

Aplicação do método de Consoli (2014) para estimativa dos parâmetros de resistência para rejeito de minério de ferro

Maiki Mafessoli

Doutorando, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, mai.kimaf@gmail.com

Lucas Festugato

Professor associado, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, lucas@ufrgs.br

Sérgio Filipe Veloso Marques

Pós-doutorando, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, s.marques@ufrgs.br

Nilo Cesar Consoli

Professor titular, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, consoli@ufrgs.br

RESUMO: Para a determinação dos parâmetros de resistência da envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb é fundamental a realização de ensaios especiais, tais como ensaios triaxiais, *simple shear*, *hollow cylinder* e entre outros, que além de apresentarem execução complexa e trabalhosa, usualmente são demorados e onerosos. Diante desse problema, Consoli (2014) desenvolveu um método para estimar os valores de intercepto coesivo e ângulo de atrito interno para solos cimentados com base em ensaios de resistência à compressão simples (q_u) e resistência à tração por compressão diametral (q_t). Para aplicação do método, utilizou-se um rejeito de minério de ferro granular, proveniente do Quadrilátero Ferrífero (MG) estabilizado com cimento Portland CP V-ARI (alta resistência inicial) com 28 dias de cura. Foram realizados ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral, sendo a moldagem dos corpos de prova realizada segundo os pontos ótimos da curva de compactação Proctor normal (peso específico de 19 kN/m^3 e teor de umidade de 11%); os teores de cimento variaram de 1 a 50%, a fim de verificar se a relação entre a resistência à tração e compressão simples fosse única. Para verificação e comparação do método utilizado, compararam-se os resultados obtidos com os ensaios triaxiais convencionais drenados (CID) e não-drenados (CIU) realizados por Mafessoli *et al.* (2023). Esse estudo estabeleceu que a razão q_t/q_u era única para cada mistura de rejeito estabilizado (variando de 1 a 50%), resultando na relação de 0,11. Para 2,5% de cimento, obteve-se uma compressão simples igual a 580,11 kPa enquanto para compressão diametral em 63,81 kPa. Comparando com os resultados dos ensaios triaxiais de Mafessoli *et al.* (2023), notou-se que o método de Consoli (2014) superestimou o ângulo de atrito interno efetivo em 16,95% (de $38,11$ para $45,89^\circ$) e subestimou o intercepto coesivo em 53,93% (de 255,15 para 117,54 kPa). Constatou-se que para esse rejeito de minério de ferro estabilizado com cimento Portland o ajuste não foi satisfatório, porém, resultou em uma estimativa inicial, que pode ser realizada previamente para definição da ordem de grande dos parâmetros de resistência, como por exemplo, em um estudo inicial pré-projeto e, posteriormente, a realização de ensaios triaxiais para a determinação desses parâmetros.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeitos de Mineração, Estabilização de Solos, Ensaios Triaxiais, Método de Consoli, Cimento Portland.

ABSTRACT: To determine the resistance parameters of the Mohr-Coulomb rupture envelope, it is essential to carry out special tests, such as triaxial tests, simple shear, hollow cylinder, and others, which in addition to being complex and laborious to execute, are usually time-consuming and costly. Faced with this problem, Consoli (2014) developed a method to estimate the cohesive intercept and internal friction angle values for cemented soils based on unconfined compressive strength (q_u) and splitting tensile strength (q_t) tests. To apply the method, granular iron ore waste was used, from the Quadrilátero Ferrífero (MG) stabilized with Portland CP V-ARI cement (high initial strength) with 28 days of curing. Unconfined compressive strength and splitting

