantendo-se constante a massa específica aparente seca e variando-se o teor de umidade de moldagem, a máxima resistência é obtida para um ponto localizado no ramo seco da curva de compactação, próximo à umidade ótima.

Dado um esforço de compactação e massa específica aparente seca, o solo tende a ser mais floculado por compactação no ramo seco quando comparado com o ramo úmido (ROSA, 2013). O aumento do teor de umidade na mistura tende a aumentar a repulsão entre as partículas, permitindo um arranjo mais ordenado das partículas do solo. Aumentando a energia de compactação com um teor de umidade constante o arranjo das partículas tende-se a arranjar as partículas de forma paralela (LAMBE e WHITMAN, 1969). Portanto, acredita-se que a diferença na resistência provocada pela variação no teor de umidade é relacionada à estrutura criada durante a compactação.

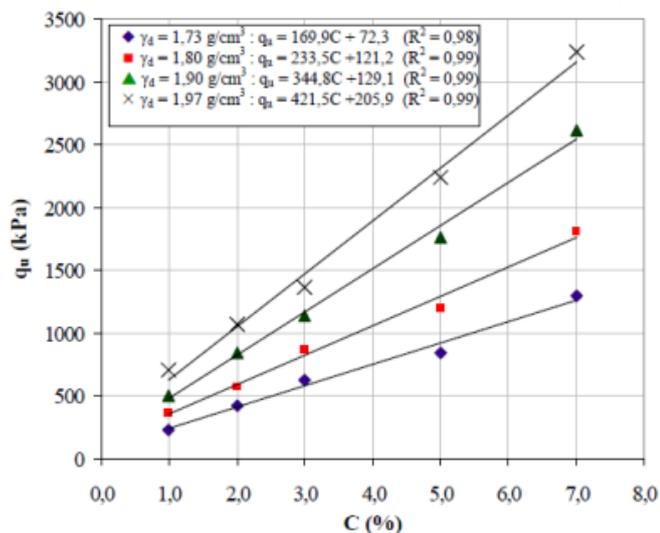
### 2.3.3 Teor de cimento

Ingles e Metcalf (1972) afirmam que a adição de pequenas quantidades de cimento modifica a propriedades do solo, ao passo que grandes quantidades modificam radicalmente as propriedades do solo. De acordo com os mesmos autores:

[...] as propriedades do solo mudam com o aumento da quantidade de cimento: a capacidade de carga aumenta, durabilidade a ciclos de molhagem e secagem aumenta, em geral a permeabilidade diminui, porém, aumenta em solos argilosos, a tendência à retração aumenta em solos granulares e a tendência à expansão de solos argilosos será reduzida.

Os estudos de Consoli et al. (2007; 2009) utilizando uma areia siltosa e uma argila respectivamente, mostram que o aumento do teor de cimento na mistura solo-cimento resulta em um aumento linear na resistência à compressão simples. Similarmente, Foppa (2005) e Lopes Junior (2007) obtiveram os mesmos resultados para um solo residual de arenito pertencente a formação de Botucatu.

Figura 5– Relação entre o teor de cimento (C) e a resistência à compressão simples ( $q_u$ ).



Fonte: Foppa, 2005.

A partir da Figura 5 pode-se observar que a inclinação das retas ajustadas aumenta para os corpos de prova com maior massa específica (menor porosidade), demonstrando que o efeito do cimento é mais pronunciado em misturas mais compactadas. Esse fato pode ser justificado devido a misturas mais densas possuírem um maior número de contatos entre as partículas, promovendo maiores possibilidades de o cimento promover a união das partículas nesses contatos.

## 2.4 Misturas Solo-cimento-argila

Assim como o concreto, o fator água-cimento tem um efeito significativo na resistência de misturas solo-cimento-argila, variando com o período de cura. Quanto menor for o fator água-cimento das misturas, maior será a resistência alcançada (JEFFERIS, 1981; PCA, 1984; LI et al., 1989).

Uma quantidade pequena de argila pode causar uma diminuição em várias ordens de grandeza no valor da condutividade hidráulica de determinados tipos de solos. Rowe (2000) comenta que existe uma quantidade adequada de argila a ser adicionada no solo que varia entre 4 e 10%, a depender do tipo de argila aplicada. O autor lembra que não é recomendado seguir esse este parâmetro sem realizar ensaios para determinar o teor ótimo de argila para cada caso.

Elkady et al. (2014) realizaram ensaios de cisalhamento direto em misturas de areia-argila atapulgita compactada e cimento, objetivando determinar a influência do teor de argila, condições iniciais de moldagem, tensão normal e condições de umidade no comportamento de resistência ao cisalhamento. A literatura mencionada descreveu a importância de otimizar a mistura areia-bentonita e investigar suas características de resistência, para integridade da estrutura, entretanto, os resultados podem depender da graduação da areia e da bentonita usada. Askarani & Pakbaz (2016) fizeram ensaios de cisalhamento direto em misturas de areia-bentonita com e sem adições de cimento. Foi concluído que a resistência ao cisalhamento drenada aumenta com a cimentação e tempo de cura.

Loch (2019), ao investigar os parâmetros de resistência à compressão simples para misturas solo-cimento-argila, identificou que as misturas solo-cimento-bentonita apresentaram valores de resistência à compressão simples semelhantes aos obtidos pelas misturas solo-cimento e superiores aos valores das misturas solo-argila. O autor ainda menciona que o aumento do teor de argila tende a aumentar a parcela da coesão, diminuir o valor do ângulo de atrito das misturas. Frente as tensões de pico, o aumento da quantidade de argila não causa redução significativa.

### **3 METODOLOGIA**

Este trabalho utilizou como banco de dados os resultados experimentais obtidos por Loch (2019), que consiste na composição de misturas solo-cimento-argila e seus respectivos valores de resistência à compressão simples. A seguir, serão apresentados os principais materiais e suas características, extraídos do banco de dados de Loch (2019), para uma melhor compreensão e análise dos resultados.

#### **3.1 Materiais**

##### **3.1.1 Solo**

O solo examinado por Loch (2019) é originário da camada de material solto que compõe a Formação de Botucatu. As amostras foram coletadas na cidade de São Carlos, situada na região nordeste do estado de São Paulo, Brasil. A Formação de Botucatu é responsável por cerca de 60% da área total do município de São Carlos - SP e se caracteriza pela presença de textura arenosa ou arenosa-franca em todos os horizontes, até o contato rochoso ou, no mínimo, até 150 cm de profundidade a partir da superfície do solo. É constituída principalmente por quartzo, calcedônia e opala, apresentando mais de 95% desses minerais, e é comum a ausência de minerais primários alteráveis (EMBRAPA, 2009). Seguindo a classificação da ASTM D2487:2011, Loch (2019) o classificou como (SM) areia siltosa.

##### **3.1.2 Cimento**

Para estabilizar o solo, Loch (2019) utilizou o cimento Portland CP II-Z32, fornecido pela Votorantim Cimentos e marca Itaú. Conforme a NBR 11578:1991, esse tipo de cimento Portland pode incluir de 6 a 14% de pozolanas em sua composição e possui massa específica de 2,990 g/cm<sup>3</sup>. Além disso, a resistência à compressão do CP II-Z32 aos 28 dias deve ser de pelo menos 32 MPa. Optou-se pelo CP II-Z32 por ser o cimento mais comum e facilmente disponível nas regiões onde o solo foi estudado.

### 3.1.3 Bentonita

A argila utilizada por Loch (2019) foi a BRASGEL AÇO DS (ativada com sódio), fornecida pela Indústria Bentonit União Nordeste (BUN), sediada em Campina Grande, Paraíba. Trata-se de uma argila esmectita naturalmente com presença de cálcio, que foi quimicamente modificada para sua forma sódica. As bentonitas sódicas são conhecidas por terem alto índice de expansão e grande capacidade de troca de cátions.

## 3.2 **Caracterização dos Materiais**

### 3.2.1 Granulometria do Solo

A maior parte da composição do solo investigado é composta por areia fina e média, com apenas uma pequena porcentagem de argila e silte. Os resultados da porcentagem de cada fração do solo obtidos por Loch (2019) estão demonstrados na Tabela 2. Quanto à fração de argila, foram identificados silte e argila como predominantes, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 2 – Porcentagens das frações granulométricas do solo.

<b>Fração Granulométrica</b>	<b>Porcentagem (%)</b>
Argila (<0,002 mm)	5,9
Silte (0,002 – 0,06 mm)	4,1
Areia Fina (0,06 – 0,2 mm)	45,7
Areia Média (0,2 – 0,6 mm)	44,0
Areia Grossa (0,6 – 2,0 mm)	0,6

Fonte: Loch (2019).

Tabela 3 – Porcentagem das frações granulométricas da argila.

<b>Fração Granulométrica</b>	<b>Porcentagem (%)</b>
Argila (<0,002 mm)	82,7
Silte (0,002 – 0,06 mm)	16,5
Areia Fina (0,06 – 0,2 mm)	0,8
Areia Média (0,2 – 0,6 mm)	0,0
Areia Grossa (0,6 – 2,0 mm)	0,0

Fonte: Loch (2019).

### 3.2.2 Índices físicos dos materiais

Foram obtidos os índices físicos dos materiais em estudo por meio de ensaios em amostras indeformadas, conforme apresentado na Tabela 4. Devido à elevada presença de areia no solo, não foi possível obter os limites de consistência.

Tabela 4 – Índices físicos e limites de consistência.

Material	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$w_{nat}$ (%)	$e$	$\eta$ (%)	Sr (%)	LL	LP	IP
Solo	1,761	2,629	1,693	4,0	0,55	36,0	18,99			
Argila	-	2,649	-	-	-	-		420	63	357

Nota:  $\rho$  – massa específica do solo;  $\rho_s$  – massa específica dos sólidos;  $\rho_d$  – massa específica aparente seca;  $w_{nat}$  – teor de umidade natural no momento da coleta;  $e$  – índice de vazios;  $\eta$  – porosidade; Sr – grau de saturação; LL – limite de liquidez; LP – limite de plasticidade; IP – índice de plasticidade. Fonte: Loch (2019).

