

Instituição:

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Nome do Trabalho:

Melhoramento de solos moles: equipamento triaxial modificado para ensaios de Expansão de Membrana Interna em laboratório.

Curso:

Engenharia Civil - Geotecnia

Nível:

Mestrado

Autor:

Guilherme Faria Souza Mussi de Andrade

Orientador:

Bruno Teixeira Lima

Coorientadora:

Ana Cristina Castro Fontenla Sieira

Avaliadores:

Prof. Bruno Teixeira Lima

Prof^a. Ana Cristina Castro Fontenla Sieira

Prof. Márcio de Souza Soares de Almeida

Prof. Marcus Peigas Pacheco

MELHORAMENTO DE SOLOS MOLES: EQUIPAMENTO TRIAXIAL MODIFICADO PARA ENSAIOS DE EXPANSÃO DE MEMBRANA INTERNA EM LABORATÓRIO.

Guilherme Faria Souza Mussi de Andrade
Universidade do Estado do Rio de Janeiro
guimussi@hotmail.com

Bruno Teixeira Lima (Orientador)
Universidade do Estado do Rio de Janeiro
brunolima.professor@gmail.com

Ana Cristina Castro Fontenla Sieira (Coorientadora)
Universidade do Estado do Rio de Janeiro
sieira@eng.uer.br

Resumo

O crescimento do setor da construção civil estimula a investigação de novos locais para instalação dos empreendimentos, que ocorrem principalmente ao longo do litoral, onde existem espessas camadas de solos com alta compressibilidade e baixa capacidade de suporte. Portanto, técnicas de melhoramento de solos moles são indicadas para controlar recalques e estabilidade. O CPR *Grouting* é uma técnica brasileira de melhoramento de solos moles baseada na teoria do adensamento radial e induz a perda de água no solo, conseqüentemente volume, através da expansão de bulbos de compressão radial. O objetivo deste estudo foi realizar uma investigação experimental inovadora, capaz de reproduzir, em laboratório, o método executivo de campo, permitindo assim: estimar parâmetros de dimensionamento de projetos, avaliar as deformações após a melhoria do solo e prever o volume de expansão ideal, o que torna a técnica mais econômica. Para a pesquisa foi desenvolvido um aparato triaxial modificado com um furo no centro do pedestal da base, permitindo o acoplamento de um tubo com uma membrana de látex, onde se injetava água sob pressão, possibilitando sua expansão no interior dos corpos de prova. Estes testes foram denominados ensaios de Expansão de Membrana Interna, internacionalmente conhecidos como *balloon test*, e foram pela primeira vez realizados no Brasil. Avaliou-se o

efeito dos diferentes volumes expandidos, ou seja, o efeito da razão de substituição. O volume ideal de expansão obtido foi de 15 ml, o qual corresponde a uma razão de substituição de 2,1%. Os ensaios reproduziram, com sucesso, o comportamento do CPR Grouting, tornando-se uma ferramenta confiável para engenheiros geotécnicos.

Palavras-chave

Investigação de Laboratório, Melhoramento de Solos Moles, CPR *Grouting*, Ensaios Triaxiais, Expansão de Cavidades

1. Introdução

CPR *Grouting* é uma técnica de melhoramento de solos moles desenvolvida no Brasil nas últimas décadas (Almeida e Riccio, 2012). A técnica é baseada na teoria do adensamento radial (Barron, 1948; Hansbo, 1981), e induz o solo a perder água, consequentemente volume, através da expansão de bulbos de compressão radial no interior do solo, conforme a teoria da expansão de cavidades (Vésic, 1972). Segundo Cirone (2016b), o CPR *Grouting* é uma adaptação do *Compaction Grouting*, técnica introduzida na década de 1950 para melhorar solos siltosos e arenosos (Graf, 1969; Brown e Warner, 1973); aplicado em solos argilosos.

A técnica consiste na instalação de um sistema de drenagem artificial, através da cravação de drenos verticais, seguida da fase de expansão de cavidades, na qual os bulbos de compressão radial são formados no interior do solo por bombeamento de geogROUT sob alta pressão. GeogROUT é uma mistura de certas proporções de areia (80%), silte (15%), cimento (5%), água, e aditivos, e sua consistência é semelhante à de uma argamassa seca (Cirone, 2016a). Os drenos garantem uma boa drenagem, o que facilita a dissipação das poropressões induzida pela expansão dos bulbos e permite taxas de adensamento mais rápidas durante os carregamentos futuros. O resultado é um solo com maior resistência e rigidez.

De acordo com Cirone (2018a), os bulbos de compressão radial não são perfeitamente esféricos e verticais. Apesar de serem expandidos verticalmente, em geral, os bulbos são deformados e desalinhados. Estes são formados pelo método *bottom-up*, conforme mostrado na Figura 1, até que se atinja uma pressão de bombeamento pré-determinada, ou que um volume pré-determinado seja expandido. Quando um destes critérios é atingido, o tubo de bombeamento é elevado, geralmente 1 metro, para iniciar a expansão do próximo bulbo.

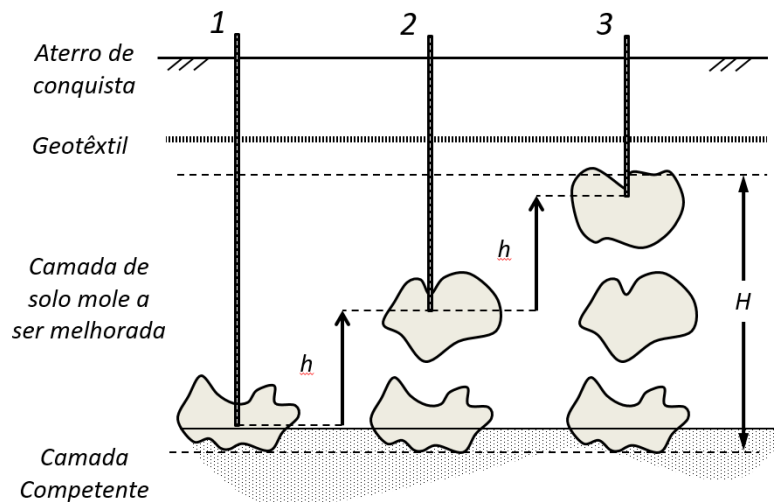


Figura 1 - Formação dos Bulbos de Compressão (Adaptado de Cirone, 2016c)

O CPR *Grouting* tem sido tema de diversas pesquisas geotécnicas, como, por exemplo: no Parque dos Atletas Rio 2016 (Riccio *et al.*, 2013), na construção no Trecho Sul do Rodoanel/SP (Nogueira, 2010), na margem do Rio Itajaí-Açu/SC (Sandoval, 2016), na Lagoa Rodrigo de Freitas/RJ (Mello, 2013) e na região oeste da cidade do Rio de Janeiro, mais especificamente, no Recreio dos Bandeirantes (Riccio *et al.*, 2018; Sieira *et al.*, 2016; Chavão *et al.*, 2017), uma região conhecida por seus depósitos heterogêneos de solo mole, incluindo camadas e lentes de areia (Almeida *et al.*, 2008). Os autores citados avaliaram a eficiência da técnica a partir de ensaios de campo realizados antes e após o tratamento. O presente trabalho diferencia-se dos estudos anteriores de CPR *Grouting* por ser uma pesquisa pioneira no Brasil que buscou reproduzir em laboratório as condições de campo da técnica.

A investigação laboratorial que simula o CPR *Grouting* foi baseada nos estudos de *Fracture Grouting* e *Compaction Grouting*, técnicas utilizadas para compensação de recalques causados durante escavações subterrâneas (*Compensation Grouting*) (Au, 2001; Komiya *et al.*, 2001; Au *et al.*, 2003; Au *et al.*, 2006; Au *et al.*, 2007; Soga *et al.*, 2003; Soga *et al.*, 2004). Os pesquisadores realizaram vários ensaios usando consolidômetros modificados em amostras de solo natural e caulim, com intuito de avaliar a eficiência de compensação. O equipamento modificado apresentava um tubo no centro de sua base para permitir a expansão de diversos materiais (expansão de um balão, argamassa e água) no interior da amostra. Da mesma forma, Wang *et al.* (2010) e Wang *et al.* (2013) realizaram ensaios em solo granular utilizando um equipamento triaxial modificado. No entanto, os pesquisadores analisaram a variação da

pressão de injeção, do índice de vazios e do excesso de poropressão, devido à compactação estática e dinâmica.

