



Resultados e Relações entre a Compressão Simples e a Compressão Diametral em Misturas de Solo-cimento em Solos Residuais de Biguaçu/SC

Wellington Borba Broering

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, wellington.bb@posgrad.ufsc.br

Patricia Odozynski da Silva

Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, patricia.odozynski@gmail.com

Julia Bellozupko Bruschi

Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, juliabellozupko10@gmail

Camilla da Silva Barbosa

Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, camillabarbosa94@gmail.com

Fábio Krueger da Silva

Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, fabio.krueger@ifsc.edu.br

RESUMO: A presente pesquisa analisou a influência do cimento nos resultados de ensaios de caracterização mecânica, sobretudo de compressão simples e compressão diametral, comparando amostras de solo natural e amostras estabilizadas com cimento a 3 e 7% em massa de solo seco. O estudo foi realizado em solos residuais de granito da região rural do município de Biguaçu, em Santa Catarina. Para a mistura de solo com 3% de cimento o aumento da resistência a compressão simples atingiu quase 130% aos 7 dias e mais de 155% aos 28 dias, enquanto que a mistura de solo com 7% de cimento atingiu quase 350% aos 7 dias e 570% aos 28 dias. Na análise da compressão diametral, com 3% de cimento o aumento da resistência aos 28 dias foi superior a 300%, enquanto que com 7% aos 28 dias atingiu mais de 700%. No comparativo entre os resultados constata-se que a resistência à tração resulta em cerca de 20 a 30% da resistência à compressão simples.

PALAVRAS-CHAVE: Caracterização Mecânica, Compressão Simples, Compressão Diametral, Solos Residuais, Estabilização Química, Solo-cimento.

1 INTRODUÇÃO

Rissardi, Bertazo e Johann (2017) indicaram que, dependendo da região onde será executada uma obra de pavimentação, por exemplo, existe a necessidade de realizar a remoção total ou parcial do material local, substituindo por outro que atenda as exigências especificadas em projeto.

No atual contexto busca-se mais otimização dos recursos disponíveis no local ou nas

imediações como solução para viabilidade logística e econômica dos empreendimentos. Rissardi, Bertazo e Johann (2017) apontam que a estabilização artificial de solos, a partir da adição de substâncias que melhoram suas propriedades, tem sido implantada com sucesso pela engenharia geotécnica. Pereira (2012) indica que a estabilização de solos é uma técnica utilizada para aumentar sua resistência e durabilidade, suportando com maior eficiência os esforços do tráfego e os efeitos causados pelas



intempéries. Dessa forma, quando não é possível a dosagem de frações nas proporções requeridas, recorre-se a estabilização dos solos, aditando um “ingrediente novo” na mistura, lhe conferindo propriedades específicas. As principais substâncias utilizadas como “aditivos” nos solos são o cimento Portland, cal, pozolanas, materiais betuminosos, resinas e cinzas volantes (BUENO, 2011 apud. RISSARDI; BERTAZO; JOHANN, 2017).

A estabilização química de solos com uso de cimento é uma excelente alternativa, podendo adicionar à quase todos os tipos de solo, com exceção de argilas muito plásticas e com percentual maior que 2% de matéria orgânica (SANDRONI; COSOLI, 2010), em que são necessárias maiores quantidades.

Citam-se alguns trabalhos como o de Goularte e Pedreira (2009), Dias (2012a), Sartori (2015), Borges e Reis (2017) e Casagrande e Lopes (2017), que estudaram o comportamento do solo a partir da adição de cimento e garantem a condição de baixos teores de matéria orgânica, granulometrias e limites de consistência específicos, além de quantidades recomendadas entre 2 e 15% de cimento em relação a massa de solo seco, em que menores teores modificam as propriedades do solo e maiores quantidades as alteram radicalmente.

Sendo assim, utilizando a técnica de solo-cimento, a presente pesquisa busca analisar a influência do cimento nos resultados de ensaios de compressão simples e compressão diametral, comparando amostras de solo natural e amostras estabilizadas quimicamente com cimento a 3% e a 7% em massa de solo seco. O intuito da pesquisa foi verificar os ganhos de resistência com a incorporação de cimento no solo estudado, o atendimento dos padrões normativos e qual a relação entre essas medidas mecânicas das propriedades do solo residual da cidade de Biguaçu, em Santa Catarina.