O solo estudado pode ser classificado como SM (areia siltosa) de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos - SUCS (ASTM D2487:2011), enquanto a bentonita é classificada como CH, argila de alta plasticidade. Conforme a classificação AASHTO M-145-91:2004, o solo pertence ao grupo A-2-4 (areia siltosa ou argilosa) e a bentonita ao grupo A-7-6 (argila).

### 3.2.3 Definição das misturas

Inicialmente, Loch (2019) determinou os teores iniciais de cimento e argila foram determinados com base na revisão bibliográfica e, em seguida, ensaios de compactação foram realizados para determinar o teor de umidade ótimo das diferentes combinações.

A Tabela 5 apresenta as diferentes misturas selecionadas para o estudo, com uma nomenclatura estabelecida que utiliza a sigla "C" para cimento e "A" para argila, seguida dos respectivos teores utilizados de cada material.

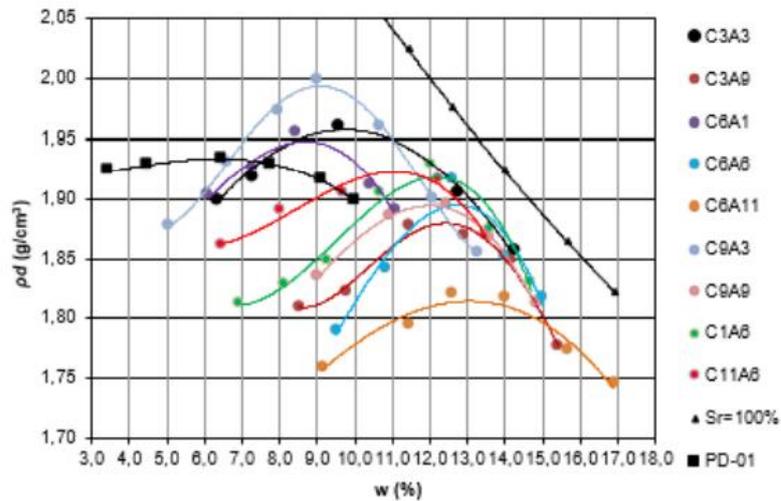
A Figura 6 apresenta as curvas de compactação, que permitem verificar que o solo estudado apresentou um teor de umidade ótimo ( $w_{ot}$ ) de 6,4% e uma massa específica aparente seca máxima ( $\rho_d$ ) de 1,934 g/cm<sup>3</sup>.

Tabela 5 – Composição das misturas definidas para o estudo.

Mistura	Teor de Cimento (C %)	Teor de Argila (A %)
C3A3	3	3
C3A9	3	9
C6A1	6	1
C6A6	6	6
C6A11	6	11
C9A3	9	3
C9A9	9	9
C1A6	1	6
C11A6	11	6

Fonte: Loch (2019).

Figura 6 – Curvas de compactação das misturas solo-cimento-argila.



Fonte: Loch (2019).

Loch (2019) observou mudanças na curva de compactação para todos os teores de estabilizante e argila empregados. A Tabela 6 mostra os valores de  $w_{ot}$ ,  $\rho_d$  e  $\rho_s$  obtidos para cada mistura solo-cimento-argila (SCA).

Tabela 6 – Massa específica aparente seca e teor de umidade ótima para cada mistura SCA.

Mistura	C (%)	A (%)	$w_{ot}$ (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )
C3A3	3	3	9,4	1,961	2,615
C3A9	3	9	12,6	1,870	2,642
C6A1	6	0,955	8,4	1,952	2,558
C6A6	6	6	12,6	1,910	2,637
C6A11	6	11,045	13,0	1,815	2,709
C9A3	9	3	9,0	1,999	2,635
C9A9	9	9	12,2	1,895	2,671
C1A6	0,955	6	12,2	1,930	2,619
C11A6	11,045	6	11,0	1,922	2,670

Fonte: Loch (2019).

A análise dos dados obtidos por Loch (2019) revelou que, à medida que se aumenta a quantidade de argila nas misturas, há uma tendência de aumento do teor de umidade ótima ( $w_{ot}$ ) e diminuição dos valores da massa específica seca máxima ( $\rho_d$ ), o que resulta em uma redução da resistência à compressão simples das misturas. Por outro lado, o aumento da quantidade de cimento tem um efeito oposto nas misturas, elevando a resistência à compressão simples. Além disso, verificou-se que tanto o acréscimo de cimento quanto o acréscimo de argila contribuíram para um aumento da massa específica dos sólidos ( $\rho_s$ ).

### 3.2.4 Planejamento Experimental das misturas SCA

O planejamento experimental das misturas solo-cimento-argila realizados por Loch (2019) utilizou um projeto fatorial  $2^3$  composto com pontos centrais e axiais, com variação dos fatores teor de cimento (C), quantidade de argila (A) e teor de umidade (W).

Para a definição das misturas, Loch, inicialmente, determinou os teores iniciais de cimento e argila com base na revisão bibliográfica e, em seguida, ensaios de compactação foram realizados para determinar o teor de umidade ótimo das diferentes combinações. Assim, os níveis de cimento foram estabelecidos entre 3% e 9%, com valores centrais em 6% e pontos axiais em 1% e 11%. O intervalo de teor de umidade ( $w$ ) foi definido após a realização dos ensaios Proctor, de forma a abranger os valores do teor de umidade ótima, com limites inferiores e superiores de 9,0% e 13,0%, respectivamente. As misturas foram estabelecidas conforme a Tabela 7.

Vale ressaltar que, das misturas SCA9, SCA10 e SCA13, utilizadas no estudo do planejamento fatorial, não foram obtidas amostras suficientes para a análise realizada neste trabalho, sendo, portanto, excluídas da avaliação.

Tabela 7 – Misturas definidas através do planejamento fatorial.

Mistura	Composição			Sigla	
	W (%)	C (%)	A (%)	W-	C-A-
<b>SCA01</b>	9,0	3,0	3,0	W9	C3A3
<b>SCA02</b>	9,0	3,0	9,0	W9	C3A9
<b>SCA03</b>	9,0	9,0	3,0	W9	C9A3
<b>SCA04</b>	9,0	9,0	9,0	W9	C9A9
<b>SCA05</b>	13,0	3,0	3,0	W13	C3A3
<b>SCA06</b>	13,0	3,0	9,0	W13	C3A9
<b>SCA07</b>	13,0	9,0	3,0	W13	C9A3
<b>SCA08</b>	13,0	9,0	9,0	W13	C9A9
<b>SCA09</b>	7,636	6,0	6,0	W7	C6A6
<b>SCA10</b>	14,364	6,0	6,0	W14	C6A6
<b>SCA11</b>	11,0	0,955	6,0	W11	C1A6
<b>SCA12</b>	11,0	11,045	6,0	W11	C11A6
<b>SCA13</b>	11,0	6,0	0,955	W11	C6A1
<b>SCA14</b>	11,0	6,0	11,045	W11	C6A11
<b>SCA15</b>	11,0	6,0	6,0	W11	C6A6
<b>SCA16</b>	11,0	6,0	6,0	W11	C6A6

Fonte: Loch (2019).

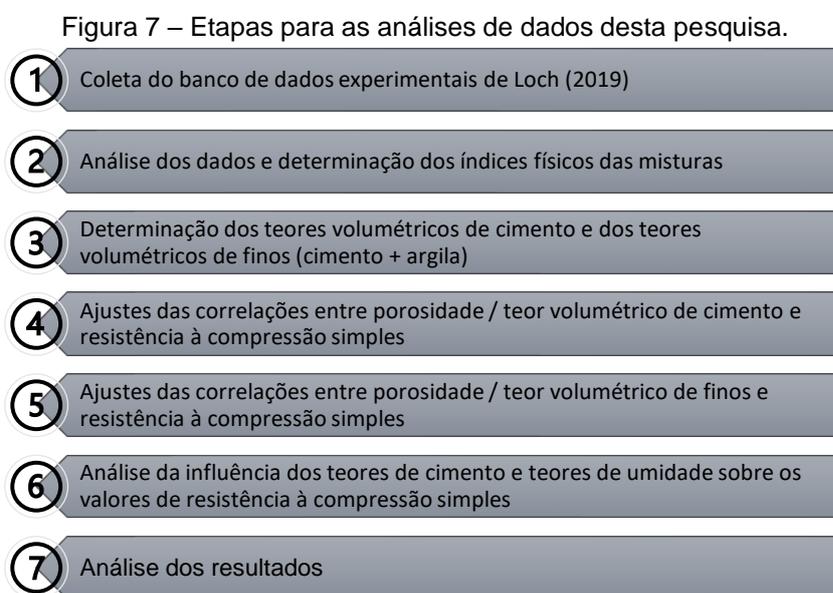
### 3.3 Resistência à compressão simples

Os ensaios realizados por Loch (2019) seguiram os procedimentos da NBR 12025:2012, que prevê a imersão dos corpos-de-prova em água por 4 horas antes do ensaio de compressão simples. No entanto, foi constatado que esse processo danificou a integridade dos espécimes ensaiados, especialmente aqueles com maior quantidade de argila, o que pode ser explicado pela propriedade expansiva das argilas montmoriloníticas (bentonita). Em virtude disso, o autor optou por realizar os ensaios para as misturas SCA sem o procedimento de imersão, a fim de preservar a integridade dos corpos-de-prova e garantir resultados mais confiáveis.

Portanto, nesta pesquisa serão avaliados os resultados obtidos através do ensaio com imersão dos corpos de prova (conforme a NBR 12025:2012) e através dos ensaios sem imersão.