Segundo Komiya *et al.* (2001) quando uma argamassa de baixa mobilidade é expandida em solo argiloso, esta não é capaz de propagar fraturas, e o bulbo continuará a se expandir (Figura 2). De acordo com Soga *et al.* (2004), o ensaio de expansão de balão simula o comportamento ideal do *Compaction Grouting*, pois, neste ensaio, não ocorre saída de água da membrana (não há encolhimento do material expandido) e nem penetração do material expandido pela amostra. Os autores realizaram diversos ensaios variando a relação água/cimento da argamassa e observaram que quanto maior a concentração de sólidos, ou seja, quanto maior a viscosidade, menor a variação de volume durante o adensamento. Desta forma, a expansão do balão poderia reproduzir o comportamento observado na expansão de um material viscoso. Como o *CPR Grouting* envolve a expansão de uma argamassa de baixa mobilidade (geogROUT) no interior do solo, similarmente ao *Compaction Grouting* (ASCE, 2010), pode-se reproduzir seu comportamento através da realização de ensaios de balão.

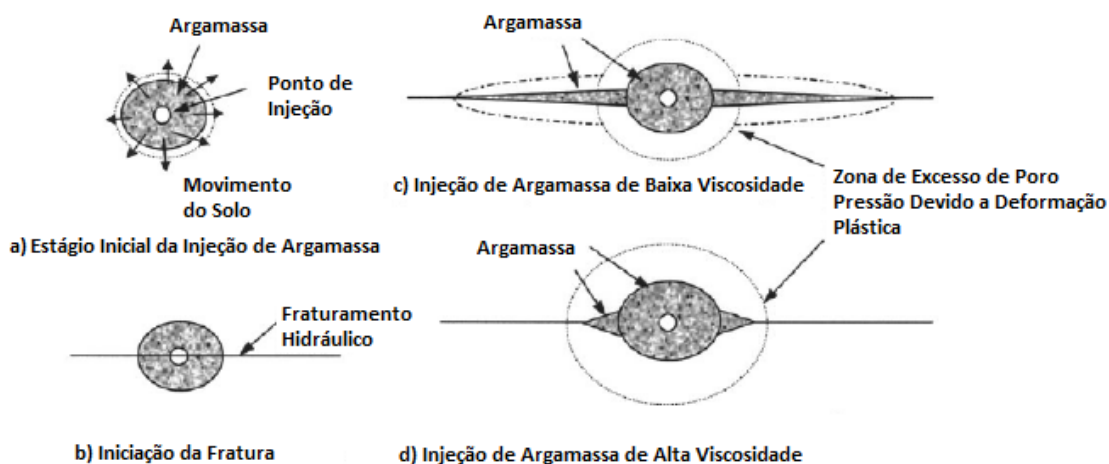


Figura 2 – Influência da viscosidade da argamassa no fraturamento hidráulico (Adaptado de Komiya *et al.*, 2001)

2. Objetivos

O presente trabalho apresenta os primeiros ensaios laboratoriais simulando o comportamento do *CPR Grouting* realizados no Brasil. O objetivo da pesquisa foi investigar o

comportamento das amostras durante a expansão de balões de diferentes volumes. Os resultados permitem: a estimativa de parâmetros utilizados na metodologia dimensionamento de projetos com CPR *Grouting*, como, por exemplo, o potencial de adensamento (λ_c), a avaliação das deformações após o melhoramento do solo, além da estimativa do volume de expansão ideal, definido como o volume expandido no interior do balão que provocará o maior adensamento da amostra.

Para atingir tais objetivos, o comportamento do CPR *Grouting* foi investigado através de uma série de ensaios de balão, chamados ensaios de Expansão de Membrana Interna. Diferentemente dos estudos que simularam o comportamento do *Compaction Grouting*, os ensaios foram realizados em um aparato triaxial modificado utilizando amostras de caulim. Estas foram envoltas por papel filtro, de modo a permitir o fluxo radial de água no corpo de prova, além de representar os geodrenos utilizados em campo pela técnica. Analisou-se o efeito dos diferentes volumes expandidos dentro do balão, ou seja, o efeito da razão de substituição. Além disto, a eficiência da técnica foi avaliada com base no volume ideal de expansão, visto que o potencial de adensamento por si só não é um parâmetro adequado para este fim.

3. Justificativa

Os ensaios de Expansão de Membrana Interna são relevantes para engenheiros geotécnicos que utilizam o CPR *Grouting* em projetos de melhoramento de solos moles. Através dos ensaios é possível determinar parâmetros de dimensionamento de projetos e deformações pós-construtivas. Outro ponto de grande interesse é a avaliação da eficiência da técnica, a partir do volume de expansão ideal. Através deste, espera-se tornar a técnica mais econômica, visto que os custos relacionados com maiores volumes expandidos que não resultariam em uma melhora de performance do solo, seriam evitados.

4. Razão de Substituição e Potencial de Adensamento

O CPR *Grouting* utiliza-se da definição de célula unitária, similarmente a outras técnicas de melhoria de solos moles (por exemplo, drenos verticais, colunas granulares). Cirone (2016b) descreveu a célula unitária como um volume de controle padrão, delimitado por contorno de drenagem rígido devido à presença de drenos verticais instalados antes da execução das

verticais de bulbos de compressão. A Figura 3 apresenta os dois padrões típicos de malhas geométricas empregados na técnica: o quadrangular e o triangular. Cada célula unitária tem o mesmo comportamento das adjacentes, portanto, todo o sistema pode ser estudado com base no comportamento de uma única célula.

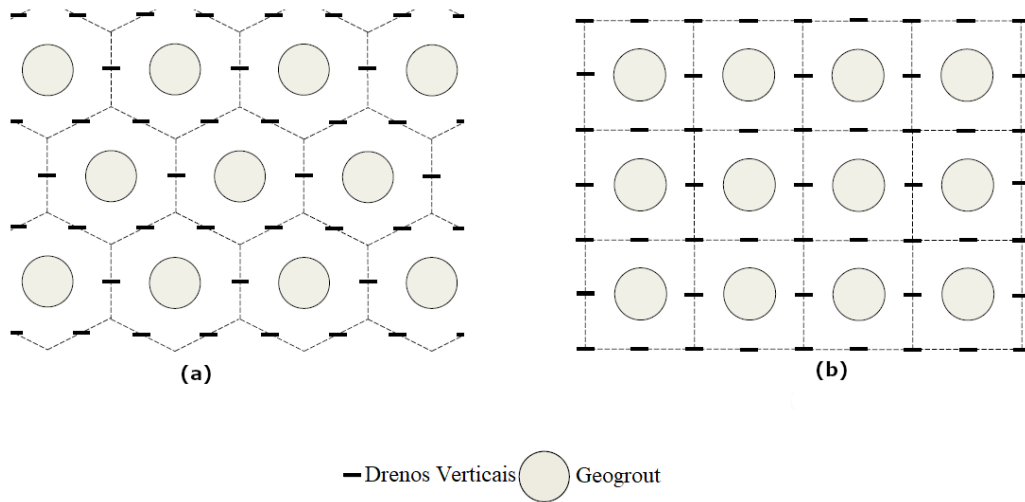


Figura 3 – a) Malha triangular de bulbos, b) Malha quadrangular de bulbos (Cirone, 2016a)

Outro conceito fundamental utilizado no CPR *Grouting*, semelhante à técnica de colunas granulares, é a Razão de Substituição (R_s). Esse conceito foi definido por Cirone (2016b) como o “volume total dos bulbos expandidos dentro de uma célula unitária indeformada”, conforme mostrado na Figura 4. Caso os bulbos expandidos tenham o mesmo volume, a razão de substituição pode ser estimada a partir da Equação 1:

$$R_s = \frac{V_g}{A \cdot h} \quad (1)$$

onde: A = área da célula unitária, h = o espaçamento vertical entre os bulbos e, V_g = volume expandido do bulbo.

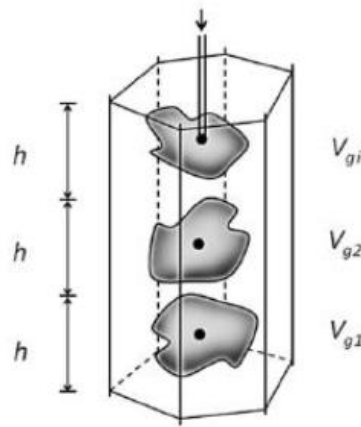


Figura 4 - Razão de substituição - volume dos bulbos expandidos ao longo de uma vertical dentro de uma célula unitária (Cirone, 2016b)

A deformação volumétrica (ε_v) depende da razão de substituição e do potencial de adensamento (λ_c) e, pode ser estimada a partir da Equação 2:

$$\varepsilon_v = R_s \cdot \lambda_c \quad (2)$$

onde: $\lambda_c = \Delta V / V_g$, e ΔV = variação de volume do solo.