2 MATERIAL E LOCAL DE ESTUDO

A pesquisa foi realizada em solos residuais de

granito originados da região rural do município de Biguaçu, em Santa Catarina. As coordenadas geográficas do ponto de estudo são 27°28'09.89" S e 48°43'20.58" W. O talude objeto desta pesquisa faz parte do Complexo Canguçu, sendo massas rochosas com formas diferenciadas, preferencialmente alongadas na direção NE-SW ou NNE-SSW. A região de estudo se encontra em uma área com eminência de solo Podzólico Vermelho-Amarelo Álico, usualmente bem drenados, com grandes quantidades de argila de atividade baixa e textura variada, presença ou não de cascalhos, calhaus e matacões.

O talude foi escolhido em função do conhecimento que no local está sendo executada a implantação de uma obra de pavimentação de grande porte, utilizando o material próprio da região para compor as camadas do pavimento. A Figura 1 apresenta o talude no estado já exposto devido às obras anteriormente mencionadas, o que permitiu uma análise tátil-visual prévia do material.



Figura 1. Representação da região onde localiza-se o talude objetivo desta pesquisa, com indicação do ponto da coleta da amostra ao pé do talude de corte.

Foram coletadas amostras de solo deformadas ao pé do talude apresentado, sendo todo o material envolvido em sacos plásticos para posterior transporte ao Laboratório de Materiais e Solos do IFSC – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, onde ocorreu o acondicionamento do material. Para o ensaio realizado no Laboratório de Engenharia Civil da UNISUL – Universidade do Sul de



Santa Catarina o material foi transportado posteriormente.

Dos vários cimentos existentes, o utilizado para a estabilização química foi o cimento Portland IV. É um cimento pozolânico que possui alta resistência química para a fabricação de concretos e argamassas sujeitas a ambientes mais agressivos, além de obras que apresentem requisitos específicos quanto à durabilidade. Dias (2012) argumenta que ele é essencialmente indicado para pavimentos rodoviários, concretagens em meios agressivos, ambientes marítimos e misturas de solo-cimento.

3 METODOLOGIA

3.1 Ensaios de caracterização do solo

O ensaio de Densidade Real dos Grãos é regido pela norma NBR 6508/1984, que prescreve o método de determinação da massa específica dos grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm, por meio do picnômetro. A preparação do ensaio foi feita com base na norma NBR 6457/2016, com secagem do material até a umidade higroscópica.

O ensaio de Granulometria é regido pela norma NBR 7181/2016, a qual prescreve o método para a análise granulométrica do solo realizada por sedimentação e peneiramento. A preparação do ensaio foi feita com base na norma NBR 6457/2016. Por se tratar de um solo visualmente silteoso/argiloso, com dimensões de grãos visivelmente menores que 5,0 mm, utilizou-se cerca de 1500 g de solo para separação do material grosso e fino na peneira de 2,0 mm (#10) e 80 g de material seco ao ar passante da peneira 2,0 mm para realização do ensaio de sedimentação.

Os Limites de Liquidez e Plasticidade são regidos pelas normas NBR 6459/2016 e NBR 7180/2016, respectivamente. As preparações dos ensaios foram feitas com base na norma NBR 6457/2016, com secagem do material na estufa.

O Ensaio de Compactação é regido pela norma NBR 7182/2016, onde, para esta

pesquisa, considerou-se o reuso de material com secagem prévia até a umidade higroscópica, baseando-se na energia normal de compactação com o cilindro Proctor pequeno, considerando 3 camadas, cada uma com 26 golpes.

Foram realizados o total de 3 ensaios de compactação, gerando 3 curvas de compactação finais, considerando amostra de solo natural, amostra de solo estabilizada quimicamente com cimento a 3% e outra amostra com estabilização a 7%.

3.2 Ensaios de compressão simples

Os ensaios de compressão simples foram realizados com base na norma NBR 12770/1992 (ABNT, 1992), seguindo os procedimentos especificados pela NBR 12025/2012 (ABNT, 2012b), que prescreve o método para determinação da resistência à compressão simples de corpos de prova cilíndricos de solo-cimento. A norma NBR 12024/2012 (ABNT, 2012a) especifica os procedimentos de moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos de solo-cimento.

Para a pesquisa em questão optou-se pela aplicação de deformação controlada em virtude dos equipamentos disponíveis no laboratório da instituição de ensino e também dos parâmetros que se pretendem obter.

Os corpos de prova foram moldados utilizando o molde do ensaio de compressão triaxial, com dimensões de 50,57 mm de diâmetro e 110,14 mm de altura. Utilizando o cilindro padrão como referência para a definição do número de camadas, conforme metodologia do ensaio triaxial, encontrou-se o número de 7 camadas de material, com o objetivo de atingir, no corpo de prova, a massa específica aparente seca máxima encontrada no ensaio de compactação, na umidade ótima.