tensile strength tests were carried out, with the molding of the specimens carried out according to the optimal points of the normal Proctor compaction curve (specific weight of 19 kN/m³ and moisture content of 11%); cement contents varied from 1 to 50%, to verify whether the relationship between splitting tensile strength and unconfined compressive strength was unique. To verify and compare the method used, the results obtained with conventional triaxial drained (CID) and non-drained (CIU) tests carried out by Mafessoli et al. (2023). This study established that the q_t/q_u ratio was unique for each stabilized waste mixture (ranging from 1 to 50%), resulting in a ratio of 0.11. For 2.5% cement, a compressive strength equal to 580.11 kPa was obtained while for splitting tensile strength it was 63.81 kPa. Comparing with the results of triaxial tests by Mafessoli et al. (2023), it was noted that the method of Consoli (2014) overestimated the effective internal friction angle by 16.95% (from 38.11 to 45.89°) and underestimated the cohesive intercept by 53.93% (from 255.15 to 117.54 kPa). It was found that for this iron ore waste stabilized with Portland cement the adjustment was not satisfactory, however, it resulted in an initial estimate, which can be carried out previously to define the order of magnitude of the resistance parameters, for example, in an initial pre-project study and, subsequently, carrying out triaxial tests to determine these parameters.

KEYWORDS: Mining Tailings, Soil Stabilization, Triaxial Tests, Consoli Method, Portland Cement.

1 INTRODUÇÃO

O processo de mineração do minério de ferro consiste basicamente na fragmentação da matéria-prima, na adição de água e produtos químicos em uma planta de tratamento para sua extração, produzindo um enorme volume de resíduos na forma de polpa, chamados de rejeitos (VIEIRA; BARBOSA, 2012). Devido à grande quantidade de água presente nas polpas, os rejeitos de minério de ferro tendem a ter uma alta mobilidade, associada a baixa ou inexistente resistência ao cisalhamento. O método tradicional para eliminar este rejeito emprega estruturas de contenção chamadas de diques ou barragens para reservar esta mistura de sólidos e água (DAVIES, 2001). Entretanto, a história brasileira tem mostrado que essa maneira de disposição tem um risco associado considerável, como foi evidenciado pelas recentes rupturas da Barragem de Fundão em 2015 e da Barragem do Córrego do Feijão em 2019 no Brasil, notavelmente quando o método à montante é utilizado para seu alteamento (AGURTODETZEL *et al.*, 2016; PEREIRA; CRUZA; GUIMARÃES, 2019).

É nesse contexto que surge a ideia de empregar a tecnologia intitulada de Estabilização de Solos (LAMBE e WHITMAN, 1969; MURTHY, 2002). As técnicas de estabilização de solos aplicadas na prática da Engenharia Geotécnica são utensílios essenciais para “arrumar” ou “corrigir” os problemas de materiais pouco resistentes (MUNFAKH e WYLLIE, 2000). A Estabilização de Solos pode ser compreendida como um método artificial utilizado com o propósito de melhorar as propriedades geotécnicas necessárias para uma determinada obra de Engenharia (AGGARWAL, 2011; BAPTISTA, 1976; INGLES e METCALF, 1972; KÉZDI, 1979; LAMBE e WHITMAN, 1969; MURTHY, 2002; TSCHEBOTARIOFF, 1973; WINTERKORN, 1955; WINTERKORN e FANG, 1991).

Especificamente, a estabilização química, ponto fundamental deste trabalho, é aquela nos quais as interações químicas, ao invés de físico-químicas e físicas, exercem um papel preeminente. Ela abrange todos os métodos em que um ou mais compostos químicos são inseridos ao solo para a intervenção. Dessa forma, várias reações químicas ocorrem entre os constituintes do solo e os aditivos utilizados. Dentre algumas das reações básicas, podemos citar: hidratação, troca iônica, reação pozolânica, floculação, precipitação, polimerização, oxidação e carbonatação (KÉZDI, 1979; PETRY e LITTLE, 2002; WINTERKORN e FANG, 1991). A estabilização química usualmente aplicada em obras de pavimentação rodoviária recorre à cal, ao cimento, aos compostos de fósforo, aos derivados de petróleo (asfalto, alcatrão, betume, emulsões asfálticas etc.), aos cloretos, às resinas, às escórias, aos polímeros, aos resíduos ou materiais recicláveis (industriais, domésticos e/ou urbanos), aos subprodutos industriais, aos reagentes químicos e, às vezes, combinações desses (GILLOTT, 1987; HAMZAH, 1983; HOSSAIN, 2010; WINTERKORN e FANG, 1991). A estabilização química por cimento e/ou cal é uma técnica já comprovada para melhorar o desempenho dos solos (KANIRAJ e HAVANAGI, 2001).