O potencial de adensamento é um parâmetro que depende das propriedades do solo, podendo ser estimado em ensaios de laboratório, conforme apresentado na seção de resultados e discussão. Este parâmetro é obtido na etapa de adensamento que ocorre após a expansão do balão, quando se permite a dissipação dos excessos de poropressão gerados durante a expansão. Neste estudo será investigado o efeito da razão de substituição, através da injeção de diferentes volumes no interior do balão, analisando esta influência no potencial de adensamento, na pressão de injeção e nos excessos de poropressão.

5. Materiais e Métodos

O *layout* experimental dos equipamentos é apresentado na Figura 5. Os ensaios de Expansão de Membrana Interna foram executados em uma câmara triaxial modificada com altura de 390 mm e diâmetro de 160 mm. A câmara possuía um orifício no centro do pedestal da base para permitir que um tubo de injeção fosse acoplado no interior dos corpos de prova.

Além da câmara triaxial, foram utilizados três controladores de pressão/volume da *Global Digital Systems* (GDS Instruments, Hook, UK), 1 sistema de aquisição de dados, 1 computador e transdutores de pressão. O controlador 1 foi responsável pela expansão do balão, enquanto a contrapressão e a pressão da câmara foram aplicadas pelos controladores 2 e 3, respectivamente. As poropressões foram medidas na base das amostras por meio do transdutor 2. Infelizmente, não foi possível registrar os dados de poropressão em outras partes da amostra, como, por exemplo, próximo à interface do balão.

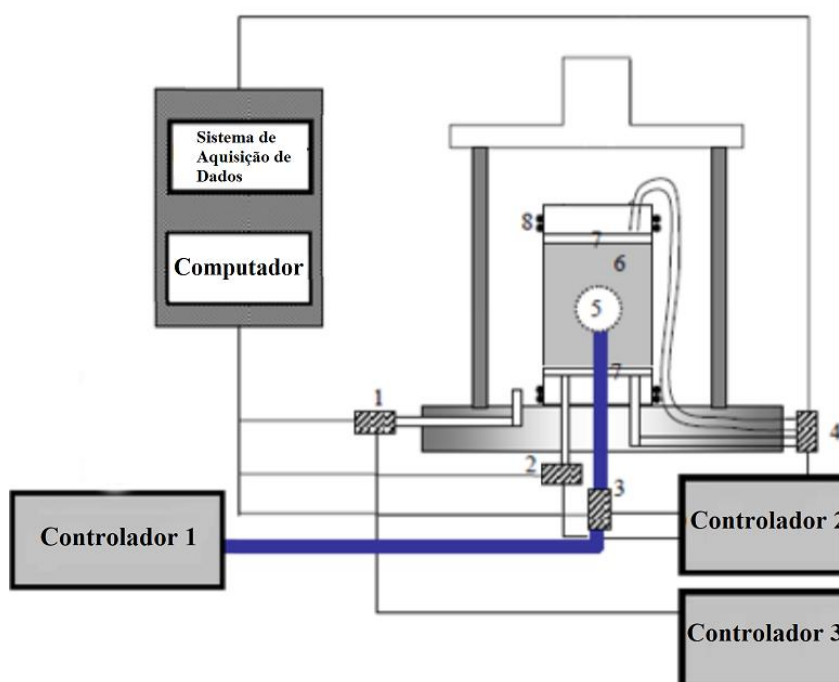


Figura 5 - *Layout* experimental utilizado nos ensaios de Expansão de Membrana Interna. 1: Transdutor da pressão confinante, 2: Transdutor da poropressão, 3: Transdutor da pressão de expansão, 4: Transdutor da contra pressão, 5: Membrana interna (balão), 6: Corpo de prova, 7: Pedra porosa, 8: O-rings

Um tubo de 8 mm de diâmetro, 46 mm de altura e 52 mm de comprimento total, considerando a espessura da pedra porosa (Figura 6a) foi conectado ao orifício central do pedestal da base triaxial. A altura da amostra era de aproximadamente 92 mm; portanto, a expansão do balão foi realizada exatamente na metade da altura do corpo de prova. O tubo de injeção possuía dois orifícios diagonalmente opostos de 1,5 mm para permitir a injeção de água desaerada, além de ser boleada na extremidade superior para evitar rasgos no balão. Optou-se pela injeção de água desaerada no interior do balão por simplicidade, e também porque o conjunto balão + água apresenta comportamento muito semelhante quando comparado à expansão de uma argamassa com alta concentração de sólidos (Au *et al.*, 2003).

A membrana utilizada como balão foi fabricada a partir de uma solução de látex pré-vulcanizada. Um molde do tubo de injeção era mergulhado na solução de látex e, em seguida, era colocado para secar em estufa a 50 °C. Realizaram-se seis ciclos de submersão e secagem: cinco ciclos de 3 minutos e um ciclo final de 10 minutos. Ao final deste procedimento, obtinha-se uma membrana mais resistente e, elástica o suficiente para suportar os volumes injetados durante a expansão dos bulbos, conforme apresentado na Figura 6 (b). Cuidados foram tomados no processo de instalação da membrana de látex no tubo de injeção para evitar o aprisionamento de bolhas de ar. Uma pequena bolha de ar no interior do balão poderia desenvolver um ponto de fraqueza, causando uma explosão precoce da membrana durante o processo de expansão. Esta instalação era realizada com o tubo totalmente submerso para garantir que nenhuma bolha ficasse aprisionada.

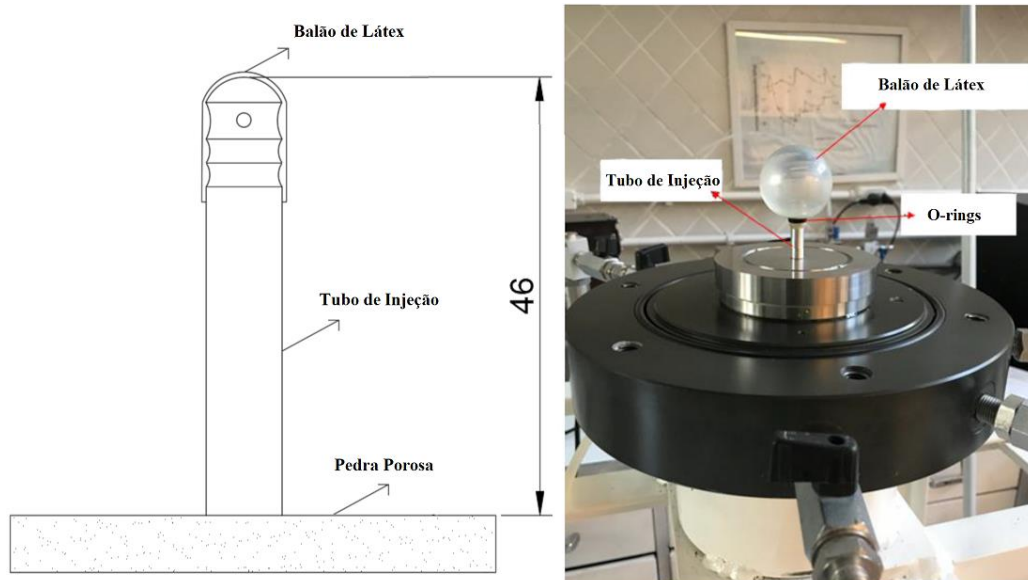


Figura 6 – a) Agulha de injeção e b) Dimensões da agulha (medida em mm)

As expansões do balão foram realizadas usando um controlador de pressão/volume, que permitia controlar o volume e a taxa de injeção. O dispositivo é um atuador hidráulico, comandado por um microprocessador para regulação e medição precisa da pressão e do volume do fluido. A taxa de injeção adotada em todos os ensaios foi de 83,3 mm³/s, similar às utilizadas por Soga *et al.* (2003). Observou-se que esta taxa garantia que o todo volume fosse injetado sem causar rompimento do balão.

