

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

FABIANO GARCIA OLIVEIRA

**TRATAMENTO DE SOLO COM POLÍMERO SUPERABSORVENTE: AVALIAÇÃO
DA VIABILIDADE PARA REDUÇÃO DA PERMEABILIDADE**

Alegrete

2022

FABIANO GARCIA OLIVEIRA

**TRATAMENTO DE SOLO COM POLÍMERO SUPERABSORVENTE: AVALIAÇÃO
DA VIABILIDADE PARA REDUÇÃO DA PERMEABILIDADE**

Defesa de dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Orientador: D.Sc. Jaelson Budny

Coorientador: D.Sc. Diego Arthur Hartmann

Alegrete

2022

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

048t Oliveira, Fabiano Garcia
 Tratamento de solo com polímero superabsorvente: avaliação
 da viabilidade para redução da permeabilidade / Fabiano
 Garcia Oliveira.
 91 p.

 Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
 MESTRADO EM ENGENHARIA, 2022.
 "Orientação: Jaelson Budny".

 1. Permeabilidade. 2. Polímero superabsorvente. 3. Barragem
 de terra. 4. Solo arenoso. I. Título.

FABIANO GARCIA OLIVEIRA

**TRATAMENTO DE SOLO COM POLÍMERO SUPERABSORVENTE: AVALIAÇÃO
DA VIABILIDADE PARA REDUÇÃO DA PERMEABILIDADE**

Defesa de dissertação apresentado ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia.

Dissertação defendida e aprovada em: 31 de outubro de 2022.

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente



JAELSON BUDNY

Data: 27/12/2022 22:50:25-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. D.Sc. Jaelson Budny

Orientador

UNIPAMPA

Documento assinado digitalmente



DIEGO ARTHUR HARTMANN

Data: 29/12/2022 19:11:33-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. D.Sc. Diego Arthur Hartmann

Coorientador

Documento assinado digitalmente



LUIS EDUARDO KOSTESKI

Data: 30/12/2022 08:13:57-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Luis Eduardo Kostas

UNIPAMPA

Documento assinado digitalmente



MARCELO MUTA HOTTA

Data: 29/12/2022 18:15:12-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

D.Sc. Marcelo Muta Hotta

COPPE/UFRJ

RESUMO

A produção agrícola é uma atividade que apresenta elevada demanda de água durante o ciclo da produção, e é a principal responsável pela movimentação da economia da região oeste do Estado do Rio Grande do Sul. Portanto, é possível encontrar diversas barragens de terra de pequeno porte construídas no interior das cidades que fazem parte desta região. Em contrapartida, esta região do Estado sofre do processo de arenização, que resulta em grandes regiões de manchas de areia na superfície destas localidades. Com isto, é possível encontrar facilmente solos de predominância arenosa, os quais não apresentam propriedades desejáveis para a utilização na construção de barragens de terra, devido a sua elevada permeabilidade. Devido ao fato de as barragens de terra desta região estarem localizadas no interior das cidades, o acesso às obras se dá geralmente por estradas não pavimentadas, o que pode tornar transporte de um material de melhor qualidade uma atividade onerosa. Desta forma, a busca por tratamentos dos solos de predominância arenosa com intuito de redução da permeabilidade apresenta-se uma solução interessante a ser estudada. Analisando as propriedades do polímero superabsorvente, amplamente utilizado para fins agrícolas, verificou-se potencial para utilização para fins de redução de permeabilidade, uma vez que este material tem a capacidade de absorver elevados volumes de água. Diante do apresentado, o presente trabalho tem o intuito de avaliar a viabilidade da utilização de polímero superabsorvente para fins de redução da permeabilidade de um solo de predominância arenosa da cidade de Alegrete, possibilitando assim apresentar uma alternativa para um melhor aproveitamento dos solos arenosos dessa região para fins de construção de barragens de terra. Para isto, foram realizados ensaios de permeabilidade em amostras de solo com adição de polímero sob três diferentes teores e quatro tempos de espera após a homogeneização, comparando os resultados com a permeabilidade do solo puro. Os resultados mostraram influência significativa do teor de polímero no valor do coeficiente de permeabilidade, sendo verificada redução de até 620 vezes quando comparado ao solo puro. Por outro lado, o tempo de espera após homogeneização não apresentou influência significativa no valor do coeficiente de permeabilidade. A adição do SAP apresenta viabilidade técnica para redução da permeabilidade do solo, estudos em campo devem ser realizados para comprovar os resultados de laboratório.

Palavras-chave: Permeabilidade, Polímero superabsorvente, Barragem de terra, Solo arenoso.

ABSTRACT

The agriculture is a business which has high water demand during the production cycle and is the main responsible for movements in the economy of western region of the State of Rio Grande do Sul. Therefore, there are present many small earth dams in the country side of this region's cities. On other hand, the western of the State of Rio Grande do Sul undergoes a process called "sandzation", which results in larges deposits of sand soil. Then, sandy soils are easily finded in this location. Due the earth dams be constructed in locations which are accessed only by dirt roads, and the earthwork process becomes expensive. In this way, the research for treatments to permeability reduction of sandy soils may be an interest solution. Analyzing the properties of superabsorbent polymer, a material widely used in agriculture, it was considered a good material for permeability reduction of sandy soils, due the polymer's capacity of water absorption. Thus, the present work aims to evaluate the feasibility of the treatment of a sandy soil with superabsorbent polymer, to reduces the permeability, making possible the use of the sandy soils of this region to earth dams buildings. Permeability tests were performed in samples of soil treated with superabsorbent polymer under three different polymer content and four time periods between mixture and compaction, comparing the results of mixture permeability with results of untreated soil permeability. The results has shown significative influence of polymer content in the permeability coefficient value, reducing the value until 620 times in relation to untreated soil. Besides that, it was not verified significative influence of the time period between mixture and compaction in coefficient permeability value. The SAP addiction shows technical feasibility to reduction of permeability and site tests are necessary to prove the laboratory results.

Keywords: Permeability, Superabsorbent polymer, Earth dam, Sandy soil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Manchas de arenização em vista satélite.....	20
Figura 2: Areal localizado no subdistrito do Durasnal.	21
Figura 3: Ilustração de barragem zoneada.....	24
Figura 4: Capacidade de absorção vs concentração de agente reticulante	33
Figura 5: Capacidade de absorção de umidade vs concentração de monômero.....	34
Figura 6: Capacidade de absorção de água vs concentração de monômetro.	34
Figura 7: Capacidade de absorção e retenção de água em função do tamanho das partículas.....	35
Figura 8: Capacidade de absorção de água em função do tempo para diferentes tamanhos de partículas.	36
Figura 9: Capacidade de absorção em função do pH da solução.	37
Figura 10: Capacidade de absorção em função da salinidade da solução.	37
Figura 11: Absorbância em função do tipo de água.	38
Figura 12: Absorbância de água em função da temperatura.....	39
Figura 13: Retenção de água em função do tempo para diferentes temperaturas....	40
Figura 14: Imagem de satélite com a localização do ponto de coleta do solo.....	43
Figura 15: Imagem do local da coleta, imediatamente antes da coleta.....	44
Figura 16: Aspecto visual do solo do estudo.	44
Figura 17: Granulometria do solo de estudo.	46
Figura 18: Classificação MCT do solo.....	47
Figura 19: Polímero no estado seco (A) e saturado (B).	48
Figura 20: Imagem de microscópio USB de um grupo de partículas.	48
Figura 21: Imagens do microscópio USB. A) C) E) Polímero seco. B) D) F) Polímero saturado.	49
Figura 22: Granulometria do SAP.	50
Figura 23: Efeito da adição do polímero ao solo úmido. A) Solo sem polímero. B) Solo com polímero.....	55
Figura 24: Apecto visual de amostras compactadas, à esquerda solo puro e à direita mistura solo + SAP. A) Amostras úmidas. B) Amostras secas.....	56
Figura 25: Curva de compactação do solo.	56
Figura 26: Variáveis analisadas e suas combinações.....	58

Figura 27: Esquema do permeâmetro.....	60
Figura 28: Permeâmetros em sala climatizada durante o ensaio de permeabilidade.	61
Figura 29: Curvas de compactação para o tempo 30 minutos.	63
Figura 30: Curvas de compactação para o tempo 60 minutos.	63
Figura 31: Curvas de compactação para o tempo 120 minutos.	64
Figura 32: Curvas de compactação para o tempo 240 minutos.	64
Figura 33: Curvas de compactação para o teor de polímero de 0,25%.	65
Figura 34: Curvas de compactação para o teor de polímero de 0,5%.	65
Figura 35: Curvas de compactação para o teor de polímero de 0,75%.	66
Figura 37: Gráfico resumo comparativo.	68
Figura 38: Teste de deslizamento das amostras. A) Amostras SP/0,25. B) Amostras SP/0,5 e SP/0,75.	69
Figura 39: Gráfico comparativo de k vs P para t = 30 min.....	70
Figura 40: Gráfico comparativo de k vs P para t = 60 min.....	70
Figura 41: Gráfico comparativo de k vs P para t = 120 min.....	71
Figura 42: Gráfico comparativo de k vs P para t = 240 min.....	71
Figura 43: Gráfico resumo sem grupo de amostras com possível erro.	73
Figura 44: Gráfico comparativo de k vs t para P = 0,25%.	74
Figura 45: Gráfico comparativo de k vs t para P = 0,5%.	75
Figura 46: Gráfico comparativo de k vs t para P = 0,75%.	75
Figura 47: Aspecto visual pós ensaio amostra S/REF	77
Figura 48: Aspecto visual após ensaio amostra SP/0,25.	77
Figura 49: Aspecto visual após ensaio amostra SP/0,5.	77
Figura 50: Aspecto visual após ensaio amostra SP/0,75.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Área de areais por município.....	19
Tabela 2: Resultados de permeabilidade para tratamento com diferentes biopolímeros.	26
Tabela 3: Produção de SAP por continentes.....	28
Tabela 4: Trabalhos recentes por área/linha de pesquisa.....	31
Tabela 5: Fração de material com base na ASTM.	46
Tabela 6: Parâmetros do solo.	46
Tabela 7: Propriedades do polímero.	52
Tabela 8: Tabela resumo dos valores de k nas diferentes condições de mistura.	68
Tabela 10: Tabela resumo sem grupo de amostras com possível diferença dos demais.....	73
Tabela 11: Comparativo entre volume do polímero após saturação e volume de vazios da amostra.	78

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CaCl – Cloreto de cálcio

CC – Coeficiente de curvatura

CNU – Coeficiente de não uniformidade

EDANA – Associação Europeia de Descartáveis e Não-têxteis

EGDMA – Etilenoglicol Dimetacrilato

Gs – Densidade relative dos grãos

ICOLD – *International Commission on Large Dams*

KCl – Cloreto de potássio

LL – Limite de liquidez

LP – Limite de plasticidade

MCT – Miniatura Compactada Tropical

MgCl – Cloreto de Magnésio

NaCl – Cloreto de sódio

NBR – Norma Brasileira

NN'-MBA – NN'-metilenobisacrilamida

PAM – Poliacrilamida

PIB – Produto Interno Bruto

Qeq – Capacidade de absorção

SAP – Polímero superabsorvente

SUCS - Sistema Unificado de Classificação de Solos

TRB - *Transportation Research Board*

UHPC – *Ultra High Performance Concrete*

USD – *United States Dollar*

W – Teor de umidade

ρ_d – Massa específica aparente seca

k – Coeficiente de permeabilidade

a – Área da seção da mangueira (cm²)

L – Comprimento da amostra (cm)

A – Área do permeâmetro (cm²)

Δt – Diferença de tempo (s)

h_i – Carga hidráulica inicial (cm)

h_f – Carga hidráulica final (cm)

$\rho_{\text{água}}$ = Massa específica da água

ρ_{SAP} = Massa específica do polímero

m_1 = Massa de polímero seco para preenchimento de um determinado volume (g)

m_2 = Massa de polímero submetido a absorção livre (g)

V_1 = Volume preenchido com a massa m_1 (cm³)

V_2 = Volume de gel após absorção pela massa m_2 (cm³)

m_p = Massa do polímero

m_s = Massa de solo

e = Índice de vazios

V_v = Volume de vazios

$V_{p100\%}$ = Volume de polímero 100% saturado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos específicos	17
1.2 Estrutura do trabalho.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Processo de arenização em Alegrete	18
2.2 Permeabilidade.....	21
2.3 Barragens de terra	23
2.4 Métodos de tratamento de solos	25
2.5 Polímeros superabsorventes	27
2.5.1 Propriedades do SAP	29
2.5.2 Classificação do SAP	29
2.5.3 Aplicações do SAP	30
2.5.4 Propriedades que influenciam a absorção	32
2.5.5 Capacidade de retenção do líquido absorvido.....	39
2.5.6 Capacidade de reabsorção do SAP.....	40
2.6 Utilização de SAP na geotecnia	41
3 MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1 Solo do estudo	43
3.2 Polímero superabsorvente	47
3.2.1 Granulometria	49
3.2.2 Capacidade de absorção de água	50
3.2.3 Massa específica aparente do material solto	51
3.2.4 Massa específica real	51
3.2.5 Resumo das propriedades analisadas do SAP	52
3.3 Metodologia do estudo	52
3.3.1 Determinação do estado de adição do polímero no solo.....	52

3.3.2 Características visuais da mistura	55
3.3.3 Curvas de compactação	56
3.3.4 Ensaios de permeabilidade	57
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	62
4.1 Curvas de compactação	62
4.2 Permeabilidade	67
4.2.1 Influência do teor de polímero na permeabilidade	69
4.2.2 Influência do tempo de espera após homogeneização na permeabilidade	74
4.2.3 Aspecto visual das amostras após ensaio de permeabilidade	76
4.3 Observações adicionais a respeito da adição do SAP ao solo	78
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS	79
5.1 Conclusões	79
5.2 Sugestões de pesquisas futuras	80
REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

Cerca de metade dos rios existentes no mundo possuem uma grande barragem¹ construída em seu leito. Estima-se que mundialmente já foram construídas mais de 45 mil grandes barragens. A busca por desenvolvimento fez com que diversos países construíssem barragens para fins de irrigação e produção de energia hidrelétrica. No ano de 2000, as barragens foram responsáveis pela geração de 19% da energia elétrica e pela irrigação de mais de 30% dos 271 milhões de hectares irrigados em todo o mundo (WORLD COMMISSION ON DAMS, 2000).

A cidade de Alegrete, localizada no oeste do Estado do Rio Grande do Sul tem sua economia fortemente influenciada pela agricultura e pecuária de forma que, segundo dados do Governo do Estado do Rio Grande do Sul (2007), a produção de arroz foi responsável por 21,33% do PIB da cidade. Devido a esta elevada produção agropecuária, é possível verificar a existência de um grande número de barragens de terra no interior da cidade, construídas para atender a demanda de água necessária ao ciclo da produção e também para garantir água em épocas de estiagem.

Contudo, Alegrete é afetada por um processo de arenização (SUERTEGARAY, 1989; ROBAINA *et al.* 2005; MEDEIROS *et al.* 2013), sendo facilmente encontrados solos de predominância arenosa na região da cidade. Este tipo de solo tende a não apresentar propriedades adequadas para a construção de barragens, devido a sua elevada permeabilidade.

Assim como para o caso da utilização de solo de predominância arenosa para construção de barragens, é comum durante o processo de projeto e execução de obras de terra, que o solo disponível na região do projeto não apresente as propriedades físicas e mecânicas adequadas para a sua utilização. Diante disto, ao longo dos tempos foram desenvolvidas diversas técnicas de tratamento do solo visando melhorar as propriedades de interesse para o determinado projeto.

Os métodos tradicionais de tratamento do solo são baseados na utilização de cal, cimento e subprodutos/resíduos de processos industriais, como a cinza volante. Porém, o processo de produção desses materiais é altamente danoso ao meio ambiente, devido à alta liberação de carbono e elevado custo energético (TINGLE *et al.*, 2007; BLANCK *et al.*, 2013; HUANG *et al.* 2021).

¹ De acordo com ICOLD (2011): barragens com altura superior a 15 m ou altura entre 5 e 15 com represando mais do que 3 milhões de metros cúbicos.

No cenário atual de pesquisas, existem um grande apelo da comunidade científica por estudos ambientalmente adequados, ou de menor impacto ambiental. Sendo assim, é possível encontrar diversos estudos a respeito da utilização de técnicas não tradicionais de tratamento e estabilização do solo, dentre as quais podem ser citadas a utilização de polímeros e biopolímeros (TINGLE *et al.*, 2007; CHANG *et al.*, 2020; NI *et al.*, 2020; HUANG *et al.* 2021).

A poliacrilamida (PAM) é um dos polímeros utilizados para tratamento do solo, apresentando bons resultados em questão de redução de permeabilidade e ganho de resistência como apresentam Kou *et al.* (2021). A poliacrilamida é considerada um hidrogel, devido às suas propriedades de interação com líquidos aquosos.

Entre os hidrogéis, existem os polímeros superabsorventes (SAP), materiais com aspecto de pó branco que, quando expostos a meios aquosos, são capazes de absorver grandes volumes de água, transformando-se em gel. Devido à sua capacidade de absorver volumes muito grandes de água ou líquidos aquosos, são amplamente utilizados em diversas áreas da indústria e pesquisa, como farmácia, higiene, medicina, agricultura e engenharia civil (ZOHURIAAN-MEHR *et al.*, 2010).

Do ponto de vista de aplicações voltadas à geotecnia, existe maior dificuldade de encontrar estudos sobre o SAP, porém pode-se observar um grande aumento de pesquisas voltadas para outras áreas da engenharia civil.

Ainda que não existam estudos que justifiquem a utilização do SAP para tratamento de solos, as suas propriedades hidrofílicas possuem potencial para a redução da permeabilidade de solos. Khedr e Ahmed (1996) justificaram através de três mecanismos a eficácia do polímero (PAM) utilizado em seu estudo para a redução da permeabilidade de uma areia, sendo estes mecanismos: a retenção de moléculas de polímero nas partículas de solo, através disso, ocorre formação do efeito gel nos poros do solo e, por fim, este gel substitui a água presente nos poros do solo.

Ainda que o efeito do SAP não seja totalmente similar ao do PAM, a elevada capacidade de absorção de água do SAP, somado a sua expansão durante a absorção, podem ser utilizadas para o preenchimento dos vazios do solo, reduzindo assim a permeabilidade.

Diante do apresentado, o presente estudo tem por objetivo a viabilização técnica da utilização de solos de predominância arenosa para a construção de barragens de terra zoneadas, com o núcleo composto por solo tratado com polímero superabsorvente.

1.1 Objetivos específicos

- Determinar o melhor estado do SAP para a adição no solo;
- Verificar a influência do SAP, sob diferentes teores de adição (0,25, 0,5 e 0,75%), na permeabilidade do solo;
- Verificar a influência do tempo após homogeneização (30, 60, 120 e 240 minutos) na permeabilidade da mistura solo + SAP, para cada teor de SAP analisado.

1.2 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está organizado estruturalmente em cinco capítulos. No primeiro capítulo é abordada a introdução do estudo, apresentando os objetivos e justificativa do mesmo. O segundo capítulo contempla a revisão bibliográfica que embasou o estudo. O terceiro, apresenta a metodologia que foi adotada para a realização do estudo. O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos e a análise destes. O quinto capítulo contempla as conclusões e sugestões de trabalhos futuros. Por fim, são apresentadas as referências utilizadas no estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processo de arenização em Alegrete

A bacia do Ibicuí integra uma província basáltica-arenítica, com base no Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul, sendo seu relevo caracterizado por inclinações suaves, com declividades predominantes entre 5 e 8%, apresentando uma forma predominante de amplas colinas (ROBAINA *et al.*, 2005).

A região da Campanha Gaúcha, onde está localizada a cidade de Alegrete e que está situada na bacia do Ibicuí, passou a ser considerada como região sujeita aos processos de desertificação a partir da década de 70, e foi identificada pelo Plano Nacional de Combate à Desertificação, no ano de 1997, como área de atenção especial devido a apresentar forte degradação ambiental e áreas de desertificação (ANDRADES FILHO *et al.*, 2007; SUERTEGARAY, 2011).

A desertificação pode ser entendida como o processo que conduz uma área a se transformar em deserto. Deserto, por sua vez, denomina uma região de clima árido ou semiárido, onde a precipitação média anual é insuficiente para compensar a evaporação potencial, o que resulta na carência de água e em uma biosfera pouco desenvolvida. (CONTI, 2008).

Porém, devido as condições climáticas e a análise do processo de arenização da região, Suertegaray (1988, apud SUERTEGARAY, 1989) considerou inadequado o uso do conceito de desertificação para explicar os processos ocorridos na Campanha Gaúcha. De acordo com a autora, o conceito de desertificação é aplicado a regiões áridas ou semiáridas, o que não se aplica à região de estudo, uma vez que esta apresenta volume médio anual de chuva de aproximadamente 1400 mm. Ainda, não existem evidências de que a expansão desse processo estaria mudando o clima da região de úmido para semiárido ou árido.

O conceito de arenização definido por Suertegaray e Verdum (2008) e consiste em:

“retrabalhamento de depósitos areníticos (pouco consolidados) ou arenosos (não consolidados) que promove nessas áreas dificuldade de fixar a vegetação, devido à constante mobilidade dos sedimentos. O retrabalhamento desses depósitos, no caso de formações superficiais, provavelmente quaternárias, resultou de uma dinâmica morfogênética onde os processos hídricos superficiais, particularmente o escoamento concentrado do tipo ravina ou voçoroca, associados a chuvas torrenciais,

expõe, transporta e deposita areia, dando origem à formação de areais que, em contato com o vento, tendem a uma constante remoção”.

Segundo Suertegaray (2011), a perda de nutrientes do solo e a mobilização de sedimentos dificultam o processo de fixação da vegetação, resultando em áreas caracterizadas por depósitos arenosos não consolidados, denominadas de areais. Estas áreas constituem a forma mais evidente do processo de arenização.

Na paisagem, os areais são visualizados como uma superfície arenosa com ausência de recobrimento contínuo com vegetação. De acordo com levantamento realizado por Andrades Filho *et al.* (2006), a região da Campanha Gaúcha apresentou nos anos de 1989 e 2004/2005 uma área de areais de 3024,32 ha e 3027,41 ha respectivamente. A Tabela 1, apresenta a área total de areais por município da região nos dois anos analisados, e a porcentagem referente a área total do município.

Tabela 1: Área de areais por município.

Município	Área do município (ha)	Área de areais (ha)		% de areais por município	
		1989	2004/2005	1989	2004/2005
Alegrete	772060,00	934,67	939,87	0,1211	0,1217
Cacequi	233307,00	9,36	18,00	0,0040	0,0077
Itaqui	329675,00	23,30	14,48	0,0071	0,0044
Maçambará	178857,00	276,66	276,12	0,1547	0,1544
Manoel Viana	128738,00	551,97	561,78	0,4288	0,4364
Quaraí	322466,00	230,40	234,09	0,0714	0,0726
Rosário do Sul	437887,00	15,39	26,46	0,0035	0,0060
São Borja	380185,00	194,94	212,40	0,0513	0,0559
São F. de Assis	259859,00	765,27	720,72	0,2945	0,2774
Unistalda	57601,00	22,41	23,49	0,0389	0,0408
Total	3100635,00	3024,37	3027,41	0,0975	0,0976

Fonte: Adaptado de Andrades Filho *et al.* (2006).

De acordo com Bellanca e Suertegaray (2003), existem diferentes teorias sobre a gênese destes areais, sendo tratadas por alguns autores como de formação por causa antrópicas e por outros autores como de formação natural.

Porém, ainda que não haja consenso a respeito da formação inicial destas áreas, é sabido que tanto a ação humana, através das atividades agrícolas, quanto a ação da natureza, através dos ventos e chuvas, contribuem para a manutenção e aumento destas áreas.

Robaina *et al.* (2005), afirma que durante os meses de julho, agosto e setembro, períodos de elevada atividade ventosa, é possível verificar ventos de elevadas velocidades conhecidos popularmente como vento “Minuano”. Estes ventos intensificam o processo de arenização na região.

Na cidade de Alegrete, e na região onde está inserida, verifica-se a ocorrência de diversos areais, sendo possível verificar a extensão da ocorrência através da imagem de satélite mostrada na Figura 1. Um exemplo de areal, localizado no subdistrito do Durasnal, está apresentado na Figura 2.

Figura 1: Manchas de arenização em vista satélite.



Fonte: Google Maps (Imagem capturada em 13/03/2022, às 23:07).

Figura 2: Areal localizado no subdistrito do Durasnal.



Fonte: Autoria própria.