O cálculo para determinação da quantidade de material (em gramas) por camada baseou-se na Equação 1 a seguir:



$$\gamma_s = \frac{P_s}{V} = \frac{1+w}{V} \frac{P_u}{V} \quad (1)$$

Onde:

γ_s = Massa específica aparente seca máxima (g/cm³);

P_s = Peso do material seco (g);

V = Volume do molde (cm³);

P_u = Peso do material úmido (g);

w = Umidade ótima do material (%).

Dessa forma tornou-se possível calcular a quantidade de material por camada, considerando os três teores estudados nesta pesquisa (natural, incorporação de 3 e 7% de cimento). A Tabela 1 apresenta a quantidade de material que foi adicionada em cada camada na moldagem dos corpos de prova.

Tabela 1. Determinação da quantidade de material em cada camada na moldagem dos corpos de prova para o ensaio de compressão simples.

T	MEASM (kg/m ³)	TUO (%)	VCP (m ³)	MMUT (kg)	MMUC (kg)
Natural	1594	22,486	2,21.10 ⁻⁴	0,4329	0,0617
3% de cimento	1598	21,963	2,21.10 ⁻⁴	0,4311	0,0616
7% de cimento	1567	22,521	2,21.10 ⁻⁴	0,4247	0,0607

Legenda: T: Teor; MEASM: Massa específica aparente seca máxima; TUO: Teor de umidade ótima; VCP: Volume do corpo de prova/molde; MMUT: Massa do material úmido total; MMUC: Massa do material úmido por camada.

O cilindro padrão foi utilizado para compactar a camada de forma dinâmica até a marca de referência, com o objetivo de alcançar a massa específica aparente seca máxima encontrada, ou seja, uma compactação próxima de 100%.

Ao todo, foram moldados 15 corpos de prova, sendo 3 de cada teor de incorporação (natural, 3 e 7% de incorporação de cimento) rompidos com 28 dias de cura e 3 de cada teor incorporado (3 e 7% de cimento) rompidos com 7 dias. Foram utilizados os tempos de cura de 7 e 28 dias em função das variáveis necessárias para utilização

posterior, em trabalhos futuros, nos cálculos de dimensionamento de pavimentos.

Após a moldagem dos corpos de prova, esses foram rompidos na prensa EMIC utilizando a célula de carga de 5000 N para os corpos de prova com idade de 7 dias e a célula de carga de 30000 N para os corpos de prova com idade de 28 dias. A velocidade de ruptura utilizada foi de 2 mm/min.

3.3 Ensaio de compressão diametral

Os ensaios de compressão diametral foram realizados com base na norma NBR 7222/2011 (ABNT, 2011), que prescreve o método para determinação da resistência à tração por compressão diametral.

Os corpos de prova foram moldados no cilindro Proctor pequeno com uso do soquete pequeno, na energia normal de compactação (3 camadas, cada camada com 26 golpes do soquete a uma altura de 30 cm) e na umidade ótima. Ao todo foram moldados 3 cilindros Proctor pequeno, um para cada teor estudado (natural, 3 e 7% de incorporação de cimento), sendo que, posteriormente no momento da extração, o corpo de prova foi dividido na sua porção central com o uso de uma espátula fina, obtendo-se dois corpos de prova cilíndricos com dimensões aproximadas de 38 mm de diâmetro e 76 mm de altura, mantendo-se a relação em que a altura é duas vezes o diâmetro da base, totalizando-se 6 corpos de prova a serem ensaiados. A velocidade de ruptura utilizada foi de 0,2 mm/min.

Por falta do dispositivo auxiliar que facilita o posicionamento do corpo de prova no equipamento de ensaio fez-se uso de duas chapas de aglomerado, isentas de defeitos, cortadas de uma maneira que os pratos da prensa encaixassem precisamente.

Após o posicionamento do corpo de prova deu-se início ao processo de aplicação de carga, utilizando a prensa EMIC com célula de carga de 5000 N. Esse procedimento foi realizado com os 6 corpos de prova.



4 RESULTADOS

4.1 Ensaio de caracterização do solo

A característica do solo foi obtida a partir dos estudos publicados por Broering *et al.* (2018) e Silva *et al.* (2018). A média alcançada da Densidade Real dos Grãos foi de 2,676 g/cm³. Para a pavimentação, a massa específica é muito utilizada para transformação de unidades gravimétricas em volumétricas e vice-versa, além de identificar o material (DNIT, 2006).