### 3.4 Correlações e definição dos parâmetros chave

Após apresentar os materiais utilizados e suas respectivas características, bem como as definições das misturas e o planejamento experimental realizado por Loch (2019), informações essenciais para o entendimento da pesquisa, a Figura 7 apresenta as etapas das análises de dados realizadas neste estudo:



Fonte: Da autora.

### 3.5 Determinação do teor volumétrico de cimento

De acordo com Foppa (2005) e Consoli et al. (2007a), a resistência à compressão simples de uma mistura é influenciada pela relação entre a porosidade e o teor volumétrico de cimento. O teor volumétrico de cimento é definido como a razão entre o volume de cimento e o volume total do corpo de prova, conforme a Equação 3.

$$C_{iv} = \frac{\left( \frac{\gamma_d}{1 + \frac{C}{100}} \right) \times \left( \frac{C}{100} \right)}{G_{sc}} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde  $\gamma_d$  é o peso específico seco aparente da mistura,  $C$  é o teor de cimento e  $G_{sc}$  é a densidade dos grãos do cimento. Aumentando-se o teor de cimento na mistura, observa-se um aumento no teor volumétrico de cimento e, conseqüentemente, uma diminuição na relação entre porosidade e teor volumétrico de cimento.

Portanto, através dos dados experimentais obtidos de Loch (2019) e da equação 3 supracitada, os valores de  $C_{iv}$  foram determinados e serão apresentados na Tabela 12 do item 4.3 a seguir.

### 3.6 Determinação do teor volumétrico de finos

Com o objetivo de compreender a influência da presença de finos nas misturas, similarmente ao teor volumétrico de cimento, foi proposto analisar o teor volumétrico de finos do material como modelo de previsão à resistência à compressão das misturas SCA.

O teor volumétrico de finos (Equação 4) foi definido como a razão entre o volume de argila pelo volume de um corpo de prova, onde  $\gamma_d$  é o peso específico seco aparente da mistura,  $A$  é o teor de argila e  $G_{sc}$  é a densidade dos grãos da argila.

$$Aiv = \frac{\left( \frac{\gamma d}{1 + \frac{A}{100}} \right) \times \left( \frac{A}{100} \right)}{Gsc} \quad (\text{Equação 4})$$

A equação 5 apresenta o parâmetro proposto que relaciona os vazios existentes nas amostras SCA e o teor volumétrico de finos, onde  $Vv$  = Volume absoluto de vazios – ar – água;  $Vci$  = volume absoluto de cimento;  $Vai$  = volume absoluto de argila;  $\eta$  = Porosidade;  $Civ$  = teor volumétrico de cimento e  $Aiv$  = teor volumétrico de argila.

$$\frac{Vv}{Vci + Vai} = \frac{\frac{Vv}{Vtotal}}{\frac{Vci}{Vtotal} + \frac{Vai}{Vtotal}} = \frac{\eta}{Civ + Aiv} \quad (\text{Equação 5})$$

Portanto, através dos dados experimentais obtidos de Loch (2019) e da equação 5 supracitada, os valores de  $Aiv$  foram determinados e serão apresentados na Tabela 15 do item 4.5 a seguir.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Misturas SCA com imersão

Os resultados de resistência à compressão simples para as misturas de solo-cimento-argila após os períodos de cura de 7 (RC7) e 28 dias (RC28) considerando o processo de imersão dos corpos-de-prova obtidos por Loch (2019) são descritos na Tabela 8.

Tabela 8 – Composição das misturas SCA e resultados de resistência à compressão simples para 7 e 28 dias de cura – Com imersão.

Mistura	W (%)	C (%)	A (%)	RC7 (KPa)	RC28 (KPa)
SCA-01	9	3	3	203,74	231,08
SCA-02	9	3	9	64,90	132,39
SCA-03	9	9	3	2306,83	2809,62
SCA-04	9	9	9	940,30	762,92
SCA-05	13	3	3	230,37	110,01
SCA-06	13	3	9	323,72	99,64
SCA-07	13	9	3	1504,50	1816,80
SCA-08	13	9	9	1066,16	1227,40
SCA-11	11	0,955	6	31,86	21,43
SCA-12	11	11,045	6	988,60	1139,41
SCA-14	11	6	11,045	363,56	232,78
SCA-15	11	6	6	878,93	613,17
SCA-16	11	6	6	954,58	877,74

Fonte: Modificado de Loch (2019).

Ao analisar o banco de dados, verifica-se que as misturas SCA apresentaram comportamento similar em relação à resistência à compressão para os períodos de cura de 7 e 28 dias, com uma tendência de diminuição dos valores de RC à medida que o teor de umidade ( $w$ ) aumenta. Isso evidencia a influência desse fator nos resultados de resistência à compressão das misturas. Em todas as situações avaliadas, verificou-se que o teor de cimento exerceu maior influência no aumento da RC em comparação com a quantidade de argila utilizada.

A análise dos dados obtidos por Loch (2019) permitiu a determinação dos índices físicos das misturas SCA, incluindo o peso específico aparente ( $\gamma_d$ ), o índice de vazios ( $e$ ), o grau de saturação ( $S_r$ ) e a porosidade ( $\eta$ ). Os valores correspondentes para cada mistura são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Índices físicos das misturas SCA – Com imersão.

Mistura	7 dias de cura				28 dias de cura			
	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	Sr (%)	$\eta$	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	Sr (%)	$\eta$
SCA-01	18,71	0,37	63,99	0,27	18,87	0,36	66,08	0,26
SCA-02	18,12	0,43	55,15	0,30	18,06	0,43	54,52	0,30
SCA-03	19,44	0,33	71,95	0,25	19,14	0,35	67,70	0,26
SCA-04	18,22	0,44	54,20	0,30	18,07	0,45	52,73	0,31
SCA-05	18,28	0,40	84,93	0,29	18,22	0,41	84,03	0,29
SCA-06	18,38	0,41	83,54	0,29	18,42	0,41	84,26	0,29
SCA-07	18,34	0,41	83,66	0,29	18,25	0,42	82,36	0,29
SCA-08	18,57	0,41	83,45	0,29	18,50	0,42	82,26	0,29
SCA-11	18,61	0,38	76,16	0,28	18,44	0,39	73,79	0,28
SCA-12	18,93	0,38	75,70	0,28	18,78	0,39	73,52	0,28
SCA-14	18,21	0,46	63,22	0,31	18,00	0,48	60,92	0,32
SCA-15	18,61	0,39	74,43	0,28	18,47	0,40	72,36	0,29
SCA-16	19,13	0,35	82,34	0,26	19,02	0,36	80,61	0,26

Fonte: Da autora.

Verifica-se que há uma relação entre a porosidade e a resistência à compressão simples da mistura SCA, de modo que quanto maior for a porosidade (ou menor o peso específico aparente seco), menor será a resistência à compressão.

#### 4.2 Misturas SCA sem imersão

Os resultados do ensaio de resistência à compressão simples para as misturas de solo-cimento-argila após os períodos de cura de 7 (RC7) e 28 dias (RC28) sem o processo de imersão dos corpos-de-prova são apresentados na Tabela 10.

Os resultados da resistência à compressão simples das misturas SCA foram semelhantes para diferentes teores de umidade ( $w$ ) tanto para o período de 7 dias quanto para o de 28 dias de cura. Além disso, observou-se uma tendência de aumento na resistência à compressão com o tempo de cura de 7 para 28 dias.

De acordo com Loch (2019), os valores de resistência à compressão obtidos nos ensaios sem a imersão dos corpos-de-prova foram maiores do que os obtidos nos ensaios realizados conforme a norma NBR 12025:2012, que prevê a imersão. Durante os ensaios com imersão em água, verificou-se a perda de integridade estrutural e massa dos corpos-de-prova, justificando a redução da resistência das amostras durante o processo.

Tabela 10 - Composição das misturas SCA e resultados de resistência à compressão simples para 7 e 28 dias de cura – Sem imersão.

Mistura	W (%)	C (%)	A (%)	RC7 (KPa)	RC28 (KPa)
PD-02*	6,4	0	0	23,30	16,767
SCA-01	9	3	3	1425,04	1273,67
SCA-02	9	3	9	667,21	867,50
SCA-03	9	9	3	6201,95	5426,55
SCA-04	9	9	9	3472,12	3560,83
SCA-05	13	3	3	648,08	606,91
SCA-06	13	3	9	1101,48	630,61
SCA-07	13	9	3	3329,52	3238,70
SCA-08	13	9	9	3478,07	4343,44
SCA-11	11	0,955	6	515,38	641,29
SCA-12	11	11,045	6	6153,14	8326,14
SCA-14	11	6	11,045	2028,27	1856,81
SCA-15	11	6	6	3137,26	3728,05
SCA-16	11	6	6	3123,68	3721,25

Fonte: Modificado de Loch (2019).

Os resultados dos índices físicos de cada mistura foram apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Índices físicos das misturas SCA – Sem imersão.

Mistura	7 dias de cura				28 dias de cura			
	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	Sr (%)	$\eta$	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	Sr (%)	$\eta$
SCA-01	18,86	0,36	65,94	0,26	18,58	0,38	62,37	0,28
SCA-02	18,20	0,42	55,93	0,30	18,15	0,43	55,41	0,30
SCA-03	19,33	0,34	70,35	0,25	19,11	0,35	67,25	0,26
SCA-04	18,50	0,42	56,97	0,29	17,93	0,46	51,40	0,32
SCA-05	18,22	0,41	84,03	0,29	18,22	0,41	84,08	0,29
SCA-06	18,08	0,43	79,05	0,30	17,98	0,44	77,62	0,31
SCA-07	18,40	0,40	84,68	0,29	18,29	0,41	82,94	0,29
SCA-08	18,64	0,41	84,41	0,29	18,56	0,41	83,24	0,29
SCA-11	18,57	0,38	75,63	0,28	18,47	0,39	74,18	0,28
SCA-12	19,40	0,35	82,80	0,26	18,77	0,39	73,40	0,28
SCA-14	17,59	0,51	56,81	0,34	17,52	0,52	56,06	0,34
SCA-15	18,85	0,37	77,94	0,27	19,07	0,36	81,27	0,26
SCA-16	18,84	0,37	77,76	0,27	18,95	0,36	79,49	0,27

Fonte: Da autora.