2.2 Permeabilidade

O solo é um material permeável devido à existência de vazios contínuos que permitem o fluxo de água no seu interior. A permeabilidade tem grande efeito no custo e dificuldade operacional de diversas obras de terra e é representada pelo coeficiente de permeabilidade (k), e expressa o quão fácil ocorrerá ou a capacidade de ocorrer a percolação de água pelos vazios de um maciço de solo (TERZAGHI *et al.*, 1996).

O coeficiente de permeabilidade de um solo depende de diversos fatores, como: densidade, umidade de compactação, grau de saturação, índice de vazios, tamanho dos poros, granulometria, composição, estrutura do solo (SINHA E WANG, 2008; DAS, 2007).

A determinação do coeficiente de permeabilidade em laboratório de forma direta é realizada através de permeâmetros, sendo estes divididos em dois tipos: permeâmetros de carga constante e permeâmetros de carga variável. Nos permeâmetros de carga constante o abastecimento de água é realizado de forma constante, de forma que a diferença de carga hidráulica durante todo o ensaio seja a

mesma. Este ensaio é utilizado em solos de elevada permeabilidade, que possibilitem a constância de carga hidráulica, como areias (HEAD E EPPS, 2011).

Diferentemente do permeâmetro de carga constante, no ensaio de permeabilidade de carga variável uma quantidade de água é adicionada na entrada do permeâmetro e durante o ensaio mede-se a diferença de carga hidráulica durante determinado período de tempo. Este tipo de ensaio é realizado para solos que apresentem permeabilidade baixa ou média (HEAD E EPPS, 2011).

Existem diversos tipos de células de ensaio que podem ser utilizadas para a medição da permeabilidade, que podem ser divididas em duas principais categorias: células de parede rígida e de parede flexível. As células de parede rígida apresentam como vantagem a simplicidade e o fato da amostra ser ensaiada diretamente no molde de compactação. As células de parede flexível têm como vantagem o fato de minimizar o fluxo o solo e a parede do molde através do confinamento da amostra, sendo adequadas para ensaios em amostras indeformadas (BOYNTON E DANIEL, 1985; DANIEL, 1994).

As células de parede rígida consistem basicamente em um tubo ou caixa rígida contendo a amostra a ser submetida ao ensaio de permeabilidade. O tubo ou caixa pode ser de metal, plástico ou vidro. Quatro tipos de células de parede rígida são utilizados, sendo elas: permeâmetro molde de compactação, permeâmetro célula de consolidação, permeâmetro tubo de amostragem e permeâmetro superdimensionado. As células de parede rígida são os tipos mais comuns utilizados em ensaios de permeabilidade para areias e materiais de elevada permeabilidade (DANIEL, 1994).

O permeâmetro do tipo molde de compactação é o mais utilizado entre as células de parede rígida. Neste tipo de permeâmetro, o solo é compactado no próprio molde em que será realizado o ensaio de permeabilidade, podendo ser utilizado para solos com granulometria desde pedregulho até argilas, desde que obedecendo as devidas proporções do tamanho do molde em relação ao tamanho do grão, sendo esta proporção recomendada pela ASTM D5856 como 6 vezes (DANIEL, 1994).

Esta relação tem que ser obedecida para garantir uma distribuição de vazios e torrões mais próxima possível do que se verifica em campo, uma vez que a dimensão da amostra utilizada nos ensaios de laboratório trata-se de um dos fatores que fazem a permeabilidade em laboratório ser diferente da observada em campo (SHACKELFORD E JAVED, 1991). Olsen (1962) afirma que o fluxo de água para em solos argilosos ocorre predominantemente entre os vazios existentes entre diferentes

torrões, e não através dos torrões. Isso faz com que amostras de dimensões pequenas e grandes torrões apresentem menos caminhos para o fluxo de água, reduzindo assim, de forma aparente, a permeabilidade durante o ensaio.

Boynton e Daniel (1985) estudaram o efeito do tamanho da amostra na permeabilidade de uma argila compactada sob diferentes teores de umidade. Os resultados mostraram que à medida que o tamanho da amostra aumenta, a permeabilidade aumenta também, porém este aumento foi inferior a 2 vezes para todos teores de umidade. Esta diferença não foi considerada significativa pelos autores.

Shackelford e Javed (1991), compararam os resultados de permeabilidade para permeâmetros com dimensões iguais a do molde pequeno do Ensaio de Compactação Proctor e permeâmetros de grande escala com dimensões superiores a 60 cm de lado e 15 cm de altura. Adicionalmente, os autores variaram o tamanho dos torrões durante a compactação das amostras. Os resultados mostraram que para torrões grandes (com dimensões superiores a relação proposta pela ASTM D5856 entre molde e tamanho de grão) a variação entre os moldes de dois tamanhos foi superior do que para torrões menores (inferiores a 4,75 mm).

Outra potencial preocupação quanto a utilização deste tipo de célula de ensaio é o fluxo através da interface amostra/tubo. Porém, estudos comprovam que não há diferença significativa entre os permeâmetros de parede rígida e os de parede flexível, de forma que para ambos os casos a permeabilidade na lateral é de 2 a 5 vezes superior à no centro da amostra. Esta diferença de grandeza é atribuída aos macroporos existentes próximos ao perímetro da amostra (DANIEL, 1994).

Ainda segundo Daniel (1994), os diâmetros mais usuais para a célula de ensaio são os mesmos orientados por normas de compactação, como por exemplo o de 100 mm referente ao cilindro pequeno do Ensaio de Compactação Proctor.

2.3 Barragens de terra

Barragens de terra são estruturas compostas por partículas de solo, ligadas entre si, compactadas mecanicamente em camadas. Possuem forma trapezoidal, usualmente, com a base larga (SALEM *et al.*, 2019).

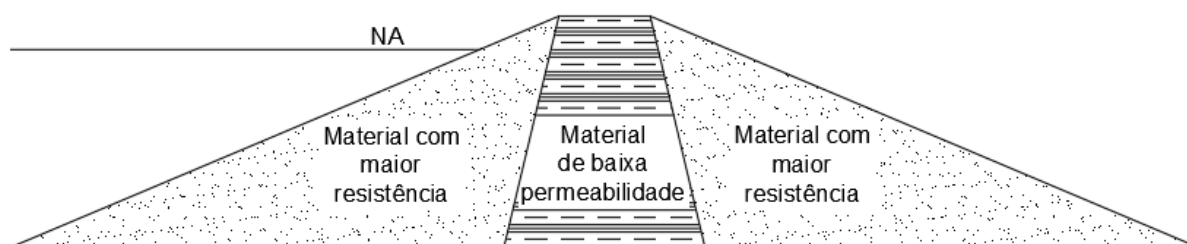
A construção de barragens de terra trata-se de uma das atividades técnica mais antigas com finalidade de benefício grandes grupos de seres humanos (KUTZNER, 1996).

As barragens são construídas para os mais diversos fins, dentre os quais ICOLD (2020) apresenta a irrigação, geração de energia, pesca, recreação, controle de alagamento, rejeitos e fornecimento de água. Destes, a irrigação é a finalidade mais buscada durante o processo de execução, seguida da geração de energia. Ainda de acordo com ICOLD (2020), 65% das grandes barragens existentes no mundo são de terra.

As barragens de terra podem ser divididas em dois principais tipos: barragem homogênea e barragem zoneada. A escolha do tipo de barragem é feita levando em conta o material disponível na região da obra e os custos envolvidos (KUTZNER, 1996; FAO, 2011).

Barragens zoneadas consistem em barramentos que utilizam mais de um tipo de material durante sua execução, conforme ilustra a Figura 3. Os materiais mais finos, e menos permeáveis, disponíveis na região da obra são utilizados no núcleo da barragem, enquanto os materiais mais resistentes, e mais permeáveis, são utilizados nos taludes de montante e jusante (KUTZNER, 1996; SANCHEZ-MARTÍN, 2020).

Figura 3: Ilustração de barragem zoneada.



Fonte: Autoria própria.

Na ausência de material fino, com permeabilidade suficientemente baixa, para execução da obra, outra solução com amplo estudo e utilização é o núcleo de concreto asfáltico (WANG *et al.*, 2010; AKHTARPOUR E KHODAII, 2013; SEO *et al.*, 2017; GAO *et al.*, 2019 e FENG *et al.*, 2020). Esta solução, segundo Seo *et al.* (2017), está aplicada em mais de 150 barragens ao redor do mundo.

Além desta solução, Baziar *et al.* (2018) apresentam a utilização de nanopartículas de argila no tratamento de solos argilosos para utilização em núcleos

de barragem. Com base nos resultados encontrados, os autores afirmam que a solução é apropriada para este fim.

2.4 Métodos de tratamento de solos

A mecânica dos solos atual fornece diversas técnicas de melhorias das propriedades do solo, o qual devido a consequências inevitáveis pode apresentar falta de resistência e capacidade de suporte, inviabilizando a sua utilização para obras geotécnicas (LATIFI *et al.*, 2017; KHAJEH *et al.*, 2020).

Em geral, os métodos de tratamento do solo podem ser divididos em duas principais categorias: tratamentos mecânicos e tratamentos químicos. Dentre os métodos mecânicos, podem ser citados a compactação, vibração e o reforço com geossintéticos. Já os tratamentos químicos consistem na adição de determinado aditivo químico ao solo, melhorando assim suas propriedades (LATIFI *et al.*, 2017; CHANG *et al.*, 2020).

A estabilização química do solo é dividida em tradicional e não tradicional. Os métodos tradicionais são amplamente estudados e já existe grande conhecimento a respeito, onde geralmente são utilizados aditivos como cimento, cal, cinza volante e produtos betuminosos para melhorar as propriedades do solo (TINGLE *et al.*, 2007; BLANCK *et al.* 2013).

O uso de cimento e/ou cal, pode ser um método de tratamento caro, principalmente em países menos desenvolvidos que precisam importar estes produtos. Além disso, tratam-se de tratamentos menos adequados de um ponto de vista ambiental, se comparados a outros tratamentos tradicionais como a utilização da cinza volante que, mesmo sendo produtos de um processo danoso ao meio ambiente, se trata de uma utilização de resíduos (LATIFI *et al.* 2017).

Devido aos princípios do desenvolvimento sustentável, como a redução de liberação de gás carbônico e da utilização de energias não renováveis, diversos métodos de tratamento do solo não tradicionais estão sendo testados e estudados. Entre eles podem ser citados a utilização de sais, ácidos, polímeros, lignossulfonatos, silicatos e resinas de árvores (TINGLE *et al.*, 2007; BLANCK *et al.* 2013, LATIFI *et al.* 2017, SOLTANI-JIGEH *et al.*, 2019; HUANG *et al.*, 2021).

Além da relativa falta de conhecimento a respeito do mecanismo de atuação de parte dos tratamentos não tradicionais, a questão do custo deve ser levada em

consideração durante os estudos, de forma a garantir a possibilidade de competitividade com os métodos tradicionais.

O tratamento do solo com polímero, para os mais diversos fins, tem recebido bastante atenção recentemente, onde são estudadas a utilização de polímeros de origem natural e sintética (ORTS *et al.*, 2007; LIU *et al.*, 2011; IYENGAR *et al.*, 2013; GEORGEES *et al.*, 2017; HUANG *et al.*, 2021).

Bouazza *et al.* (2009) estudaram o efeito da adição de três diferentes polímeros naturais (biopolímeros) na condutividade hidráulica de um solo classificado como areia siltosa. Os polímeros utilizados foram: goma guar, goma xantana e alignato de sódio. Os polímeros foram adicionados em porcentagem de massa, e os ensaios de permeabilidade realizados na umidade 2% acima da ótima. Estão apresentados na Tabela 2 os resultados encontrados para o tratamento com os diferentes polímeros e diferentes teores.

Como pode-se perceber há uma redução da permeabilidade superior a quatro ordens de magnitude para o tratamento com goma xantana. Os autores estudaram ainda o efeito do tempo de cura do polímero alignato de sódio, verificando que a permeabilidade reduziu ainda mais até o período de 70 dias de cura.

Tabela 2: Resultados de permeabilidade para tratamento com diferentes biopolímeros.

Propriedade analisada	Areia siltosa	Compósito solo-biopolímero						
		Material adicionado (em % de massa)						
		Goma guar			Alignato de sódio		Goma xantana	
		0,5	1	2	0,5	1	0,5	1
Wot + 2%	10,5	12,5	12,1	13,7	11,2	12,4	12,4	14,2
γ_d (kN/m ³)	21,2	19,8	21,2	19,1	20,9	19,8	20,1	20,1
k (m/s)	1E-06	3E-07	8E-08	4E-10	2E-09	4E-10	4E-11	3E-11

Fonte: Adaptado de Bouazza *et al.* (2009).

O mecanismo de redução de permeabilidade dos biopolímeros adicionados ao solo é explicado pelos autores como o preenchimento dos vazios do solo pelo polímero. Ainda, os autores explicam que o melhor resultado foi encontrado para a goma xantana devido a sua alta afinidade com a água e sua capacidade de adsorver em partículas de argila.

2.5 Polímeros superabsorventes

Hidrogéis são redes macromoleculares formadas por cadeias de polímeros hidrofílicos. Este tipo de material possui a capacidade de absorver fluídos aquosos, sendo essa capacidade de absorção geralmente inferior a 100% de sua massa própria, para hidrogéis comuns. Entre os hidrogéis, existem os polímeros superabsorventes que são, basicamente, hidrogéis com capacidade de absorção de fluídos aquosos extremamente elevadas. A grande diferença na capacidade de absorção entre os hidrogéis comuns e os SAP se devem a proporção de monômero hidrofílico e agente reticulador utilizado para sua sintetização. Os hidrogéis comuns são densamente reticulados e apresentam menores concentrações de monômeros, enquanto os SAP são levemente reticulados e apresentam maiores concentrações de monômeros (ZOHURIAAN-MEHR E KABIRI, 2008).

Os polímeros superabsorventes são um tipo de gel polimérico com grande capacidade de absorção de água sem que haja sua dissolução, podendo ser capaz de absorver proporções de água de até 1500 vezes sua massa própria. (LIU E GUO, 2001; FRIEDRICH, 2012; LAFTAH *et al.*, 2011; MA E WEN 2020).

Esses materiais possuem estrutura tridimensional e reticulada, podendo ser de origem natural ou sintética. Normalmente as cadeias poliméricas que formam esses polímeros são constituídas de ânions de carboxilato e cátions de sódio (LIU E GUO, 2001; MA E WEN, 2020).

A capacidade do SAP de absorver água parte dos grupos funcionais hidrofílicos ligados à sua estrutura, enquanto a sua resistência a dissolução se deve à presença de ligações cruzadas (*crosslinks*) entre suas cadeias de rede (OKAY, 2009).

De acordo com Friedrich (2012) o principal fator que resulta expansão do polímero é a pressão osmótica proporcional a concentração a concentração de íons do polímero. Como os íons no SAP são forçados a estarem próximos, devido à rede polimérica, uma elevada pressão osmótica está presente dentro do polímero, a qual é reduzida à medida que o polímero absorve água, pois ocorre a diluição destas cargas. Quando todas as cargas estão em equilíbrio, afirma-se que é a expansão também está em equilíbrio, e o polímero atinge sua máxima capacidade de absorção.

As ligações cruzadas são formadas através da utilização de agentes específicos, que são substâncias de baixa massa molar e grupos funcionais reativos com capacidade de permitir a formação de ligações entre as cadeias poliméricas como

etilenoglicol dimetacrilato (EGDMA) e NN'-metilenobisacrilamida (NN'-MBA), sendo o agente escolhido de acordo com o tipo de monômero utilizado na sintetização (BEGAM *et al.*, 2003; GONSALVES *et al.*, 2011).

Comparando o material no estado seco e após contato com a água, é possível verificar duas fases distintas, sendo elas: colapsada e saturada. Na fase colapsada, o material tem aspecto de pó com cor branca, enquanto na fase saturada possui aspecto de gel transparente.

Entre as características importantes para utilização na engenharia, Jensen e Hansen (2001) destacam a capacidade de absorção, a resistência e o módulo de elasticidade no estado de gel inchado. Segundo os autores, essas propriedades dependem diretamente do quão densamente reticulada é a rede do polímero, de forma que quanto maior a densidade das conexões, menor é a capacidade de absorção e maior é o módulo de elasticidade e resistência.

Quanto ao preço, podem ser encontrados no mercado diferentes precificações para o produto, variando com o tipo, propriedades e qualidade. Foram encontrados preços entre USD 1,90 até USD 50,00², excluso o frete. De acordo com Zohuriaan-Mehr e Kabiri (2008), um levantamento realizado pela Associação Europeia de Descartáveis e Não-têxteis (EDANA) em 2005, indicou que a produção mundial de polímero na data foi de aproximadamente 1,483 milhões de toneladas, sendo a quantidade por continente e os principais produtores apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Produção de SAP por continentes.

Continente	Quantidade (toneladas)	Produtores
Ásia	623000	Nippon Shokubai San-Dia Polymers Sumitomo Seika Chemichals Degussa (atualmente Evonik)
América do Norte	490000	BASF Nippon Shokubai Dow
Europa	370000	Degussa (atualmente Evonik) BASF

Fonte: Adaptado de Zohuriaan-Mehr e Kabiri (2008).

² Preços referentes ao ano de 2022, desconsiderados preços excessivamente elevados.

Atualmente, entre as citadas, BASF, Dow e Evonik possuem fábrica no Brasil, mas a fábrica da Evonik não produz polímeros superabsorventes no país.

A seguir serão comentadas as propriedades, classificação, aplicações, propriedades que influenciam a absorção dos polímeros superabsorventes, e, por fim, a sua breve aplicabilidade para fins geotécnicos.

2.5.1 Propriedades do SAP

Além da elevada capacidade de absorção, o SAP possui propriedades que o tornam um material muito versátil, podendo ser aplicado nas mais diversas áreas do conhecimento. Dentre estas propriedades, Zohuriaan-Mehr e Kabiri (2008), Behera e Mahanwar (2020), destacam:

- Diferentes taxas de absorção, dependendo do tipo de aplicação desejado;
- Incolor, Inodoro e não tóxico;
- Elevada capacidade de absorção de água sob carregamento;
- Custo relativamente baixo;
- Capacidade de reabsorção de água;
- Em geral, são biodegradáveis e apresentam biocompatibilidade, não apresentando formação de substâncias tóxicas durante sua degradação;
- Apresentam boa durabilidade e estabilidade em ambientes de absorção.
- Capacidade de devolver ao meio a solução absorvida (dependendo da aplicação desejada).
- Possibilidade de modificar as propriedades de acordo com a aplicação (e.g. capacidade de absorção, capacidade de retenção, capacidade de reabsorção).

2.5.2 Classificação do SAP

Devido a elevada quantidade de variáveis que podem ser modificadas durante o processo de sintetização dos polímeros superabsorventes, é possível encontrar diversas formas de classificação desses materiais. A seguir estão apresentadas as principais formas de classificação.

Natureza – A classificação quanto a natureza é dividida em natural, sintético e híbridos. Os polímeros naturais são geralmente baseados em polissacarídeos,

celulose, amidos, quitosana e proteínas. Já os sintéticos são baseados em petroquímicos como o copolímero de ácido acrílico e acrilamida, sendo este o mais comum entre os comerciais. Os híbridos são geralmente compósitos, buscando maximizar determinada característica do SAP (ZOHURIAAN-MEHR E KABIRI, 2008; MA E WEN, 2020).

Tipo de agente reticulador – de acordo com o tipo de agente reticulador, os SAP podem ser classificados como físicos e químicos. Geralmente, a reticulação física é baseada em ligações de hidrogênio e tendem a ser mais fracas que as reticulações químicas, derivadas geralmente de ligações covalentes (ULLAH *et al.*, 2015; MIGNON *et al.*, 2019).

Composição – Baseado na sua composição, os SAP podem ser classificados como: homopolímero, copolímero e polímero de cadeia interpenetrada. Os polímeros comerciais geralmente são copolímeros (BEHERA E MAHANWAR, 2020; VENKATACHALAM E KALIAPPA, 2021).

Presença de cargas nas cadeias – A classificação quanto a carga elétrica pode ser realizada como: iônico (catiônico ou aniônico), não iônico (neutros), anfótero e zwitterion. Os iônicos são os mais comuns de serem encontrados, e são os derivados de monômeros acrílicos principalmente. Os neutros são derivados geralmente de celulose. Os anfóteros são os que apresentam grupos ácidos e básicos simultaneamente em sua unidade estrutural. Por fim, os zwitterion são os que apresentam grupos catiônicos e aniônicos simultaneamente em sua unidade estrutural (ZOHURIAAN-MEHR E KABIRI, 2008; VENKATACHALAM E KALIAPPA, 2021)

Morfologia – De acordo com sua morfologia, os SAP podem ser classificados como: pó, fibra, granular e lamelar (MIGNON *et al.*, 2019).

2.5.3 Aplicações do SAP

Historicamente, os primeiros polímeros superabsorventes comerciais surgiram na década de 1970, e tinham sua utilização voltada totalmente para produtos higiênicos (ZOHURIAAN-MEHR E KABIRI, 2008).

Entre aplicações que o polímero possui estudos relacionados a sua utilização, Zohuriaan-Mehr *et al.* (2010) citam: higiene, agricultura, farmácia, medicina, fibras e têxteis, tratamento de efluentes, estruturas de concreto, eletrônica, sistemas de refrigeração, géis de combate a incêndio, borrachas absorventes de água,

desidratação de lama/lodo, biosensores. Estão apresentados na Tabela 4 uma seleção de trabalhos recentes em diferentes áreas do conhecimento.

Tabela 4: Trabalhos recentes por área/linha de pesquisa.

Área/Linha de Pesquisa	Autor/Ano	Polímero	Finalidade
Higiene	Lacoste <i>et al.</i> (2019)	Celulose reciclada	Sintetização de polímero reciclado para uso em fraldas
Farmácia	Yang e Park (2018)	Poliacrilato de sódio	<i>Drug delivery</i>
	Hajikhani <i>et al.</i> (2019)	A base de goma xantana e ácido acrílico	
Biologia	Nielsen <i>et al.</i> (2020)	**	Precipitação microbial de CaCO ₃ induzida
Medicina	Sepantafar <i>et al.</i> (2017)	**	Modelos de reconstrução de tumores
Concreto	Boshoff <i>et al.</i> (2020)	Dois polímeros de diferentes densidades reticulares	Mitigação da fissuração por retração plástica
	Liu <i>et al.</i> (2021)	Poliacrilato de sódio (copolímero)	Análise microestrutural e micromecânica de UHPC
Argamassas	Rostami <i>et al.</i> (2021)	Variáveis*	Redução da retração plástica, autógena e por secagem
	De Meyst <i>et al.</i> (2021)	1 - Poliacrilato de potássio; 2 - Poliacrilato de sódio	Redução da retração autógena
Agricultura	Dispat <i>et al.</i> (2020)	1 -Poliacrilato de sódio; 2 - A base de amido e poliacrilato	Biodegradação e crescimento de plantas

*Propriedades disponíveis no trabalho.

** Propriedades do material não informadas.

Fonte: Autoria própria.

Segundo Venkatachalam e Kaliappa (2021), a maior aplicabilidade do SAP é em fraldas de bebês, sendo referente a 85% da utilização do polímero. Os 15% restantes são divididos em produtos de incontinência adulta (10%), produtos higiênicos femininos (3%) e as demais aplicações somam os últimos 2%.

2.5.4 Propriedades que influenciam a absorção

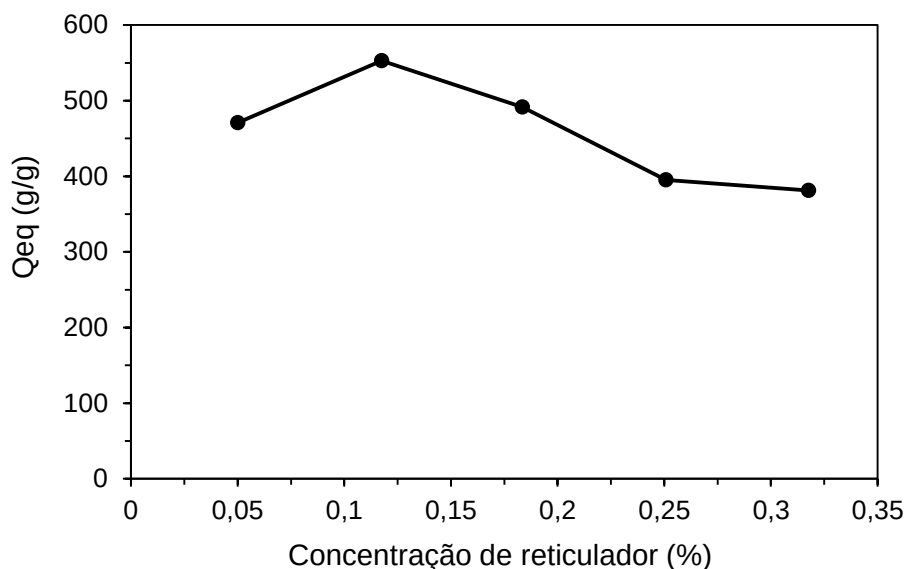
A capacidade de absorção (Q_{eq}) e retenção do material, assim como a taxa de absorção e de redução de volume dependem de diversas propriedades, podendo estas serem propriedades do material ou do líquido que está sendo absorvido, assim como propriedades do ambiente.