A norma NBR 6502/1995 define as frações do solo de acordo com o tamanho das partículas. A Tabela 2 apresenta as frações distribuídas do solo estudado. Nota-se uma fração predominantemente maior de silte com frações basicamente iguais de argila, areias fina, média e grossa, sendo o solo classificado como areia siltosa.

Tabela 2. Frações do Solo.

Fração	Partícula (mm)	FRS (%)
Argila	0,000 – 0,002	15
Silte	0,002 – 0,060	36
Areia Fina	0,060 – 0,200	15
Areia Média	0,200 – 0,600	19
Areia Grossa	0,600 – 2,000	13
Pedregulho	2,000 – 60,000	3

Legenda: FRS: Frações Distribuídas do Solo estudado.

Os valores de Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade encontrados foram de 36% e 28,61%, respectivamente, não havendo discrepâncias em relação aos 5% de variação impostos pelas normativas. A partir disso, o Índice de Plasticidade resultante foi de 7. Caputo (1988) demonstra a classificação quanto à plasticidade do solo de acordo com o IP, sendo o solo estudado enquadrado como Fracamente Plástico. O Índice de Grupo foi calculado de acordo com a equação normativa, chegando-se em um valor de IG igual a 4,00. Ambos os valores são utilizados para a classificação TRB. O DNIT (2006) informa que, para materiais de base de pavimentos, o Limite de Liquidez deve ser menor que 25% e o Índice de Plasticidade menor que 6%.

Os resultados dos ensaios de compactação para as amostras natural e incorporadas com 3% e 7% de cimento são observados a partir da Tabela 3.

Tabela 3. Resultados finais das umidades ótimas encontradas através das curvas de compactação geradas.

Amostra Natural		Amostra incorporada a 3%		Amostra incorporada a 7%	
UO (%)	DM (g/cm ³)	UO (%)	DM (g/cm ³)	UO (%)	DM (g/cm ³)
22,486	1,594	21,963	1,598	22,521	1,567

Legenda: UO: Umidade Ótima; DM: Densidade Máxima.

Após todos os resultados anteriormente citados e discutidos, faz-se a classificação do solo pelo método TRB, de acordo com o DNIT (2006). O solo estudado se encontra no Grupo A-4 do método de classificação. Senço (2007) avalia o Grupo A-4 classificando-o como solos finos siltosos de baixa plasticidade, tendo seu comportamento sob o pavimento precário quanto a inchamento devido às chuvas.

4.2 Ensaio de compressão simples

Foram moldados corpos de prova para os três teores de incorporação (natural, 3% e 7% de cimento). As análises permearam os tempos de cura de 7 e 28 dias. Para os corpos de prova de solo natural não faz sentido falar em tempo de cura, visto que eles não levam adição de cimento e, portanto, o valor de resistência e deformação axial máxima será sensivelmente o mesmo ao longo do tempo, desde que o mesmo não perca umidade. Foram moldados apenas três corpos de prova, com a análise comparativa de 7 e 28 dias de cura.

Como critério de aceitação para os ensaios de resistência à compressão simples, estabeleceu-se que as resistências à compressão simples individuais de cada corpo de prova não devem ter um desvio superior à 10% da resistência média do conjunto. Na Tabela 4 são apresentados os valores de resistências máximas obtidas para cada corpo de prova, o desvio em porcentagem para cada valor de resistência



máxima em relação à média do conjunto e a deformação axial média.

Tabela 4. Resistências e deformações axiais máximas no ensaio de compressão simples, considerando a amostra de solo natural.

CP	σ_c (MPa)	σ_{cm} (MPa)	DRM (%)	DA (%)	DAM (%)
CP 1	0,48		2,13	3,01	
CP 2	0,49	0,47	4,26	2,70	2,73
CP 3	0,44		6,38	2,47	

Legenda: CP: Corpo de prova; σ_c : Resistência à compressão simples; σ_{cm} : Resistência à compressão simples média; DRM: Desvio em relação à média; DA: Deformação axial; DAM: Deformação axial média.

A Tabela 5 exibe os valores obtidos para cada corpo de prova, considerando as misturas com 3 e 7% de incorporação de cimento e seus respectivos tempos de cura, retratando: valores das resistências máximas obtidas, desvio percentual em relação à média de resistência do conjunto dos três corpos de prova e a deformação axial máxima, para cada corpo de prova ensaiado.

Tabela 5. Resistências e deformações axiais máximas nos ensaios de compressão simples, considerando as amostras com incorporação de 3% e 7% de cimento, com cura de 7 e 28 dias.

