

*XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP*



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBC

Percolação de Dióxido de Carbono (CO₂) e sua Influência no Aumento da Permeabilidade do Corpo de Prova e Redução das Pressões Necessárias para Alcançar um Parâmetro “B” > que 95%.

Yuri Gouvêa Corrêa

Técnico de laboratório, UNIBH, Belo Horizonte, Brasil, ur.yuri.cr@gmail.com

Àtila Geraldo Rochido dos Santos

Engenheiro Sênior, UNB, Belo Horizonte, Brasil, atila.santos@vale.com

João Paulo Silva

Engenheiro Especialista, UNB, Belo Horizonte, Brasil, joao.paulo.silva@vale.com

Rosiane Aparecida Soares

Técnico de laboratório, FUMEC, Belo Horizonte, Brasil, rosiane.soares@vale.com

RESUMO: O presente artigo possui o objetivo de comparar e analisar as diferenças na utilização de gás carbônico durante a fase de saturação inicial da amostra, fase conhecida como percolação. A percolação de água pode ser um processo bastante demorado dependendo da permeabilidade da amostra, da quantidade de material fino e do seu grau de compactação. Para efeitos comparativos, foi adotado o mesmo tipo de amostra, porém em condições iniciais diferentes, comparadas em duplicata, sendo a primeira utilizando o processo normal e outra utilizando a percolação de CO₂. Como principal consequência, a percolação de gás carbônico demonstrou uma redução drástica no tempo necessário para percolar a mesma quantidade de água na amostra sem a utilização de gás, demonstrando impactos produtivos de ordem imediata e possibilitando a redução de ao menos um dia de trabalho na rotina dos ensaios triaxiais.

PALAVRAS-CHAVE: Triaxial, Percolação, Dióxido de carbono, Parâmetro “B”, Linha de Estado Crítico.

ABSTRACT: This paper has the objective to compare and analyze the differences between using carbon dioxide at the beginning of the sample saturation or just passing deaired water, a step known as percolation phase. Water percolation can be a long process depending on the sample permeability, the quantity of small particles and its compaction degree. To properly compare the results, the same sample was adopted in two different conditions, the first one was executed in the normal process and the second one with the addition of the CO₂ percolation. The main consequence was a huge decrease in time needed to pass through the sample the same amount of water than the sample without the dioxide percolation, resulting in an immediate production impact, accelerating the percolation process, decreasing in one day the test routine.

KEY-WORDS: Triaxial, Percolation, Carbon dioxide, “B” parameter, Critical State Line.

1 Introdução

Os ensaios triaxiais são uma ferramenta importante na mecânica dos solos, os modelos de resistência em solos não coesivos foram desenvolvidos inicialmente por (CASAGRANDE, 1936) na década de 30 e posteriormente em 1975 (CASAGRANDE, 1975), logo se tornaram relevantes para o estudo da resistência dos solos até a atualidade. Hoje os rejeitos de mineração e os estudos da linha de estados críticos necessitam de metodologias mais adequadas e de precisão para uma determinação mais assertiva do índice de vazios e resultados coerentes com a amostra analisada.



A utilização de CO_2 na fase de percolação entra como uma tentativa de melhoria dessa etapa, para aumentar a produtividade e melhorar a rotina dos ensaios triaxiais. Utilizando a percolação do gás durante a fase de saturação, visando melhorar uma etapa que a princípio é simples, compreende uma parte fundamental da rotina dos ensaios triaxiais, podendo tomar uma quantidade de horas relevante em caso de solos com uma permeabilidade mais baixa. Segundo (LADE, 2016) a saturação dos solos é necessária pois possibilita medidas viáveis da poro pressão e da variação de volume. No caso de ensaios não drenados a garantia de uma saturação eficiente é fundamental na etapa de cisalhamento, pois a ruptura ocorre através do excesso de poro pressão.

2 Objetivo

O presente artigo possui como principal objetivo verificar se a utilização de gás carbônico, CO_2 , antes da percolação de água, aumenta o coeficiente de permeabilidade do corpo de prova e reduz o tempo necessário para a saturação, aumentando a produtividade do laboratório, promovendo uma melhoria na saturação da amostra e reduzindo a quantidade de tensão necessária para se alcançar a saturação do corpo de prova (parâmetro “B” aceitável acima de 95%).