2.5.4.1 Influência das propriedades do polímero na capacidade de absorção

Entre as propriedades do polímero podem ser destacadas: densidade reticular, grau de neutralização, método de polimerização e tamanho das partículas. Estas propriedades estão comentadas a seguir.

Densidade reticular – O agente reticulante é o responsável pela não dissolução do polímero quando em contato com a água. Baixos teores de agente reticulante resultam em um baixo grau de rede formado, fazendo com que não haja uma estrutura de rede tridimensional. Nestes casos, parte do polímero é dissolvido, reduzindo assim a capacidade de absorção. A medida que o teor de agente reticulante é aumentado, até um valor ótimo, a capacidade de absorção do polímero aumenta. Para valores excessivamente grandes de agente reticulante, superiores ao ótimo, a estrutura de rede formada é muito densa, dificultando a capacidade de expansão do polímero e, conseqüentemente, limitando sua capacidade de absorção. (LIU E GUO, 2000 e CHENG *et al.*, 2017). A variação da capacidade de absorção pela porcentagem de agente reticulante, utilizado na sintetização para um compósito superabsorvente sintetizado por Cheng *et al.* (2017), está apresentado Figura 4.

Figura 4: Capacidade de absorção vs concentração de agente reticulante



Fonte: Adaptado de Cheng *et al.* (2017).

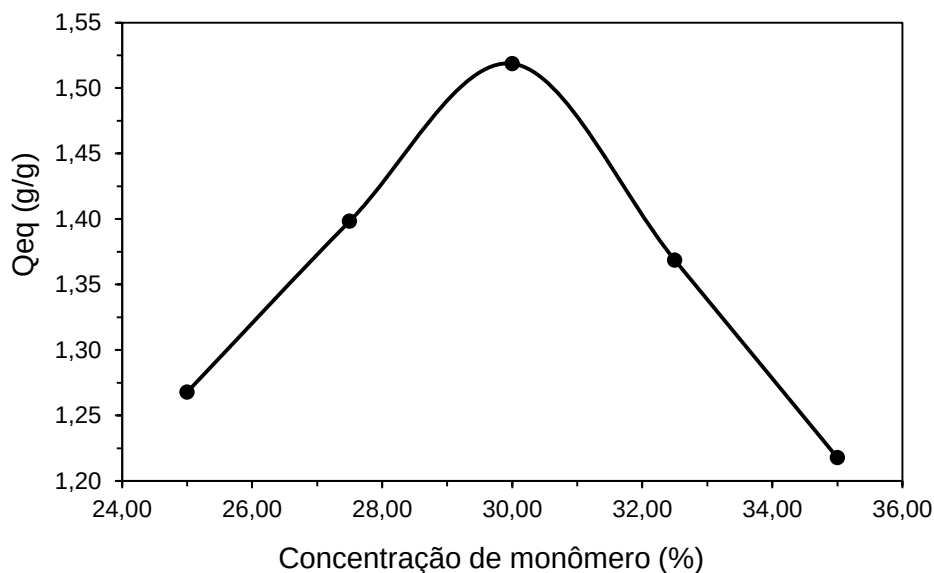
Grau de neutralização – O grau de neutralização influencia na resistência das “partículas” do polímero e, por consequência, na sua capacidade de não ser dissolvido. Entretanto, valores excessivamente elevados de grau de neutralização fazem com que os componentes solúveis do hidrogel aumentem em número, e o polímero se torne parcialmente solúvel em água (LIU E GUO, 2000; CHENG *et al.*, 2017).

Diversos estudos analisaram a dependência da capacidade de absorção de água do polímero em relação ao grau de neutralização, sendo verificado sempre um valor ótimo de grau de neutralização. O valor ótimo varia de acordo com a forma de neutralização e com o monômero que dá origem ao polímero, de forma que determinado monômero pode se tornar solúvel em valores menores de grau de neutralização do que outros.

Concentração de monômero – Como apresentado no item 2.4, a capacidade de absorção dos SAP é principalmente atribuída à quantidade de monômero hidrofílico que é utilizada na sua sintetização. Assim como para as demais propriedades do polímero que influenciam na capacidade de absorção, a concentração de monômero costuma também apresentar um valor ótimo. A Figura 5 apresenta a variação da capacidade de absorção de umidade em função da concentração de monômero para o polímero sintetizado por Zhang *et al.* (2009). A Figura 6, apresenta a variação da

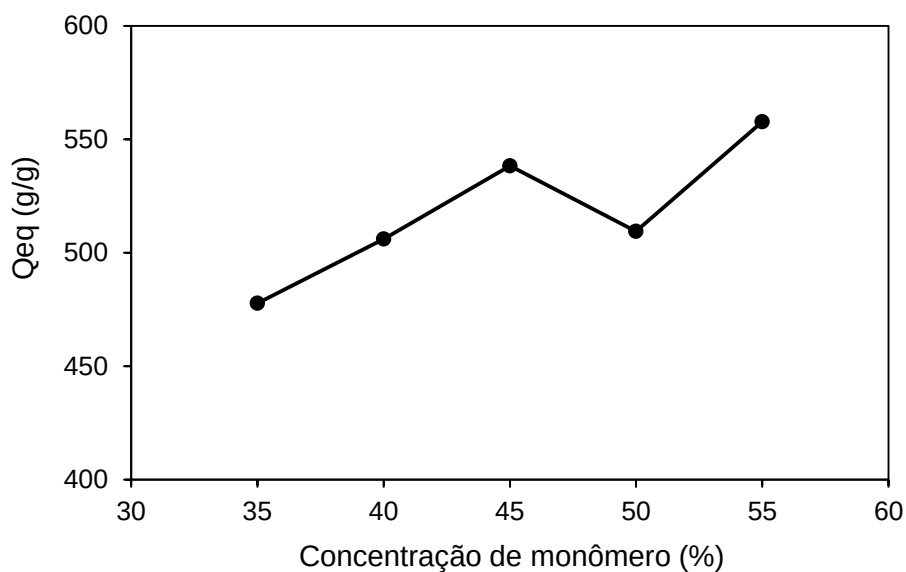
capacidade de absorção para um compósito superabsorvente sintetizado por Cheng *et al.* (2017).

Figura 5: Capacidade de absorção de umidade vs concentração de monômero.



Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2009).

Figura 6: Capacidade de absorção de água vs concentração de monômetro.



Fonte: Adaptado de Cheng *et al.* (2017).

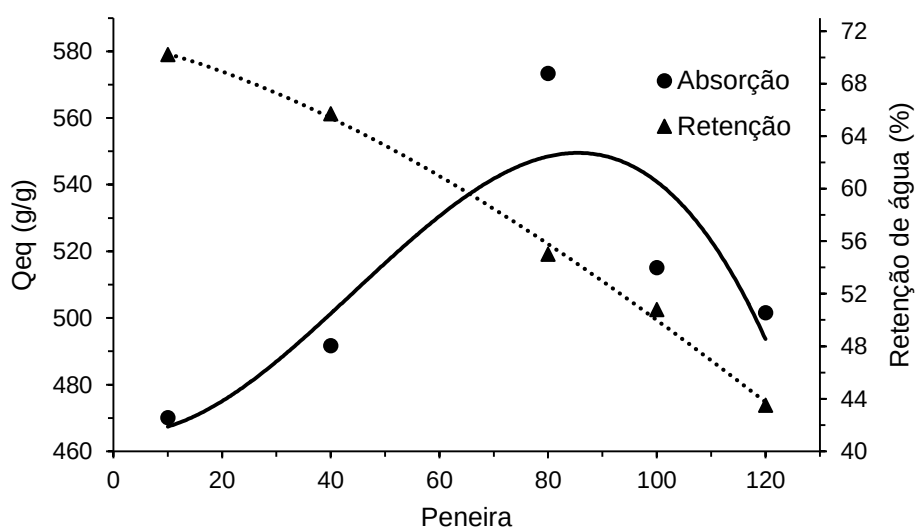
Tamanho das partículas – Bao *et al.* (2011) analisaram a capacidade de absorção e a retenção de água do polímero, por eles sintetizado, em função do tamanho das partículas. O resultado encontrado está apresentado na Figura 7, e pode-se observar comportamento variável para a capacidade de absorção em função do tamanho, apresentando pico de capacidade para partículas retidas na peneira #80

e menor capacidade conforme as partículas ficam menores ou maiores. Tal comportamento é atribuído pelos autores a variação da taxa de absorção e do volume intersticial presente para cada polímero, de forma que a combinação ótima destes dois fatores resulta no pico de capacidade.

Sohn e Kim (2002), analisaram a capacidade de absorção de um polímero superabsorvente (poliacrilato de sódio), sintetizado com propriedades variadas, sendo uma destas o tamanho das partículas. O resultado por eles encontrados, apresentado na Figura 8, indica que à medida que o tamanho das partículas aumentou, a absorbância reduziu.

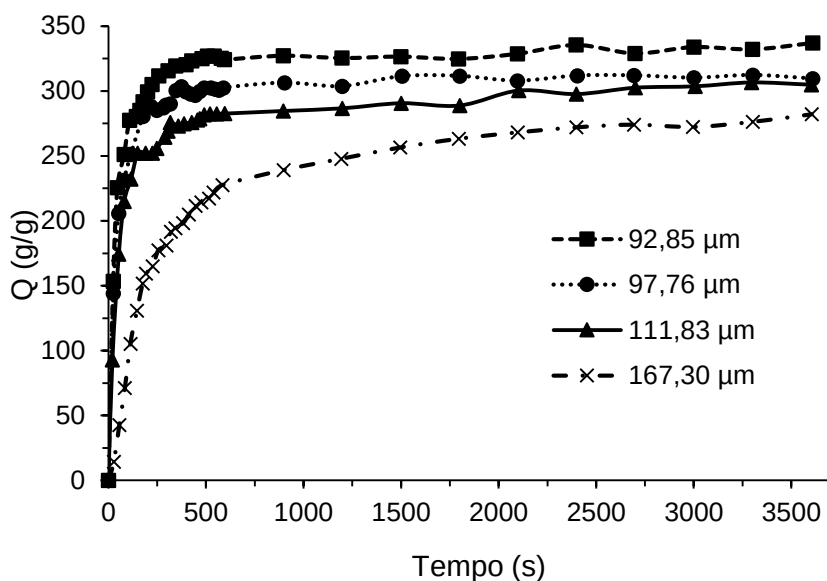
Além disso, Omidian *et al.* (1999) afirma que a absorção de água pelo polímero ocorre mais rapidamente para polímeros com partículas menores, devido ao fato da área de superfície aumentar conforme a redução do tamanho das partículas.

Figura 7: Capacidade de absorção e retenção de água em função do tamanho das partículas.



Fonte: Adaptado de Bao et al. (2011).

Figura 8: Capacidade de absorção de água em função do tempo para diferentes tamanhos de partículas.

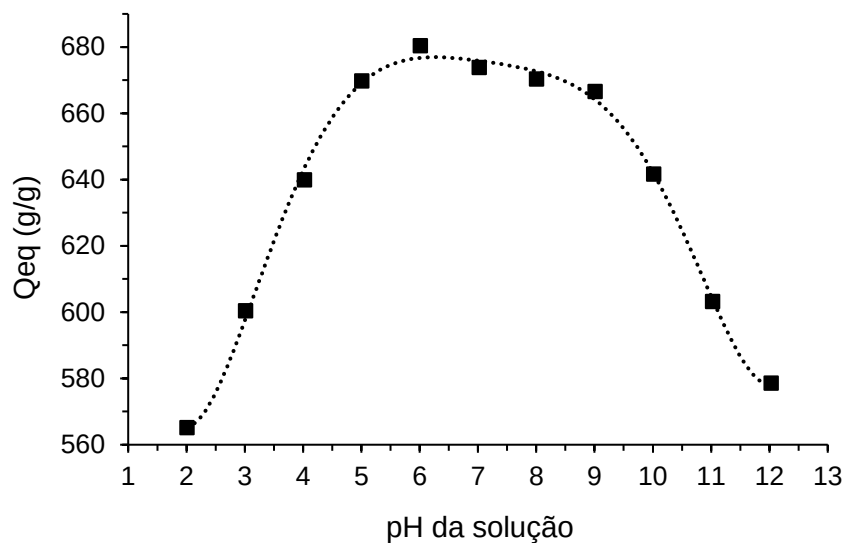


Fonte: Adaptado de Sohn e Kim (2002).

2.5.4.2 Influência das propriedades do líquido na capacidade de absorção

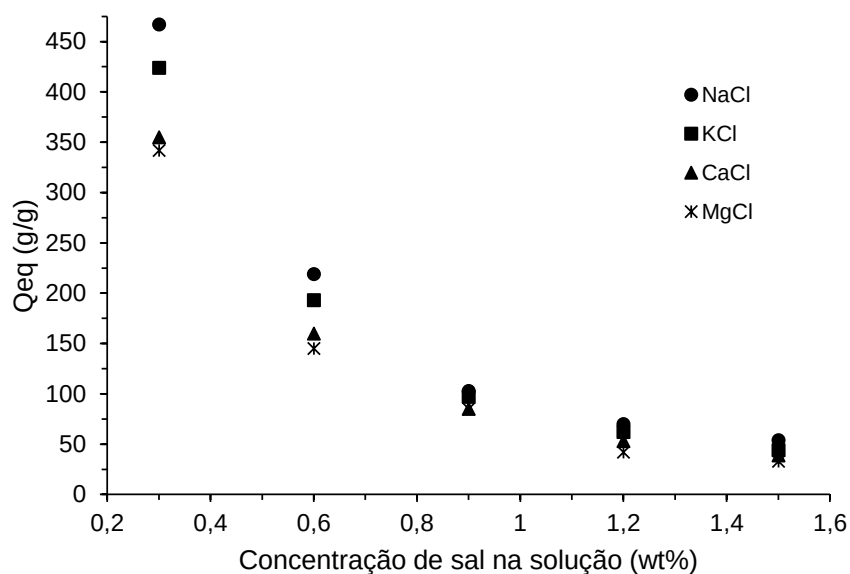
Se tratando do líquido absorvido, propriedades como pH da solução e tipos de sais com diferentes concentrações são citadas em estudos como o de Bao *et al.* (2011), onde os autores analisaram a variação da absorbância em função de tais propriedades. Verificaram que, para o polímero por eles sintetizado, a capacidade de absorção era maior para pHs próximos do neutro (7) e era menor para pHs mais ácidos ou básicos, conforme apresentado na Figura 9. Se tratando da concentração de sais da solução, os autores analisaram a capacidade de absorção em função da concentração de quatro diferentes sais, sendo eles: cloreto de sódio (NaCl), cloreto de potássio (KCl), cloreto de cálcio (CaCl) e cloreto de magnésio (MgCl). Para todas as concentrações analisadas, a maior capacidade de absorção foi observada para o NaCl, enquanto a menor foi observada para o MgCl. Além disso, a capacidade de absorção é inversamente proporcional a concentração de sal na solução. A capacidade de absorção em função do tipo e concentração de sais está apresentada na Figura 10.

Figura 9: Capacidade de absorção em função do pH da solução.



Fonte: Adaptado de Bao et al. (2011).

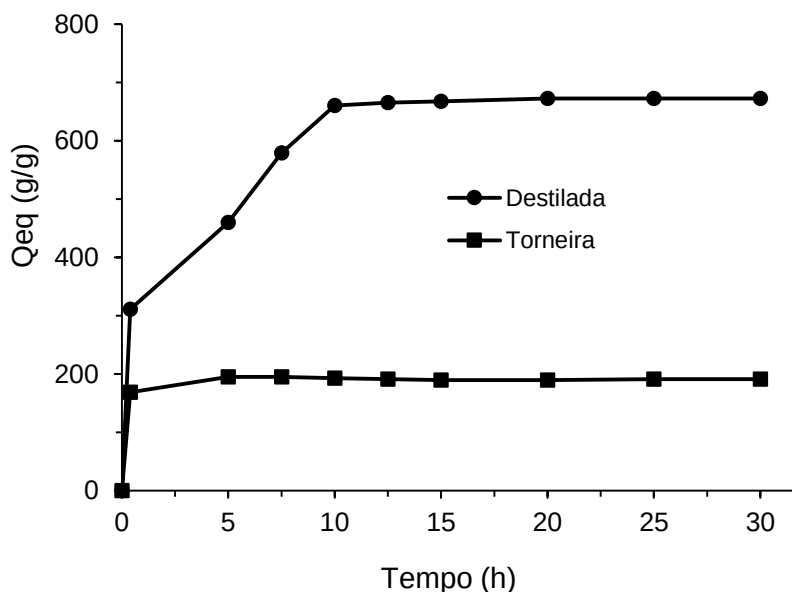
Figura 10: Capacidade de absorção em função da salinidade da solução.



Fonte: Adaptado de Bao et al. (2011).

Ainda a respeito da influência das propriedades do líquido absorvido, Liu e Guo (2000) analisaram a capacidade de absorção utilizando água destilada e água da torneira, sendo o resultado apresentado na Figura 11. É possível verificar grande redução da absorbância quando utilizado água da torneira, em relação a água destilada.

Figura 11: Absorbância em função do tipo de água.

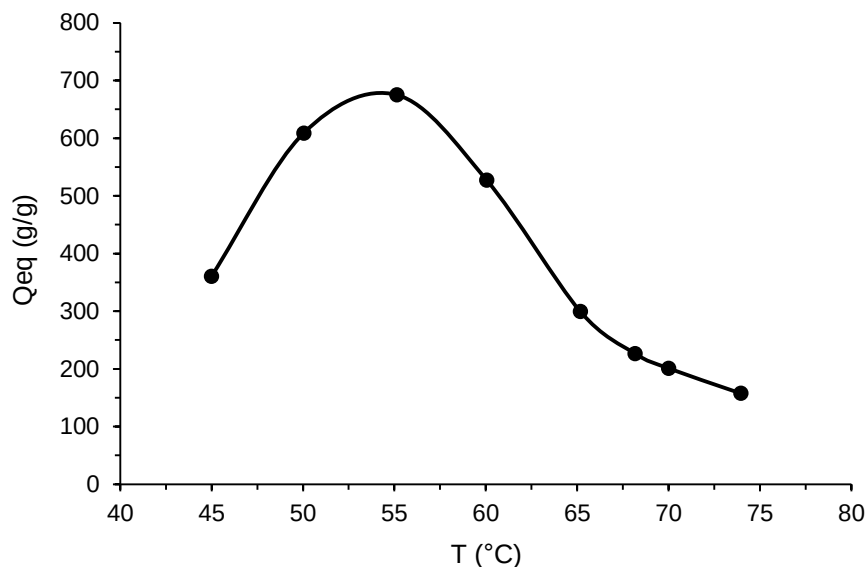


Fonte: Adaptado de Liu e Guo (2000).

2.5.4.3 Influência das propriedades do ambiente na capacidade de absorção

Além das propriedades do polímero e do líquido, a absorbância varia de acordo com propriedades do ambiente como temperatura e pressão. Liu e Guo (2000) analisaram, entre diversas propriedades, a influência da temperatura e pressão na absorbância de água do polímero por eles sintetizado. Se tratando da temperatura, foi possível perceber um pico de absorbância por volta de 55 °C e menores absorbâncias para temperaturas elevadas, conforme apresenta a Figura 12. A existência de um pico de absorbância para determinada temperatura é atribuída pelos autores ao fato de que a região de temperatura onde o pico se encontra trata-se de uma região em que se observa aumento do comprimento médio de reticulações, impactando em uma maior absorbância. Além disso, percebeu-se uma relação inversamente proporcional entre a absorbância e a pressão aplicada.

Figura 12: Absorvência de água em função da temperatura.



Fonte: Adaptado de Liu e Guo (2000).

Tal comportamento do polímero sugere que para possível aplicação em barragens, deve ser realizado análise prévia das águas da região, além das propriedades do ambiente em que o material irá se encontrar, e realizar o teste de absorção do polímero de interesse, de forma a se obter o melhor rendimento possível.

2.5.5 Capacidade de retenção do líquido absorvido

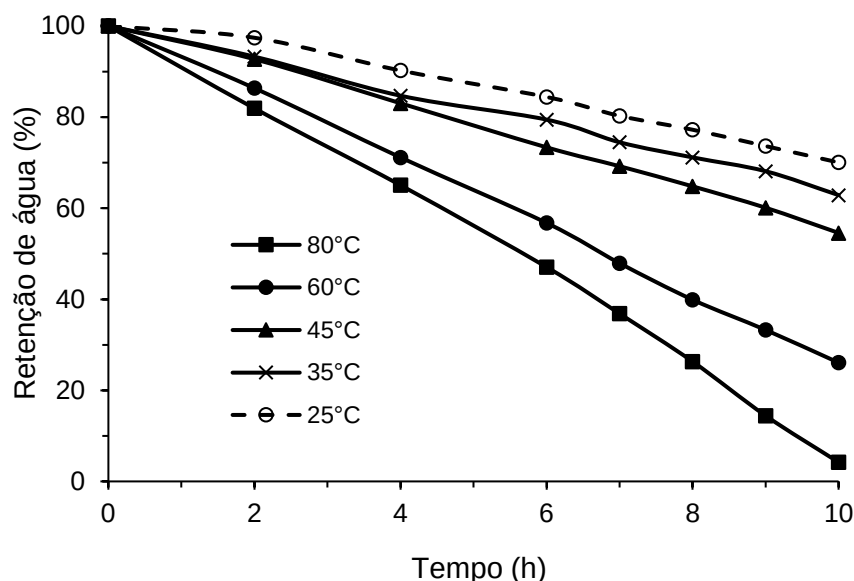
Além da capacidade de absorção, o SAP possui capacidade de retenção do líquido absorvido sob determinadas condições. Tal capacidade é bastante aproveitada quando o SAP é utilizado para fins agrícola, onde o material ajuda o solo a reter água para as plantas.

De acordo com Fang *et al.* (2018), a capacidade de retenção está associada estrutura de rede do polímero, portanto, estruturas reticulares mais densas proporcionam maior retenção de água.

Diversos autores, dentre eles Zhang *et al.* (2021) e Qi e Hu (2022), propõe a existência de uma retenção residual do material de forma que, na ausência de fatores externos que estimulem a liberação de água, o SAP mantém uma determinada quantidade da água absorvida, sendo esta quantidade variável para cada tipo de polímero.

Zhang *et al.* (2021) analisaram a retenção de água do SAP após determinados períodos de tempo quando submetido à diferentes temperaturas, conforme apresentado na Figura 13. É possível perceber que, para temperaturas inferiores a 45°C, o polímero consegue reter mais de 50% da água absorvida após 10 horas de ensaio.

Figura 13: Retenção de água em função do tempo para diferentes temperaturas.



Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2021)

Outros autores, como Zhang *et al.* (2019), também encontraram comportamento semelhante para a capacidade de retenção, de forma que para 40°C, após 10 horas de ensaio o SAP manteve 63% da água absorvida e, após 17 horas, foi capaz de manter 30% da água absorvida.

Ainda, Zhang *et al.* (2019), associam o fenômeno de diferentes retenções para cada temperatura às pontes de hidrogênio e forças de van der Waals entre o polímero e as moléculas de água.

2.5.6 Capacidade de reabsorção do SAP

Ao ser submetido a ciclos de umedecimento e secagem, o polímero superabsorvente pode apresentar diferentes capacidades de absorção, podendo estas ser maiores (SWAIN *et al.*, 2013) ou menores que a inicial (ZHANG *et al.*, 2006; MARANDI *et al.*, 2011; PARVATHY E JYOTHI, 2012).

Swain *et al.* (2010) verificaram um aumento na capacidade de absorção após ciclos de reabsorção, chegando a atingir valores 1,8 vezes maiores em relação à referência (primeiro ciclo) após 5 ciclos.