Os resultados dos ensaios com imersão indicam uma relação entre a porosidade e a resistência à compressão simples da mistura SCA. Verificou-se que quanto maior a porosidade (ou menor o peso específico aparente seco), menor foi a resistência à compressão. Essa relação é semelhante à observada nos ensaios sem imersão.

### 4.3 Teor volumétrico de cimento

A Tabela 12 apresenta os valores de teor volumétrico de cimento para cada mistura SCA investigada neste trabalho.

Tabela 12 – Teor volumétrico de cimento para cada mistura SCA

Misturas	Com Imersão		Sem Imersão	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
	Civ	Civ	Civ	Civ
SCA-01	0,18	0,18	0,18	0,18
SCA-02	0,18	0,18	0,18	0,18
SCA-03	0,54	0,53	0,53	0,53
SCA-04	0,50	0,50	0,51	0,50
SCA-05	0,18	0,18	0,18	0,18
SCA-06	0,18	0,18	0,18	0,18
SCA-07	0,51	0,50	0,51	0,51
SCA-08	0,51	0,51	0,51	0,51
SCA-11	0,06	0,06	0,06	0,06
SCA-12	0,63	0,62	0,65	0,62
SCA-14	0,34	0,34	0,33	0,33
SCA-15	0,35	0,35	0,36	0,36
SCA-16	0,36	0,36	0,36	0,36

Fonte: Da autora.

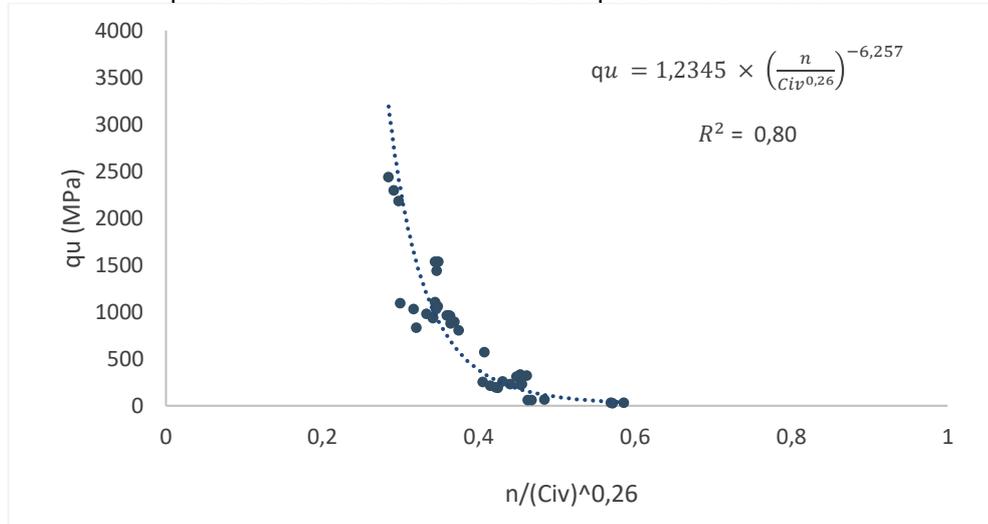
Nota-se que não há discrepâncias nos valores de teor volumétrico de cimento entre os ensaios realizados com e sem imersão, nem entre os tempos de cura de 7 e 28 dias.

Ao traçar a curva de resistência à compressão simples em relação a relação vazios/cimento para os períodos de 7 e 28 dias de cura com imersão (Figura 8 e Figura 9) e sem imersão (Figura 10 e Figura 11), verifica-se que os dados estão bem ajustados, com o modelo exponencial sendo o mais apropriado para os resultados experimentais.

A porosidade da mistura SCA apresenta uma relação exponencial inversa com a resistência à compressão simples, ou seja, quanto maior a porosidade (menor densidade aparente seca), menor a resistência à compressão. Em contrapartida, um maior teor de cimento resulta em maior resistência à compressão. É importante notar que as taxas de crescimento da resistência à compressão em relação à porosidade e ao teor de cimento são distintas, sendo necessário aplicar um expoente ao parâmetro *Civ* para compatibilizar as duas taxas de crescimento, como realizado em trabalhos anteriores, como Consoli et al. (2007).

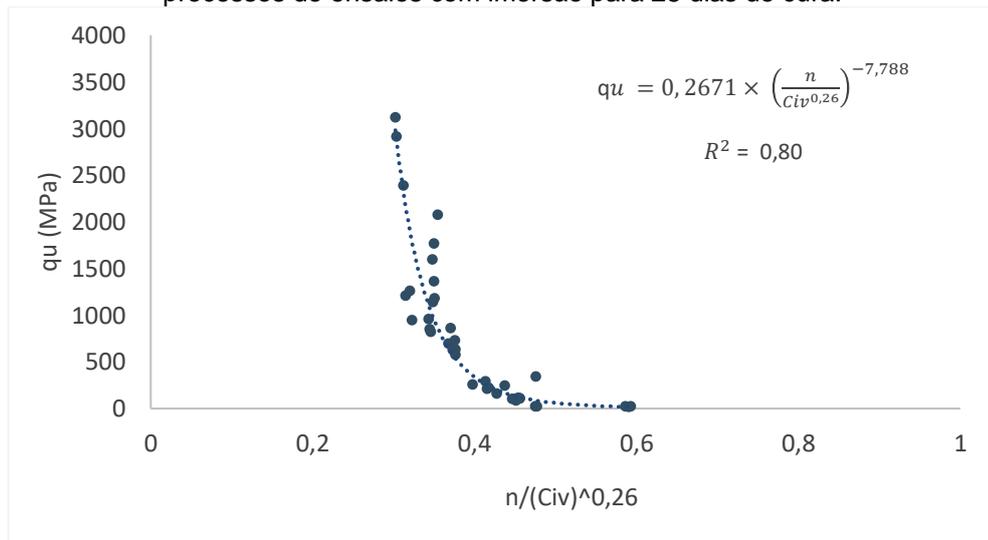
O valor do expoente aplicado ao parâmetro  $Civ$  foi definido iterativamente, avaliando-se o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) a cada iteração. O valor de 0,26 resultou em maiores valores de  $R^2$ .

Figura 8 - Relação vazios/teor volumétrico de cimento na resistência à compressão simples pelos processos de ensaios com imersão para 7 dias de cura.



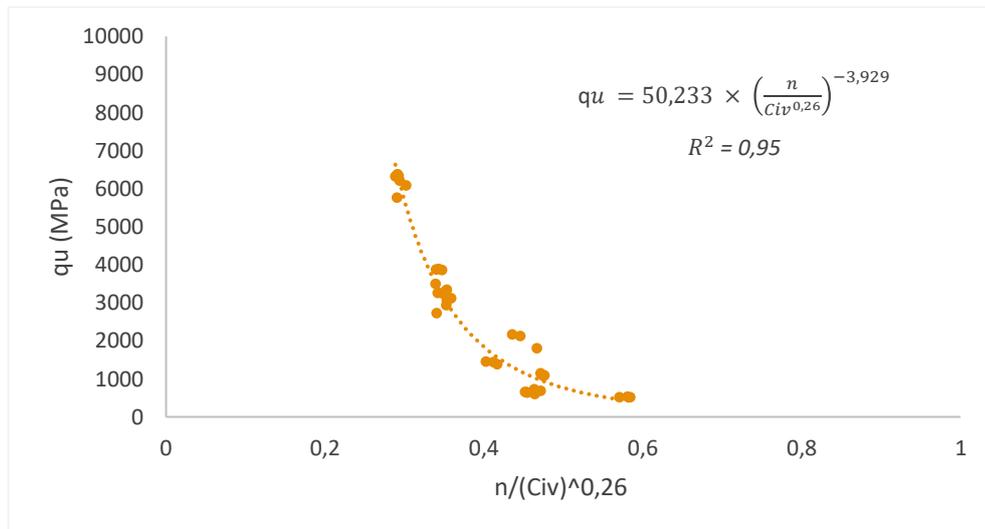
Fonte: Da autora.

Figura 9 - Relação vazios/teor volumétrico de cimento na resistência à compressão simples pelos processos de ensaios com imersão para 28 dias de cura.



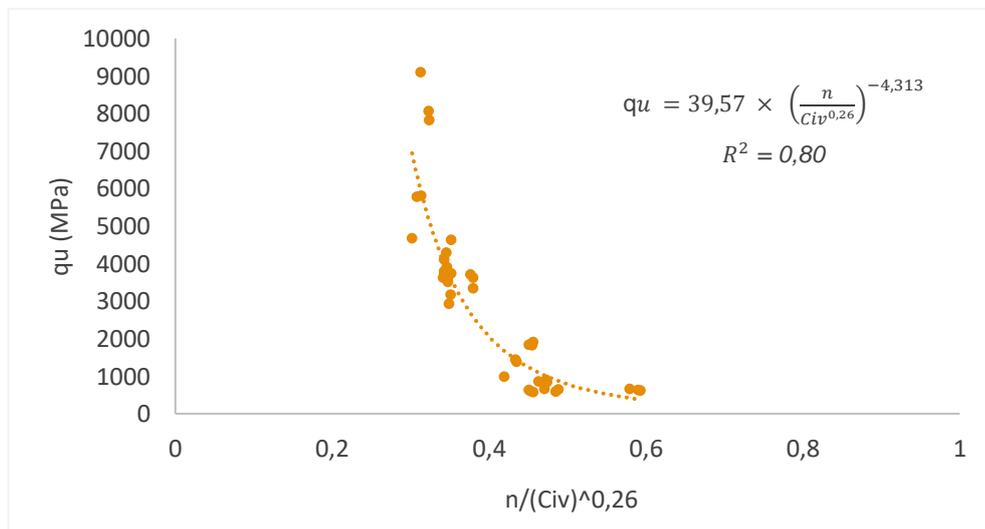
Fonte: Da autora.