Diferentemente dos estudos experimentais sobre *Compensation Grouting* realizados Au (2001) Komiya *et al.* (2001), Au *et al.* (2003), Au *et al.* (2006), Au *et al.* (2007), Soga *et al.* (2003) e Soga *et al.* (2004), este trabalho aborda ensaios de expansão de balão realizados em amostras de caulim utilizando um aparelho triaxial modificado. As amostras foram preparadas com a homogeneização do pó de caulim e água desaerada em uma batedeira, resultando em uma pasta com umidade de cerca de 60%, correspondendo a 1,4 vezes o limite de liquidez da mistura. Posteriormente, a amostra foi transferida para um molde e adensada a 50 kPa em uma prensa Bishop, conforme mostrado na Figura 7, carregada em 5 estágios de 24 horas cada (2,5; 7,5; 15; 30 e 50 kPa). Após o processo de adensamento a amostra era retirada do molde e cortada até ter 92 mm de altura e 101,7 mm de diâmetro. Papéis filtro eram colocados ao redor da amostra para acelerar o processo de adensamento, além de simular os drenos verticais utilizados em campo pelo CPR *Grouting*. Finalmente, os corpos de prova eram cuidadosamente cravados no tubo de injeção para iniciar os ensaios de Expansão de Membrana Interna.



Figura 7 – Amostra na prensa de adensamento Bishop

O caulim utilizado é de fabricação brasileira e apresentou composição granulométrica extremamente fina, com 100% do material passante na peneira #200 (Figura 8). A Tabela 1

resumo as propriedades físicas do caulim, que apresentou o coeficiente de adensamento vertical igual a $3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

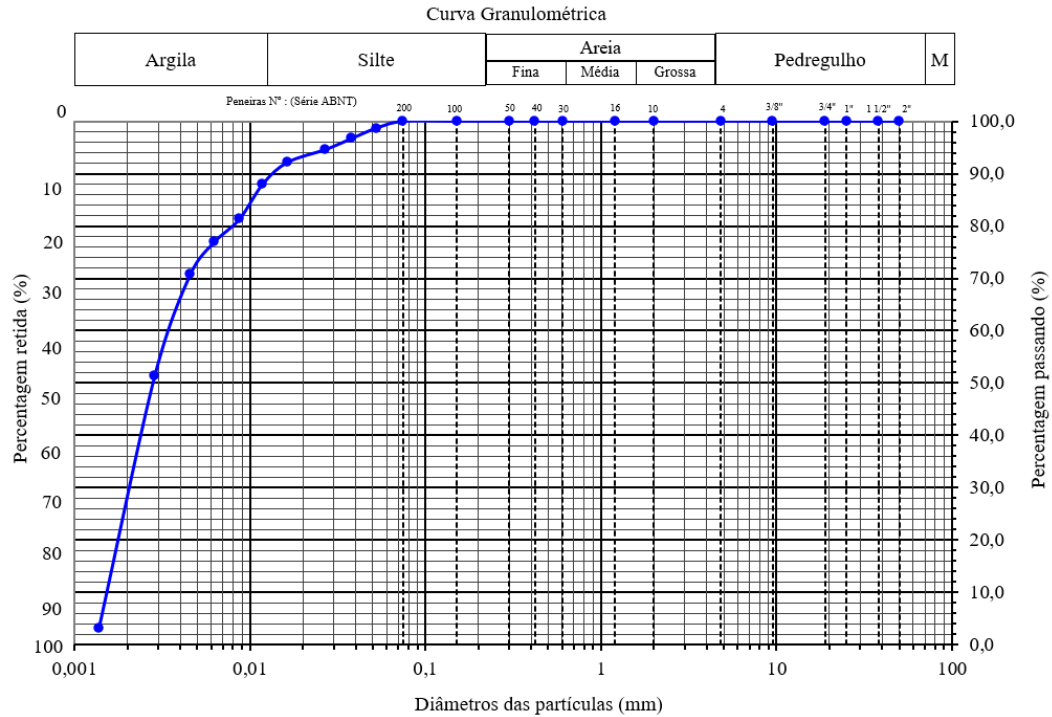


Figura 8 – Curva granulométrica do caulim

Tabela 1. Propriedades físicas do caulim

Propriedades	Valor
LL (%)	43
LP (%)	27
IP (%)	16
G_s	2,60

6. Procedimento Experimental

Os ensaios de Expansão de Membrana Interna são compostos por cinco etapas: Saturação da Amostra, Adensamento Inicial Hidrostático, Expansão da Membrana Interna, Adensamento Pós-Expansão e Nova Compressão Hidrostática. A Figura 9 apresenta uma representação esquemática das etapas do ensaio que serão detalhadamente descritas subsequentemente.

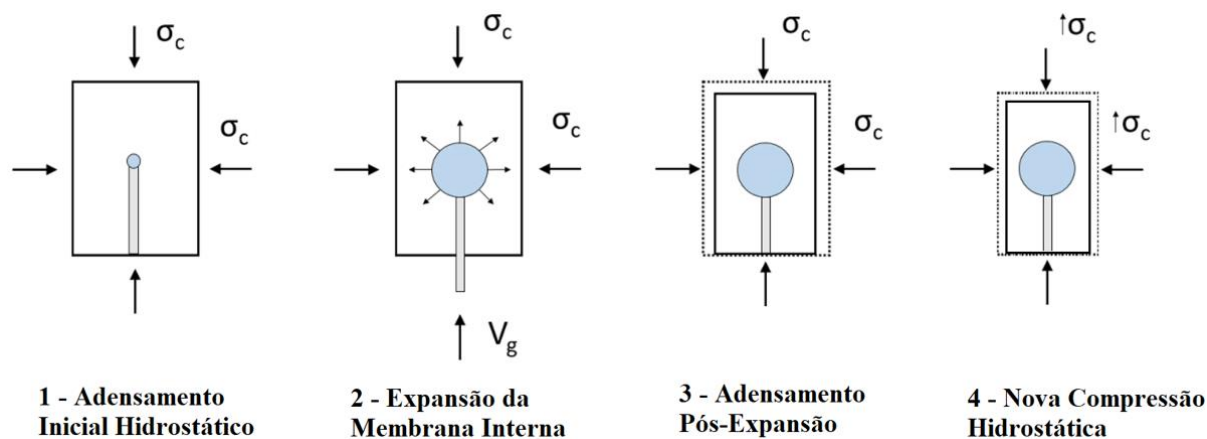


Figura 9 – Representação esquemática das etapas do ensaio de Expansão de Membrana Interna

Etapa 1) Saturação da Amostra: A saturação das amostras de solo é necessária para fornecer uma medição confiável da poropressão e da mudança de volume. O grau de saturação foi confirmado a partir da avaliação do coeficiente B (Skempton, 1954). Os valores atingidos deste coeficiente foram de 0,98-0,99, garantindo que as amostras estavam satisfatoriamente saturadas.

Etapa 2) Adensamento Inicial Hidrostático: A amostra foi carregada até 50 kPa, mesmo nível de tensão utilizado em sua preparação. No entanto, nesta etapa, a amostra foi hidrostaticamente carregada ($\sigma'_{oct} = 50$ kPa), devido ao aumento da pressão de confinamento. Portanto, garantia-se que as amostras de caulim eram normalmente adensadas.

Etapa 3) Expansão da Membrana Interna: A etapa de expansão da membrana interna (balão) foi realizada em condições não drenadas, ou seja, quando o balão começou a se expandir e comprimir o solo circundante, ocorreu um aumento instantâneo da poropressão. Além disto, o volume injetado no balão foi igual ao volume que retornou ao controlador da câmara. Durante esta fase, a pressão de injeção, o volume expandido e o excesso de poropressão foram monitorados. A razão de substituição pode ser estimada com base no volume expandido no interior do balão. A Figura 10 apresenta três balões com diferentes volumes de expansão.