Por outro lado, Zhang *et al.* (2006) verificaram redução da capacidade de absorção superiores a 50% após 5 ciclos. Para o polímero analisado por Parvathy e Jyothi (2012), a redução da capacidade de absorção foi ainda maior, de forma que no quinto ciclo a absorção foi da ordem de 30% da verificada no primeiro ciclo.

Ainda, Marandi *et al.* (2011) estudaram um polímero superabsorvente comum e um polímero nanocompósito otimizado. Para ambos os polímeros os autores verificaram redução na capacidade de absorção, porém para o polímero convencional foi de 82% da capacidade inicial, enquanto para o nanocompósito foi de apenas 17%.

Portanto, para o uso em barragens de terra sugere-se o estudo da capacidade de absorção após ciclos, uma vez que o material estará sujeito a estes ciclos nestas obras.

2.6 Utilização de SAP na geotecnia

Ainda que a utilização de polímeros superabsorventes seja amplamente estudada em diferentes áreas do conhecimento, quando se tratando da geotecnia os estudos são ainda limitados. De qualquer forma, é possível selecionar alguns trabalhos onde foi utilizado o polímero com fins geotécnicos, entre eles: os de Bian *et al.* (2016), Bian *et al.* (2017), Bian *et al.* (2018) e Wu *et al.* (2019).

Bian *et al.* (2016), Bian *et al.* (2017) e Bian *et al.* (2018) estudaram o uso do SAP como meio de melhorar os resultados para o tratamento de argilas de dragagem com cal e/ou cimento, a fim de transformar estes materiais, considerados subprodutos, em materiais com potencial uso para obras de terra. Esta melhoria ocorre através da absorção, por parte do polímero, da umidade em excesso que o cimento e/ou a cal não consomem durante a sua hidratação.

Já Wu *et al.* (2019), estudaram o tratamento de solo com SAP a fim de buscar melhorar o comportamento do mesmo quando submetido a ciclos de umedecimento e secagem, e terá maior destaque devido a maior proximidade com a aplicação desejada no presente estudo. O SAP utilizado pelos autores trata-se de um poliacrilato de sódio, com capacidade de absorção da ordem de 52 ± 2 g/g, e grãos angulares e

irregulares. O solo de estudo foi classificado pelos autores pela classificação SUCS como GW, pedregulho bem graduado.

No referido estudo, Wu *et al.* (2019), avaliaram a influência do SAP sob diferentes teores de adição e diferentes teores de umidade. No estudo, avaliaram o efeito do SAP na compactação, resistência ao cisalhamento (através de cisalhamento direto) e ciclos de molhagem e secagem. A respeito da influência do SAP na compactação, os autores verificaram redução da massa específica aparente seca máxima com o aumento do teor de SAP, e verificaram a não influência do SAP no teor de umidade ótimo. Se tratando da resistência ao cisalhamento, os autores verificaram ganho de resistência com o uso do SAP, sendo este ganho mais visível no parâmetro da coesão. Quando analisaram o comportamento da resistência após ciclos, o solo sem SAP apresentou grande redução nos parâmetros de resistência, enquanto o solo tratado com SAP apresentou aumento do ângulo de atrito e redução apenas na coesão. A análise do volume após os ciclos de molhagem e secagem mostraram que o volume após os ciclos tende a ser maior à medida que o teor de SAP é aumentado, porém para teores de polímero menores o aumento de volume não foi significativo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e os métodos utilizados para verificar a influência do SAP na permeabilidade de um solo arenoso. O solo utilizado no estudo trata-se de um solo da região de Alegrete, dado o interesse na aplicação regional. O polímero superabsorvente utilizado trata-se de um polímero comercializado no Brasil pela BASF. A caracterização dos materiais foi dividida em caracterização do solo, do polímero e da mistura. A metodologia do estudo é baseada em ensaios de permeabilidade de carga variável.

3.1 Solo do estudo

O solo do estudo foi coletado na cidade de Alegrete, no subdistrito do Durasnal, com posição de latitude $29^{\circ}54'40,1''\text{S}$ e longitude $55^{\circ}29'05,8''\text{W}$. Na Figura 14 está apresentada a imagem de satélite da região e na Figura 15 uma imagem da área de coleta do material, a qual está localizada próxima a um areal como pode ser observado na imagem de satélite. Por análise tátil visual, o solo apresentou característica arenosa, com porcentagem de finos baixa, atendendo ao que se busca para o presente estudo. O aspecto visual do solo do estudo está apresentado na Figura 16.

Figura 14: Imagem de satélite com a localização do ponto de coleta do solo.



Fonte: Google Earth (Imagem capturada em 01/04/2022, às 16:30).

Figura 15: Imagem do local da coleta, imediatamente antes da coleta.



Fonte: Autoria própria.

Figura 16: Aspecto visual do solo do estudo.



Fonte: Autoria própria.

Buscou-se caracterizar o solo pelas classificações Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), *Transportation Research Board* (TRB) e Miniatura Compactada Tropical (MCT). Os ensaios de caracterização realizados foram: granulometria, massa específica dos grãos, limites de Atterberg, para as classificações SUCS e TRB, e os ensaios Mini-MCV e perda de massa por imersão para a classificação MCT.

A granulometria foi realizada de acordo com a NBR7181 (ABNT, 2016), sendo esta realizada por sedimentação com defloculante.

A massa específica dos grãos foi determinada de acordo com o Anexo B da NBR6458 (ABNT, 2016). Foram realizados ensaios com três picnômetros, observando variação máxima de 0,02 g/cm³ entre eles para serem considerados no cálculo da massa específica dos grãos, conforme orienta a norma.

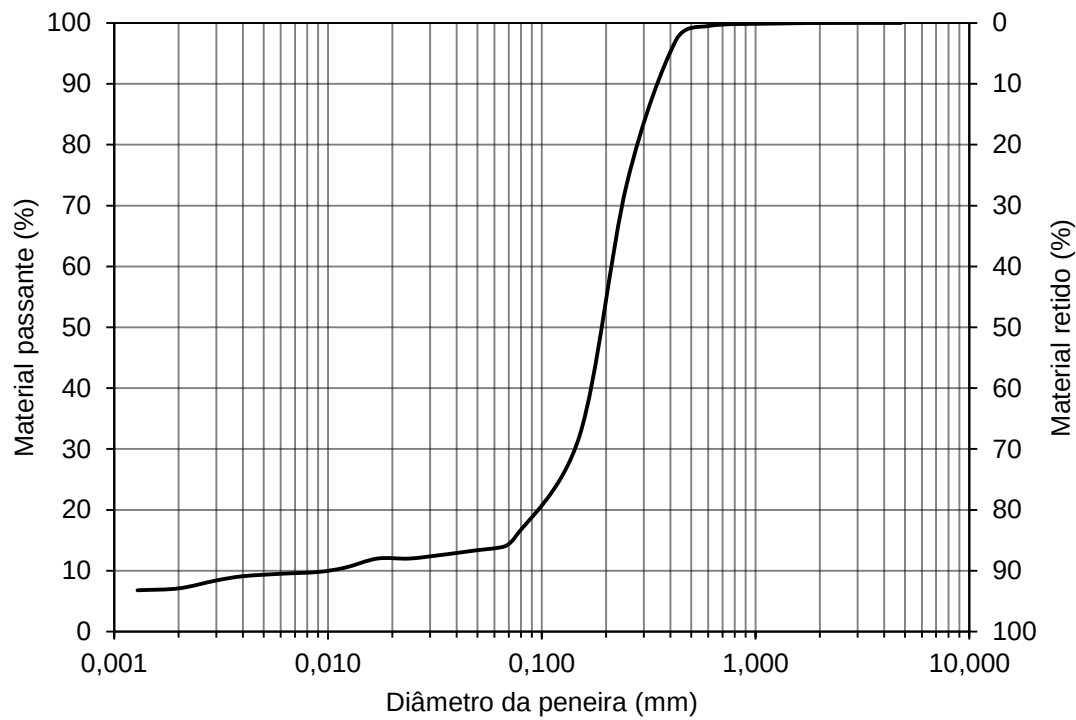
Para a determinação dos limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP), foram respeitados os procedimentos orientados pelas normas NBR6459 (ABNT, 2016) e NBR7180 (ABNT, 2016). O solo não apresentou plasticidade, não sendo possível realizar os ensaios.

A granulometria do solo está apresentada na Figura 17 e a fração de cada material de acordo com a classificação da ASTM apresentada na Tabela 5. Os valores dos coeficientes de curvatura (CC) e não uniformidade (CNU), densidade relativa dos grãos (Gs), LL e LP estão apresentados na Tabela 6.

O solo foi classificado como ML (silte de baixa compressibilidade) e A-2-4 (areia siltosa ou argilosa) pelas classificações SUCS e TRB respectivamente.

Para a classificação MCT foi seguido o proposto por Nogami e Villibor para a execução dos ensaios do Mini-MCV e perda de massa por imersão. O solo foi classificado como NA, areia não laterítica. A Figura 18 apresenta a posição do solo de estudo no ábaco do MCT.

Figura 17: Granulometria do solo de estudo.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 5: Fração de material com base na ASTM.

Material	Fração
Areia grossa (4,8 - 2,0mm)	0,00%
Areia média (2,0 - 0,42mm)	2,80%
Areia fina (0,42-0,075 mm)	81,70%
Silte (0,075 - 0,005 mm)	6,40%
Argila (<0,005mm)	9,10%

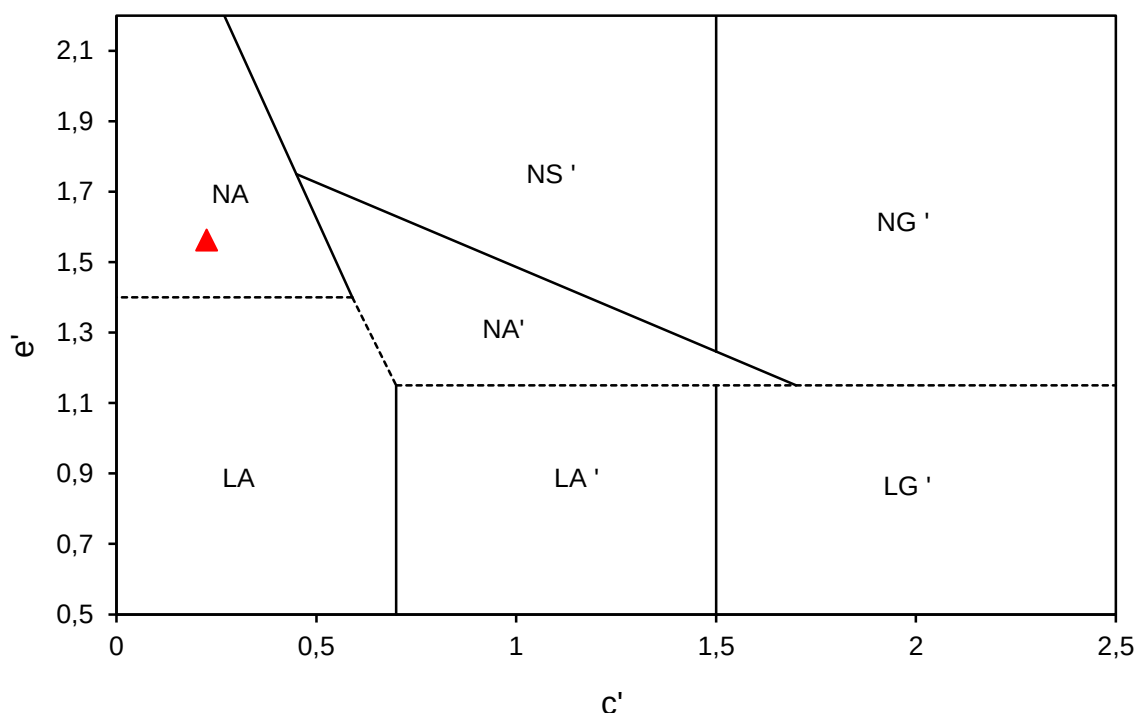
Fonte: Autoria própria.

Tabela 6: Parâmetros do solo.

Parâmetro	Valor
CC	8,45
CNU	20
LL	Não plástico
LP	Não plástico
Gs	2,59

Fonte: Autoria própria.

Figura 18: Classificação MCT do solo.



Fonte: Adaptado de Villibor e Alves (2019).

3.2 Polímero superabsorvente

O polímero utilizado no estudo foi um polímero superabsorvente do modelo Hysorb® C9630, Poliacrilato de Sódio, classificado como homopolímero sintético. O material foi doado pela BASF para utilização na pesquisa.

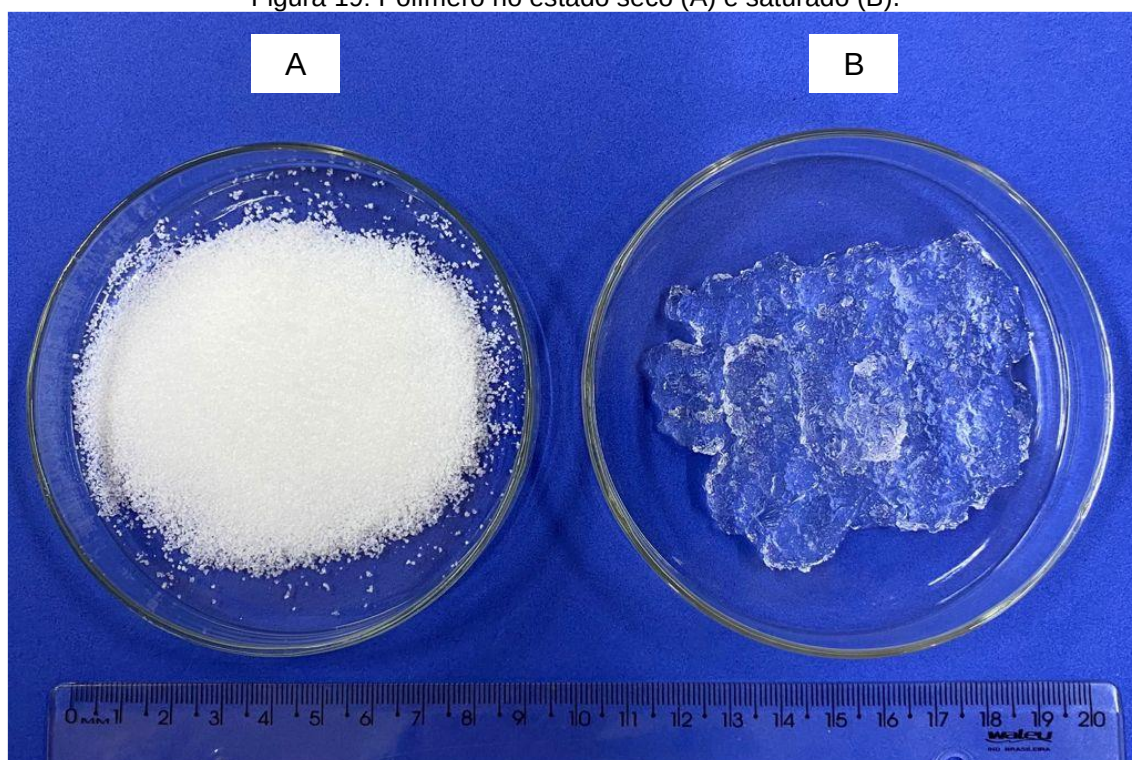
O aspecto do material pode ser definido como granular de cor branca, no estado seco (A), e gel transparente, no estado saturado (B). Os estados do polímero estão apresentados na Figura 19.

As partículas do polímero no estado seco apresentam aspecto irregular, indicando que a polimerização foi realizada por solução. A Figura 20 apresenta uma imagem obtida com microscópio digital USB de um grupo de partículas do polímero seco.

A fim de verificar as mudanças ocorridas em grãos do polímero ao entrarem em contato com a água, foram imageados três grãos diferentes através do uso de um microscópio digital USB, os quais estão apresentadas na Figura 21.

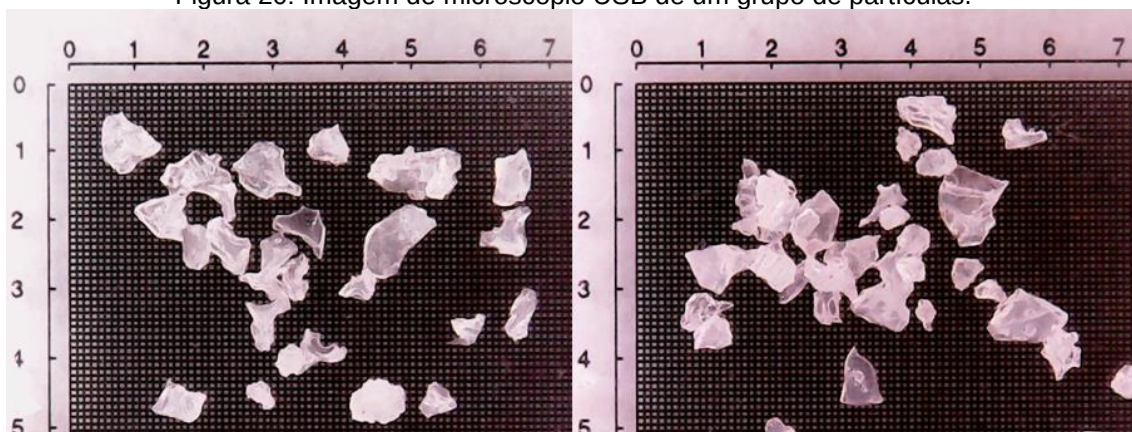
Do ponto de vista de caracterização do material, as propriedades analisadas foram: granulometria, massa específica aparente, massa específica real e absorbância.

Figura 19: Polímero no estado seco (A) e saturado (B).



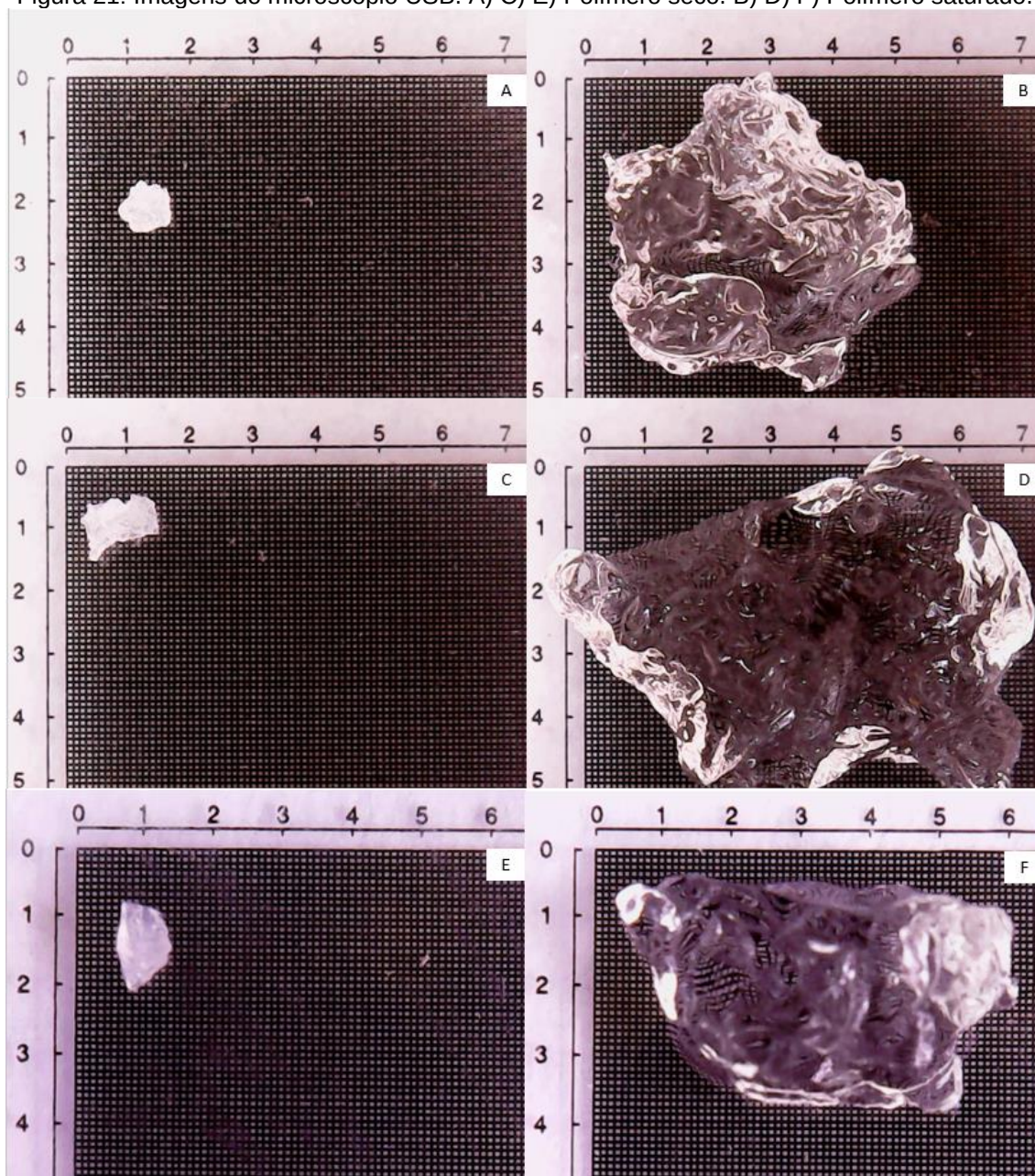
Fonte: Autoria própria.

Figura 20: Imagem de microscópio USB de um grupo de partículas.



Nota: A escala da grade é de 1 mm, enquanto as divisões menores são referentes a 0,1 mm cada.
Fonte: Autoria própria.

Figura 21: Imagens do microscópio USB. A) C) E) Polímero seco. B) D) F) Polímero saturado.

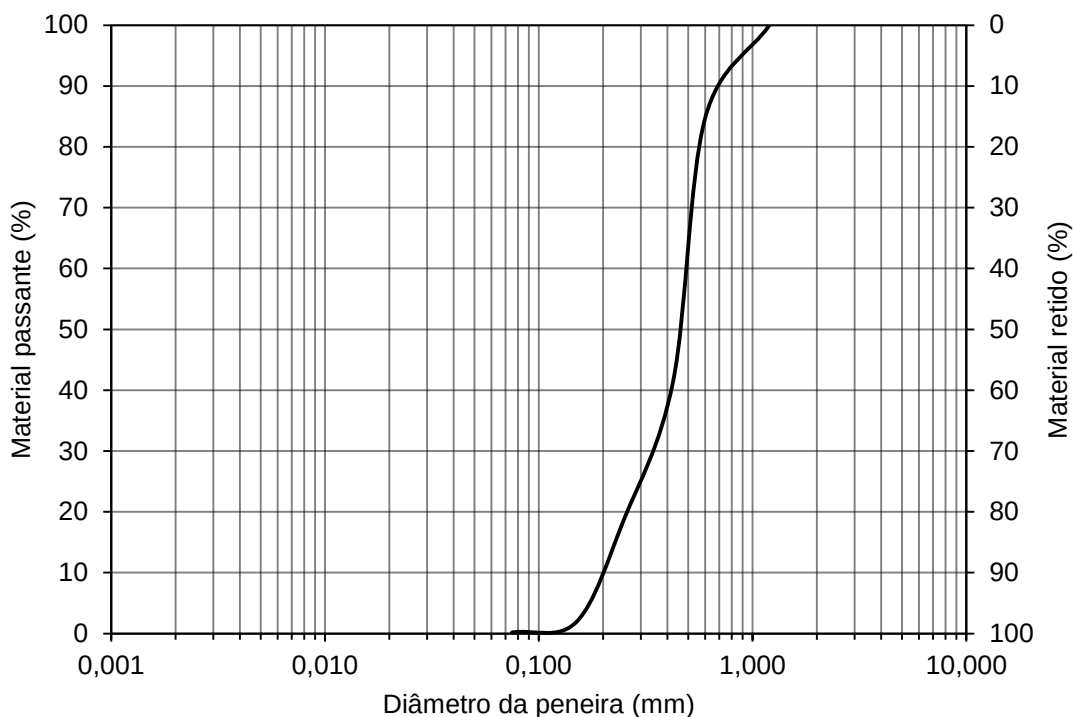


Fonte: Autoria própria.

3.2.1 Granulometria

A granulometria do material foi determinada através de peneiramento simples, utilizando a sequência de peneiras do peneiramento fino, uma vez que todo material foi passante na peneira de abertura 2 mm, orientado pela NBR7181/2016, sendo estas: 1,2 mm, 0,6 mm, 0,425 mm, 0,25 mm, 0,125mm e 0,075 mm. Na Figura 22 está apresentada a granulometria do SAP.

Figura 22: Granulometria do SAP.