Para a determinação dos parâmetros da envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb é necessário a execução de ensaios triaxiais, simple shear e entre outros, que além de terem certa complexidade e cuidados em seu manuseio, usualmente são demorados e onerosos (MARQUES, 2016). Consoli (2014) desenvolveu um método que permite estimar os valores de ϕ' e c' para solos cimentados com base no ensaio de tração por compressão

diametral (q_t) e no ensaio de compressão simples (q_u). Assumindo que $\sigma'_{3t} = q_t$ e $\sigma'_{1t} = -3q_t$, segundo Jaeger, Cook e Zimmerman (2007), é possível traçar os círculos de Mohr representativos desses ensaios e representar uma envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb, como está apresentado na Figura 1. Pode-se obter que os parâmetros ϕ' e c' , respectivamente, são calculados pelas Equações 1 e 2:

$$\phi' = \arcsen \frac{1 - 4 q_t/q_u}{1 - 2 q_t/q_u} = \arcsen \frac{1 - 4 \zeta}{1 - 2 \zeta} \quad (1)$$

$$c' = \frac{q_u \left(1 - \frac{1 - 4 q_t/q_u}{1 - 2 q_t/q_u}\right)}{2 \cos \left(\arcsen \frac{1 - 4 q_t/q_u}{1 - 2 q_t/q_u}\right)} = \frac{q_u \left(1 - \frac{1 - 4 \zeta}{1 - 2 \zeta}\right)}{2 \cos \left(\arcsen \frac{1 - 4 \zeta}{1 - 2 \zeta}\right)} \quad (2)$$

em que $\zeta = q_t/q_u$ é um escalar representativo da relação entre as tensões q_t sobre q_u .

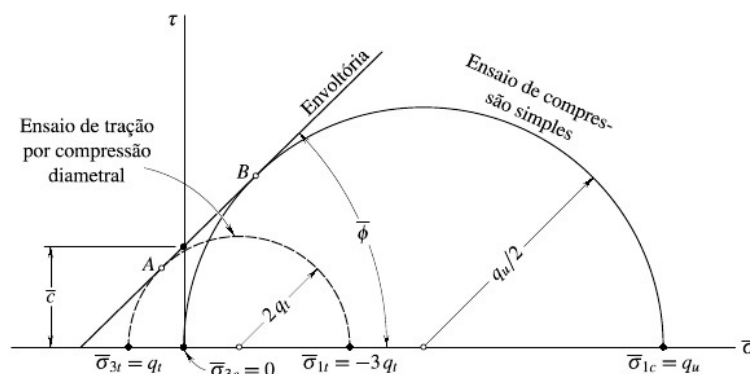


Figura 1. Envoltória de Mohr-Coulomb com base em círculos de Mohr de ensaios de q_u e q_t .

Genericamente, considera-se que a resistência à tração nas condições de teor de umidade ótimo e peso específico aparente seco, atinge cerca de 10% da resistência à compressão simples (CLOUGH et al., 1981; INGLES e METCALF, 1972). Clough et al. (1981) depararam-se com valores de resistência à tração variando de 0,09 a 0,12 da resistência à compressão simples em solos naturalmente cimentados e de 0,11 a 0,13 em solos artificialmente cimentados. Mais recentemente, Consoli (2014) verificou que q_t/q_u de uma areia artificialmente cimentada pode variar de 0,09 a 0,18 a depender do tipo de solo e ligante empregado.

Babic (1987), ao estudar um solo arenoso em três granulometrias distintas (fina, média e grossa), verificou que o tipo de cimento empregado e a granulometria do corpo de prova não influenciavam a razão entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão simples. Porém, o autor percebeu que a densidade de compactação influenciava na relação, dispondo valores de q_t/q_u de 0,15, 0,13 e 0,115 para densidades de compactação (ensaio de Proctor modificado) de 90, 95 e 98%, respectivamente. A média da relação q_t/q_u para todas as misturas analisadas foi de 0,12.