3 Metodologia

Para o presente estudo, uma amostra de rejeito silto arenoso foi selecionada para realizar os ensaios e as comparações. A princípio foram moldados 12 corpos de prova, variando o grau de compactação dos mesmos da seguinte forma: 100%, 90% e 75%, e todos com o diâmetro do molde de 50 mm e 110 mm de altura. Sendo assim, para cada grau de compactação foram moldados no mínimo dois corpos de prova, um deles foi percolado apenas com água e o outro com CO_2 e depois com água.

A água utilizada para a percolação, em ambos os casos, foi filtrada e desaerada, a pressão efetiva de percolação de água e a do gás foi de 10 kPa, porém nos corpos de prova com 75% do grau de compactação foi necessário aumentar a efetiva para 15 kPa, devido a ocorrência de liquefação destes. Os procedimentos de moldagem dos corpos de prova foram os sugeridos por (K.H.HEAD, 2014) e (LADE, 2016), sendo a metodologia moist tamping a utilizada.

O funcionamento da percolação de gás carbônico é bem simples, a ideia é trocar a fase gasosa da amostra, que é formada por uma mistura diversa de gases que compõem a atmosfera, por um único componente gasoso e que seja mais solúvel em água, que neste caso é o CO_2 . Desta maneira a solubilização do gás ocorre no momento em que é percolado a água, tornando a comunicação intragranular eficiente, pois será feita uma troca de interfaces gás-água, como consequência a permeabilidade da amostra é melhorada e as pressões para se atingir um grau satisfatório de saturação são reduzidas.

Segundo (JEFFERIES; BEEN, 2016) a pressão do gás não deve ser muito alta, a fim de se evitar um carreamento de material e/ou criação de canais de preferência de fluxo na amostra, sendo assim a pressão do gás foi controlada de maneira a não exceder 15 kPa, exceto em situações na qual foram executados ensaios em altas pressões, neste caso por limitações de precisão dos controladores de pressão a pressão do gás foi de 30 kPa e a efetiva foi de 20 kPa, sendo assim 50 kPa de confinante. As conexões para a passagem de CO_2 foram mantidas da mesma maneira na qual se faz a passagem de água, da base para o topo, fluxo ascendente, contudo foi necessário conectar a linha de gás no registro junto à poro pressão, para conseguir visualizar a pressão que o gás se encontra e regular a mesma na pressão desejada. A pressão inicial do gás foi controlada por um registro de agulha, cujo possibilita uma regulação fina da pressão, o esquema da percolação de CO_2 é demonstrado na Figura 2.

Após a pressão ser estabelecida, elevou-se a pressão confinante e a contrapressão, mantendo o registro que está conectado ao gás fechado, e mantendo a tensão efetiva desejada, gradativamente até a contrapressão se igualar a pressão do CO_2 . Após o pareamento das pressões o registro da contra pressão é fechado e o registro do dreno no topo é aberto, em seguida o registro do gás é aberto e o processo de percolação se inicia, Figura 1. Inicialmente é necessário um ajuste da vazão de gás, para a velocidade das bolhas de CO_2 ficarem entre 1 a 4 bolhas por segundo, (JEFFERIES; BEEN, 2016).

(JEFFERIES; BEEN, 2016), ainda sugere um tempo de percolação de CO_2 excessivo, entre 1 a 2 horas, podendo se estender a até 24 horas dependendo do tipo de amostra. Durante o processo de percolação de CO_2 , o tempo mínimo utilizado foi de 2 horas, com a vazão de gás variando entre a sugerida. Após atingido o tempo de percolação do gás, foi iniciado a percolação de água desaerada. Como foi observado uma permeabilidade



elevada, o volume mínimo aceitável de água percolada foi de 1,8 litros, após o volume desejado ser atingido o procedimento de saturação por contrapressão foi iniciado.

Para a segunda leva de corpos de prova, o procedimento tradicional de percolação de água foi seguido. Utilizando uma pressão efetiva de 10 kPa, elevou-se a pressão confinante para 20 kPa e a contrapressão para 10 kPa. Após, foi aberto o registro do topo da amostra, permitindo o fluxo ascendente de água, da mesma forma que no processo anterior. A percolação da água foi mantida até o volume de água ser igual a no mínimo duas vezes o volume do corpo de prova ou um tempo de percolação de 24 horas, após o volume desejado atingido o procedimento de saturação por contrapressão foi iniciado seguindo os passos descritos anteriormente.