TC	CP	σ_c (MPa)	σ_{cm} (MPa)	DRM (%)	DA (%)	DAM (%)
7 dias	CP 1-3%	1,06		0,93	2,43	
	CP 2-3%	1,09	1,07	1,87	1,99	2,15
	CP 3-3%	1,06		0,93	2,04	
	CP 1-7%	2,08		2,04	2,21	
	CP 2-7%	2,02	2,12	4,87	2,17	2,17
	CP 3-7%	2,27		6,91	2,12	
28 dias	CP 1-3%	1,09		9,67	2,69	
	CP 2-3%	1,32	1,21	9,39	2,02	2,38
	CP 3-3%	1,21		0,28	2,42	
	CP 1-7%	2,90		8,23	1,31	
	CP 2-7%	3,28	3,16	3,80	1,73	1,53
	CP 3-7%	3,30		4,43	1,55	

Legenda: TC: Tempo de cura; CP: Corpo de prova; σ_c : Resistência à compressão simples; σ_{cm} : Resistência à compressão simples média; DRM: Desvio em relação à média; DA: Deformação axial; DAM: Deformação axial média.

Dessa maneira é possível verificar que, para a mistura de solo com 3% de cimento, o aumento da resistência média aos 7 dias de cura atingiu

quase 130% em comparação com a amostra de solo natural. Se analisado o tempo de cura aos 28 dias, o aumento foi mais de 155%.

Com relação à incorporação de 7% de cimento, o aumento da resistência média aos 7 dias de cura atingiu mais de 350% em comparação com a amostra de solo natural. Com 28 dias de cura o aumento foi de 570% da resistência à compressão simples.

Analisando os ganhos de resistência em função da porcentagem de incorporação de cimento à mistura, constata-se que, com 7 dias de cura, os corpos de prova com 7% de adição de cimento apresentaram uma resistência quase 100% maior se comparado com os corpos de prova com 3% de cimento, ou seja, praticamente duplicaram sua resistência à compressão simples. Com 28 dias de cura essa diferença ficou ainda maior, sendo a resistência dos corpos de prova com 7% de cimento superior em mais de 160% se comparados com o sistema de incorporação com 3% de cimento.

Observa-se, portanto, que a adição de cimento tende a aumentar a resistência do sistema, constatando o fato de que a deformação apresentou comportamentos diferentes com a adição de cimento, se comparados os corpos de prova isoladamente para o mesmo tempo de cura. Para as amostras com 7 dias de tempo de cura destaca-se que o aumento do teor de cimento resultou em uma variação ínfima da deformação axial de 0,02%, podendo-se concluir que não houve variação significativa. No entanto, para as amostras com 28 dias de tempo de cura, destaca-se que o aumento do teor de cimento diminuiu a deformação axial resultante em uma média superior a 0,8%.

Nos trabalhos de Dias (2012a) há o estudo da resistência à compressão simples utilizando incorporações de 8 e 12% de cimento, sendo possível perceber que o aumento significativo da resistência ocorre com 90 dias de cura, pois no comparativo entre 7 e 28 dias não há um aumento tão significativo se comparado com os ganhos de resistência obtidos no intervalo entre 0 e 7 dias de cura e 28 e 90 dias de cura, sendo uma característica observada também na presente

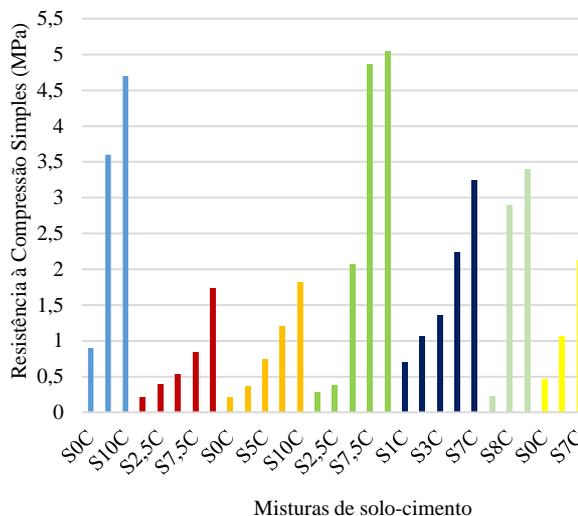


pesquisa, pois os corpos de prova com 3% de incorporação de cimento apresentaram um ganho de resistência próximo de 13% no intervalo de cura de 7 a 28 dias. Já em relação aos corpos de prova com 7% cimento, o incremento na resistência foi próximo de 50% no intervalo de tempo de cura de 7 a 28 dias.

Dias (2012b), em seu trabalho de análise da resistência à compressão não-confinada de misturas de solo-cimento visando a aplicação do sistema de estabilização Dry-Mix, investiga resultados de módulos de elasticidade em misturas com argila e teores de cimento.