Consoli *et al.* (2010), ao estudar misturas de areia de Osório com cimento Portland cujos teores de cimento eram de 1, 2, 3, 5, 7, 9 e 12% em corpos de prova com três pesos específicos secos diferentes e, verificaram que a razão entre a resistência à tração por compressão diametral e à compressão simples foi igual a 0,15, independente do índice porosidade/teor volumétrico de cimento (η/C_{iv}). Consequentemente, as metodologias de dosagem com base em critérios racionais podem concentrar-se, para este material, tanto em ensaios de tração quanto de compressão simples.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Três partes compuseram o programa experimental. A primeira englobou a caracterização físico-química do rejeito de minério de ferro (RMF). Para informações sobre as características básicas geotécnicas do RMF, pode-se consultar Mafessoli (2022) e Mafessoli *et al.* (2023). A segunda compreendeu a avaliação dos efeitos do teor de cimento (C_i) tanto na q_u quanto na q_t de corpos de prova compactados de rejeitos de minério de ferro-cimento. Nesta etapa, as dosagens estabelecidas foram os valores de peso específico aparente seco de 19

kN/m³, teor de umidade de 11% e os teores de cimento (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 25, 30, 35, 40, 45 e 50%), ensaiados considerando um período de cura de 28 dias. Para a terceira fase, uma única dosagem representativa (19 kN/m³ e $C_i = 2,5\%$) foi escolhida para os testes triaxiais CID e CIU. Em relação a terceira etapa, pode-se encontrar os resultados triaxiais em Mafessoli (2022) e Mafessoli *et al.* (2023).

2.1 Materiais

Os materiais empregados nesta pesquisa, catalogaram-se em:

a) Agente a ser estabilizado = rejeito de minério de ferro (RMF) ($d < 0,42$ mm); b) Estabilizador: cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI); e c) Água = água destilada.

2.1.1 Rejeito de Minério de Ferro (RMF)

O rejeito de minério de ferro foi cedido por uma indústria mineradora localizada no Quadrilátero Ferrífero, região localizada no centro-sul do estado de Minas Gerais, Brasil. A composição granulométrica do rejeito de minério de ferro desta pesquisa foi empregada uma mistura de 80% de rejeitos granulares (maiores do que 0,05 mm) e de 20% de rejeitos ultrafinos (constituídos por partículas menores do que 0,01 mm), intitulada mistura de RMF 80/20. O RMF possui G_s de 2,916 e sendo não-plástico (NP).

2.1.2 Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI)

O cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) foi empregado devido seu rápido ganho de resistência à baixos tempos de cura. Normalmente possui uma massa específica real dos grãos variando entre 3,10 e 3,15 g/cm³ (nesse caso, com valor de 3,15 g/cm³, segundo o Fabricante) e, já sua massa específica aparente em torno de 0,9 a 1,2 g/cm³, ambos para a temperatura de 20°C. Outro ponto importante é o seu pH em solução aquosa, que usualmente está entre $12 < \text{pH} < 14$.

2.2 Métodos

2.2.1 Moldagem e Cura das Amostras

O método de sub-compactação foi empregado na moldagem dos corpos de prova cilíndricos (50 mm de diâmetro e 100 mm de altura) para todos os ensaios aqui realizados. O processo de mistura foi cuidadosamente conduzido manualmente e continuou até a obtenção de uma massa homogênea. Após a moldagem, os corpos de prova foram pesados, medidos, acondicionados em sacos plásticos e encaminhados para sala úmida (umidade relativa de 95%) para ser curado à temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 28 dias. No 27º dia de cura, cada corpo de prova foi submerso em água por no mínimo 24 horas (temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$) visando aumentar o grau de saturação e, assim, diminuir possíveis efeitos de sucção.

2.2.2 Resistência à Compressão Simples e Tração por Compressão Diametral

Uma prensa de carregamento automático foi utilizada para realizar os ensaios de resistência não-confinada a uma taxa de deslocamento de 1,14 mm por minuto. Dentro de cada ensaio, a carga foi registrada usando uma célula de carga de 20 kN (0,005 kN de resolução). Como critério de aceitação, o valor de resistência individual (q_u e/ou q_t) não deve divergir em mais de 15% da resistência média da triplicata.