A fase de saturação por contrapressão foi igual para as duas situações, em ambos foi mantido um acréscimo de 50 kPa/h até atingir 100 kPa e depois os acréscimos foram de 100 kPa/h até os 250 kPa. Com 250 kPa foi medido o parâmetro B elevando-se a pressão confinante para 300 kPa e analisada a resposta da poropressão.

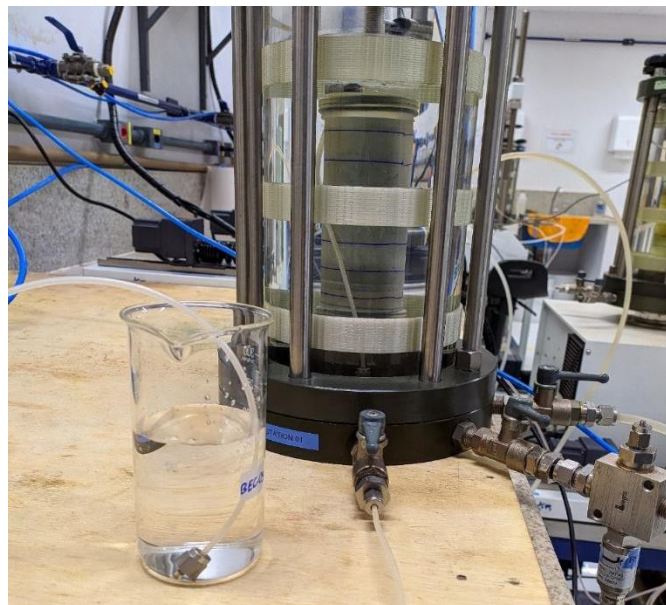


Figura 1 – Esquema da percolação de CO₂ montado e em operação.

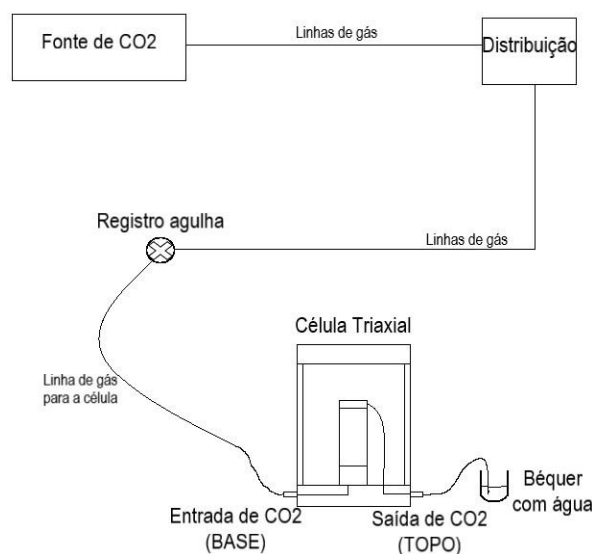


Figura 2 - Diagrama da percolação de CO₂.



4 Resultados e análises

A utilização de CO₂ na saturação do corpo de prova permitiu a obtenção de um parâmetro “B” mínimo de 95% com uma pressão de confinamento de 300 kPa. Foi possível obter uma percolação de água bem próxima em graus de compactação diferentes, ao comparar o tempo total de percolação com o volume percolado de água na amostra, fica evidente a diferença que a percolação do gás implica, sendo que sem o gás esse tempo pode chegar até 120 horas, Tabela 1, e com a utilização de CO₂ foi possível obter tempos de 20 horas para percolar 6 vezes o volume, mesmo variando a pressão efetiva durante a percolação de água.

Após a percolação de gás foi observado que a variação de tensões não influenciou muito na velocidade de percolação, o que demonstra um grau de saturação elevado. Em relação ao aumento da pressão de percolação, foi constatado que a utilização de pressões em valores superiores a 20 kPa, no sistema de altas pressões, a velocidade de percolação foi maior, Tabela 2.