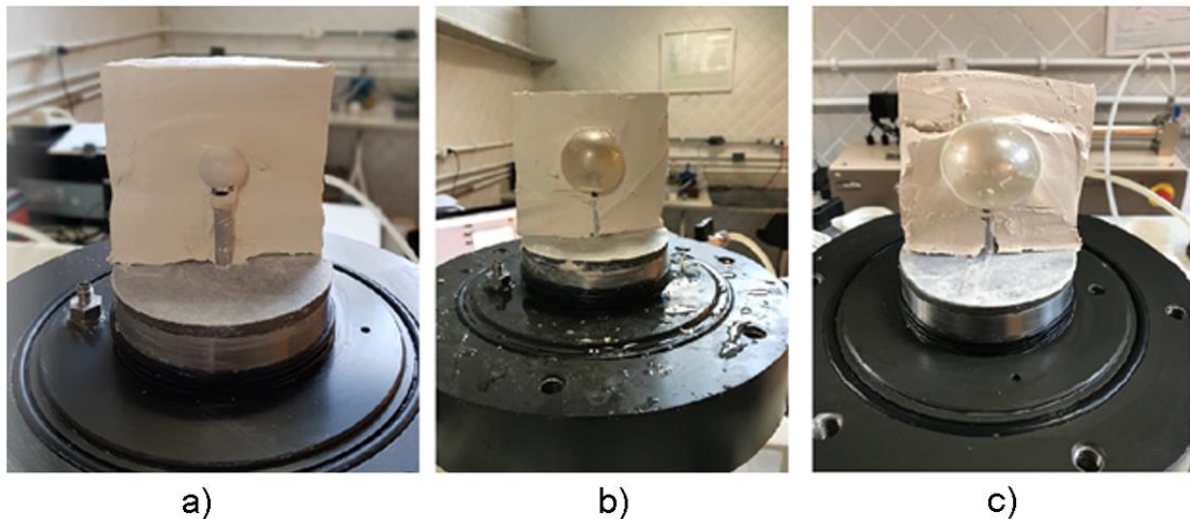


Figura 10 – Expansão do balão no interior das amostras. (a) $V_g = 5$ ml, (b) $V_g = 41$ ml, (c) $V_g = 70$ ml

Etapa 4) Adensamento Pós-Expansão: Esta etapa começou justamente ao término da expansão do balão. O excesso de poropressão gerado na etapa anterior foi dissipado e o volume do balão foi mantido constante. O potencial de adensamento (λ_c) é estimado a partir da relação entre a variação de volume da amostra e o volume expandido no balão. Nesta etapa, o processo de adensamento durou 12 horas.

Etapa 5) Nova Compressão Hidrostática: Na etapa final do procedimento experimental, uma nova compressão hidrostática foi realizada, com intuito de simular um carregamento externo aplicado no solo melhorado (após tratamento com a técnica, ou seja, após expansão do balão). Nesta etapa, a drenagem foi permitida e a pressão de confinamento foi aumentada para 295 kPa. A duração da etapa 5 foi de 24 horas.

7. Programação Experimental

O efeito da razão de substituição (R_s) foi avaliado medindo-se a razão entre os volumes expandidos e o volume da amostra após a etapa de Adensamento Inicial Hidrostática (V_i). A Tabela 2 resume os dados utilizados na programação de ensaios. As razões de substituição adotadas foram: 0,7; 2,1; 4,2; 5,7 e 9,8%. Estes valores foram escolhidos visto que razões de substituição de até 10% são usualmente utilizadas em campo pela técnica. Além disto, em laboratório, constatou-se que a adoção de valores acima de 10% aumentava o risco de ruptura do balão. Pode-se observar que todas as amostras adensaram aproximadamente o mesmo

volume (≈ 32 ml) na etapa de Adensamento Inicial Hidrostático, comprovando a eficiência do processo de fabricação das amostras (Figura 11).

Tabela 2. Dados dos ensaios de Expansão de Membrana Interna

Ensaio	R_s (%)	ΔV (ml)	V_i (ml)	V_g (ml)
1	0,7	32	715,4	5
2	2,1	32	714,6	15
3	4,2	34	713,4	30
4	5,7	30	717,2	41
5	9,8	33	714,2	70

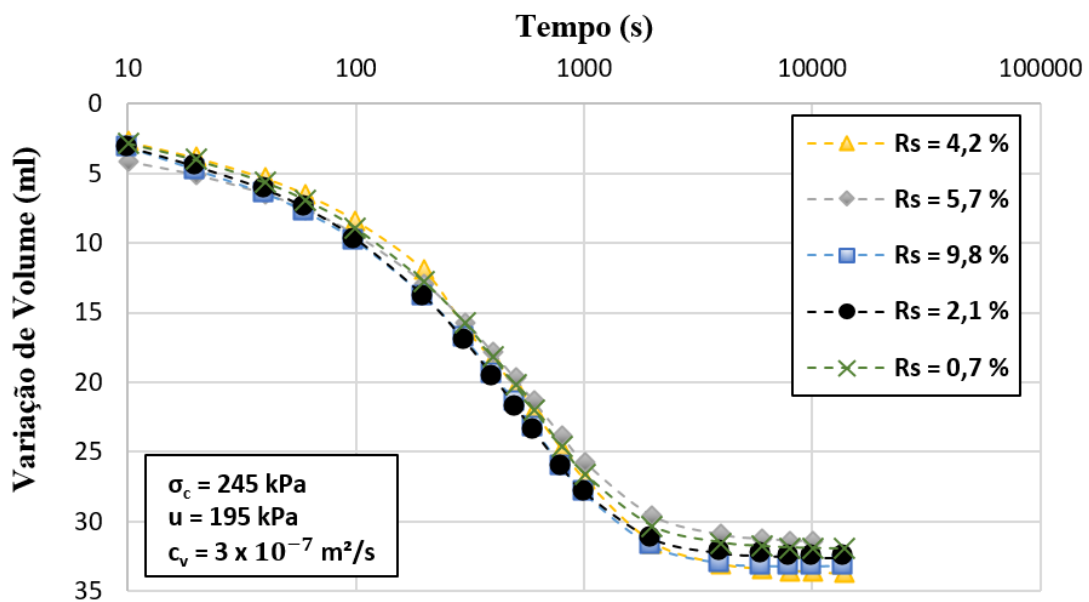


Figura 11 – Variação de volume durante a etapa de Adensamento Inicial Hidrostático

8. Resultados e Discussão

8.1. Expansão da Membrana Interna (Expansão do Balão)

Durante a etapa de expansão do balão, as pressões de injeção (P_{ic}) e o excesso de poropressão (Δu) foram monitorados. As pressões de injeção foram corrigidas para considerar a resistência imposta pelo balão (Mussi, 2019).

A Figura 12 apresenta os resultados da pressão de injeção corrigida (P_{ic}) em função do tempo normalizado (tempo de ensaio/tempo final do ensaio). Observou-se que as curvas apresentaram comportamento semelhante, atingindo o pico de pressão aproximadamente no mesmo momento. Este pico de pressão é denominado pressão de injeção limite (P_l). As curvas diferenciam-se no trecho pós pico, pois quanto maior o volume do balão, mais tempo é necessário para completar a expansão.

Na Figura 12, é possível concluir que a pressão de injeção limite independe do volume expandido. O comportamento dos ensaios enfatiza que a fabricação dos balões foi padronizada, visto que resultados semelhantes foram obtidos. Por exemplo, se os balões fossem mais grossos, seriam necessárias maiores pressões para expandi-los.

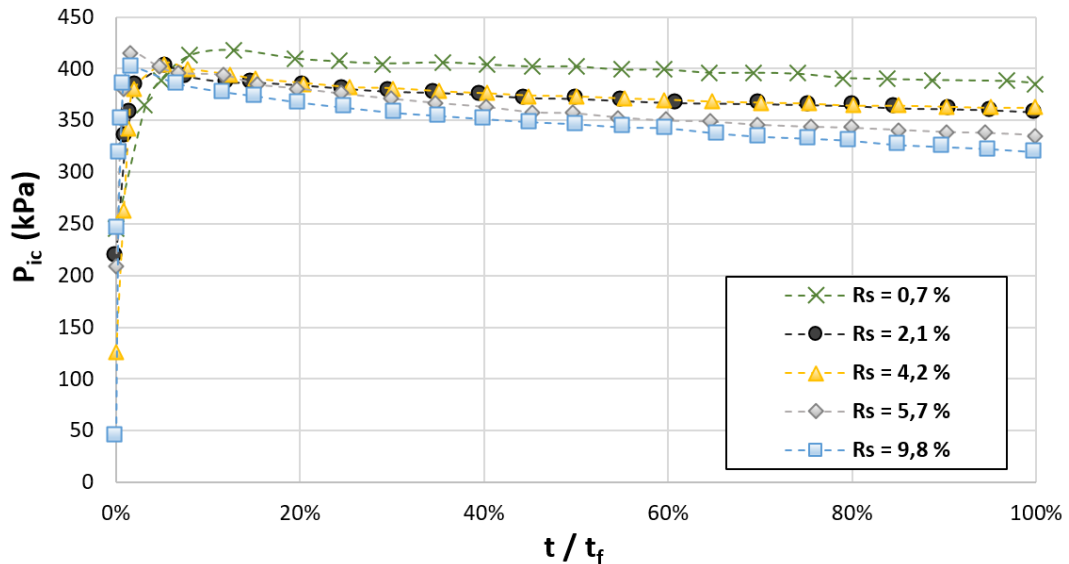


Figura 12 – Comportamento da pressão de expansão do balão a diferentes razões de substituição

A Figura 13 apresenta o comportamento do excesso de poropressão em função do volume expandido. As curvas do excesso de poropressão aumentam linearmente com o volume expandido até cerca de 10 ml. Após atingir este volume, as poropressões continuam aumentando até atingirem o excesso de poropressão máximo ($\Delta u_{m\acute{a}x}$), seguido por uma queda de pressão. Este comportamento foi detectado nos ensaios com V_g iguais a 30, 41 e 70 ml; entretanto, não foi observado comportamento semelhante nos ensaios com V_g iguais a 5 e 15 ml, pois os volumes expandidos foram menores. Desta forma, constatou-se que há uma correlação entre os valores do excesso de poropressão e do volume expandido.