Com a análise dos seus resultados é possível concluir que o comportamento do cimento nas misturas de Dias (2012b) seguiu o mesmo padrão desta pesquisa. Se analisados os tempos de cura de 7 e 28 dias observa-se que o aumento do teor de cimento resulta no aumento da deformação axial, considerando 7 dias de tempo de cura (apesar do aumento do módulo de elasticidade), enquanto que para 28 dias de cura a deformação diminuiu. Analogamente, o aumento do tempo de cura resultou no aumento da deformação axial para as amostras com 100 kg de cimento CPIII (apesar do aumento do módulo de elasticidade), enquanto que para as amostras com 200 kg de cimento CPIII a deformação diminuiu com o aumento do tempo de cura.

A Figura 2 apresenta um resumo comparativo com os valores obtidos nos trabalhos de outros autores, juntamente com os valores obtidos no presente trabalho. Todos os valores apresentados correspondem à média de 3 corpos de prova nos ensaios de resistência à compressão simples para um tempo de cura de 7 dias. Foram criadas nomenclaturas para todas as misturas apresentadas. Todas as nomenclaturas iniciam-se pela letra “S”, que corresponde ao solo. Para designar a inclusão do cimento adotou-se a letra “C”, estando o valor da porcentagem do aditivo químico antes da respectiva letra de designação.



Misturas de solo-cimento

Figura 2. Resistências máximas obtidas para cada mistura de solo-cimento dos diferentes trabalhos apresentados. Legenda: Os trabalhos apresentados (são destacados, da esquerda para a direita: Cruz (2004); Muhuthan e Sariosseiri (2008) - Solo de Aberdeen; Muhuthan e Sariosseiri (2008) - Solo de Everett; Muhuthan e Sariosseiri (2008) - Solo de Palouse; Foppa (2005); Dias (2012); Presente pesquisa (2019).

Observa-se que o comportamento comum em todos os solos é que, conforme o aumento da quantidade de cimento, há um aumento da resistência máxima. As resistências máximas obtidas no programa experimental realizado nesta pesquisa estão de acordo com os intervalos resultantes obtidos pelos outros autores.

4.3 Ensaios de compressão diametral

Foram moldados corpos de prova para os três teores de incorporação (natural, 3 e 7% de incorporação do cimento), sendo que as análises permearam o tempo de cura de 28 dias. Para os corpos de prova de solo natural não faz sentido falar em tempo de cura, visto que estes não levam adição de cimento e, portanto, o valor de resistência será sensivelmente o mesmo ao longo do tempo.

Os resultados dos ensaios de compressão diametral para os teores de incorporação de cimento estudados estão apresentados na Tabela 6, considerando a resistência à tração, a resistência à tração média e o desvio em relação à média dos teores para cada corpo de prova.



Tabela 6. Resultados do ensaio de compressão diametral nos teores de incorporação de cimento estudados, aos 28 dias de cura.

TA	CP	σ_t (MPa)	σ_{tm} (MPa)	DRM (%)
Solo natural	CP 1	0,09	0,09	0,00%
	CP 2	0,09		0,00%
3% de cimento	CP 1	0,32	0,365	12,33%
	CP 2	0,41		12,33%
7% de cimento	CP 1	0,74	0,73	1,37%
	CP 2	0,72		1,37%

Legenda: TA: Tipo de amostra; CP: Corpo de prova; σ_t : Resistência à tração; σ_{tm} : Resistência à tração média; DRM: Desvio em relação à média.

Dessa maneira é possível verificar que, para a mistura de solo com 3% de cimento, o aumento da resistência média aos 28 dias de cura foi superior a 300% em comparação com a amostra de solo natural. Com relação à incorporação de 7% de cimento o aumento da resistência média aos 28 dias de cura atingiu mais de 700% em comparação com a amostra de solo natural. Esse fato indica que, conforme o maior nível de cimentação, maior é a resistência à tração.

Analisando os ganhos de resistência em função da porcentagem de incorporação de cimento à mistura, constata-se que os corpos de prova com 7% de adição de cimento apresentaram uma resistência 100% maior se comparados com os corpos de prova com 3% de cimento, ou seja, duplicaram sua resistência à tração.

A Tabela 7 faz o comparativo entre os resultados de resistência à compressão simples e de tração obtidos com os corpos de prova aos 28 dias de cura. Constata-se que a resistência à tração resulta em cerca de 20% a 30% da resistência à compressão simples, sendo os maiores percentuais quando analisadas as amostras com incorporação de cimento.