3 RESULTADOS

3.1.1 Resistência à Compressão Simples e Tração por Compressão Diametral

Nas Figuras 2a,b são apresentados a resistência à compressão simples e a resistência à tração por compressão diametral em função do teor de cimento para 28 dias de cura. Pode-se perceber, que o teor de cimento teve um grande efeito sobre a resistência à compressão e à tração por compressão diametral do

material. É notável o aumento de q_u e q_t com a adição de cimento Portland. Verifica-se que uma pequena quantidade de cimento foi suficiente para produzir aumentos significativos de resistências.

Comparando, por exemplo, de 1 para 50%, a resistência à compressão simples para 28 dias de cura, aumentou de 0,25 para 26,57 MPa (106,28 vezes). Realça-se ainda, que todos os pontos foram muito bem adequados com ajustes do tipo linear, mesmo tendo uma ampla faixa variando de 1 a 50% de cimento. Desta forma, fica provado que para o rejeito de minério de ferro estudado, a resistência à compressão simples cresce linearmente em função do teor de cimento e, também, para teores de até 50% de cimento Portland.

Comparando, por exemplo, de 1, 5 e 50%, a resistência à tração por compressão diametral para 28 dias de cura, aumentou de 0,02 para 0,20 e para 2,87 MPa (10 e 14,35 vezes, respectivamente), respectivamente. Novamente, de forma análoga à resistência à compressão simples, ficou evidenciado que para o rejeito de minério de ferro estudado, a resistência à tração por compressão diametral cresce linearmente em função do teor de cimento e, extraordinariamente para teores de até 50% de cimento Portland.

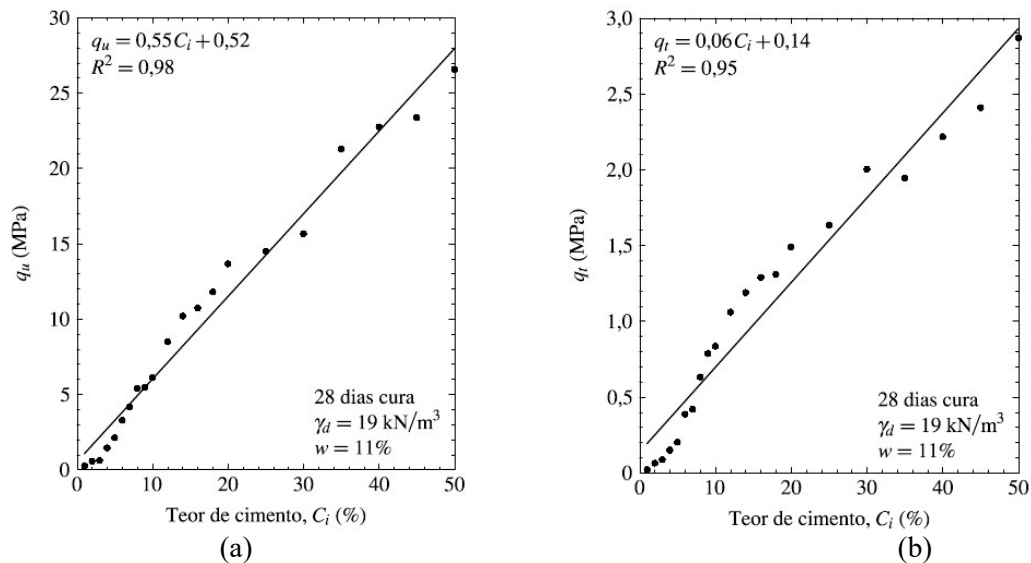


Figura 2. Resistências em função do teor de cimento: (a) q_u ; e (b) q_t .

Na Figura 3, é apresentado a relação entre q_t em função de q_u , e dessa forma, podendo determinar o valor de q_t/q_u . À vista do que foi apresentado, é possível ponderar, que a relação q_t/q_u resulta em um único escalar, no caso desta pesquisa, $q_t/q_u = 0,11$. Essa relação evidencia que a relação entre as resistências das misturas rejeito-cimento independe da porosidade, do teor de cimento e, certamente, do índice porosidade/teor volumétrico de cimento.