Figura 10 - Relação vazios/teor volumétrico de cimento na resistência à compressão simples pelos processos de ensaios sem imersão para 7 dias de cura.



Fonte: Da autora.

Figura 11 - Relação vazios/teor volumétrico de cimento na resistência à compressão simples pelos processos de ensaios sem imersão para 28 dias de cura.



Fonte: Da autora.

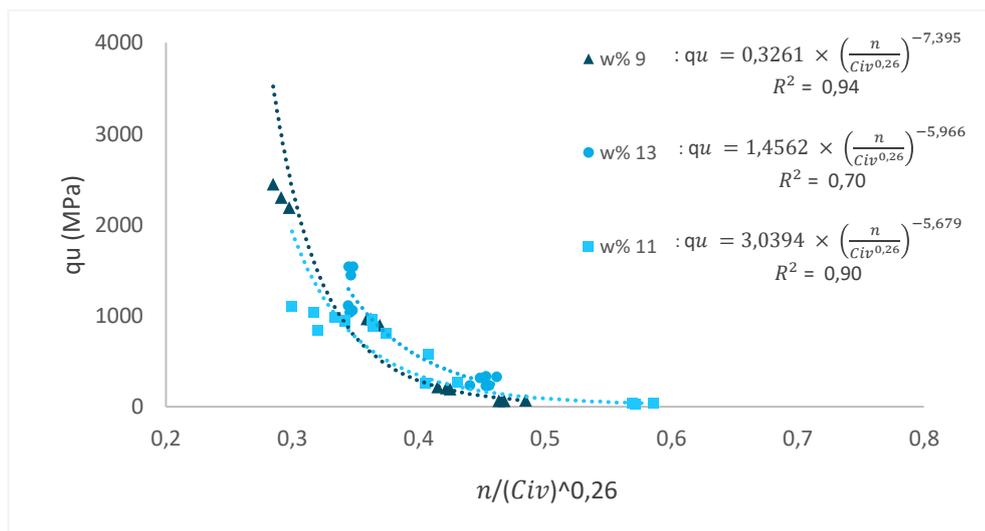
Observa-se que a metodologia que considera a porosidade ( $\eta$ ) e o teor volumétrico de cimento ( $Civ$ ) é apropriada para prever o comportamento, como evidenciado por Foppa (2005) e Consoli et al. (2007). De maneira geral, todas as curvas apresentaram coeficientes de determinação confiáveis para a aplicação da metodologia. É importante destacar que quanto maior o fator porosidade/teor

volumétrico de cimento, menor será a resistência à compressão simples das amostras.

#### 4.4 Influência do teor de umidade sobre o teor volumétrico de cimento

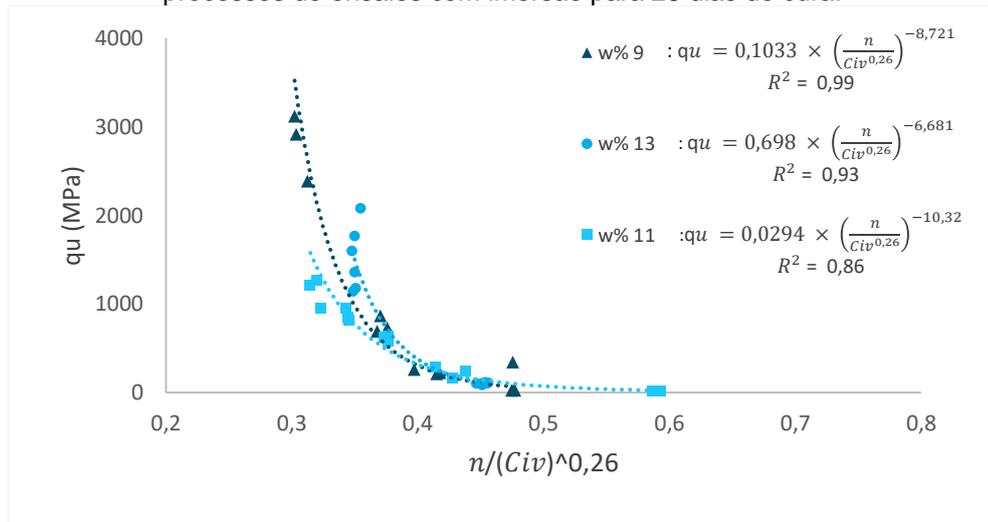
Foi identificado que a resistência à compressão das misturas SCA depende de três parâmetros principais: porosidade, teor de cimento e teor de umidade. Conforme observado anteriormente, o aumento da porosidade resulta em diminuição da resistência à compressão, enquanto o aumento do teor de cimento resulta em aumento da resistência. Para avaliar a influência do teor de umidade no teor volumétrico de cimento, foram plotadas três curvas distintas para cada um dos teores de umidade estudados (9%, 11% e 13%), conforme ilustrado na Figura 12 e Figura 13 para os ensaios com imersão e Figura 14 e Figura 15 para os ensaios sem imersão.

Figura 12 - Relação vazios/teor volumétrico de cimento na resistência à compressão simples pelos processos de ensaios com imersão para 7 dias de cura.



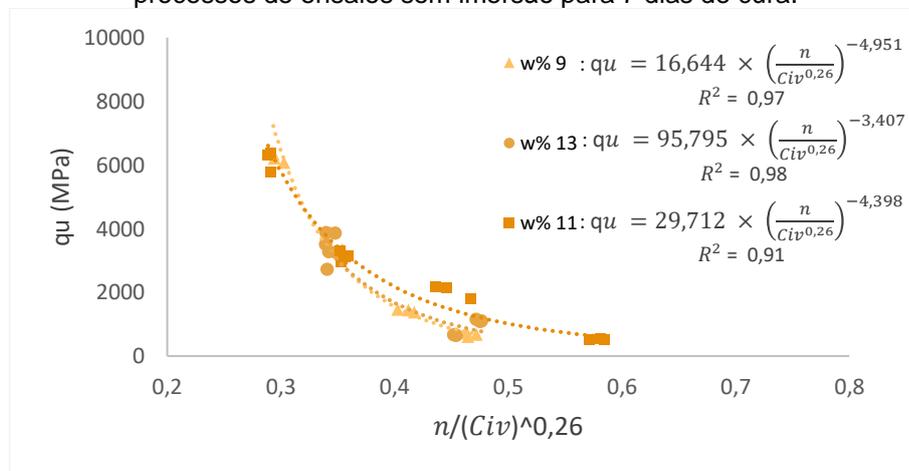
Fonte: Da autora.

Figura 13 - Relação vazios/teor volumétrico de cimento na resistência à compressão simples pelos processos de ensaios com imersão para 28 dias de cura.



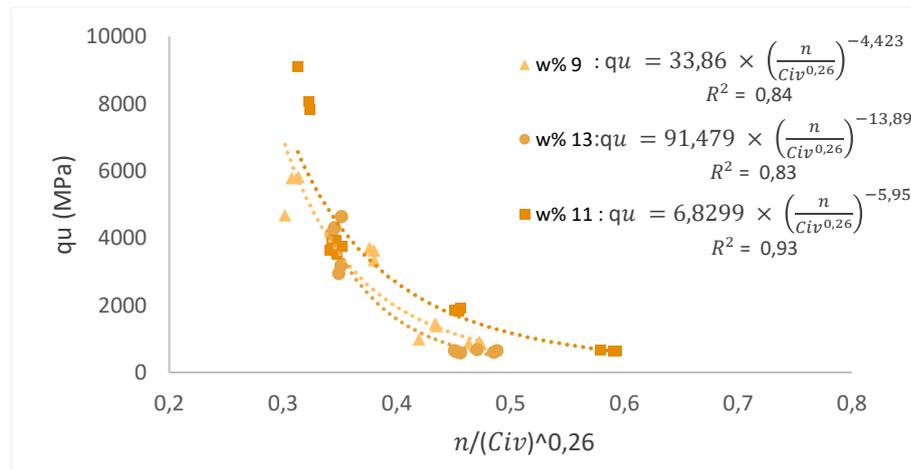
Fonte: Da autora.

Figura 14 - Relação vazios/teor volumétrico de cimento na resistência à compressão simples pelos processos de ensaios sem imersão para 7 dias de cura.



Fonte: Da autora.

Figura 15 - Relação vazios/teor volumétrico de cimento na resistência à compressão simples pelos processos de ensaios sem imersão para 28 dias de cura.



Fonte: Da autora.

Ao separar as curvas de resistência por teor de umidade, observa-se uma melhoria geral do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) em relação ao modelo sem a distinção das umidades, o que evidencia a influência direta do teor de umidade na resistência à compressão simples das misturas. Esse resultado indica uma maior precisão na previsão de comportamento. Para facilitar a compreensão da influência dos parâmetros estudados, as Tabelas 13 e 14 apresentam um resumo dos dados obtidos para o processo com e sem imersão dos corpos de prova, incluindo a composição de cada mistura ( $W\%$ ,  $C\%$  e  $A\%$ ), seus teores de umidade ótimo ( $Wót$ ) e suas respectivas tensões em 7 e 28 dias de cura.

#### a) Misturas SCA com imersão

Observa-se que as misturas SCA-03 e SCA-07 apresentaram os maiores valores de resistência à compressão aos 28 dias de cura. Essas amostras possuem composição com 9% de cimento e 3% de argila, e foram compactadas com teor de umidade de 9% e 13%, respectivamente. Foi constatado também que o aumento do teor de umidade resultou em redução da resistência à compressão das misturas.

Tabela 13 – Resumo dos dados obtidos para o processo com imersão dos corpos de prova.