Então, de maneira prática, quando não for possível realizar ensaios de tração, os autores indicam, para o material estudado, uma relação para estimativa representada pela Equação 2.

Tabela 7. Comparativo entre as resistências à compressão e tração, considerando as amostras com 28 dias de cura.

TA	σ_{cm} (MPa)	σ_{tm} (MPa)	PR (%)
----	---------------------	---------------------	--------

Solo natural	0,47	0,09	19,15
3% de cimento	1,21	0,365	30,16
7% de cimento	3,16	0,73	23,10

Legenda: TA: Tipo de amostra; σ_{cm} : Resistência à compressão simples média; σ_{tm} : Resistência à tração média; PR: Porcentagem representativa da resistência à tração comparada à compressão simples.

$$R_T = 0,25 \times R_{CS} \quad (2)$$

Onde:

R_T = resistência à tração;

R_{CS} = resistência à compressão simples.

Da mesma forma, é possível avaliar, a partir da Figura 3, que a inclinação da reta dos resultados de compressão simples é maior se comparado com os resultados de compressão diametral, o que enfatiza um crescimento mais acentuado dos valores a medida que o teor de cimento vai aumentando, enquanto o crescimento dos valores de compressão diametral são mais lentos (as linhas de tendência não são paralelas).

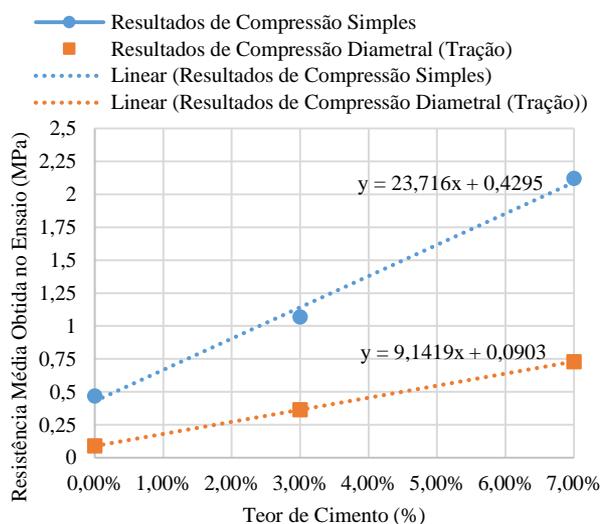


Figura 3. Comparativo entre os resultados de compressão simples e compressão diametral (tração).

5 CONCLUSÕES

Os ensaios de compressão simples resultaram, para as amostras naturais, resistência à compressão simples média igual a 0,47 MPa e deformação axial média de 2,73%. Em relação às



amostras com 3 e 7% de incorporação de cimento aos 7 dias de cura, a resistência a compressão simples média resultou em 1,07 MPa, com deformação axial média de 2,15%, e resistência a compressão simples média de 2,12 MPa, com deformação axial média de 2,17%, respectivamente. Já em relação às amostras com 3 e 7% de incorporação de cimento aos 28 dias de cura a resistência a compressão simples média resultou em 1,21 MPa, com deformação axial média de 2,38%, e resistência a compressão simples média de 3,16 MPa, com deformação axial média de 1,53%, respectivamente.

Observa-se que a adição de cimento tende a aumentar a resistência à compressão simples do sistema, constatando o fato de que a deformação apresentou comportamentos diferentes com adição de cimento se comparados os corpos de prova isoladamente para o mesmo tempo de cura. Para as amostras com 7 dias de tempo de cura destaca-se que o aumento do teor de cimento resultou em uma variação ínfima da deformação axial, de 0,02%, podendo-se concluir que não houve variação significativa da deformação. No entanto, para as amostras com 28 dias de tempo de cura, destaca-se que o aumento do teor de cimento diminuiu a deformação axial resultante em uma média superior a 0,8%.

Ainda com relação à compressão simples, analisando o mesmo teor de cimento, é possível constatar novamente comportamentos diferentes da deformação axial em relação à variação do tempo de cura para o mesmo teor de cimento. Para as amostras com 3% de incorporação a deformação axial aumentou em uma média superior a 0,2% com o aumento do tempo de cura (de 7 para 28 dias). No entanto, para as amostras com 7% de incorporação de cimento, a deformação axial diminuiu em uma média superior a 0,6% com o aumento do tempo de cura (de 7 para 28 dias).

Assim como na incorporação com 3% de cimento as deformações axiais dos corpos de prova com 7% de adição de cimento apresentaram reduções superiores a 0,5%. No entanto, em se tratando dos corpos de prova com

28 dias de cura, constataram-se diminuições resultantes a 1,2% no comparativo com os corpos de prova com solo natural.