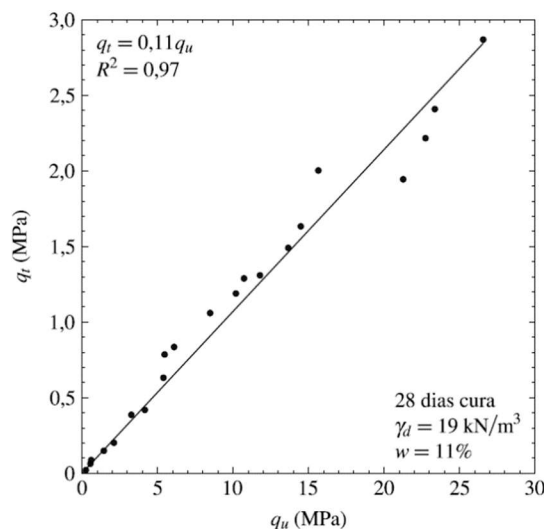


Figura 3. Resistência q_t em função de q_u com C_i variando de 1 a 50%.

Desta maneira, existe uma proporcionalidade direta entre as resistências à tração e à compressão do material, a qual é válida para todo o peso específico aparente seco empregado (19 kN/m^3) e do teor de cimento (1 a 50%) apresentados nessa subseção. Como consequência, é factível inferir que metodologias de dosagem racionais podem ser estabelecidas, salientadas em ensaios de compressão e/ou tração, uma vez que as resistências estão intrinsecamente associadas, na forma de um escalar.

3.1.2 Aplicação do método de Consoli (2014)

Em seu estudo, Consoli (2014) conseguiu avaliar a influência da relação da porosidade na previsão da envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb de solos estabilizados, através de ensaios de resistência à compressão simples (q_u) e de tração por compressão diametral (q_t) realizados para cada mistura solo-cimento, sem a necessidade de ensaios triaxiais. Esse estudo estabelece que a razão q_t/q_u é única para cada mistura de solo estabilizado, onde demonstra que o ângulo de atrito interno efetivo para cada mistura de solo-cimento é independente da porosidade e do teor de cimento e, o intercepto coesivo efetivo é diretamente proporcional em função de q_u e/ou q_t correspondente ao solo estabilizado.

Por meio de ensaios triaxiais convencionais drenados e não-drenados com tensões efetivas variando de 200 a 1.600 kPa, Mafessoli *et al.* (2023) obteve os valores de $38,11^\circ$ de ângulo de atrito e intercepto coesivo de 255,15 kPa. Os ensaios foram realizados em amostras com peso específico de 19 kN/m^3 e teor de umidade de 11%.

Como relatado anteriormente, obteve-se que $q_t/q_u = 0,11$ e realizando uma média entre os teores de 2 e 3% para 28 dias de cura, chega-se em $q_u = 580,11 \text{ kPa}$, para 2,5% de teor de cimento. Sendo assim, empregando as Equações 1 e 2, temos que o ângulo de atrito interno efetivo e o intercepto coesivo, são, respectivamente:

$$\phi' = \arcsen \frac{1 - 4 \times 0,11}{1 - 2 \times 0,11} = 45,89^\circ \text{ e } c' = \frac{580,11 \times \left(1 - \frac{1 - 4 \times 0,11}{1 - 2 \times 0,11}\right)}{2 \cos \left(\arcsen \frac{1 - 4 \times 0,11}{1 - 2 \times 0,11}\right)} = 117,54 \text{ kPa}$$

Pelos resultados, nota-se que o método de Consoli (2014) superestimou o ângulo de atrito interno efetivo em 16,95% (de $38,11$ para $45,89^\circ$) e subestimou o intercepto coesivo em 53,93% (de 255,15 para 117,54 kPa), como está apresentado na Figura 4, inserindo somente os círculos de Mohr dos ensaios drenados, apenas para fins de visualização.