O excesso de poropressão é espacialmente variável e não uniforme no interior da amostra, provavelmente sendo maior na interface do balão e diminuindo radialmente à medida que se afasta do balão. Como as poropressão foram medidas na base da amostra, acredita-se que nos ensaios com maiores volumes expandidos, as poropressão se desenvolveram ao longo da amostra durante a expansão do balão até atingirem um valor máximo. Porém, como a expansão ainda estava ocorrendo, as poropressão continuaram se equalizando na amostra, ocasionando uma diminuição do valor obtido pelo transdutor de pressão na base (Figura 13).

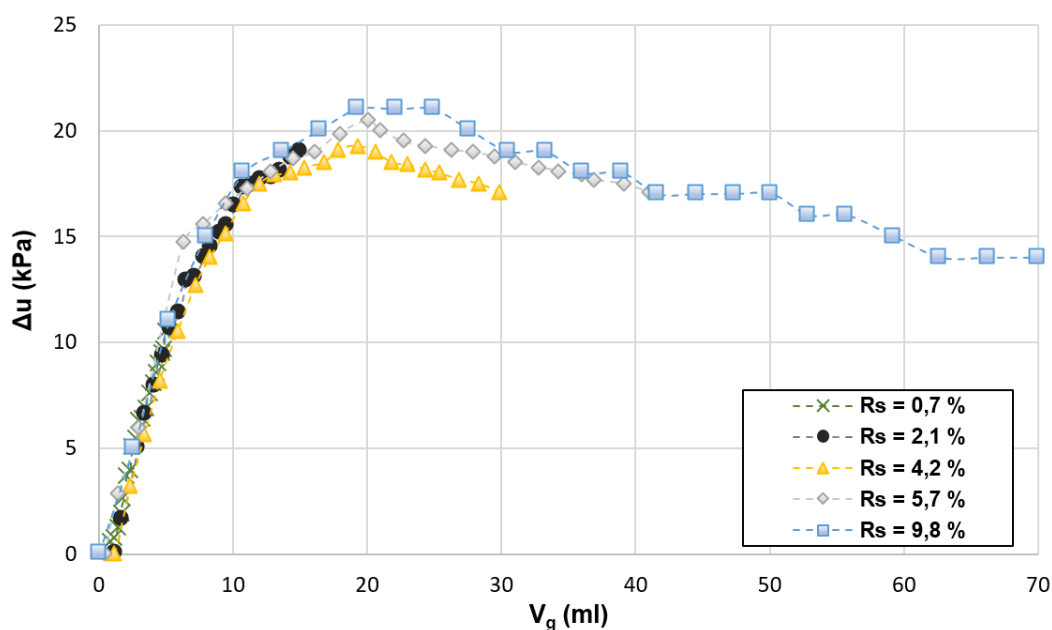


Figura 13 – Comportamento do excesso de poropressão durante a etapa de Expansão da Membrana Interna

Observando o ensaio com a R_s de 2,1%, o volume expandido foi suficiente para que o excesso de poropressão atingisse o valor máximo ao final do processo de expansão do balão. No ensaio com R_s de 0,7%, o volume expandido foi baixo. Consequentemente, pouco tempo foi necessário para alcançar a expansão total; portanto, não foi possível desenvolver maiores poropressões, gerando o menor valor de excesso de poropressão máximo. Constatou-se que o excesso de poropressão máximo foi alcançado nos ensaios com R_s de 4,2; 5,7 e 9,8%, quando os balões apresentavam aproximadamente 20 ml de volume expandido. A Tabela 3 apresenta os valores de $\Delta u_{\text{máx}}$, além dos valores de excesso de poropressão final (Δu_f), obtidos em cada ensaio. Apesar das magnitudes do excesso de poropressão máximo tenham sido semelhantes, observou-se que maiores volumes de expansão geraram maiores excessos de poropressão.

Tabela 3. Magnitude do excesso de poropressão máximo e do excesso de poropressão final

Ensaio	R_s (%)	V_g (ml)	$\Delta u_{m\acute{a}x}$ (kPa)	Δu_f (kPa)
1	0,7	5	10,5	10,5
2	2,1	15	19,1	19,1
3	4,2	30	19,3	17,1
4	5,7	41	20,5	17,6
5	9,8	70	21,0	14,0

8.2. Adensamento Pós-Expansão

Nesta etapa, a drenagem foi permitida e o volume do balão foi mantido constante. Após a variação de volume da amostra foi possível estimar o potencial de adensamento (λ_c) e a deformação volumétrica (ε_v). A Tabela 4 resume os resultados desta etapa, apresentando os valores do potencial de adensamento e da deformação volumétrica.

Tabela 4. Resultados da etapa de Adensamento Pós-Expansão

Ensaio	R_s (%)	V_g (ml)	ΔV (ml)	λ_c	ε_v (%)
1	0,7	5	4,03	0,81	0,57
2	2,1	15	6,43	0,43	0,90
3	4,2	30	5,26	0,18	0,76
4	5,7	41	5,34	0,13	0,74
5	9,8	70	4,29	0,06	0,59

A Figura 14 apresenta o efeito das diferentes razões de substituição no potencial de adensamento, indicando a relação inversamente proporcional entre os parâmetros. Com o aumento do volume expandido, ou seja, quanto maior o R_s , menores os valores do potencial de adensamento, λ_c , obtidos. Esse comportamento já havia sido verificado por Komiya *et al.* (2001). No ensaio com a menor razão de substituição (0,7%), λ_c alcançou valores de aproximadamente 0,81, enquanto no ensaio com $R_s = 9,8\%$, λ_c atingiu valores de apenas 0,06.

O potencial de adensamento depende também das propriedades do solo. Ensaios realizados em outro caulim ($LL = 67\%$, $G_s = 2,607$ e $c_v = 7 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$) com razões de

substituição similares as utilizadas neste estudo, apresentaram valores de potencial de adensamento maiores comparados aos resultados obtidos na presente pesquisa.

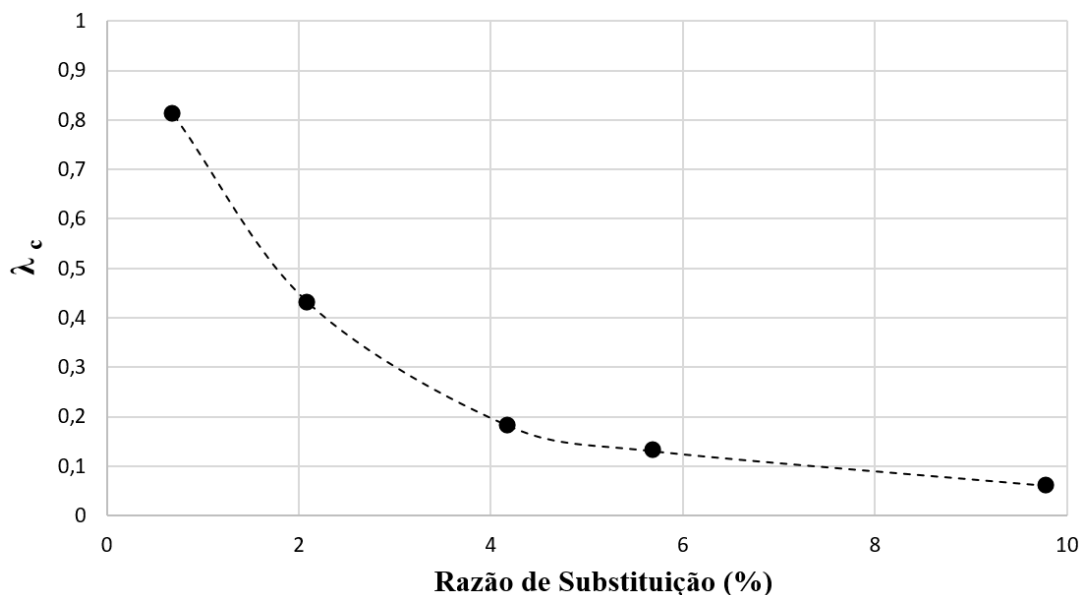


Figura 14 - Comportamento do potencial de adensamento (λ_c) em função da razão de substituição (R_s)