Mistura	Composição			w <sub>ot</sub> (%)	Tensão méd. (kPa)	
	W%	C%	A%		7 dias	28 dias
SCA-01	9	3	3	9,4	203,74	231,08
SCA-02	9	3	9	12,6	64,90	132,39
SCA-03	9	9	3	9	2306,83	2809,62
SCA-04	9	9	9	12,2	940,30	762,92
SCA-05	13	3	3	9,4	230,37	110,01
SCA-06	13	3	9	12,6	323,72	99,64
SCA-07	13	9	3	9	1504,50	1816,80
SCA-08	13	9	9	12,2	1066,16	1227,40
SCA-11	11	0,955	6	12,2	31,86	21,43
SCA-12	11	11,05	6	11	988,60	1139,41
SCA-14	11	6	11,05	13	363,56	232,78
SCA-15	11	6	6	12,6	878,93	613,17
SCA-16	11	6	6	12,6	954,58	877,74

Fonte: Modificado de Loch (2019).

## b) Misturas SCA sem imersão

Tabela 14 - Resumo dos dados obtidos para o processo sem imersão dos corpos de prova.

Mistura	Composição			w <sub>ot</sub> (%)	γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	Tensão méd. (kPa)	
	W%	C%	A%			7 dias	28 dias
SCA-01	9	3	3	9,4	18,58	1425,04	1273,67
SCA-02	9	3	9	12,6	18,15	667,21	867,50
SCA-03	9	9	3	9	19,11	6201,95	5426,55
SCA-04	9	9	9	12,2	17,93	3472,12	3560,83
SCA-05	13	3	3	9,4	18,22	648,08	606,91
SCA-06	13	3	9	12,6	17,98	1101,48	630,61
SCA-07	13	9	3	9	18,29	3329,52	3238,70
SCA-08	13	9	9	12,2	18,56	3478,07	4343,44
SCA-11	11	0,955	6	12,2	18,47	515,38	641,29
SCA-12	11	11,045	6	11	18,77	6153,14	8326,14
SCA-14	11	6	11,045	13	17,52	2028,27	1856,81
SCA-15	11	6	6	12,6	19,07	3137,26	3728,05
SCA-16	11	6	6	12,6	18,95	3123,68	3721,25

Fonte: Modificado de Loch (2019).

Ao analisar os resultados das amostras ensaiadas sem imersão dos corpos de prova, nota-se que as misturas compactadas com o teor de umidade ótimo (SCA-03 e SCA-12) apresentaram os maiores valores de resistência à compressão simples aos 28 dias de cura. Além disso, constatou-se que os ensaios compactados em valores iguais ou ligeiramente inferiores ao teor ótimo de umidade (tramo seco) resultaram em valores de resistência à compressão melhores em comparação aos ensaios realizados com tramo úmido.

#### 4.5 Teor volumétrico de finos

A Tabela 15 apresenta os valores de teor volumétrico de finos para cada mistura SCA investigada neste trabalho.

Tabela 15 – Teor volumétrico de finos para cada mistura SCA.

Misturas	Com Imersão		Sem Imersão	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
	Aiv	Aiv	Aiv	Aiv
SCA-01	0,18	0,18	0,18	0,18
SCA-02	0,50	0,50	0,50	0,50
SCA-03	0,19	0,19	0,19	0,19
SCA-04	0,50	0,50	0,51	0,50
SCA-05	0,18	0,18	0,18	0,18
SCA-06	0,51	0,51	0,50	0,50
SCA-07	0,18	0,18	0,18	0,18
SCA-08	0,51	0,51	0,51	0,51
SCA-11	0,35	0,35	0,35	0,35
SCA-12	0,36	0,36	0,37	0,36
SCA-14	0,34	0,34	0,33	0,33
SCA-15	0,35	0,35	0,36	0,36
SCA-16	0,36	0,36	0,36	0,36

Fonte: Da autora.

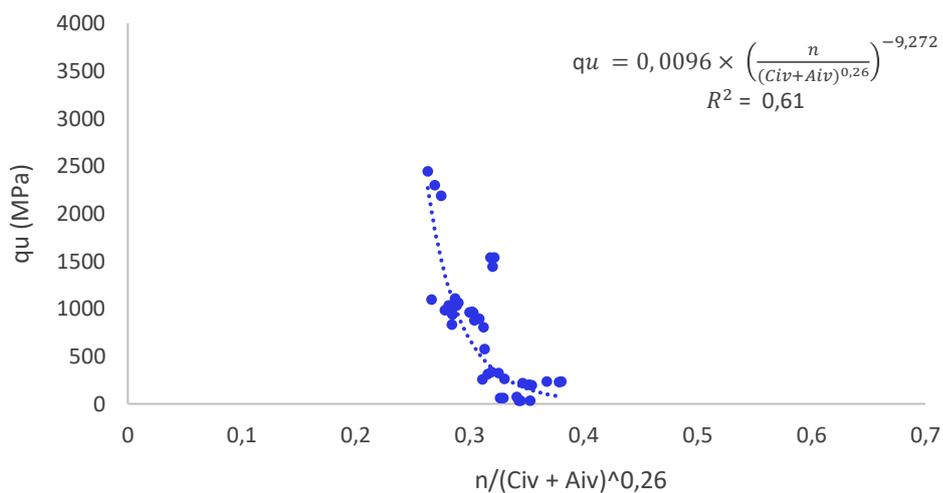
Assim como o teor volumétrico de cimento, os valores de teor volumétrico de finos não apresentaram variações para os ensaios realizados com e sem imersão, e ainda para os valores de tempo de cura de 7 e 28 dias. Isso sugere que o teor volumétrico de finos aumenta com o aumento do teor de argila e cimento, enquanto a relação porosidade/teor volumétrico diminui.

O valor do expoente aplicado ao parâmetro *Aiv* foi definido iterativamente, visando maximizar o coeficiente de determinação ( $R^2$ ). O valor encontrado foi 0,26, semelhante ao valor obtido para as análises do teor volumétrico de cimento.

Percebe-se que a metodologia, que leva em consideração a porosidade ( $\eta$ ) e o teor volumétrico de finos (*Aiv*), não apresenta uma resposta adequada a sua proposta de previsão de comportamento, apresentando valores de coeficientes de determinação ( $R^2$ ) entre 0,51 e 0,83. Contudo, nota-se similaridade no comportamento das misturas em que, quanto maior o fator porosidade / teor volumétrico de finos, menor será a resistência à compressão simples das amostras.

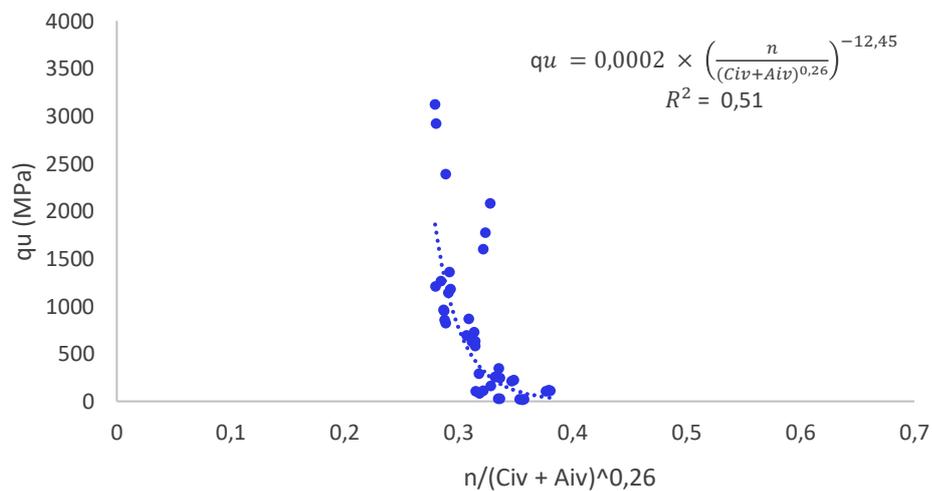
As observações realizadas são ilustradas na Figura 16 à Figura 19.

Figura 16 - Relação vazios/teor volumétrico de finos na resistência à compressão simples pelo processo de ensaios com imersão para 7 dias de cura.



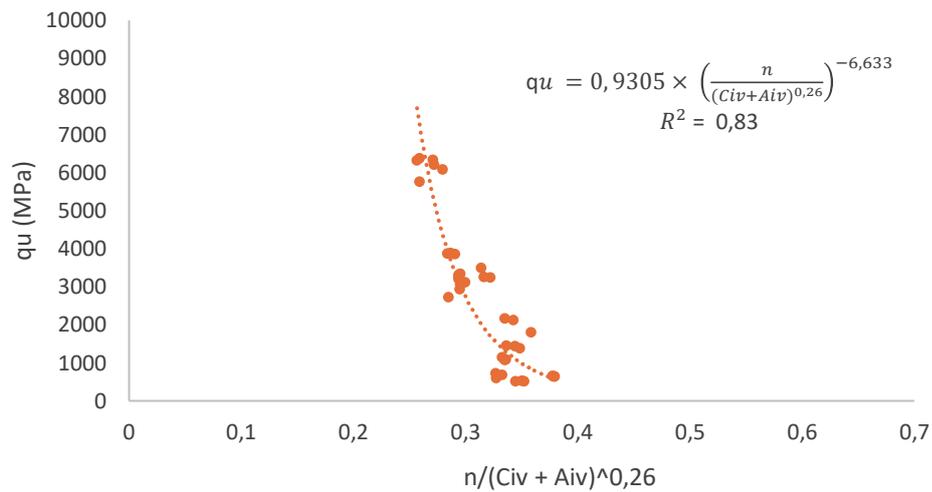
Fonte: Da autora.

Figura 17 - Relação vazios/teor volumétrico de finos na resistência à compressão simples pelo processo de ensaios com imersão para 28 dias de cura.