Em contrapartida com as especificações encontradas na bibliografia, o tempo de percolação de gás de 1 hora demonstrou o mesmo resultado que 2 horas, nessa mesma amostra, mostrando que esse tempo pode variar e ser otimizado. Em tentativas realizadas numa outra amostra, um rejeito mais fino e com uma coesão maior, foi testado um tempo de percolação de CO₂ de 30 minutos e deixado percolar água por no máximo 1,5 vezes o volume de vazios. Os resultados deste experimento foram bem promissores, os corpos de prova apresentaram um parâmetro “B” de 95% com 300 kPa, da mesma maneira que os corpos de prova anteriores.

Sem a adição do CO₂, a pressão de confinamento mínima para o mesmo parâmetro foi de 900 kPa e em alguns casos essa pressão não foi suficiente, fazendo-se necessário aumentar até 1200 kPa para atingir a saturação mínima. Além disso, a introdução do CO₂ ocasionou em um ganho de produtividade de 1 dia, possibilitando realizar as etapas de percolação, saturação e adensamento no mesmo dia.

Pode-se consolidar os resultados da seguinte maneira, a percolação de gás carbônico permitiu uma comunicação intragranular eficiente pois o CO₂ é dissolvido durante a passagem de água, dessa maneira a permeabilidade da amostra tornou-se direta e eficiente pois a água acaba preenchendo os vazios à medida que passa pelo corpo de prova. Abaixo as duas tabelas que consolidam os resultados de antes e depois do uso de CO₂.

Tabela 1 – Síntese dos resultados de tempo de percolação de água sem utilização de CO₂.

Grau de compactação (%)	Tensão Confinante (kPa)	Contrapressão (kPa)	Volume Percolado (mL)	Tempo total (Horas)
100	20	9	309	108
100	50	10	500	47
90	20	9	400	72
90	48	9	370	21
75	20	9	700	22
75	20	9	780	23

Tabela 2 – Síntese dos resultados de tempo de percolação de água após percolação de CO₂.

Grau de compactação (%)	Pressão de CO ₂ (kPa)	Tensão Confinante (kPa)	Contrapressão (kPa)	Volume Percolado (mL)	Tempo total (Horas)
100	26	36	26	1800	20



100	30	50	30	1800	5
90	27	17	17	1830	23:49
90	15	25	15	1900	23
75	30	20	20	1900	22:38
75	15	25	15	2100	18

5 Conclusão

A percolação de CO₂ se mostrou efetiva, reduzindo o tempo de execução do ensaio. Com essa prática, alcançar um parâmetro “B” de 95% com 300 kPa foi possível em todos os casos, também foi observado uma redução na perturbação da amostra e na variação de volume durante a saturação, os corpos de prova com 75% de grau de compactação mostraram um resultado interessante, pois são os que mais sofrem alterações devido ao aumento da pressão.

A determinação do índice de vazios final foi mais precisa e coerente com a linha de estados críticos quando associada ao método de congelamento, descrito por (JEFFERIES; BEEN, 2016). Além do mais, com diferentes amostras o resultado foi o mesmo, uma amostra que possui quantidade de partículas finas maior e consequentemente uma permeabilidade natural menor, foi possível obter valores de grau de saturação acima de 95% com 300 kPa de confinamento, semelhante ao resultados da amostra estudada.

6 Agradecimentos

Agradecemos ao laboratório de geotecnia da Vale, LGV, e ao nosso gerente Inácio Carvalho, por incentivar a pesquisa dentro do laboratório e colaborar com os seus conhecimentos práticos e teóricos.

7 Referências bibliográficas

Casagrande, A. (1936) **Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of earth fills**. Journal of Boston Society of Civil Engineers, 23, 257–276.

Casagrande, A. (1975) **Liquefaction and cyclic deformation of sands: A critical review**. In Proceedings of the Fifth Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires, Argentina, Vol. 5, pp. 79–133.

JEFFERIES, M.; BEEN, K. **Soil Liquefaction A Critical State Approach**. Second ed. Broken Sound Parkway NW: Taylor & Francis Group, 2016.

K.H.HEAD. **Manual of Soil Lab Testing 3rd Edition (K H Head) | Engineering | Physical Sciences**. [s.l.: s.n.].

LADE, P. V. **Triaxial Testing of Soils. Triaxial Testing of Soils**, 2016.