Fonte: Autoria própria.

3.2.2 Capacidade de absorção de água

A capacidade de absorção do polímero, foi medida por dois diferentes métodos, utilizando água da torneira. Os métodos utilizados foram: *tea bag* e cilindro graduado. A metodologia de cada um deles será descrita a seguir.

Tea bag – De acordo com Jensen (2011), o método do *tea bag* trata-se de uma metodologia popular para determinação da absorção do SAP. O método consiste em preencher um pequeno saco permeável com partículas de SAP seca e, posteriormente, submergir o conjunto em água por um período de tempo até se verificar constância de massa. A absorção é calculada através da relação entre a massa seca do polímero e a massa do polímero após absorção.

Para o presente estudo, foi utilizado um filtro de tecido com abertura suficientemente pequena de forma a evitar perda de partículas de SAP. Este filtro, contendo o SAP seco, foi submerso em um béquer com água garantindo a total submersão do material, mesmo após a expansão durante a absorção.

Cilindro graduado – De acordo com Jensen (2011) trata-se de um método simples para estimar a absorção do SAP. O método consiste em medir a variação de volume de uma certa massa de SAP seco, solta em um cilindro graduado, enquanto

ocorre a absorção de água. É possível medir a absorção de água no equilíbrio e, se a absorção for suficientemente lenta, medir a variação da absorção ao longo do tempo.

Inicialmente determina-se a densidade aparente do SAP, preenchendo o cilindro graduado, com partículas secas do polímero, até um volume conhecido e medindo a massa de polímero necessária para preencher este volume. Após isso, retira-se o excesso de polímero mantendo apenas uma pequena quantidade para determinação da variação de volume após absorção. Preenche-se com água o cilindro e, durante o processo de absorção, agita-se o cilindro para garantir a que as partículas de SAP possam expandir livremente.

A absorção é determinada pela Equação 1, sendo usualmente expressa em g/g:

$$Q_{eq} = \frac{\rho_{\text{água}}}{\rho_{\text{SAP}}} \left(\frac{V_2}{V_1} \cdot \frac{m_1}{m_2} - 1 \right) \quad (1)$$

Onde:

$\rho_{\text{água}}$ = massa específica da água.

ρ_{SAP} = massa específica do polímero.

m_1 = massa de polímero seco para preenchimento de um determinado volume.

m_2 = massa de polímero submetido a absorção livre.

V_1 = volume preenchido com a massa m_1 .

V_2 = volume de gel após absorção pela massa m_2 .

3.2.3 Massa específica aparente do material solto

A determinação da massa específica aparente do material foi realizada durante o método do cilindro graduado, proposto por Jensen (2011). O polímero foi solto em um cilindro graduado até o preenchimento de um volume conhecido. O conjunto foi pesado, e foi determinado assim a massa específica aparente do material.

3.2.4 Massa específica real

A determinação da massa específica real foi realizada pela metodologia usual utilizada para o cimento, utilizando o frasco de Le Chatelier, normatizada pela NBR16605 (ABNT, 2017).

Tal escolha se deve ao fato de o polímero reagir com a água, portanto foi buscada uma metodologia alternativa, sendo utilizado um líquido que o polímero não absorvesse. Para o presente estudo foi utilizado querosene. Vale ressaltar que a EDANA orienta que a densidade deve ser obtida através de densímetro digital, porém como o laboratório não dispõe do equipamento, optou-se pela metodologia adotada.

3.2.5 Resumo das propriedades analisadas do SAP

Os resultados da caracterização do SAP em termos de massa específica e capacidade de absorção estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Propriedades do polímero.

Propriedade	Valor
Massa específica solta (g/cm ³)	0,7
Massa específica real (g/cm ³)	1,62
Qeq - <i>tea bag</i> (g/g)	195
Qeq - cilindro graduado (g/g)	298 < Qeq < 348

Fonte: Autoria própria.

3.3 Metodologia do estudo

Dado o interesse na utilização do polímero superabsorvente para a construção de barragens, a metodologia do estudo foi baseada na determinação da permeabilidade do solo e da mistura solo/polímero. Para atingir o objetivo, foi necessária inicialmente a determinação do estado de adição do polímero no solo, dada a ausência de bibliografias a respeito.

3.3.1 Determinação do estado de adição do polímero no solo

Devido as propriedades absorventes do polímero, foi necessário um estudo prévio da melhor forma de adicionar o polímero no solo.

Como citado no item 2.5 o polímero superabsorvente apresenta dois estados distintos, sendo estes: seco e saturado. Além dos dois estados citados, o polímero pode se encontrar em um estado parcialmente saturado, correspondente a um

polímero submetido a uma quantidade de água inferior à sua máxima capacidade de absorção.

A utilização do polímero totalmente saturado foi descartada, dado o interesse nas propriedades expansivas do material para o preenchimento dos vazios do solo após a compactação. Desta forma, se utilizado de forma totalmente saturada o material já teria atingido sua máxima capacidade de expansão, prejudicando o funcionamento para os fins desejados, uma vez que ele não preencheria os vazios do solo.

Desta forma, foram analisadas as adições do polímero no solo úmido no estado seco e parcialmente saturado, e a adição do polímero no estado seco ao solo seco ao ar com posterior adição de água.

3.3.1.1 Adição do polímero parcialmente saturado ao solo úmido

Esta forma de adição consiste na homogeneização prévia do solo com água até a umidade desejada e, a este solo úmido, foi adicionado o polímero parcialmente saturado. A saturação parcial do polímero é realizada adicionando certa quantidade de água, sendo esta quantidade inferior a máxima capacidade de absorção do material. No estudo, foram testadas saturações parciais com relações de massa de água por massa de polímero de 20, 30 e 40 g/g.

Durante o processo de mistura do polímero parcialmente saturado ao solo úmido, verificou-se que a umidade do solo, visualmente, reduzia menos que ao adicionar o polímero seco e a expansão após a compactação foi menor quando comparada a adição do polímero no estado seco. Tal fenômeno pode ser atribuído ao fato de que o polímero já possuía parte da sua capacidade de absorção utilizada e que a água presente no solo não se trata de água livre, fazendo com que o polímero não absorvesse grandes quantidades de água do solo.

Ainda que tenha apresentado determinadas vantagens em relação à adição do polímero no estado seco, a homogeneização do polímero no solo se mostrou uma tarefa complicada, que exigiria o desenvolvimento de equipamentos específicos para a utilização em campo. Esta dificuldade se deve a forte atração entre as partículas de polímero após absorverem água, fazendo com que estivessem concentradas em determinadas regiões da mistura, prejudicando assim a homogeneização.

3.3.1.2 Adição do polímero seco ao solo seco ao ar

Como alternativa, foi estudada a possibilidade de adicionar o polímero seco na amostra seca ao ar e posteriormente adicionar a água.

Devido ao fato de a água adicionada posteriormente estar livre, o polímero absorve a mesma mais rapidamente, fazendo com que haja uma heterogeneidade da mistura (mesmo que seja homogeneizada rapidamente). Portanto, era possível identificar visualmente partículas de polímero com maior concentração de água de que outras.

3.3.1.3 Adição do polímero seco ao solo úmido

A adição do polímero no estado seco ao solo úmido foi realizada homogeneizando o solo até a umidade desejada e, posteriormente, adicionando o polímero no estado seco, cuidando para que estivesse bem distribuído ao longo do material.

A adição do polímero no estado seco à amostra previamente úmida ocasiona em uma série de impactos na mistura, como mudança do aspecto visual e expansão após compactação, conforme apresentado no item 3.3.1. Ainda assim, do ponto de vista prático, se mostrou o método mais viável para execução em campo, uma vez que não seria necessário o desenvolvimento de novos equipamentos. O único cuidado exigido seria a adição do polímero de forma não concentrada, buscando abranger maiores áreas.

Ao analisar o efeito da compactação nos diferentes estados de adição do polímero, não foi possível verificar, em laboratório, diferença significativa no processo de compactação que justificasse adotar um determinado estado de adição para o estudo.

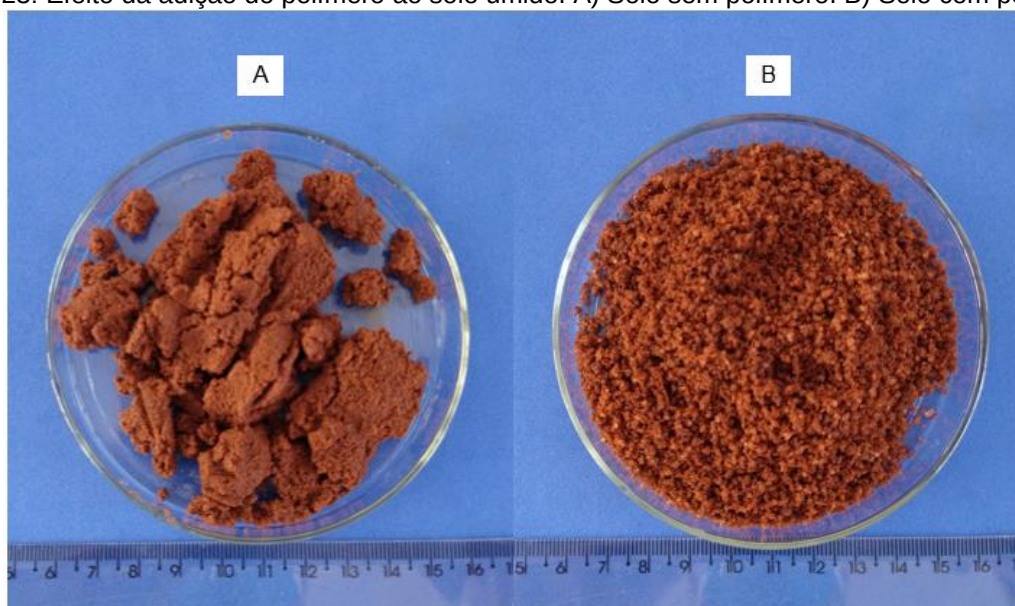
Portanto, para a determinação das curvas de compactação e realização de ensaios de permeabilidade, no presente estudo será utilizada a adição do polímero seco ao solo previamente homogeneizado na umidade desejada

3.3.2 Características visuais da mistura

Devido as propriedades de absorção do polímero, ao adicioná-lo ao solo úmido verifica-se a absorção da água por parte do polímero, fazendo com que as partículas do solo apresentem aspecto mais seco com a aparência de um formigueiro. O efeito da adição do polímero a uma amostra de solo úmido, homogeneizado com teor de umidade de 15%, está apresentado na Figura 23.

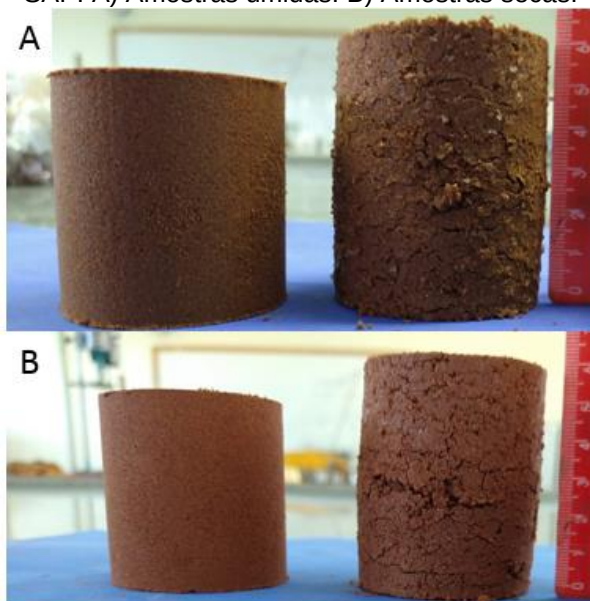
Ao compactar amostras no Mini-Proctor, é possível verificar visualmente que a amostra compactada com polímero tende a apresentar maiores vazios, além de ter sua estrutura desfeita com maior facilidade. O aspecto da amostra compactada nos estados úmido e seco em estufa está apresentado na Figura 24.

Figura 23: Efeito da adição do polímero ao solo úmido. A) Solo sem polímero. B) Solo com polímero.



Fonte: Autoria própria.

Figura 24: Apecto visual de amostras compactadas, à esquerda solo puro e à direita mistura solo + SAP. A) Amostras úmidas. B) Amostras secas.

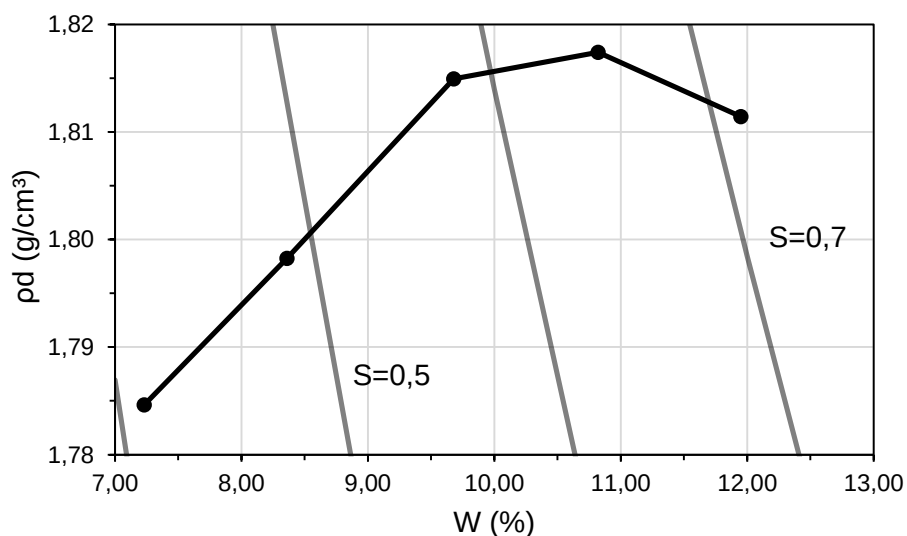


Fonte: Autoria própria.

3.3.3 Curvas de compactação

A curva de compactação do solo, massa específica aparente seca (ρ_d) vs teor de umidade (W), foi determinada para a energia normal de compactação, realizada de acordo com o proposto por Nogami e Villibor para o ensaio do Mini-Proctor, e está apresentada na Figura 25, acompanhada das curvas de saturação (S).

Figura 25: Curva de compactação do solo.



Fonte: Autoria própria.

Se tratando da mistura solo + polímero, devido ao fato de que a água presente no solo úmido não se trata de água livre, o polímero precisa de maiores períodos de tempos para realizar a absorção. Com isto, percebeu-se a necessidade de verificar o comportamento do solo quando compactado com diferentes períodos de espera após homogeneização.

Portanto, foram determinadas curvas de compactação para diferentes teores de umidade, combinados com diferentes teores de polímero e tempo após homogeneização. As curvas de compactação para as diferentes condições de mistura serão apresentadas no item 4.1 do presente trabalho. Desta forma, determinou-se um teor de umidade ótimo para cada combinação, o qual foi utilizado para as moldagens dos permeâmetros.

O procedimento de mistura do material e compactação do material obedeceu a seguinte metodologia:

- a) O solo, seco ao ar até a umidade higroscópica, foi homogeneizado com o teor de umidade desejado utilizando-se espátulas e colheres;
- b) Adicionou-se o polímero no estado seco ao solo previamente umedecido e homogeneizado;
- c) O polímero e o solo úmido foram misturados durante 5 minutos, da mesma forma que o solo foi misturado a água no item a;
- d) Após a mistura do solo com o polímero, aguardou-se os devidos períodos após mistura para realização da compactação;
- e) Assim como para o solo puro, as amostras de solo + polímero foram compactadas com energia normal, de acordo com a metodologia do mini-Proctor.

Para a análise da variação da massa específica seca em função do tempo de espera, foi adicionado polímero ao solo úmido e compactadas amostras com o Mini-Proctor com tempo de espera após mistura de 30 minutos, 1 hora, 2 horas e 4 horas. Ainda, foram medidos os teores de umidade da mistura para os mesmos períodos de tempo, a fim de verificar possível variação da mesma.

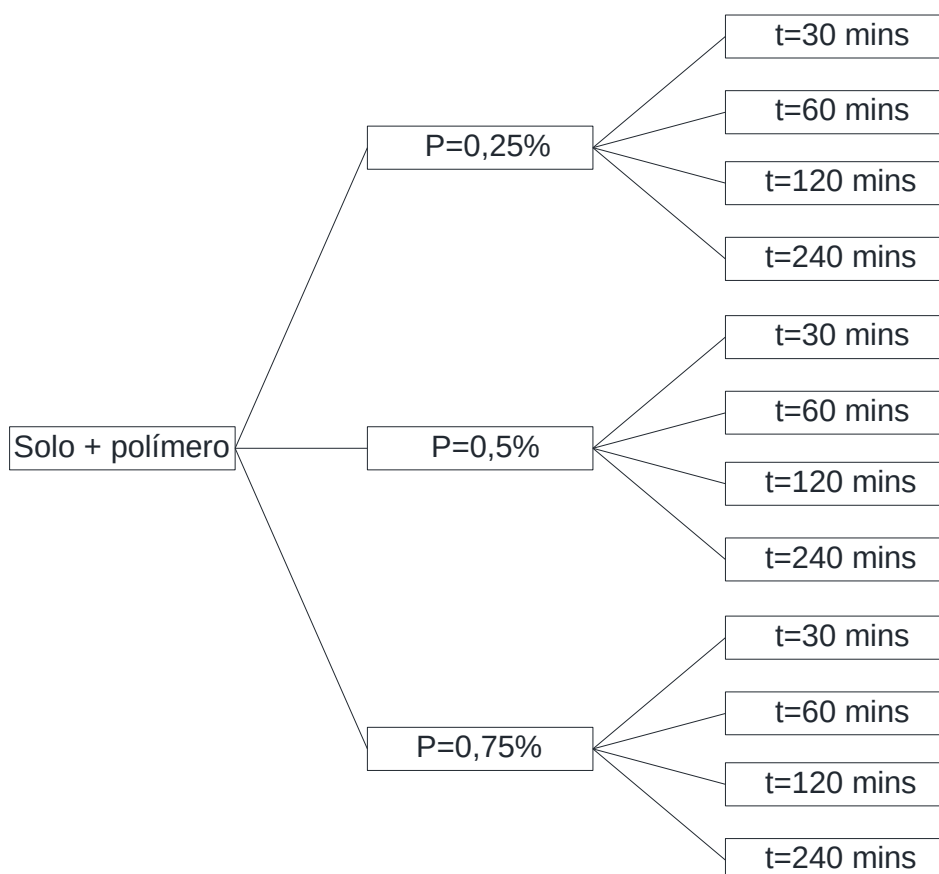
3.3.4 Ensaios de permeabilidade

Os ensaios de permeabilidade foram realizados com permeâmetros de carga variável, devido à baixa permeabilidade do solo e da mistura quando compactados.

As amostras foram mantidas durante todo o período do ensaio em sala climatizada com temperatura constante de 20°C.

Para o solo puro foram realizados ensaios de permeabilidade em amostras compactadas no teor de umidade ótimo. Para a mistura solo + polímero, foi escolhido um teor de umidade com base nas curvas de compactação e aspecto visual da mistura, conforme será detalhado no item 4.1. Ainda, foram analisadas as influências do teor de polímero (P) e do tempo (t) de espera entre a mistura (e suas combinações), do solo com o polímero, e a compactação. Para cada combinação de variável analisada, foram moldadas 3 amostras a fim de obter resultados de melhor confiabilidade. As condições de análise estão apresentadas na Figura 26.

Figura 26: Variáveis analisadas e suas combinações.



Dado o interesse em analisar amostras compactadas, a célula de ensaio utilizada foi a célula de parede rígida do tipo molde de compactação.

A célula de ensaio utilizada trata-se de uma adaptação do modelo proposto por Daniel (1994), consistindo, além da amostra compactada, em:

- Duas chapas de PEAD rígidas o suficiente para não apresentarem elevada deformação durante a moldagem;
- Um tubo de PVC de parede rígida;
- Quatro barras rosqueadas;
- Material granular;
- Duas telas metálicas;
- Dois EVAs para vedação;
- Dois tubos de alumínio.

Os permeâmetros são moldados na seguinte ordem:

1. O material é compactado no interior do tubo de PVC;
2. O material granular é colocado na forma solta nas extremidades da amostra compactada formando uma camada de espessura de 2,5 cm, com função de filtro;
3. A tela metálica é posicionada sobre a camada de material granular para impedir a passagem de grãos para os tubos de entrada e saída de água;
4. São posicionados EVAs nas extremidades dos tubos, sobre as telas metálicas, para garantir a vedação do sistema;
5. As duas chapas de PEAD, contendo os tubos de alumínio nos seus centros, são posicionadas de forma a realizar o fechamento do molde. A fixação das placas é feita através barras rosqueadas e porcas que são ajustadas de forma a garantir suficiente vedação.

Está apresentado na Figura 27 um esquema do permeâmetro. Para os ensaios de permeabilidade foram utilizados permeâmetros com dimensões do molde do Mini-Proctor, compactados sobre a curva de compactação, os quais podem ser visualizados na Figura 28 durante a realização do ensaio de permeabilidade.

Foi admitida saturação da amostra quando verificada constância nos valores do coeficiente de permeabilidade entre diferentes leituras.

O coeficiente de permeabilidade foi determinado através da Equação 2.

$$k = 2,3 \cdot \frac{a \cdot L}{A \cdot \Delta t} \log \frac{h_i}{h_f} \quad (2)$$

Onde:

k - Coeficiente de permeabilidade (cm/s);

a - Área da seção da mangueira (cm²);

L - Comprimento da amostra (cm);

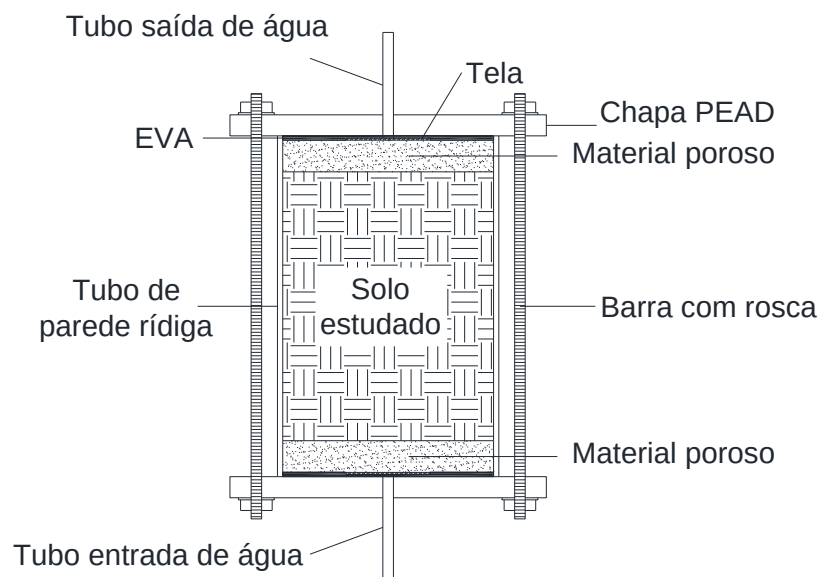
A - Área da seção transversal da amostra (cm²);

t - Diferença de tempo entre as leituras (s);

h_i - Carga hidráulica inicial (cm);

h_f - Carga hidráulica final (cm).

Figura 27: Esquema do permeâmetro.



Fonte: Autoria própria.

Figura 28: Permeômetros em sala climatizada durante o ensaio de permeabilidade.



Fonte: Autoria própria.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados do estudo dividem-se em curvas de compactação e coeficientes de permeabilidade para cada condição de mistura analisada. Inicialmente serão apresentados os resultados encontrados para as curvas de compactação, bem como os valores adotados para analisar o coeficiente de permeabilidade e, posteriormente, os valores encontrados para a permeabilidade das misturas.

A nomenclatura das amostras obedecerá a seguinte regra:

- Para o solo puro as amostras serão descritas com um S acompanhado de REF, representando que se tratam das amostras referência, separados por barra.
- Para a mistura solo + polímero, as amostras serão chamadas de SP acompanhadas do teor de polímero e do tempo de espera em minutos, todos separados por barra (e.g.: para 0,5% de polímero e 30 minutos de espera após mistura será SP/0,5/30).