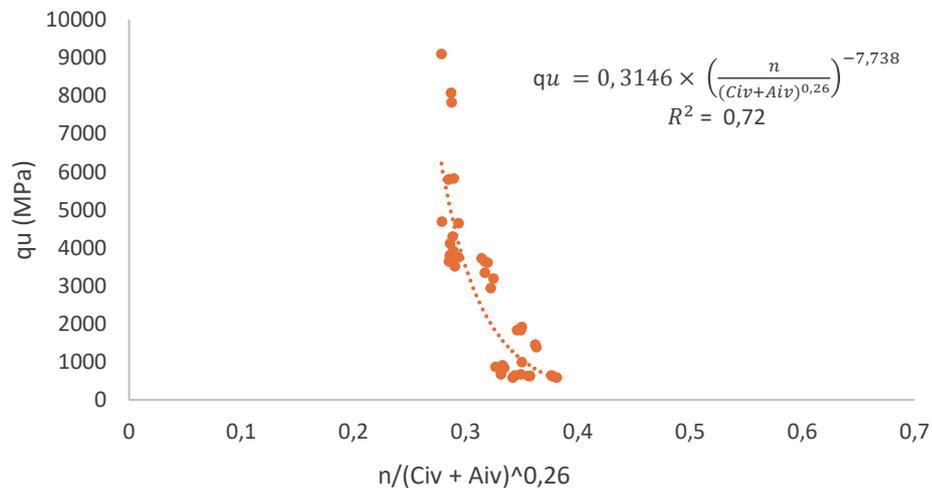
Fonte: Da autora.

Figura 18 - Relação vazios/teor volumétrico de finos na resistência à compressão simples pelo processo de ensaios sem imersão para 7 dias de cura.



Fonte: Da autora.

Figura 19 - Relação vazios/teor volumétrico de finos na resistência à compressão simples pelo processo de ensaios sem imersão para 28 dias de cura.

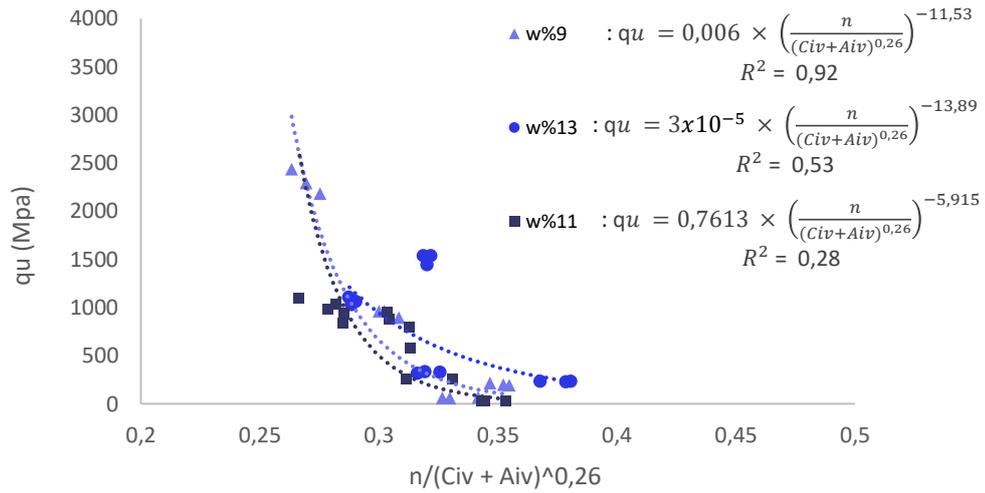


Fonte: Da autora.

#### 4.6 Influência do teor de umidade sobre o teor volumétrico de finos

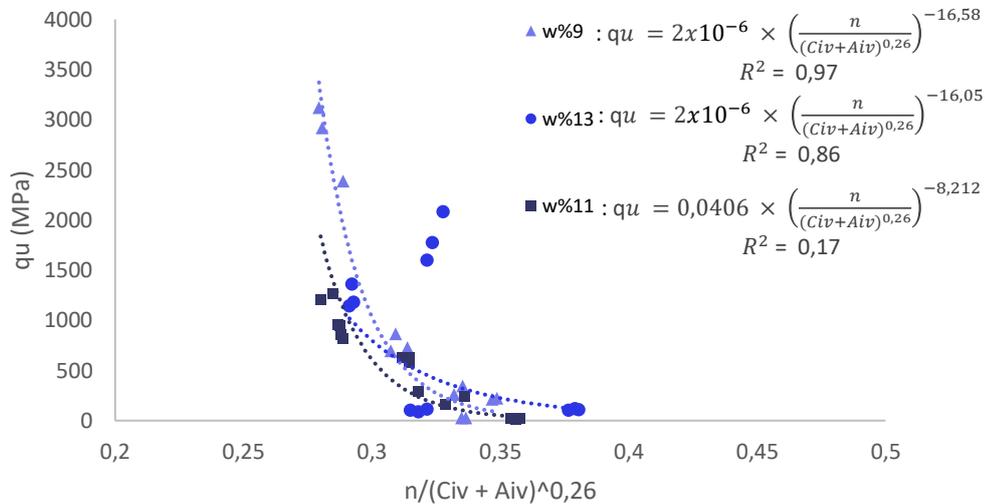
Devido à similaridade de comportamento identificado nas curvas analisadas, decidiu-se investigar a influência do teor de umidade sobre as amostras ensaiadas. Para isso, foram geradas três curvas distintas para cada um dos teores de umidade estudados (9%, 11% e 13%), como ilustrado na Figura 20 à Figura 23.

Figura 20 - Relação vazios/teor volumétrico de finos na resistência à compressão simples pelo processo de ensaios com imersão para 7 dias de cura para cada teor volumétrico (w) estudado.



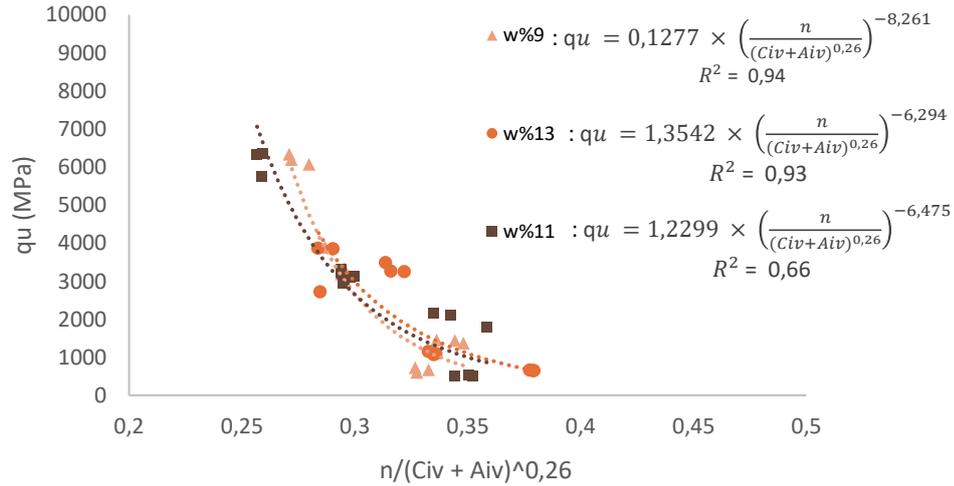
Fonte: Da autora.

Figura 21 - Relação vazios/teor volumétrico de finos na resistência à compressão simples pelo processo de ensaios com imersão para 28 dias de cura para cada teor volumétrico (w) estudado.



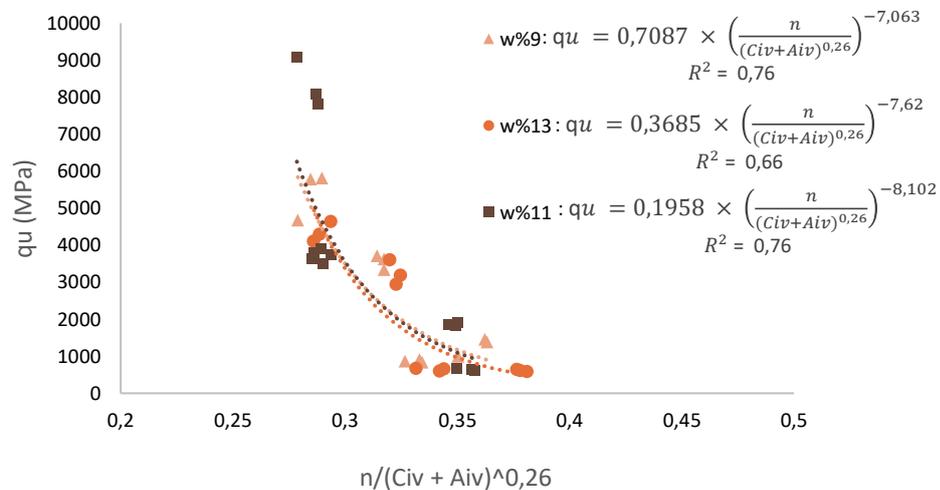
Fonte: Da autora.

Figura 22 - Relação vazios/teor volumétrico de finos na resistência à compressão simples pelo processo de ensaios sem imersão para 7 dias de cura para cada teor volumétrico (w) estudado.



Fonte: Da autora.

Figura 23 - Relação vazios/teor volumétrico de finos na resistência à compressão simples pelo processo de ensaios sem imersão para 28 dias de cura para cada teor volumétrico (w) estudado



Fonte: Da autora.

Ao analisar as curvas de resistência separadas por teor de umidade, observa-se, em geral, que as misturas com teor de umidade de 9% apresentam melhores resultados quando comparadas aos demais valores de  $w$  estudados. Essa tendência pode ser explicada pelo fato de que as misturas com teor de umidade de 9% foram compactadas em valores próximos ou iguais ao seu teor de umidade ótimo ( $w_{ót}$ ), o que difere dos outros grupos que apresentaram variações maiores entre o  $w$  e o  $w_{ót}$ .