O ensaio com $R_s = 0,7\%$ apresentou a menor variação de volume (4,03 ml) e o menor excesso de poropressão final (10 kPa) após a expansão do balão, devido ao volume injetado mais baixo e, conseqüentemente, à influência menos significativa do aumento das tensões na amostra. Porém, o ensaio com R_s de 2,1% apresentou o maior excesso de poropressão final (19,1 kPa), além da maior variação de volume (6,43 ml), enquanto os ensaios com maiores volumes expandidos apresentaram menores variações volumétricas (Tabela 4). Isto provavelmente ocorreu devido à redução da tensão octaédrica durante a expansão do balão, conforme mostrado por Au *et al.* (2006). A geração de um sobreadensamento resultou em uma variação de volume menor após a expansão do balão nas amostras com R_s de 4,2; 5,7 e 9,8%; a amostra com R_s de 2,1% foi a menos influenciada por este efeito.

No entanto, os valores de λ_c não podem ser utilizados unicamente para avaliar a eficiência do CPR *Grouting*. Por se tratar da relação entre a variação de volume e o volume expandido, maiores valores de λ_c podem não representar a melhor opção a ser adotada em projeto. Assim, para tornar a técnica mais econômica, definiu-se que o volume de expansão ideal seria aquele que provocasse o maior adensamento da amostra, representando o valor ideal

do potencial de adensamento. A Figura 15 apresenta, no eixo das ordenadas, a variação de volume desta etapa, e, no eixo das abscissas, o volume expandido.

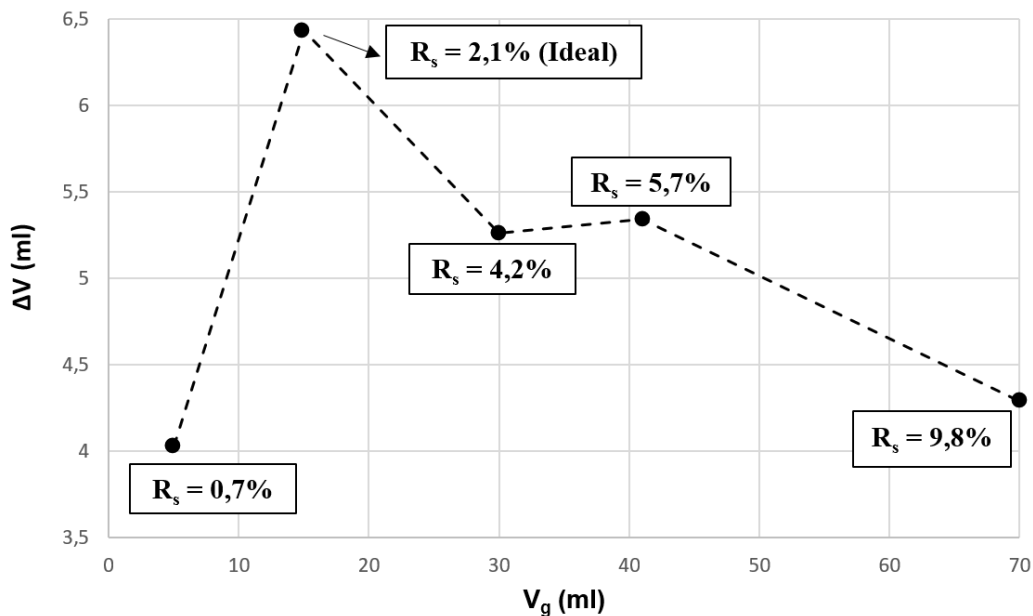


Figura 15 – Variação de volume x volume expandido

Conclui-se que menores volumes de expansão não foram capazes de proporcionar o maior adensamento pós-expansão da amostra, apesar de fornecerem maiores valores de λ_c . Portanto, constatou-se que o valor ideal do potencial de adensamento foi de 0,43, e que o volume de expansão ideal foi igual a 15 ml, correspondendo a uma razão de substituição de 2,1%.

Os resultados apresentados nesta pesquisa devem ser utilizados com cautela devido à variação natural das características geotécnicas de cada subsolo. Recomenda-se que sejam realizados ensaios de Expansão de Membrana Interna em amostras do solo a ser estudado, com intuito de se obter os valores ideais do potencial de adensamento e do volume de expansão.

8.3. Nova Compressão Hidrostática

Na etapa final do ensaio, a pressão de confinamento foi aumentada hidrostaticamente para 295 kPa para simular um carregamento externo após aplicação do CPR *Grouting*. Espera-se que menores deformações ocorram devido ao carregamento imposto após melhoramento do solo. A Tabela 5 apresenta os resultados dessa etapa, mostrando o volume da amostra após a

etapa de Adensamento Pós-Expansão (V_{pe}), a variação do volume e a deformação volumétrica em cada ensaio.

Observou-se que o ensaio com $R_s = 9,8\%$ foi o que apresentou menores deformações devido ao novo carregamento. É possível que parte da carga tenha sido suportada pela água no interior do balão, devido à divisão de carga entre o solo e o conjunto balão + água; portanto, menores deformações foram observadas na amostra. Apesar disto, constatou-se que as deformações foram similares em todos os ensaios, portanto, independentes do volume expandido.

Tabela 5. Resultados da etapa Nova Compressão Hidrostática

Ensaio	R_s (%)	V_{pe} (ml)	ΔV (ml)	ε_v (%)
1	0,7	711,40	15,06	2,12
2	2,1	708,19	15,41	2,18
3	4,2	708,21	13,36	1,89
4	5,7	710,59	13,93	1,96
5	9,8	709,89	13,08	1,84

8.4. Variação do Índice de Vazios

O parâmetro e^* representa a mudança no índice de vazios, desconsiderando quaisquer alterações do índice de vazios inicial (e_0) ocorridas durante o processo de fabricação das amostras. Estima-se e^* conforme apresentado na Equação 3:

$$e^* = 1 - \frac{\Delta e}{e_0} \quad (3)$$

onde: Δe = variação do índice de vazios, e^* = índice de vazios normalizado.

A Tabela 6 apresenta os valores do parâmetro e^* em cada etapa do ensaio. Na etapa Expansão da Membrana Interna, observa-se que o valor do e^* permanece constante, visto que as expansões foram realizadas em condições não drenadas, sem alteração de volume. Na etapa Nova Compressão Hidrostática, foi considerado a variação no índice de vazios ao final das 24 horas de ensaio.

Durante a etapa de Adensamento Pós-Expansão, a variação no índice de vazios foi de cerca de 0,01 a 0,02. Quando a pressão da câmara foi aumentada para simular um carregamento externo, os ensaios apresentaram variações deste parâmetro de aproximadamente 0,03 a 0,04. Considerando a variação do índice de vazios ao final do adensamento primário, observou-se pouca alteração em relação ao conteúdo da Tabela 6, o que demonstrou que o caulim sofreu pouca influência da compressão secundária (Mussi, 2019).

Tabela 6. Valores de e^* em cada etapa do ensaio

Etapa	R_s (%)				
	0,7	2,1	4,2	5,7	9,8
	e^*				
Adensamento Inicial Hidrostático	0,92	0,92	0,92	0,93	0,92
Expansão da Membrana Interna	0,92	0,92	0,92	0,93	0,92
Adensamento Pós-Expansão	0,91	0,90	0,91	0,91	0,91
Nova Compressão Hidrostática	0,87	0,86	0,87	0,88	0,88

9. Conclusões

A investigação laboratorial apresentada neste trabalho foi realizada com intuito de simular o comportamento da técnica CPR *Grouting*. A expansão de uma argamassa de alta viscosidade foi reproduzida através da expansão de uma membrana de látex (balão) sob condições não drenadas. O efeito da razão de substituição (R_s) foi analisado variando os volumes expandidos no interior dos balões. Após a etapa de Expansão da Membrana Interna, a drenagem foi permitida e o parâmetro potencial de adensamento (λ_c) foi estimado.