4.1 Curvas de compactação

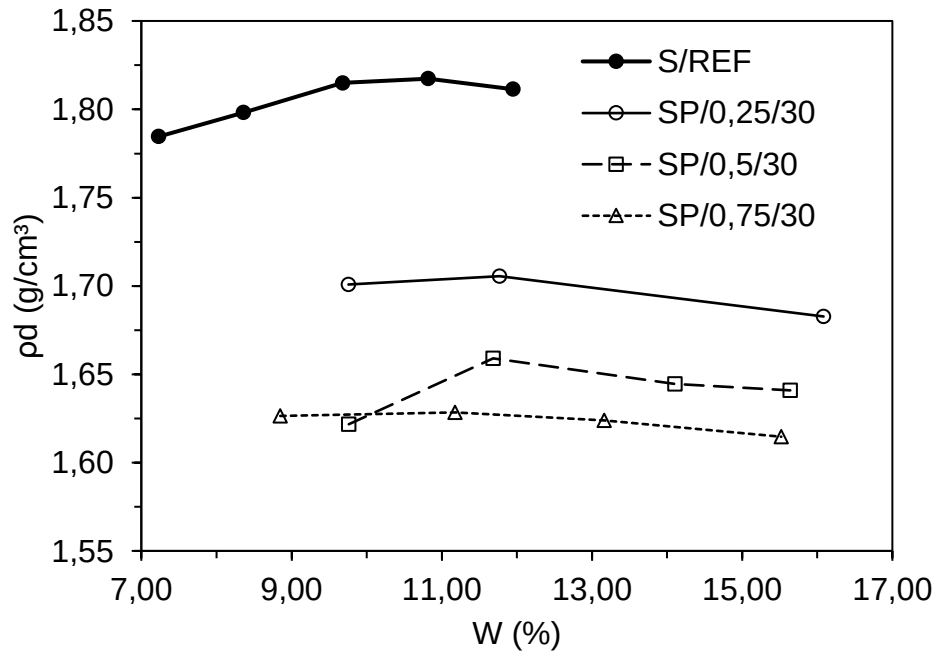
A fim de verificar o teor de umidade ótimo para compactação das amostras para o ensaio de permeabilidade, foram compactadas amostras sob diferentes teores de umidade, teor de polímero e tempos após mistura. Os resultados encontrados para as curvas de compactação serão apresentados separados por teor de polímero e tempo de espera para compactação.

Fixando inicialmente a variável do tempo após mistura, e variando o teor de polímero, foram obtidas as curvas de compactação apresentadas a seguir, sendo a Figura 29 referente ao tempo de 30 minutos, Figura 30 referente ao tempo de 60 minutos, Figura 31 referente ao tempo de 120 minutos e Figura 32 referente ao tempo de 240 minutos.

É possível verificar a tendência de relação inversamente proporcional entre a massa específica aparente seca e o teor de polímero para a maioria dos valores analisados. Esta relação se deve ao fato de que o polímero, ao ser misturado ao solo úmido, absorve parte da umidade do solo e expande seu volume, ocupando espaço que seria ocupado por partículas de solo, uma vez que o tamanho das partículas do polímero saturado é superior ao tamanho dos vazios do solo compactado. Como a

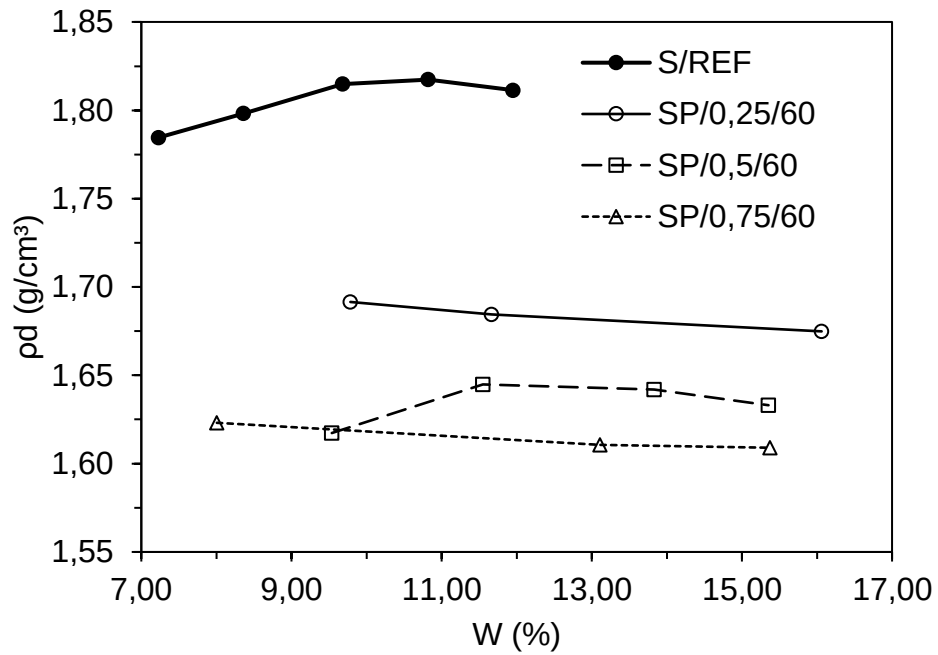
massa específica da água é inferior à do solo, a massa específica seca da mistura tende a ser menor à medida que o teor de polímero é aumentado.

Figura 29: Curvas de compactação para o tempo 30 minutos.



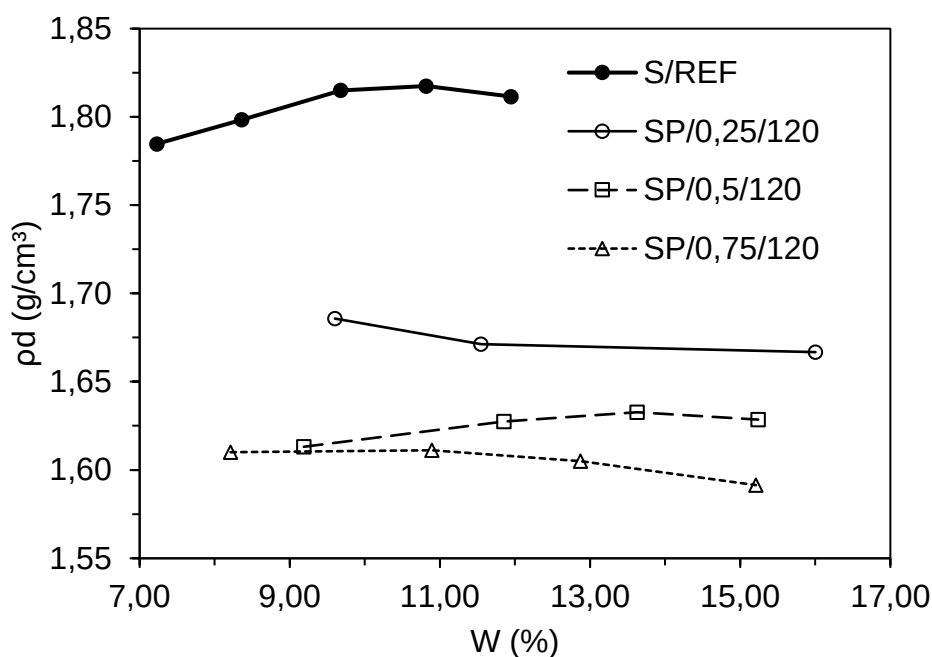
Fonte: Autoria própria.

Figura 30: Curvas de compactação para o tempo 60 minutos.



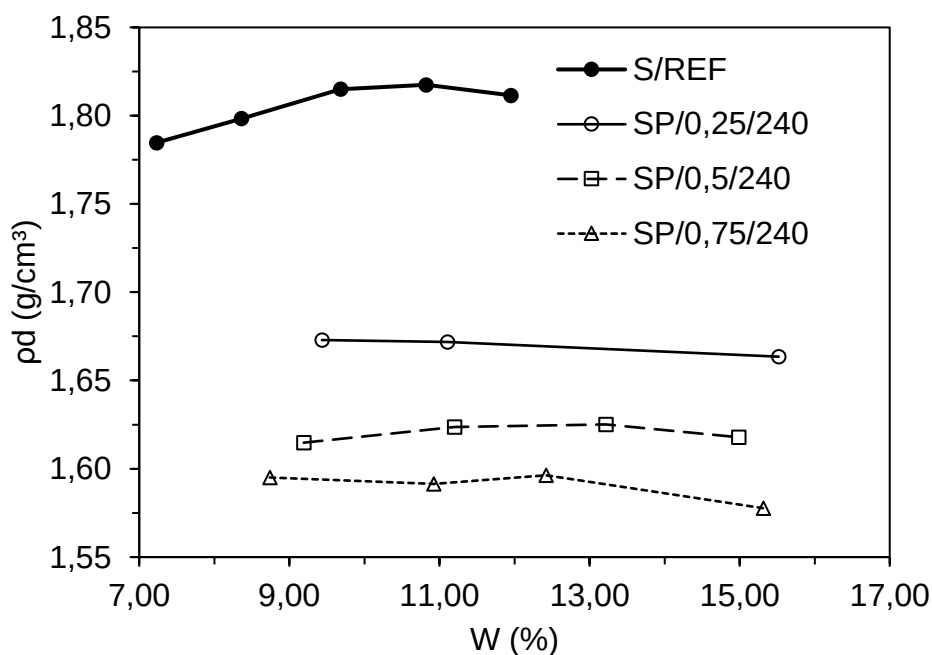
Fonte: Autoria própria.

Figura 31: Curvas de compactação para o tempo 120 minutos.



Fonte: Autoria própria.

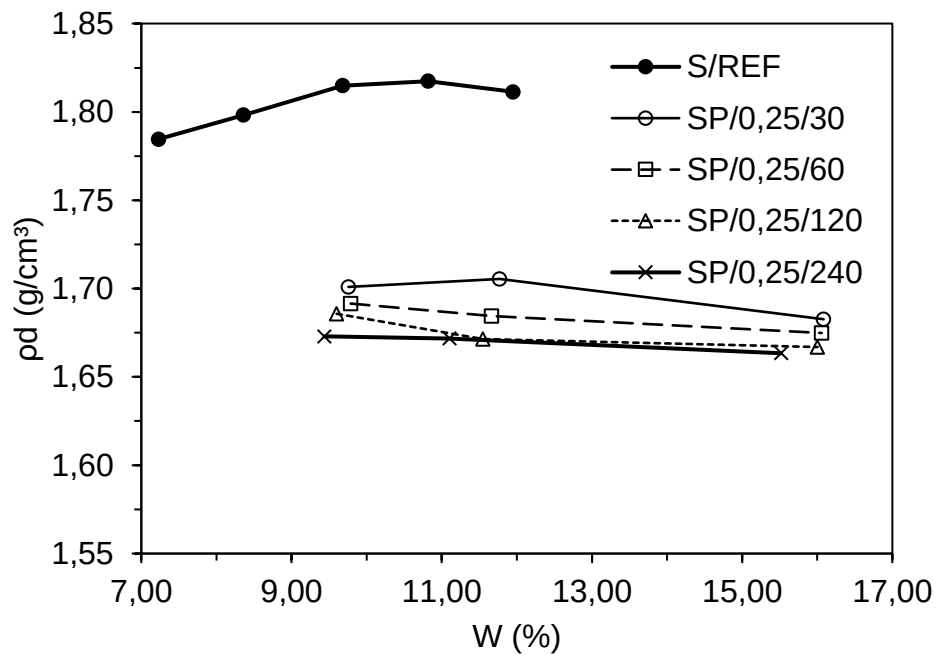
Figura 32: Curvas de compactação para o tempo 240 minutos.



Fonte: Autoria própria.

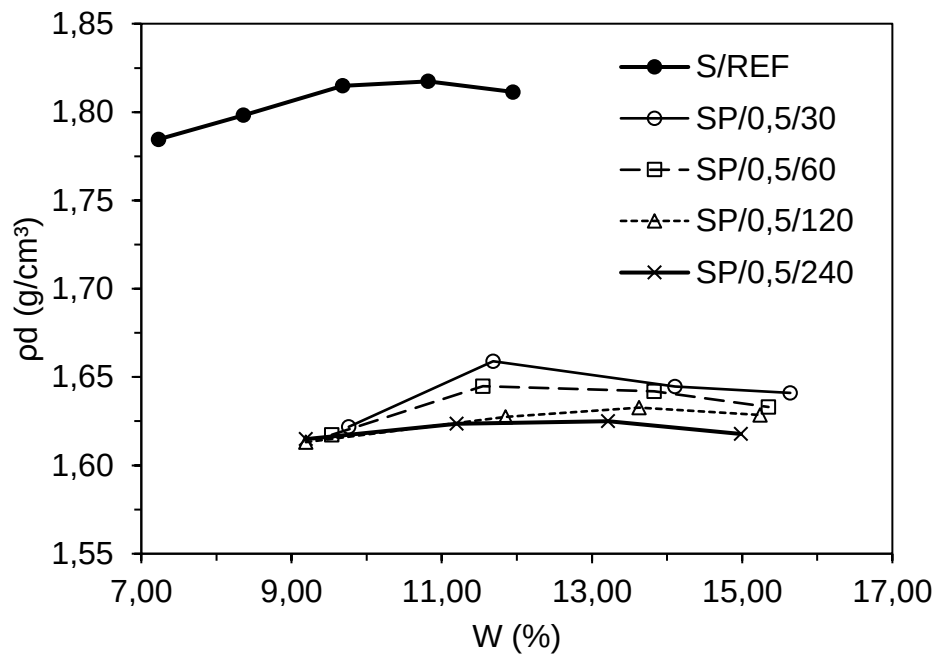
Fixando agora o teor de polímero, estão apresentadas a seguir as curvas de compactação quando variando o tempo de espera após homogeneização. Na Figura 33 estão apresentadas as curvas de compactação referentes ao teor de polímero de 0,25%, na Figura 34 referentes ao teor de 0,5% e na Figura 35 referentes ao teor 0,75%.

Figura 33: Curvas de compactação para o teor de polímero de 0,25%.



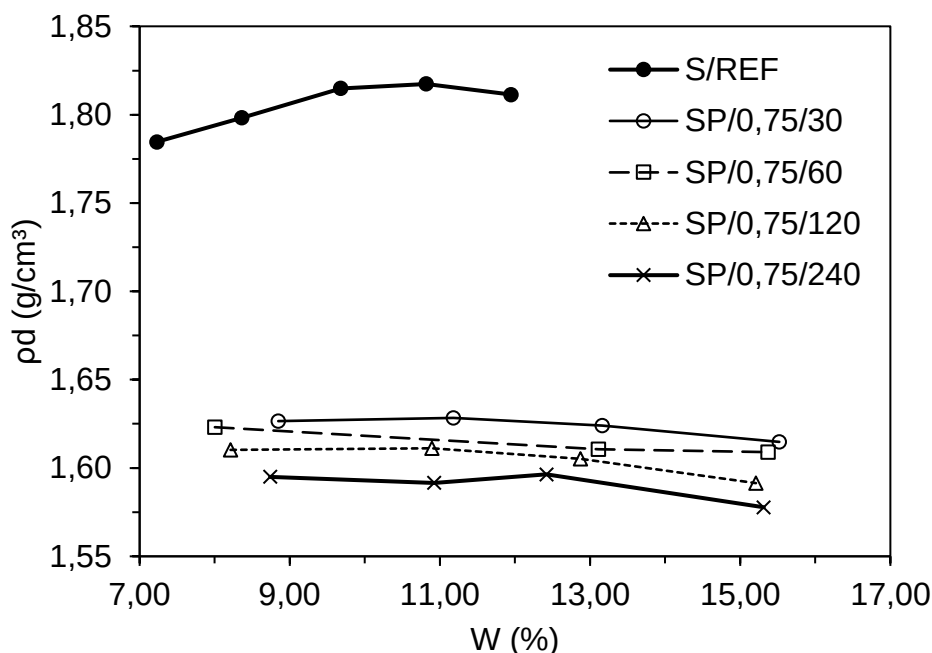
Fonte: Autoria própria.

Figura 34: Curvas de compactação para o teor de polímero de 0,5%.



Fonte: Autoria própria.

Figura 35: Curvas de compactação para o teor de polímero de 0,75%.



Fonte: Autoria própria.

Nota-se que à medida que o tempo de espera após a homogeneização é aumentado, a massa específica aparente seca da mistura reduz. Isto pode ser atribuído ao fato de que a água presente no solo não se trata de água livre, fazendo com que sejam necessários maiores períodos de tempo para que o polímero absorva a água. Desta forma, à medida que o tempo de espera após homogeneização avançou, o polímero retirou umidade do solo e a concentrou em suas partículas, fazendo estas aumentarem de volume, ocupando maior espaço na amostra e resultando em um maior índice de vazios.

A redução da massa específica seca máxima, para o teor de polímero de 0,25%, foi de 6 a 8%, sendo 6% para o tempo de espera após homogeneização de 30 minutos e 8% para 240 minutos.

Para o teor de polímero de 0,5% a redução foi de 8 a 10%, sendo 8% para o tempo de 30 minutos e 10% para o tempo de 240 minutos. Já para o teor de polímero de 0,75%, a redução ficou entre 10 e 12%, respeitando a mesma tendência a respeito do tempo.

Ainda que tenham sido verificados diferentes teores de umidade ótimo para cada cenário de mistura analisado, optou-se por utilizar o teor de umidade de 12% para a moldagem dos permeâmetro com polímero. Tal escolha foi embasada nas seguintes considerações:

- Para teores de umidade superiores a 12%, verificou-se uma tendência geral de redução ou, em teores de umidade próximos a este, estabilização da massa específica da mistura para todos os teores de polímero;
- Para teores de umidade inferiores a 12%, ainda que sejam verificadas massa específicas superiores em determinadas situações, o aspecto visual das partículas de solo já se apresentaria demasiadamente seco, fazendo com que a aderência da amostra ao molde do permeâmetro fosse prejudicada.

4.2 Permeabilidade

Para a determinação do coeficiente de permeabilidade das amostras com solo + polímero, foi adotada a altura da amostra logo após a compactação.

Ainda, foram desconsiderados os efeitos de evaporação durante o ensaio, uma vez que ao serem medidos, se mostraram pouco significantes.

Na Tabela 8 é apresentado um resumo dos valores de coeficiente de permeabilidade encontrados para cada amostra, acompanhada da razão entre o coeficiente de permeabilidade referência (k_{ref}) e o coeficiente de permeabilidade para cada amostra (k), sendo a amostra S/REF considerada como referência. A fim de complementar a visualização dos dados, na Figura 36 está apresentado um gráfico de barras comparativo do resumo dos valores encontrados, onde a barra de erros se refere aos maiores e menores valores para cada condição, entre as amostras S/REF, SP/0,25, SP/0,5 e SP/0,75.

A determinação dos valores de coeficiente de permeabilidade das amostras com 0,25% de polímero foi prejudicada pela verificação de possível fluxo pela interface molde-amostra.

A hipótese de fluxo pela parede do molde foi levantada a partir de análise das amostras desmoldadas após o ensaio de permeabilidade. As amostras SP/0,25 não apresentaram resistência significativa ao processo de desmoldagem quando comparadas as demais amostras. Ainda, após a desmoldagem, as amostras SP/0,25 não apresentavam expansão visível, enquanto as amostras SP/0,5 e SP/0,75 apresentavam grande expansão, chegando a perder parte de sua estrutura. As amostras desmoldadas após o ensaio de permeabilidade estão apresentadas no item 4.2.3.

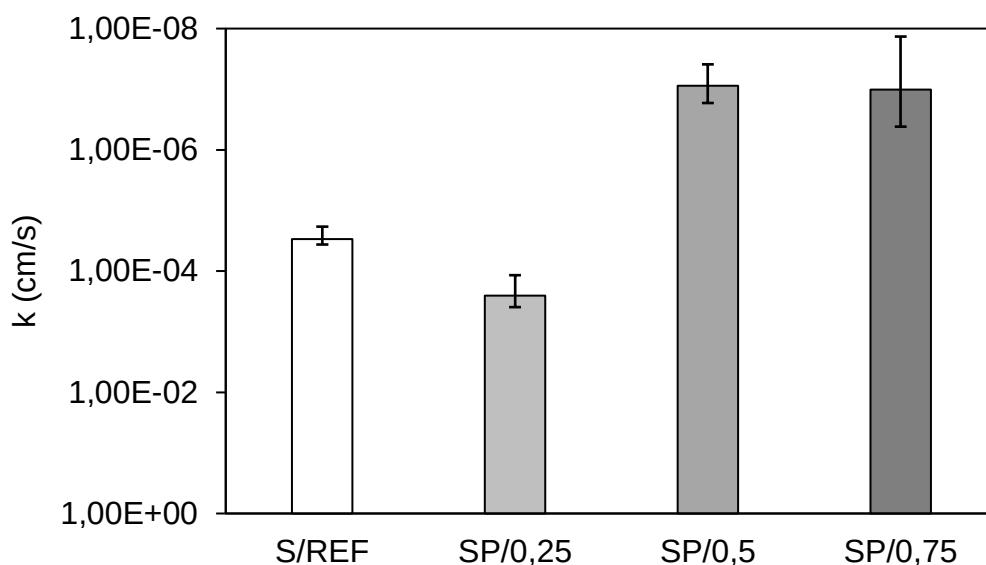
Tabela 8: Tabela resumo dos valores de k nas diferentes condições de mistura.

Amostra	k (cm/s)			k _{med} (cm/s)	k _{ref} /k
S/REF	3,35E-05	3,65E-05	1,85E-05	2,95E-05	REF
SP/0,25/30	2,59E-04	2,97E-04	3,86E-04	3,14E-04	0,1
SP/0,25/60	1,16E-04	3,77E-04	1,21E-04	2,04E-04	0,1
SP/0,25/120	3,74E-04	1,55E-04	3,91E-04	3,07E-04	0,1
SP/0,25/240	1,99E-04	1,80E-04	2,02E-04	1,94E-04	0,2
SP/0,5/30	3,89E-08	1,18E-07	8,10E-08	7,91E-08	373
SP/0,5/60	4,26E-08	9,88E-08	1,24E-07	8,84E-08	334
SP/0,5/120	4,46E-08	5,94E-08	--	5,20E-08	567
SP/0,5/240	6,83E-08	1,17E-07	1,69E-07	1,18E-07	250
SP/0,75/30	4,11E-07	1,85E-08	3,17E-08	1,54E-07	192
SP/0,75/60	1,11E-07	2,52E-08	1,80E-08	5,14E-08	574
SP/0,75/120	9,36E-08	2,17E-08	3,08E-08	4,87E-08	606
SP/0,75/240	3,98E-07	1,34E-08	3,33E-08	1,48E-07	199

Fonte: Autoria própria.

Nota: Uma amostra SP/0,5/120 foi perdida durante o processo de moldagem.

Figura 36: Gráfico resumo comparativo.



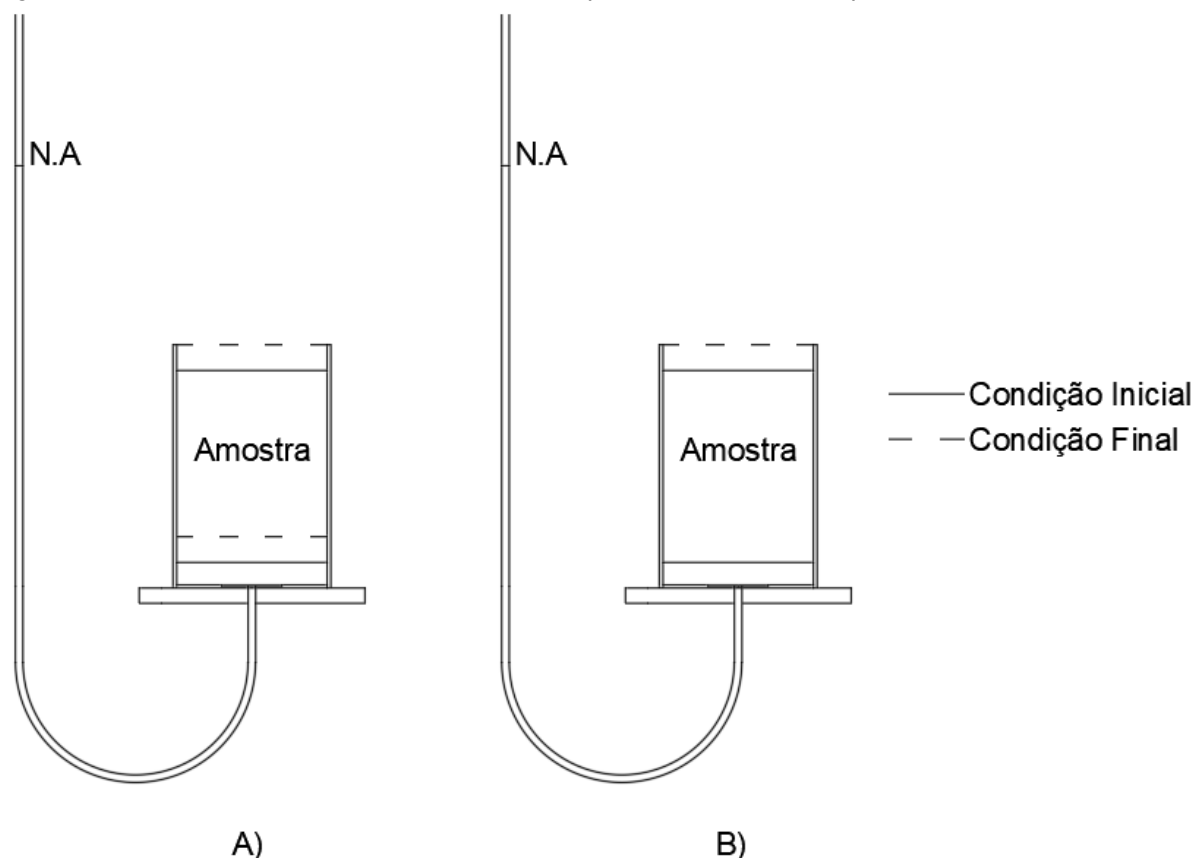
Fonte: Autoria própria.