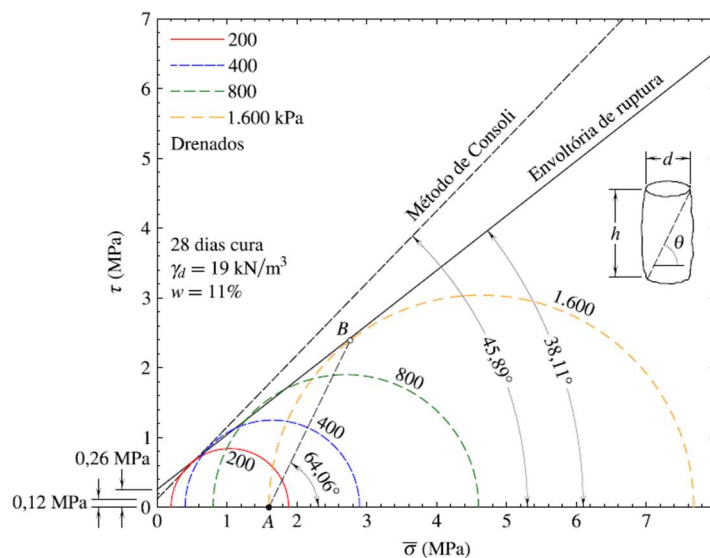


Figura 4. Comparação envoltória de ruptura dos ensaios triaxiais e pelo método de Consoli (2014).

Verifica-se que para o rejeito de minério de ferro estabilizado com cimento CP V-ARI não foi satisfatório, porém, resultou em uma estimativa inicial, que pode ser realizada previamente apenas para se ter uma noção da ordem de grande dos parâmetros de resistência, como por exemplo, em um estudo inicial pré-projeto e, posteriormente, é claro, a realização dos ensaios triaxiais para a determinação mais congruente desses parâmetros para projeto. Entretanto, realizando uma envoltória de ajuste duplo os resultados podem ser mais

satisfatórios. Isso se deve ao fato de que o método de Consoli (2014) é aplicável para tensões efetiva de até 400 kPa. Assim, para uma aplicação mais sensata do método dever-se-ia empregar uma envoltória de ruptura dupla, isto é, uma envoltória para tensões efetivas de até 400 kPa e uma outra para maiores tensões. Portanto, teriam-se dois valores de ângulo de atrito interno efetivo e dois interceptos coesivos.

4 CONCLUSÕES

É possível afirmar que através dos resultados obtidos, a estabilização foi realizada com êxito, tendo visto os aumentos significativos de resistência, rigidez e parâmetros de cisalhamento. Desta forma, por meio do emprego da técnica de estabilização química de solos com cimento CP V-ARI a aplicabilidade de desse material estabilizado em obras de engenharia, pode ser empregada na prática.

Tanto a resistência a compressão simples, quanto a resistência à tração por compressão diametral tiveram um aumento significativo em função do teor de cimento. Verificou-se que uma pequena quantidade de cimento já era suficiente para produzir altas resistências. Para a faixa de teor de cimento estudado, os valores de q_u e q_t cresceram linearmente em relação ao teor de cimento.

Aplicando o método de Consoli (2014) para estimativa dos parâmetros ϕ' e c' , calculou-se os parâmetros, respectivamente em 45,89° e 117,54 kPa. O ângulo de atrito interno foi superestimado em 16,95%, enquanto o intercepto coesivo por subestimado em 53,93%, verificando uma pouca adequabilidade do método ao rejeito de minério de ferro estabilizado com CP V-ARI. Dessa forma, verificou-se a necessidade de aplicação de uma envoltória dupla para obtenção de resultados mais próximos dos ensaios triaxiais.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar seu agradecimento à Vale S.A. e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio ao grupo de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aggarwal, S. (2011) Soil stabilization techniques for road construction. In: Proceeding of the All India Council for Technical Education. Ludhiana, India: Department of Civil Engineering, Guru Nanak Dev Engineering College. p. 24–34.