Durante a etapa de Expansão da Membrana Interna, constatou-se que as pressões de injeção limite eram semelhantes e independiam do volume expandido. O padrão na fabricação dos balões também foi confirmado. Observou-se uma correlação entre os volumes expandidos e o excesso de poropressão. As curvas de excesso de poropressão atingiram o pico para um determinado volume de expansão; alcançado o pico, ocorria uma queda de pressão.

Verificou-se que o potencial de adensamento é extremamente dependente dos volumes expandidos, e que este parâmetro não pode ser utilizado unicamente para avaliar a eficiência da

técnica. Constatou-se que quanto maior o volume expandido, menor o valor do potencial de adensamento. A eficiência do CPR *Grouting* foi avaliada através do volume de expansão ideal, que corresponde a níveis mais elevados de adensamento da amostra.

As deformações pós-melhoramento das amostras foram semelhantes, independentemente do volume expandido. Portanto, adotar o melhoramento deste solo com maiores volumes de expansão não seria econômico, pois os custos superariam as vantagens obtidas nas deformações pós-construtivas.

O ensaio com desempenho mais eficiente foi aquele que expandiu 15 ml no interior do balão, correspondendo a um $R_s = 2,1\%$. Este volume de expansão foi capaz de proporcionar a maior variação de volume da amostra. O potencial de adensamento (λ_c) considerado ideal para este caulim foi de 0,43.

Os autores consideram que a metodologia desenvolvida nos ensaios é grande importância no dimensionamento de projetos com CPR *Grouting*, pois auxilia os engenheiros geotécnicos na estimativa do volume de expansão ideal, tornando a técnica mais econômica, visto que evita a injeção de maiores quantidades de geogROUT no solo. Além disto, os resultados obtidos auxiliam na avaliação das deformações que ocorrerão após o melhoramento do solo, possibilitando que os projetos sejam realizados com mais segurança e que a técnica seja executada de maneira mais eficaz e controlada.

Deve-se notar que a interpretação dos resultados experimentais apresentados neste estudo é limitada a escala e as condições de contorno dos ensaios de laboratório. A extrapolação dos resultados para as condições de campo deve ser feita com cautela, sendo recomendado que a aplicabilidade desses achados seja avaliada por meio da realização de ensaios de campo.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES pelo apoio financeiro e à empresa ENGEGRAUT, pelo incentivo a pesquisa e pela disponibilização de seu laboratório para este projeto. Agradecimentos especiais aos engenheiros Alessandro Cirone e Cid Dieguez, pela valiosa e fundamental colaboração em todas as etapas desta pesquisa.

Referências

- Almeida, M.S.S. e Riccio, M.V.F. (2012) *Ground improvement of extremely soft soils in Rio de Janeiro*. In Proceedings of the International Conference on Ground Improvement and Ground Control (Indraratna B, Rujikiatkamjorn C and Vinod JS (eds)), Wollongong, Australia, pp. 1-14.
- Almeida M.S.S., Futai M.M., Lacerda W.A e Marques M.E.S. (2008) *Laboratory behavior of Rio de Janeiro soft clays, part 1: index and compression properties*. Soils and Rocks 31(2): 69–75.
- ASCE (2010) ASCE/G-I 53-10: *Compaction Grouting Consensus Guide*. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- Au S.K.A. (2001), *Fundamental Study of Compensation Grouting in Clay*. University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom (Ph.D. Thesis).
- Au S.K.A., Soga K., Jafari M.R., Bolton M.D. e Komiya K. (2003) *Factors affecting long-term efficiency of compensation grouting in clay*. Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering ASCE 129 (3): 254-262.
- Au S.K.A., Yeung A.T. e Soga K. (2006) *Pressure-controlled cavity expansion in clay*. Canadian Geotechnical Journal 43(7): 714-725, doi: 10.1680/geot.2007.57.10.821.
- Au, S.K.A., Yeung A.T., Soga K. e Cheng Y.M. (2007) *Effects of subsurface cavity expansion in clays*. Géotechnique 57(10): 821–830, doi: 10.1680/geot.2007.57.10.821.
- Barron R.A. (1948) *Consolidation of fine-grained soils by drain wells*. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division ASCE 73(6): 811–835.
- Brown D.R. e Warner J. (1973) *Compaction grouting*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE 99(SM8): 589–601.
- Cirone A. (2016a), *Geotechnical modelling of CPR Grouting*, MSc Thesis, Politecnico di Milano, Milano.
- Cirone A. (2016b) *Cálculo simples do aumento da resistência não drenada para solos enrijecidos com CPR Grouting*. Em anais do COBRAMSEG - XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
- Cirone A. (2016c) *Modelagem geotécnica do CPR Grouting*. Palestra apresentada na Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Cirone A. (2018a) *Considerações sobre a modelagem geotécnica do CPR Grouting*. Palestra/artigo apresentado no Clube de Engenharia do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 1-8.

Cirone A. (2018b) *Análise de poropressões no CPR Grouting*. Em anais do COBRAMSEG - XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Salvador, Bahia, Brasil.

Chavão A.O., Sieira A.C.C.F. e Lima A.P. (2017) *Evaluation of the efficiency of the CPR Grouting technique in the stiffening of compressible soils*. Geotecnia 41(November): 59-81, <http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2017.141.04>.

Graf E.D. (1969) *Compaction grouting technique and observations*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE 95(SM5): 1151–1158.

Hansbo S. (1981) *Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains*. In Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden, pp. 667-682.

Komiya K., Soga K., Akagi H., Jafari M.R. e Bolton M.D. (2001) *Soil consolidation associated with grouting during shield tunnelling in soft clayey ground*. Géotechnique 51(10): 835–846, <https://doi.org/10.1680/geot.2001.51.10.835>.

Mello M.A.A. (2013), *Consolidação Profunda Radial aplicada em solo compressível na Lagoa Rodrigo de Freitas/RJ*, Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

Mussi G.F.S.A. (2019), *Melhoramento de solos moles: equipamento triaxial modificado para ensaios de Expansão de Membrana Interna em laboratório*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Nogueira E.G. (2010), *Estudo de algumas soluções de tratamento de solos moles para construção de aterros no trecho sul do rodoanel – SP*. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo.

Riccio M.V.F., Baroni M. e Almeida M.S.S. (2013) *Ground improvement in soft soils in Rio de Janeiro: the case of Athletics Park*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Civil Engineering Special Issue 166(CE6): 36–43, <https://doi.org/10.1680/cien.13.00008>.

Riccio M.V.F., Cirone A., Almeida M.S.S., Rodriguez T.T. e Faria D.A. (2018) *Site investigation and performance of radial deep consolidation grouting in soft soil*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement 173(1): 1-12, <https://doi.org/10.1680/jgrim.18.00036>.

Sandoval C.L.Z. (2016), *Avaliação da técnica da consolidação profunda radial aplicada em solo mole na margem do Rio Itajaí-Açu/SC* – Estudo de caso baseado em ensaios geotécnicos, Dissertação de Mestrado, UFPR, Curitiba – PR.

Sieira A.C.C.F., Lima A.P., Chavão A.O. e Gondariz L.J.N.C. (2016) *Consolidation Radial Deep CPR Grouting: efficiency in compressible soil treatment*. Sodebras Magazine 11(135): 1-8.

Skempton A.W. (1954) *The pore pressure coefficients A and B*. Géotechnique 4(1): 143-147.

Soga K., Au S.K.A. e Bolton M.D. (2003) *Effect of injection rate on clay-grout behavior for compensation grouting*. In Third International Conference on Grouting and Ground Treatment, New Orleans, Louisiana, United States, pp. 845-856.

Soga K., Au S.K.A., Jafari M.R. e Bolton M.D. (2004) *Laboratory investigation of multiple grout injections into clay*. Géotechnique 54(2): 81–90, <https://doi.org/10.1680/geot.2004.54.2.81>.

Vésic A.S. (1972) *Expansion of cavities in infinite soil mass*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE 98(3): 265–290.

Wang S.Y., Chan D.H., Lam K.C. e Au S.K.A. (2010) *Effect of lateral earth pressure coefficient on pressure controlled compaction grouting in triaxial condition*. Soils and Foundations 50(3): 441–445, <https://doi.org/10.3208/sandf.50.441>.

Wang S.Y., Chan D.H., Lam K.C. e Au S.K.A. (2013) *A new laboratory apparatus for studying dynamic compaction grouting into granular soils*. Soils and Foundations 53(3): 462–468, <http://dx.doi.org/10.1016/j.sandf.2013.04.007>.