Nota: Para a média dos valores de k foram utilizadas 3 amostras para a condição S/REF, 11 para a condição SP/0,5 e 12 amostras para as demais.

De forma a analisar a aderência da amostra com a parede do molde foi realizado teste, no qual foi retirada a chapa de PEAD responsável pelo fechamento superior da amostra e aplicou-se uma carga hidráulica para verificar o fluxo. Nas amostras SP/0,25 foi observado o deslizamento da amostra ao longo do molde, conforme apresentado na Figura 37.A). Nas amostras SP/0,5 e SP/0,75 tal problema

não foi verificado. Nestes casos, a amostra expandia verticalmente ao invés de deslizar, conforme ilustrado na Figura 37.B).

Figura 37: Teste de deslizamento das amostras. A) Amostras SP/0,25. B) Amostras SP/0,5 e SP/0,75.



Fonte: Autoria própria.

A seguir serão analisadas as influências do teor de polímero e do tempo de espera após mistura nos valores de coeficiente de permeabilidade.

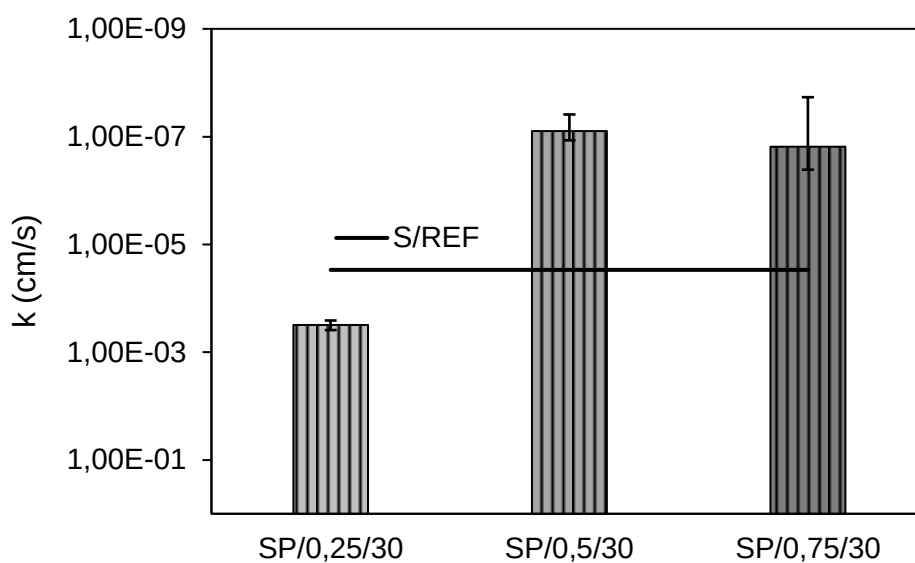
4.2.1 Influência do teor de polímero na permeabilidade

Analisando a Tabela 8 é possível perceber grande redução do valor do coeficiente de permeabilidade quando adicionado SAP ao solo, estando esta redução entre 192 e 606 vezes em relação a amostra S/REF. A seguir estão apresentados gráficos comparativos, em forma de colunas, dos valores de coeficiente de permeabilidade em relação ao teor de polímero para cada tempo de espera após homogeneização, sendo que na Figura 38 estão apresentados dados referentes ao

tempo 30 minutos, na Figura 39 a 60 minutos, na Figura 40 a 120 minutos e na Figura 41 referente a 240 minutos.

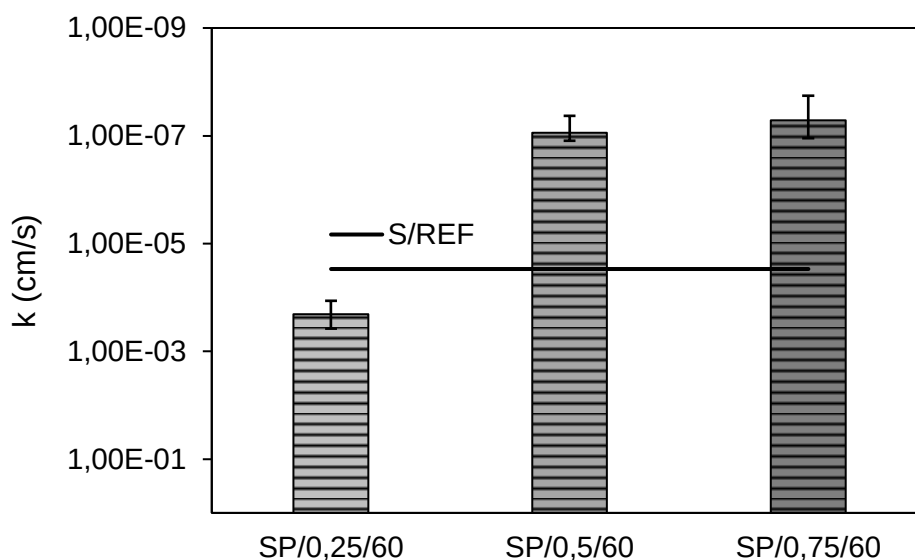
Nos gráficos, a escala de cor difere o teor de polímero da mistura, enquanto a hachura difere o tempo de espera após homogeneização. Ainda, em forma de linha, está apresentado o valor médio do coeficiente de permeabilidade da referência (S/REF).

Figura 38: Gráfico comparativo de k vs P para $t = 30$ min.



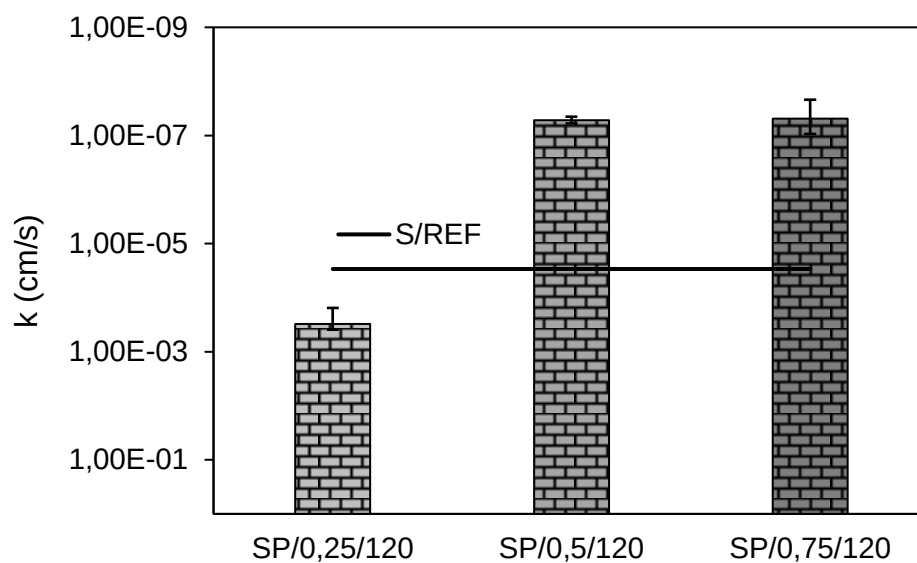
Fonte: Autoria própria.

Figura 39: Gráfico comparativo de k vs P para $t = 60$ min.



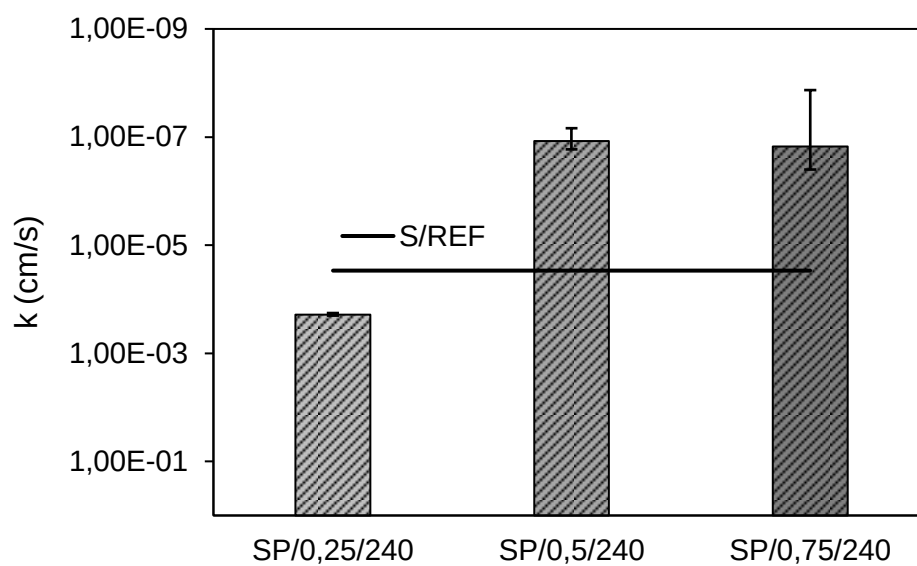
Fonte: Autoria própria.

Figura 40: Gráfico comparativo de k vs P para $t = 120$ min.



Fonte: Autoria própria.

Figura 41: Gráfico comparativo de k vs P para $t = 240$ min.



Fonte: Autoria própria.

Para todas as condições analisadas é possível verificar a tendência de grande redução da permeabilidade para as amostras SP/0,5 e SP/0,75 em relação à referência. Por outro lado, é possível verificar também pequena variação dos valores do coeficiente de permeabilidade quando comparando individualmente as amostras SP/0,5 e SP/0,75.

Foram realizadas análises de variância (ANOVA) de dois fatores para verificar se houve significância do fator teor de polímero nos resultados de coeficiente de permeabilidade e, para significância de 5%, resultou em influência significativa do fator teor de polímero. Ressalta-se que, para todas análises de ANOVA realizadas no presente trabalho, foi necessária a utilização dos valores dos coeficientes de permeabilidade em forma de logaritmo de base 10, uma vez que os dados tem diferentes ordens de grandeza, fazendo com que a análise estatística fosse prejudicada.

A redução da permeabilidade proporcionada pela adição do polímero ao solo, nos teores de 0,5 e 0,75%, pode ser atribuída às propriedades expansivas do polímero que, quando em contato com a água, expande ocupando parte dos vazios do solo, reduzindo assim a permeabilidade.

Intuitivamente, esperava-se que à medida que o teor de polímero da mistura fosse aumentado, a permeabilidade fosse reduzida, porém tal comportamento não foi verificado. De forma a verificar estatisticamente esta variação, realizou-se teste de Tukey em conjunto com a análise de ANOVA, e foi verificado que entre os teores de polímero de 0,5 e 0,75 não houve variação significativa. Para todas as demais combinações de teores de polímero, a variação foi significativa de acordo com o teste.

A explicação disto pode estar associada à duas possíveis hipóteses: o confinamento do sistema adotado que limita a expansão do material e a possível adição involuntária de uma nova variável.

A primeira hipótese se baseia na ideia de que a célula de ensaio permite a expansão da amostra apenas verticalmente, e é limitada aos vazios da areia solta utilizada como filtro de finos. Uma vez que este limite é atingido, o polímero para de expandir e, por consequência, não influencia na permeabilidade.

A segunda hipótese é embasada no fato de que um grupo de permeâmetros SP/0,75 (quatro amostras moldadas no mesmo dia, uma para cada tempo após mistura) apresentou coeficiente de permeabilidade maior que as demais réplicas desta mesma condição de moldagem. O que difere o processo de moldagem deste grupo em relação aos demais está no tempo de espera para moldagem após compactação, uma vez que este foi moldado com um tempo fora do padronizado para as demais amostras. Ainda que não haja evidência que este fator influencie na permeabilidade, é possível verificar que, ao retirar o grupo de amostras que difere dos demais, a permeabilidade das amostras SP/0,75 restantes reduz consideravelmente, chegando

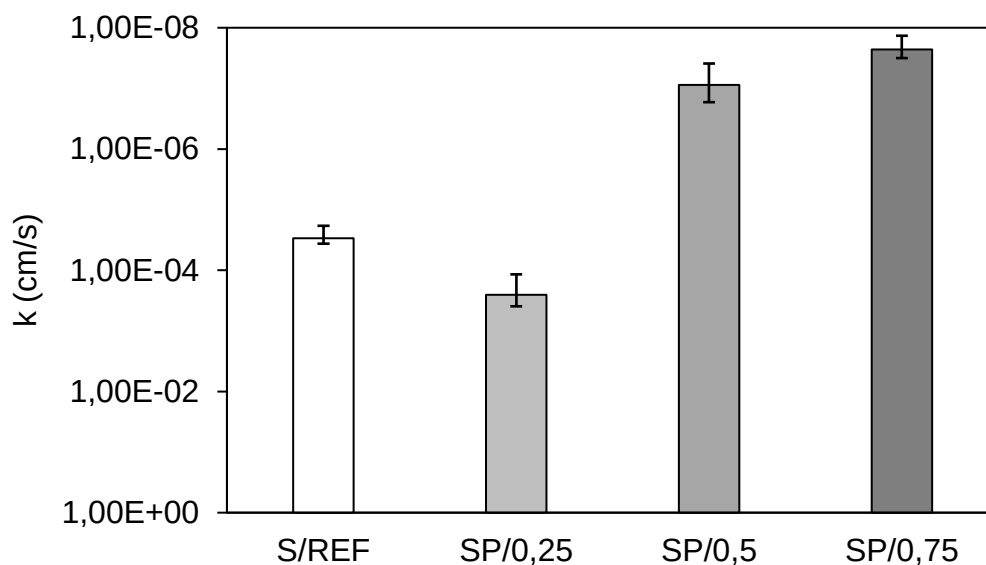
a apresentar redução de 1462 vezes em relação a referência, conforme apresentado na Tabela 9, a seguir. Ainda, a barra de erros dos dados de permeabilidade para as amostras SP/0,75 tem sua amplitude reduzida, conforme verificado na Figura 42. Tais análises salientam para uma melhor avaliação das amostras moldadas nestas condições.

Tabela 9: Tabela resumo sem grupo de amostras com possível diferença dos demais.

Amostra	k (cm/s)			k _{med} (cm/s)	k _{ref} /k
S/REF	3,35E-05	3,65E-05	1,85E-05	2,95E-05	REF
SP/0,25/30	2,59E-04	2,97E-04	3,86E-04	3,14E-04	0,1
SP/0,25/60	1,16E-04	3,77E-04	1,21E-04	2,04E-04	0,1
SP/0,25/120	3,74E-04	1,55E-04	3,91E-04	3,07E-04	0,1
SP/0,25/240	1,99E-04	1,80E-04	2,02E-04	1,94E-04	0,2
SP/0,5/30	3,89E-08	1,18E-07	8,10E-08	7,91E-08	373
SP/0,5/60	4,26E-08	9,88E-08	1,24E-07	8,84E-08	334
SP/0,5/120	4,46E-08	5,94E-08	--	5,20E-08	567
SP/0,5/240	6,83E-08	1,17E-07	1,69E-07	1,18E-07	250
SP/0,75/30	--	1,85E-08	3,17E-08	2,51E-08	1175
SP/0,75/60	--	2,52E-08	1,80E-08	2,16E-08	1366
SP/0,75/120	--	2,17E-08	2,71E-08	2,44E-08	1209
SP/0,75/240	--	1,34E-08	2,69E-08	2,02E-08	1462

Fonte: Autoria própria.

Figura 42: Gráfico resumo sem grupo de amostras com possível erro.



Fonte: Autoria própria.

Foi realizada ANOVA e teste de Tukey, utilizando o logaritmo dos valores do coeficiente de permeabilidade, substituindo os valores do coeficiente de permeabilidade do grupo de amostras com potencial diferença pela média dos dois grupos restantes, e foi verificado que houve diferença significativa quando comparando os teores de polímero de 0,5 e 0,75%.

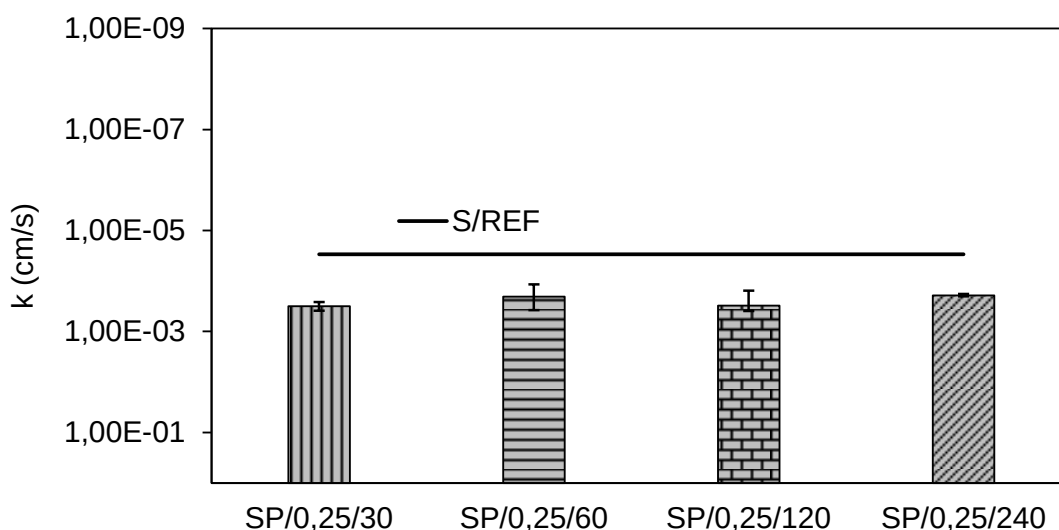
Portanto, desconsiderando este grupo de amostras, não foi encontrado um valor para o teor de polímero (aqui chamado de ótimo) de forma que, após este valor, não se verifica redução considerável da permeabilidade.

Salienta-se que, para aplicação em campo, um confinamento será necessário para que o material não expanda livremente assim danificando a estrutura do solo compactado.

4.2.2 Influência do tempo de espera após homogeneização na permeabilidade

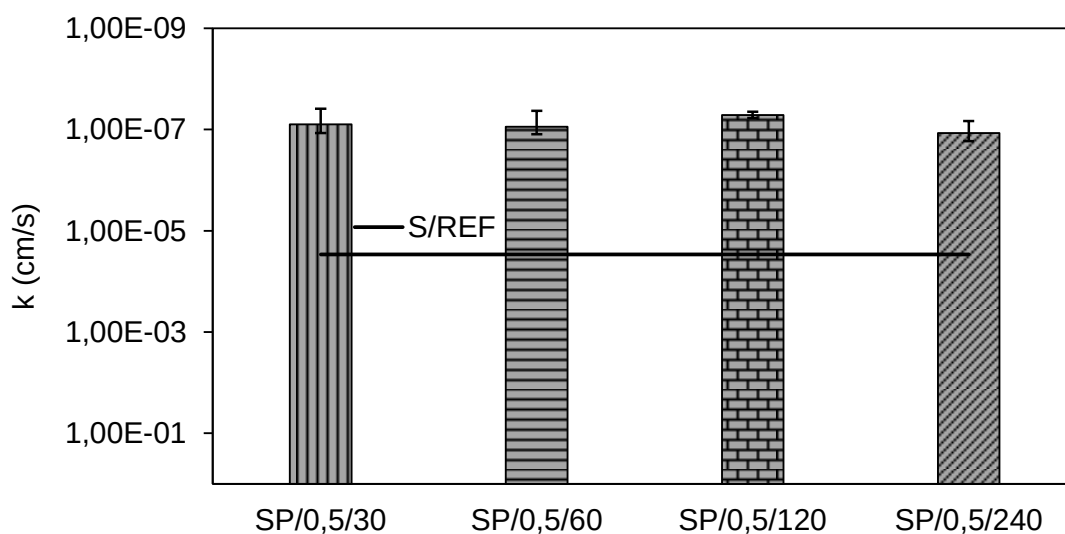
Analisando a Tabela 9 é possível notar que houve certa variação nos valores do coeficiente de permeabilidade para os diferentes tempos de espera após mistura. Para auxiliar a análise, estão apresentados a seguir gráficos comparativos, em forma de colunas, com valores de coeficiente de permeabilidade quando fixados os teores de polímero e variados o tempo de espera após homogeneização. Na Figura 43 está apresentado o comparativo referente ao teor de polímero de 0,25%, na Figura 44 ao teor de 0,5% e na Figura 45 referente ao teor de 0,75%.

Figura 43: Gráfico comparativo de k vs t para $P = 0,25\%$.



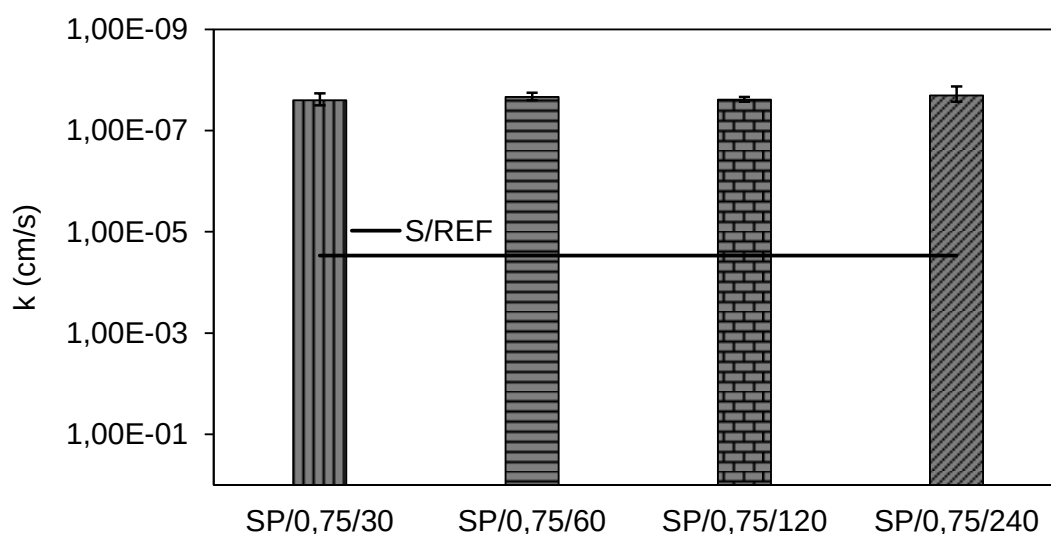
Fonte: Autoria própria.

Figura 44: Gráfico comparativo de k vs t para $P = 0,5\%$.



Fonte: Autoria própria.

Figura 45: Gráfico comparativo de k vs t para $P = 0,75\%$.



Fonte: Autoria própria.

Nos gráficos, a escala de cor difere o teor de polímero da mistura, enquanto a hachura difere o tempo de espera após homogeneização. Ainda, em forma de linha, está apresentado o valor médio do coeficiente de permeabilidade da referência (S/REF).

A fim de verificar se a influência do tempo foi significativa ou não no valor do coeficiente de permeabilidade, foram realizadas análises de variância de dois fatores, com significância de 5% e teste de Tukey.

Para as condições analisadas, não foi verificada influência significativa do tempo de espera após homogeneização nos valores de coeficiente de permeabilidade e, pelo teste de Tukey, não se verificou significância dos tempos em nenhuma das possíveis combinações. Ainda, a interação dos fatores tempo após homogeneização e teor de polímero não apresentou significância.

A ausência de significância pode ser atribuída ao fato de que, ainda que o SAP absorvesse toda a umidade do solo, este volume de água não seria suficiente para saturá-lo completamente. Portanto, ao ser submetido à um fluxo de água, o material continua absorver até que atinja o limite permitido pelo confinamento do sistema.