Agurto-Detzel, H., Bianchi, M., Assumpção, M., Schimmel, M., Collaço, B., Ciardelli, C., Barbosa, J.R., Calhau, J. (2016) The tailings dam failure of 5 November 2015 in SE Brazil and its preceding seismic sequence. *Geophysical Research Letters*, 43(10), pp.4929-4936.

Babić, B. (1987) Relationships between mechanical properties of cement stabilized materials. *Materials and Structures*, 20, 455-460.

Baptista, C. F. N. (1976) *Ensaio fundamentais para a pavimentação. Dimensionamento dos pavimentos flexíveis*. 2. ed. Porto Alegre: Globo. 253 p.

Clough, G. W., Sitar, N., Bachus, R. C., Rad, N. S. (1981). Cemented sands under static loading. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 107(6), 799-817.

Consoli, N. C. (2014). A method proposed for the assessment of failure envelopes of cemented sandy soils. *Engineering geology*, 169, 61-68.

Consoli, N. C., Cruz, R. C., Floss, M. F., Festugato, L. (2010). Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(5), 759-763.

Gillott, J. E. (1987) *Chapter 8 - soil stabilization*. In: Clay in Engineering Geology. Elsevier. (Developments in Geotechnical Engineering, 41), p. 251–283.

- Hamzah, M. O. (1983) Conventional methods for highway soil stabilization. 179 p. Dissertação (Master of Science in Civil Engineering) - University of Strathclyde, Glasgow, Scotland.
- Hossain, K. M. A. (2010). Development of stabilised soils for construction applications. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 163(3), 173-185.
- Ingles, O. G.; Metcalf, J. B. (1972) *Soil stabilization: principles and practice*. Sydney, Australia: Butterworths. 374 p.
- Jaeger, J. C.; Cook, N. G. W.; Zimmerman, R. W. (2007) *Fundamentals of rock mechanics*. 4. ed. Singapore: Blackwell Publishing. 489 p.
- Kaniraj, S. R., Havanagi, V. G. (2001). Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced fly ash-soil mixtures. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 127(7), 574-584.
- Kézdi, A (1979) *Stabilized earth roads: developments in geotechnical engineering*. New York: Elsevier Scientific Publishing Company. 327 p.
- Lambe, T. W., Whitman, R. V. (1969) *Soil mechanics*. New York: John Wiley & Sons. 576 p.
- Little, D. N. (1995) *Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime*. 1. ed. Texas: Kendall Hunt Publishing Company, 244 p.
- Mafessoli, M. (2022) Comportamento mecânico de um rejeito de minério de ferro estabilizado com cimento Portland. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 180 p.
- Mafessoli, M., Marques, S. F. V., Scheuermann Filho, H. C., Consoli, N. C. (2023). Response of artificially cemented iron ore tailings for dry stacking disposal over a wide range of stresses. *Indian Geotechnical Journal*, 53(4), 904-915.
- Marques, S. F. V. (2016) *Comportamento de uma areia artificialmente cimentada até altas tensões de confinamento*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 379 p.
- Munfakh, G. A., Wyllie, D. C. (2000). Ground improvement engineering-issues and selection. In *ISRM International Symposium* (pp. ISRM-IS). ISRM.
- Murthy, V. N. S. (2002) *Geotechnical engineering: principles and practices of soil mechanics and foundation engineering*. New York: CRC Press. 1056 p.
- Pereira, L. F., de Barros Cruz, G., Guimarães, R. M. F. (2019). Impactos do rompimento da barragem de rejeitos de Brumadinho, Brasil: uma análise baseada nas mudanças de cobertura da terra. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 122-129.
- Petry, T. M., Little, D. N. (2002). Review of stabilization of clays and expansive soils in pavements and lightly loaded structures—history, practice, and future. *Journal of materials in civil engineering*, 14(6), 447-460.
- Tschebotarioff, G. P. (1973) *Foundations, retaining and earth structures: the art of design and construction and its scientific basis in soil mechanics*. 2. ed. New York: McGraw-Hill. 642 p.
- Winterkorn, H. F.; Fang, H. Y. (1991) *Foundation engineering handbook*. New York: Springer. 923 p.