No ensaio de compressão diametral constataram-se aumentos de 300 e 700% de resistência em comparação com a amostra de solo natural a partir das incorporações de 3 e 7% de cimento, respectivamente. Dessa forma, quanto maior o nível de cimentação, maior é a resistência à tração na compressão. Comparando os teores de incorporação houve um aumento de 100% na resistência de 3 para 7% de incorporação de cimento.

No comparativo dos resultados de compressão simples e compressão diametral a resistência à tração resulta em cerca de 20 a 30% da resistência à compressão, sendo os maiores percentuais quando analisadas as amostras com incorporação de cimento. Constatou-se também que o comportamento das curvas de compressão simples e compressão diametral é linear, com crescimento da resistência a medida que o teor de cimento vai aumentando.

Sobretudo, quando não for possível realizar ensaios de tração, para o material estudado, uma estimativa de que a resistência à tração corresponde a 25% da resistência à compressão simples pode ser utilizada.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984), NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica, Brasil.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1995), NBR 6502: Rochas e solos, Brasil.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1996), NBR 13600: Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C, Brasil.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016a), NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, Brasil.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016b), NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez, Brasil.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016c), NBR 7180: Solo – Determinação



- do limite de plasticidade, Brasil.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016d), NBR 7181: Solo – Análise granulométrica, Brasil.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016e), NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação, Brasil.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12024: Solo-cimento — Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos — Procedimento. Brasil. 2012a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12025: Solo-cimento — Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio. Brasil. 2012b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12770: Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada - Método de ensaio. Brasil. 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Brasil. 2011.
- BROERING, Wellington Borba et al. A Influência da Incorporação de Cimento em Misturas de Solos Residuais de Granito da Região Rural de Biguaçu, Santa Catarina, na Umidade Ótima, Considerando sua Aplicabilidade em Projetos de Pavimentação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19º, 2018, Salvador. Anais COBRAMSEG 2018. Salvador: Abms, 2018. p. 1 - 10.
- CAPUTO, H. P. (1988), Mecânica dos solos e suas aplicações: Fundamentos, 6. ed, Rio de Janeiro: Ltc, Brasil.
- CRUZ, M. Novas tecnologias da aplicação de solo-cimento, Dissertação de Mestrado Departamento de Engenharia Civil Estruturas, Geotecnia e Fundações. Universidade do Minho, Guimarães, 2004.
- DIAS, Débora Regina. Resistência à compressão não confinada de misturas de solo-cimento visando à aplicação do sistema de estabilização Dry-Mix. 2012. 220 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012b.
- DIAS, João José da Fonseca Marques Simões. Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas. 2012. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2012a.
- DNIT (2006). Manual de pavimentação, Diretoria de Planejamento e Pesquisa, Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 3. ed., Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- FOPPA, D. Análise de variáveis chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2005.
- GOULARTE, Cristina Lemos; PEDREIRA, Celso Luis da Silva. Estabilização química de solo com adição de cimento ou cal como alternativa de pavimento. [s.l.], Rio Grande, v. [s.l.], n. [s.l.], p.1-7, 2009.
- MUHUNTHAN, B., Sariosseiri, F. Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils, Engineering Geology, Washington, pgs. 119-125, 2008.
- PEREIRA, Kiev Luiz de Araújo. Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos. 2012. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.
- RISSARDI, João Luiz; BERTAZO, Igor Luiz; JOHANNE, Amanda dalla Rosa. A eficiência da cal para base de pavimentos utilizando um solo representativo da região metropolitana de Curitiba/PR. Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul, Bento Gonçalves, v. 1, n. 1, p.146-153, jul. 2017.
- SANDRONI, S., CONSOLI, N. C. Sobre a Prática da Engenharia Geotécnica com Dois Solos Difíceis: Os Extremamente Moles e os Expansivos. COBRAMSEG 2010. Anais. PP. 97–186. 2010.
- SARTORI, Guilherme. Estudo de estabilização de solos para fins de pavimentação na região de Campo Mourão. 2015. 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2015.
- SENÇO, W. (1997). Manual de técnicas de pavimentação, volume I, 1ª. Ed., Pini, São Paulo, SP, Brasil.
- SILVA, Patricia Odozynski da et al. Caracterização Física de um Solo Residual com Aplicabilidade em Projetos de Pavimentação no Município de Biguaçu – Santa Catarina. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19º, 2018, Salvador. Anais COBRAMSEG 2018. Salvador: Abms, 2018. p. 1 - 10.