Portanto, nas condições de mistura analisadas, o tempo de espera após mistura não foi um problema e, para aplicações em campo, não acarretaria em dificuldades de padronização da execução.

4.2.3 Aspecto visual das amostras após ensaio de permeabilidade

Após os ensaios de permeabilidade, foi analisado o aspecto visual de algumas amostras após desmoldadas. Primeiramente, será apresentada a amostra S/REF, na Figura 46. Na sequência, a amostra SP/0,25 está apresentada na Figura 47, a amostra SP/0,5 na Figura 48 e a amostra SP/0,75 na Figura 49.

Inicialmente foi verificado o aspecto visual se tratando da umidade da amostra. Macroscopicamente, as amostras apresentaram umidade homogênea. Dado o fato de existir água no polímero e nos vazios de solo, não é possível verificar o grau de saturação das amostras de solo + polímero.

É possível verificar também a tendência da presença de maiores e em mais quantidades vazios nas amostras de solo + polímero. Além disso, a amostra é bastante delicada, tendo sua estrutura facilmente desfeita ao toque. Após o passar do tempo, as amostras SP/0,5 e SP/0,75 tenderam a expandir, conforme era esperado. Porém, as amostras SP/0,25 não expandiram, fenômeno que ainda não foi justificado.

Destaca-se ainda que, as amostras SP/0,5 e SP/0,75 apresentaram maior resistência a desmoldagem em relação as demais. Por outro lado, a amostra SP/0,25 se encontrava praticamente livre no molde.

Figura 46: Aspecto visual pós ensaio amostra S/REF



Fonte: Autoria própria.

Figura 47: Aspecto visual após ensaio amostra SP/0,25.



Fonte: Autoria própria.

Figura 48: Aspecto visual após ensaio amostra SP/0,5.



Fonte: Autoria própria.

Figura 49: Aspecto visual após ensaio amostra SP/0,75.



Fonte: Autoria própria.

4.3 Observações adicionais a respeito da adição do SAP ao solo

Como não foi verificada a saída de água com aspecto visual diferente da entrada durante o ensaio de permeabilidade, assume-se, inicialmente, que não ocorre o fluxo das partículas de polímero após a expansão.

Ainda, foi possível verificar que em momento algum foi atingida a capacidade máxima de expansão SAP, indicando possível subutilização do material. Para verificar esta hipótese, foram calculados os volumes de vazios para as amostras de solo + polímero considerando uma amostra de 1 cm³ de volume. Este valor de volume de vazios foi comparado com o valor estimado de volume que o SAP atingiria após absorver 100% de sua capacidade. Este comparativo está apresentado na Tabela 10 a seguir.

Através destes cálculos foi possível comprovar que a capacidade de expansão do polímero foi subutilizada, indicando a possibilidade da utilização de polímeros de menor capacidade de absorção para o tratamento de solos visando redução da permeabilidade.

Tabela 10: Comparativo entre volume do polímero após saturação e volume de vazios da amostra.

Amostra	pd (g/cm ³)	ms + mp (g)	e	Vv (cm ³)	mp (g)	Vp 100% (cm ³)	Vp/Vv
SP/0,25	1,67	1,87	0,55	0,36	4,17E-03	0,83	2,35
SP/0,5	1,62	1,81	0,60	0,37	8,06E-03	1,61	4,31
SP/0,75	1,60	1,79	0,62	0,38	1,19E-02	2,38	6,24

Fonte: Autoria própria.

Nota: *Foi utilizada a massa específica dos sólidos do solo apenas, uma vez que a quantidade de polímero é muito baixa e pouco influenciaria. Para a capacidade de absorção do polímero, foi utilizado o valor de 195 vezes, uma vez que foi o menor entre os determinados.

** ms = massa de solo, mp = massa de polímero, e = índice de vazios, Vv = volume de vazio, Vp100% = volume do polímero 100% saturado.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

A seguir serão descritas as conclusões que foram obtidas no presente estudo, seguidas de sugestões de pesquisas futuras que possam auxiliar na complementação do estudo do uso do SAP para fins de redução da permeabilidade.

5.1 Conclusões

Para a utilização do SAP em obras de terra diversas análises adicionais são necessárias, contudo, são cabíveis algumas conclusões iniciais a respeito do uso do material para fins geotécnicos.

- Para o polímero superabsorvente Hysorb® C9630, a melhor forma de adição do material o solo foi estando o SAP no estado seco e o solo previamente homogeneizado na umidade desejada;
- A massa específica seca apresenta relação inversamente proporcional ao teor de SAP da mistura;
- O tempo de espera para compactação também apresentou influência na massa específica seca da mistura, sendo esta relação inversamente proporcional.
- Não foi verificada a existência de um teor de umidade ótimo;
- A permeabilidade do solo reduziu consideravelmente com a adição do SAP, sendo verificadas reduções entre 192 e 606 vezes, com possibilidade de redução de 1462 vezes;
- Não foi verificada influência significativa do tempo de espera após mistura nos valores do coeficiente de permeabilidade, o que facilita a aplicação em campo;
- Para o polímero estudado, nas condições de mistura utilizadas, não foi possível concluir a respeito da existência de um teor ótimo de polímero;
- A capacidade de expansão do polímero não foi utilizada em sua totalidade;
- O confinamento da mistura se mostra necessário para que não haja a destruição da estrutura do solo compactado por conta da expansão do SAP. Em campo, este confinamento pode ser realizado pelo próprio solo a montante e a jusante do núcleo, se considerada a hipótese de uma barragem zoneada com SAP.

5.2 Sugestões de pesquisas futuras

Dado o potencial benefício do uso do material para fins de redução da permeabilidade de um solo, e os possíveis obstáculos verificados durante o desenvolvimento do trabalho, são válidas análises complementares que possibilitem esta utilização.

- Estudo da expansão do polímero no solo após compactação e após fluxo de água;
- Análise do estado de tensões que resultará da expansão do material;
- Avaliação da permeabilidade após ciclos de secagem e umedecimento;
- Estudo das propriedades mecânicas da mistura solo + SAP;
- Estudo da adição de SAPs com diferentes capacidades de absorção;
- Verificar o efeito da granulometria do SAP;
- Avaliação do efeito da umidade de compactação da mistura solo + SAP;
- Avaliação da influência do tempo após compactação na permeabilidade da mistura solo + SAP;
- Estudo do efeito da taxa de absorção na adição do SAP ao solo e nas propriedades física e mecânicas do material após adição;
- Estudo de solos com teor de finos superior ao do presente estudo;
- Avaliação da utilização do SAP como barreira selante e não misturado de forma homogênea ao núcleo da barragem de terra;
- Construir um segmento de barragem para monitorar os efeitos em campo.

REFERÊNCIAS

AKHTARPOUR, Ali; KHODAI, Ali. Experimental study of asphaltic concrete dynamic properties as an impervious core in embankment dams. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 319-334, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D5856 - Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter**. 2016.

ANDRADES FILHO, C. O.; SUERTEGARAY, D. M. A.; GUASSELLI, L. A. Arenização no sudoeste do Rio Grande do Sul: Investigação sobre a relação entre areais, drenagem e orientação do relevo. In: **VI Simpósio Nacional de Geomorfologia Regional/Conference on Geomorphology, Goiânia-GO. VI Simpósio Nacional de Geomorfologia/Regional Conference on Geomorphology**, IAG/UGB. 2006.

ANDRADES FILHO, C.; GUASSELLI, L. A.; SUERTEGARAY, D. M. A. Investigação sobre a relação entre lineamentos estruturais e a ocorrência de areais no sudoeste do Rio Grande do Sul. **XII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, v. 12, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4, 8 mm- Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 6459: Solo-Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7181: Solo: Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016.

BAO, Yan; MA, Jianzhong; LI, Na. Synthesis and swelling behaviors of sodium carboxymethyl cellulose-g-poly (AA-co-AM-co-AMPS)/MMT superabsorbent hydrogel. **Carbohydrate Polymers**, v. 84, n. 1, p. 76-82, 2011.

BAZIAR, Mohammad Hassan; SAEIDASKARI, Javad; ALIBOLANDI, Mahdi. Effects of nanoclay on the treatment of core material in earth dams. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 10, p. 04018250, 2018.

BEGAM, Tamanna; NAGPAL, A. K.; SINGHAL, Reena. A comparative study of swelling properties of hydrogels based on poly (acrylamide-co-methyl methacrylate) containing physical and chemical crosslinks. **Journal of applied polymer science**, v. 89, n. 3, p. 779-786, 2003.

BELLANCA, Eri Tonietti; SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes. Sítios arqueológicos e áreas no sudoeste do Rio Grande do Sul. **Mercator–Revista de Geografia da UFC**, v. 2, p. 99-114, 2003.

BEHERA, Sabyasachi; MAHANWAR, Prakash A. Superabsorbent polymers in agriculture and other applications: A review. **Polymer-Plastics Technology and Materials**, v. 59, n. 4, p. 341-356, 2020

BIAN, Xia et al. Compression and strength behavior of cement–lime–polymer-solidified dredged material at high water content. **Marine Georesources & Geotechnology**, v. 35, n. 6, p. 840-846, 2016.

BIAN, Xia et al. Effect of super-absorbent polymer on the undrained shear behavior of cemented dredged clay with high water content. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 7, p. 04017023, 2017.

BIAN, Xia et al. The role of superabsorbent polymer on strength and microstructure development in cemented dredged clay with high water content. **Polymers**, v. 10, n. 10, p. 1069, 2018.

BLANCK, Gaëtan; CUISINIER, Olivier; MASROURI, Farimah. Soil treatment with organic non-traditional additives for the improvement of earthworks. **Acta Geotechnica**, v. 9, n. 6, p. 1111-1122, 2013.

BOSHOFF, William et al. The effect of superabsorbent polymers on the mitigation of plastic shrinkage cracking of conventional concrete, results of an inter-laboratory test by RILEM TC 260-RSC. **Materials and Structures**, v. 53, n. 4, p. 1-16, 2020.

BOUAZZA, Abdelmalek; GATES, Will Peter; RANJITH, Pathegama Gamage. Hydraulic conductivity of biopolymer-treated silty sand. **Géotechnique**, v. 59, n. 1, p. 71-72, 2009.

BOYNTON, Stephen S.; DANIEL, David E. Hydraulic conductivity tests on compacted clay. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 111, n. 4, p. 465-478, 1985.

CHANG, Ilhan et al. Review on biopolymer-based soil treatment (BPST) technology in geotechnical engineering practices. **Transportation Geotechnics**, v. 24, p. 100385, 2020.

CHENG, Wei-Min et al. Preparation and swelling properties of poly (acrylic acid-co-acrylamide) composite hydrogels. **e-Polymers**, v. 17, n. 1, p. 95-106, 2017.

CONTI, José Bueno. O conceito de desertificação. **CLIMEP-Climatologia e Estudos da Paisagem**, v. 3, n. 2, 2008.

DANIEL, David E. State-of-the-art: Laboratory hydraulic conductivity tests for saturated soils. In: **Hydraulic conductivity and waste contaminant transport in soil**. v. 1142, p. 30, 1994.

DAS, Braja M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

DE MEYST, Laurence *et al.* The influence of superabsorbent polymers (SAPs) on autogenous shrinkage in cement paste, mortar and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 286, p. 122948, 2021.

DISPAT, Nonpan; POOMPRADUB, Sirilux; KIATKAMJORNWONG, Suda. Synthesis of ZnO/SiO₂-modified starch-graft-polyacrylate superabsorbent polymer for agricultural application. **Carbohydrate Polymers**, v. 249, p. 116862, 2020.

FANG, Shixin *et al.* Synthesis of chitosan derivative graft acrylic acid superabsorbent polymers and its application as water retaining agent. **International journal of biological macromolecules**, v. 115, p. 754-761, 2018.

FAO - Food And Agriculture Organization Of The United Nations. **Manual sobre pequenas barragens de terra**. Roma, 2011.

FENG, Shan *et al.* Stress-strain-strength behavior of asphalt core in embankment dams during construction. **Construction and Building Materials**, v. 259, p. 119706, 2020.

FRIEDRICH, Stefan. Superabsorbent polymers (SAP). In: **Application of super absorbent polymers (sap) in concrete construction**. Springer, Dordrecht, 2012. p. 13-19.

GAO, Jun; DANG, Faning; MA, Zongyuan. Investigation for the key technologies of ultra-high asphalt concrete core rockfill dams. **Soils and Foundations**, v. 59, n. 6, p. 1740-1757, 2019.

GEORGEES, Romel N.; HASSAN, Rayya A.; EVANS, Robert P. A potential use of a hydrophilic polymeric material to enhance durability properties of pavement materials. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 686-695, 2017.

GONSALVES, Arlan de Assis *et al.* Diferentes estratégias para a reticulação de quitosana. **Química Nova**, v. 34, n. 7, p. 1215-1223, 2011.

HAJIKHANI, Mohsen *et al.* Intelligent superabsorbents based on a xanthan gum/poly (acrylic acid) semi-interpenetrating polymer network for application in drug delivery systems. **International journal of biological macromolecules**, v. 139, p. 509-520, 2019.

HEAD, Ken H.; EPPS, Roger. **Permeability, shear strength and compressibility tests**. Caithness: CRC Press, 2011.

HUANG, Jianxin *et al.* A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization. **Construction and Building Materials**, v. 305, p. 124685, 2021.

ICOLD – International Commission on Large Dams. **Constitution**. Paris, 2011.

ICOLD. ICOLD-CIBG, 2020. **World Register of Dams**. Disponível em: <https://www.icold-cigb.org/GB/world_register/general_synthesis.asp>. Acesso em: 25/08/2022.

IYENGAR, Srinath R. *et al.* Pavement subgrade stabilization using polymers: Characterization and performance. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 4, p. 472-483, 2013.

JENSEN, Ole Mejlhede; HANSEN, Per Freiesleben. Water-entrained cement-based materials: I. Principles and theoretical background. **Cement and concrete research**, v. 31, n. 4, p. 647-654, 2001

JENSEN, Ole Mejlhede. Water absorption of superabsorbent polymers in a cementitious environment. In: **International Conference on Advances in Construction Materials through Science and Engineering 2011**. Rilem publications, 2011.

KHAJEH, Aghileh; JAMSHIDI CHENARI, Reza; PAYAN, Meghdad. A simple review of cemented non-conventional materials: soil composites. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 38, n. 2, p. 1019-1040, 2020.

KHEDR, Safwan A.; AHMED, Mohamed Salah. Using polyacrylamide grouts for permeability control in sand. **Transportation research record**, v. 1546, n. 1, p. 131-139, 1996.

KOU, Hai-lei et al. Effect of polymer on strength and permeability of marine clay. **Marine Georesources & Geotechnology**, v. 39, n. 2, p. 234-240, 2021.

KUTZNER, Christian. **Earth and rockfill dams: principles of design and construction**. A.A. Balkema. Rotterdam, 1996.

LACOSTE, Clément; LOPEZ-CUESTA, José-Marie; BERGERET, Anne. Development of a biobased superabsorbent polymer from recycled cellulose for diapers applications. **European Polymer Journal**, v. 116, p. 38-44, 2019.

LAFTAH, Waham Ashaier; HASHIM, Shahrir; IBRAHIM, Akos N. Polymer hydrogels: A review. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, v. 50, n. 14, p. 1475-1486, 2011.

LATIFI, Nima et al. Improvement of problematic soils with biopolymer—an environmentally friendly soil stabilizer. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 2, p. 04016204, 2017.

LIU, Mingzhu; GUO, Tianhua. Preparation and swelling properties of crosslinked sodium polyacrylate. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 82, n. 6, p. 1515-1520, 2001.

LIU, Jin et al. Research on the stabilization treatment of clay slope topsoil by organic polymer soil stabilizer. **Engineering Geology**, v. 117, n. 1-2, p. 114-120, 2011.

LIU, Jianhui; FARZADNIA, Nima; SHI, Caijun. Microstructural and micromechanical characteristics of ultra-high performance concrete with superabsorbent polymer (SAP). **Cement and Concrete Research**, v. 149, p. 106560, 2021.

MA, Xiaofang; WEN, Guohua. Development history and synthesis of super-absorbent polymers: a review. **Journal of Polymer Research**, v. 27, n. 6, p. 1-12, 2020.

MARANDI, G. B.; MAHDAVINIA, G. R.; GHAFARY, S. Collagen-g-poly (Sodium Acrylate-co-Acrylamide)/sodium montmorillonite superabsorbent nanocomposites: synthesis and swelling behavior. **Journal of Polymer Research**, v. 18, n. 6, p. 1487-1499, 2011.

MEDEIROS, Edgardo Ramos; DE ARAÚJO PEDRON, Fabrício; SCCOTI, Anderson Augusto Volpato. Evidências de pedogênese alóctone sobre arenitos Botucatu no sudoeste gaúcho. **Ciência e Natura**, v. 35, n. 1, p. 43-54, 2013.

MIGNON, Arn et al. Superabsorbent polymers: A review on the characteristics and applications of synthetic, polysaccharide-based, semi-synthetic and 'smart' derivatives. **European Polymer Journal**, v. 117, p. 165-178, 2019.

NI, Jing et al. Performance of soils enhanced with eco-friendly biopolymers in unconfined compression strength tests and fatigue loading tests. **Construction and Building Materials**, v. 263, p. 120039, 2020.

NIELSEN, Søren Dollerup *et al.* Constraints on CaCO₃ precipitation in superabsorbent polymer by aerobic bacteria. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 104, n. 1, p. 365-375, 2020.

OKAY, Oguz. General properties of hydrogels. In: **Hydrogel sensors and actuators**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. p. 1-14.

OLSEN, Harold W. Hydraulic flow through saturated clays. **Clays and Clay Minerals**, v. 9, n. 1, p. 131-161, 1962.

OMIDIAN, H. et al. Modified acrylic-based superabsorbent polymers (dependence on particle size and salinity). **Polymer**, v. 40, n. 7, p. 1753-1761, 1999

ORTS, William J. et al. Use of synthetic polymers and biopolymers for soil stabilization in agricultural, construction, and military applications. **Journal of materials in civil engineering**, v. 19, n. 1, p. 58-66, 2007.

PARVATHY, Prabha C.; JYOTHI, Alummoottil N. Synthesis, characterization and swelling behaviour of superabsorbent polymers from cassava starch-graft-poly (acrylamide). **Starch-Stärke**, v. 64, n. 3, p. 207-218, 2012.

QI, Zhenming; HU, Xiaosai. Water absorbency of super absorbent polymer based on flexible polymeric network. **European Polymer Journal**, v. 166, p. 111045, 2022.

RIO GRANDE DO SUL (Estado). Governo do Estado, 2007. Disponível em: <<https://estado.rs.gov.br/alegrete-tem-na-producao-de-arroz-sua-grande-forca-economica>>. Acesso em: 26/03/2022.

ROBAINA, Luis Eduardo de Souza; DE PAULA, Patrícia Milani; TRENTIN, Romario. SOIL DEGRADATION AND DEVELOPMENTS OF THE SANDS IN IBICUI BASIN-RS-BRAZIL. **Sociedade & Natureza**, v. 1, n. 1, p. 215-223, 2005.

ROSTAMI, Rohollah; KLEMM, Agnieszka J.; ALMEIDA, Fernando CR. Reduction of shrinkage by Superabsorbent polymers (SAP) in fibre reinforced mortars. **Construction and Building Materials**, v. 288, p. 123109, 2021.

SALEM, Mohamed N.; ELDEEB, H.; NOFAL, S. Analysis of seepage through earth dams with internal core. **International Journal of Engineering Research & Technology**, v. 8, p. 768-77, 2019.

SÁNCHEZ-MARTÍN, José et al. Optimized Design of Earth Dams: Analysis of Zoning and Heterogeneous Material in Its Core. **Sustainability**, v. 12, n. 16, p. 6667, 2020.

SEO, Jung-Woo; PARK, Dae-Wook; LE, Tri Ho Minh. Development of an asphalt concrete mixture for Asphalt Core Rockfill Dam. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 301-309, 2017.

SEPANTAFAR, Mohammadmajid *et al.* Engineered hydrogels in cancer therapy and diagnosis. **Trends in biotechnology**, v. 35, n. 11, p. 1074-1087, 2017.

SHACKELFORD, Charles D.; JAVED, Farhat. Large-scale laboratory permeability testing of a compacted clay soil. **Geotechnical Testing Journal**, v. 14, n. 2, p. 171-179, 1991.

SINHA, Sunil K.; WANG, Mian C. Artificial neural network prediction models for soil compaction and permeability. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 26, n. 1, p. 47-64, 2008.

SOHN, Ohgun; KIM, Dukjoon. Theoretical and experimental investigation of the swelling behavior of sodium polyacrylate superabsorbent particles. **Journal of applied polymer science**, v. 87, n. 2, p. 252-257, 2002.

SOLTANI-JIGHEH, Hossein; BAGHERI, Mohammad; AMANI-GHADIM, Ali Reza. Use of hydrophilic polymeric stabilizer to improve strength and durability of fine-grained soils. **Cold Regions Science and Technology**, v. 157, p. 187-195, 2019.

SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes. A trajetória da natureza: um estudo geomorfológico sobre os areais de Quaraí-RS: uma síntese. **Boletim Gaúcho de Geografia**. Porto Alegre. n. 17 (1989), p. 16-31, 1989.

SUERTEGARAY, D. M. A e VERDUM, R. Desertification in the tropics. In: UNESCO. (Org.). **Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)**. Paris: UNESCO Publishing, v.1, p. 1-17., 2008.

SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes. Erosão nos campos sulinos: arenização no sudoeste do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, 2011.

SWAIN, Sarat K.; SHUR, Bhargabi; PATRA, Subrata K. Poly (acrylamide-co-vinyl alcohol)—Superabsorbent materials reinforced by modified clay. **Polymer composites**, v. 34, n. 11, p. 1794-1800, 2013

TERZAGHI, Karl; PECK, Ralph B.; MESRI, G. **Soil mechanics in Engineering Practice**. New York: John Wiley & Sons, 1996.

TINGLE, Jeb S. et al. Stabilization mechanisms of nontraditional additives. **Transportation research record**, v. 1989, n. 1, p. 59-67, 2007.

ULLAH, Faheem et al. Classification, processing and application of hydrogels: A review. **Materials Science and Engineering: C**, v. 57, p. 414-433, 2015.

VENKATACHALAM, Dhanapal; KALIAPPA, Subramanian. Superabsorbent polymers: A state-of-art review on their classification, synthesis, physicochemical properties, and applications. **Reviews in Chemical Engineering**, 2021.

VILLIBOR, Douglas F.; ALVES, Driely M. L. **Pavimentação de Baixo Custo para Regiões Tropicais: Projeto e Construção – Novas Considerações**. Florianópolis: Tribo da Ilha, 2019.

WANG, Weibiao; HÖEG, Kaare; ZHANG, Yingbo. Design and performance of the Yele asphalt-core rockfill dam. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 47, n. 12, p. 1365-1381, 2010.

WORLD COMMISSION ON DAMS. **Dams and development: A new framework for decision-making: The report of the world commission on dams**. Earthscan, 2000.

WU, Hao et al. Experimental study on moisture susceptibility of subgrade soil with superabsorbent polymers. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 7, p. 04019120, 2019.

YANG, Sung-Tae; PARK, Young-Seok. Release pattern of dexamethasone after administration through an implant-mediated drug delivery device with an active plunger of super absorbent polymer. **Drug Delivery and Translational Research**, v. 8, n. 3, p. 702-707, 2018.

ZHANG, Jun Ping; CHEN, Hao; WANG, Ai Qin. Study on superabsorbent composite—VII. Effects of organification of attapulgite on swelling behaviors of poly (acrylic acid-co-acrylamide)/sodium humate/organo-attapulgite composite. **Polymers for advanced technologies**, v. 17, n. 5, p. 379-385, 2006.

ZHANG, ChunXiao et al. Research on various factors influencing the moisture absorption property of sodium polyacrylate. **Science in China Series B: Chemistry**, v. 52, n. 7, p. 1000-1008, 2009.

ZHANG, Mingchang et al. Preparation and characterization of superabsorbent polymers based on sawdust. **Polymers**, v. 11, n. 11, p. 1891, 2019.

ZHANG, Wenxu et al. Preparation of superabsorbent polymer gel based on PVPP and its application in water-holding in sandy soil. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 6, p. 106760, 2021.

ZOHOURIAN MEHR, M., & KABIRI, K. (2008). Superabsorbent polymer materials: a review. **Iranian Polymer Journal** (English), 2008.

ZOHURIAAN-MEHR, M. J. et al. Advances in non-hygienic applications of superabsorbent hydrogel materials. **Journal of materials science**, v. 45, n. 21, p. 5711-5735, 2010.