## 5 CONCLUSÕES

O objetivo desta pesquisa foi, através da análise do banco de dados experimentais obtidos por Loch (2019), avaliar a precisão da relação vazios/cimento na predição da resistência à compressão simples de misturas de solo-cimento-argila utilizando solo proveniente da Formação de Botucatu classificado como areia siltosa, com ênfase na resistência à compressão simples. Além disso, buscou-se avaliar possíveis procedimentos de dosagem, com base nos índices físicos das misturas e nos resultados de resistência.

Frente aos índices físicos, foi possível identificar que a porosidade apresenta uma relação com a resistência à compressão simples da mistura SCA, sendo que quanto maior a porosidade (menor peso específico aparente seco), menor a resistência à compressão. Esse comportamento pode ser justificado devido a redução da porosidade resultar em um número maior de contatos entre as partículas, tornando a cimentação mais efetiva. Além desse aspecto, a maior capacidade de distribuição de tensões no interior da amostra, bem como a maior capacidade de mobilização de atrito nas porosidades mais baixas, também contribuem para o ganho de resistência do material. Complementarmente, quanto maior o teor de cimento, maior a resistência à compressão para o solo artificialmente cimentado desta pesquisa, sendo que, em todas as misturas, o teor de cimento apresentou maior influência no aumento da resistência à compressão quando comparado ao fator argila.

O teor de umidade da moldagem desempenha um papel fundamental na determinação da resistência à compressão simples do material. Aumentos no teor de umidade resultaram em reduções na resistência para os teores de umidade avaliados. O teor de umidade que gerou a maior resistência é ligeiramente inferior (tramo seco) ou igual ao teor ótimo obtido no ensaio de compactação. Quanto menores as variações no teor de umidade, melhores foram os resultados obtidos.

A razão entre vazios e cimento, ajustada com um expoente de 0,26 para solos classificados como areia siltosa ou argilosa em cada uma das três umidades de compactação, foi um bom parâmetro para estimar a resistência à compressão do solo estudado. A relação sugeriu que o ajuste deste expoente é função das características do tipo de solo e do agente cimentante utilizado.

A resistência à compressão simples das misturas SCA ensaiadas apresentou a tendência de que, quanto menor a relação entre a porosidade e o teor volumétrico de cimento ( $\eta/Civ$ ), maior a RC, estabelecendo assim uma metodologia para a previsão do comportamento desses parâmetros nas características estudadas.

Com base na equação de estimativa da resistência à compressão estabelecida nesta pesquisa, diferentes combinações de teor de cimento, porosidade e teor de umidade podem ser utilizadas para atingir a  $qu$  de projeto. A melhor solução varia de acordo com a acessibilidade dos equipamentos para atingir um determinado índice de vazios, o custo do cimento e a disponibilidade de água.

No entanto, a metodologia proposta para analisar o teor volumétrico de finos do material como modelo de previsão para a resistência à compressão das misturas SCA, considerando a porosidade ( $\eta$ ) e o teor volumétrico de finos ( $Civ + Aiv$ ), não apresentou uma resposta adequada à sua proposta de previsão de comportamento, apresentando valores de coeficientes de determinação ( $R^2$ ) entre 0,17 e 0,83. Entretanto, ao analisar a influência do teor de umidade nas misturas, em geral, observou-se uma tendência de melhores resultados nas amostras compactadas em valores próximos ou iguais ao seu teor de umidade ótimo ( $wót$ ).

## REFERÊNCIAS

ASKARANI, K. K.; PAKBAZ, M. S. Drained Shear Strength of Over-Consolidated Compacted Soil-Cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 28, n. 5, 2016. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001510.

BALDOVINO, J. J. A. et al. Equations controlling the strength of sedimentary silty soil–cement blends: influence of voids/cement ratio and types of cement. *International Journal of Geotechnical Engineering*, p. 1-14, 2019.

CARRARO, J. A. Utilização de resíduos industriais na estabilização de um solo residual de arenito. 1997. 149p. Tese (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil/UFRGS, Porto Alegre.

CHANG, T. S.; WOODS, R. D. Effect of Particle Contact Bond on Shear Modulus. *Journal Of Geotechnical Engineering*, v. 8, n. 118, p.1216-1233, 1992.

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*, vol. 133, nº 2, pp. 197-205, 2007.

CONSOLI, N. C. et al. Mathematical model for isotropic compression behaviour of cemented soil cured under stress. *Geomechanics and Geoengineering*, v. 2, n. 4, p.269-280, 2007b.

CONSOLI, N. C.; DALLA ROSA, F.; FONINI, A. Plate Load Tests on Cemented Soil Layers Overlaying Weaker Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 135, n. 12, p.1846-1856, 2009a.

CONSOLI, N. C.; LOPES, L. S. JR.; FOPPA, D.; HEINECK, K. S. (2009). Key parameters dictating strength of lime/cement-treated soils. *Proc., Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, vol. 162, nº 2, pp. 111-118.

CONSOLI, N. C.; LOPES JR, L. S.; PRIETTO, P. D. M.; FESTUGATO, L.; CRUZ, R. C. Variables controlling stiffness and strength of lime-stabilized soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*; vol. 137, nº 6, pp. 628-632, 2011.

CONSOLI, N. C.; CRUZ, R. C.; FONSECA, A. V.; COOP, M. (2012a). Influence of the voids-cement ratio on stressdilatancy behavior of artificially cemented sand.

Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. vol. 138, nº 1, pp. 100-109.

CONSOLI, N. C.; FONSECA, A. V.; SILVA, S. R.; CRUZ, R. C.; FONINI, A. (2012b). Parameters controlling stiffness and strength of artificially cemented soils. *Géotechnique*, vol. 62, nº 2, pp. 177-183.

CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M.; LOPES JR., L. S.; WINTER, D. (2014). Control factors for the long term compressive strength of lime treated sandy clay soil. *Transportation Geotechnics*, vol. 1, pp. 129-136.

CONSOLI, N. C.; QUIÑÓNEZ, R. A.; GONZÁLEZ, L. E.; LÓPEZ, R. A. (2017). Influence of molding moisture content and porosity/cement index on stiffness, strength, and failure envelopes of artificially cemented fine-grained soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE.

ELKADY, T.Y.; SHAKER, A.A.; DHOWAIN, A.W. Shear strengths and volume changes of sand–attapulgate clay mixtures. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v.74, n.2, 2014. p.595- 609.

FELT, E. J. Factors influencing physical properties of soil-cement mixtures. Research and development laboratories of the Portland cement association: Bulletin D5. Authorized reprint of the Bulletin 108 of the Highway Research Board, 1955.

FOPPA, D. Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados. 2005. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

Freire, W.J. Tratamento prévio do solo com aditivos químicos e seu efeito sobre a qualidade do solo-cimento. Piracicaba: Universidade de São Paulo - ESALQ, 1976, 142p. Tese Doutorado

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. Soil stabilization - Principles and practice. Butterworths, Melbourne, Australia, 1972.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. Soil Mechanics. New York: John Wiley & Sons, 1969. 553 p.

JEFFERIS, S. A. Bentonite-cement slurries for hydraulic cut-offs. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1991, Stockholm. Proceedings Rotterdam: A. A. Balkema, V.1, P.435-440.

LEON, H. B. O índice porosidade/teor volumétrico de cimento ( $\eta/\text{Civ}$ ) como um parâmetro de estado para areias cimentadas. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

LI, J. C.; HWANG, C.L.; YAO, H.L.; LEE, H.J.; LEE, R.J.; A study of slag cement-bentonite slurry. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 12., 1989, Rio de Janeiro. Proceedings Rotterdam: A.A. Balkema, v.3, p. 1499-1502.

LOCH, F.C. Barreiras de Solos Estabilizados com Cal e Cimento para Proteção Ambiental. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

LOCH, F.C. Estudo Integrado do Comportamento de Misturas de Solo Arenoso, Argila e Cimento para Aplicação em Barreiras de Proteção Ambiental. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

NÚÑEZ, W. P. ESTABILIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE UM SOLO RESIDUAL DE ARENITO BOTUCATU, VISANDO SEU EMPREGO NA PAVIMENTAÇÃO. 1991. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

PARK, Sung-sik. Effect of Wetting on Unconfined Compressive Strength of Cemented Sands. Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering, v. 136, n. 12, p.1713-1720, 2010.

PITTA, M. R. Estabilização com solo-cimento. Técnica, São Paulo: PINI, 1995 n. 17, julho/agosto.

PORBAHA, A.; TANAKA, H.; KOBAYASHI, M. State of the art in deep mixing technology: part II. Applications. Proceedings of the ICE - Ground Improvement, vol. 2, n. 3, 1998. p.125 –139.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA) – Cement-bentonite slurry trench cut-off walls. PCA Concret Information, USA, 1979, 11p.

ROSA, D.A. Relação entre Resistência à tração e à Compressão de um Solo Fino Artificialmente Cimentado. Dissertação – Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre, 2013.

ROWE, R. K. Barrier Systems. In: Geotechnical and geoenvironmental engineering handbook. Ontario, Kluwer academic publishers, 2000. p.739-788.

SALES, L. F. P. Estudo do Comportamento de Fundações Superficiais Assentes em Solos tratados. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, p.146, 1998.

SEGANTINI, A. A. S. Utilização de Solo-Cimento em Estacas Escavadas com Trado em Ilha Solteira-SP. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000, 176p.

THOMÉ. A.; DONATO, M.; CONSOLI, N. C.; GRAHAM, J. Circular footings on a cemented layer above weak foundation soil. Canadian Geotechnical Journal, v.42, 2005. p.1569-1584.

VERSON, G. I.; SOUZA, P. G. B.; MOURA, J. P. Influência da Razão Porosidade/Teor Volumétrico na Variação do Módulo de Elasticidade de uma Argila Melhorada com Cal. XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2022.