

2 Revisão Bibliográfica

2.1. Poliestireno Expandido (EPS)

2.1.1. Aspectos Gerais do EPS

O EPS é a sigla internacional do Poliestireno Expandido, produto, no Brasil, conhecido como “Isopor®”. Esse material foi descoberto em 1949 pelos químicos Fritz Stastny e Karl Buchholz nos laboratórios da Basf, na Alemanha. O termo expandido refere-se à expansão sofrida pelas cápsulas de estireno, pérolas de 0,4 a 2,5 mm de diâmetro, podendo ser ampliadas até 50 vezes, quando em uma câmara hermeticamente fechada e aquecida, aplicando-se o vácuo.

O EPS é um termoplástico derivado do petróleo. Constitui-se de um polímero do hidrocarboneto estireno (poliestireno) que é expandido usando-se o gás pentano (outro hidrocarboneto). Sendo assim, quimicamente o EPS é formado só de dois elementos, o carbono e o hidrogênio. A pérola de EPS é composta de 98% de ar e 2% de matéria-prima (em massa).

No processo produtivo do EPS, inicialmente ocorre a expansão do poliestireno por um pré-expansor através de aquecimento por contato com vapor de água, resultando um granulado de partículas de EPS constituídas por pequenas células fechadas, que são armazenadas para estabilização. Ao longo deste processo, o espaço dentro das células é preenchido pelo ar circundante. O gás expansor incorporado na matéria-prima é o pentano, conforme mencionado anteriormente. É importante lembrar que não se usa nenhum tipo de CFC como agente expansor na produção de EPS e o gás pentano é inofensivo ao meio ambiente por degradar-se fotoquimicamente (pela ação dos raios solares) muito rapidamente.

Além do poliestireno expandido, existem outros tipos de poliestireno. Um exemplo é o poliestireno extrudido (XPS), que é também uma espuma rígida de poliestireno, mas diferencia-se do EPS por ser obtida por um processo de extrusão em contínuo e por empregar outros gases expansores. Assim como já foi mencionado, o

EPS se expande com gás pentano, não sendo impactante ao meio ambiente, porém o XPS é expandido com o gás CFC, o maior agressor da camada de ozônio.

O EPS apresenta muitas vantagens, as principais características são destacadas a seguir.

- **Baixa condutibilidade térmica:** A estrutura de células fechadas, cheias de ar, dificulta a passagem do calor, o que confere ao EPS um excelente poder isolante.
- **Exposição a temperaturas extremas:** O EPS não tem limite a exposição a baixas temperaturas; a temperatura mínima de utilização corresponde à de liquefação dos gases do ar contido nas células. No entanto, como todos os plásticos, o EPS tem um limite superior de exposição à temperatura. A temperatura máxima do EPS poderá ultrapassar os 100°C em exposição muito curtas, baixando para 80-85°C em situações de exposição prolongada com aplicação de cargas elevadas.
- **Baixo peso específico:** Entre 9kg/m³ a 40kg/m³.
- **Resistência mecânica:** Possui alta resistência à compressão que normalmente varia de 7000kgf/m² até 1400kgf/m².
- **Baixa absorção de água:** O EPS não é higroscópico. Mesmo quando imerso em água ele absorve apenas pequenas quantidades de água. Tal propriedade garante que o EPS mantenha suas características térmicas e mecânicas mesmo sob a ação da umidade. O EPS não apresenta ascensão capilar.
- **Difusão do vapor de água:** O EPS é permeável ao vapor de água.
- **Resistente ao envelhecimento:** As propriedades do EPS não tem alteração ao longo da vida do material. Estima-se, na natureza, que o EPS tenha vida útil de 150 anos.

O EPS é produzido em duas versões: Classe P, não retardante à chama, e Classe F, retardante à chama. Possui três grupos de massa específica aparente: I – de 13 a 16kg/m³, II – de 16 a 20kg/m³ e III – de 20 a 25kg/m³. Na Tabela 2.1 são mostradas as características exigíveis para o EPS de acordo com a norma NBR 11752/2007 da ABNT (ABRAPEX, 2000).

Tabela 2.1 - Características exigíveis para o EPS na NBR 11752:1993.

Propriedades	Método de ensaio	Unidade	Classe P			Classe F		
			I	II	III	I	II	III
Tipo de material			I	II	III	I	II	III
Massa específica aparente	NBR 11949	kg/m ³	13-16	16-20	20-25	13-16	16-20	20-25
Resistência à compressão com 10% de deformação	NBR 8082	kPa	≥ 60	≥ 70	≥ 100	≥ 60	≥ 70	≥ 100
Resistência à flexão	ASTM C-203	kPa	≥ 150	≥ 190	≥ 240	≥ 150	≥ 190	≥ 240
Absorção de água Imersão em água	NBR 7973	g/cm ³ x 100	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Permeabilidade ao vapor d'água	NBR 8081	ng/Pa.s.m	≤ 7	≤ 5	≤ 5	≤ 7	≤ 5	≤ 5
Coefficiente de condutividade térmica a 23°C	NBR 12904	X/(m.k)	0,042	0,039	0,037	0,042	0,039	0,037
Flamabilidade	NBR 1948		Material não retardante à chama			Material retardante à chama		

Fonte: (ABRAPEX, 2000).

As aplicações do EPS estendem-se por diversas áreas como: embalagens para equipamentos eletroeletrônicos, utilidades domésticas como conservadoras térmicas, isolantes acústicos e térmicos, bandejas para acondicionamento de alimentos, entre outras.

2.1.2. Características de mercado do EPS

De acordo com a pesquisa divulgada pela ABRAPEX (2000) foram produzidos 2,95 milhões de toneladas de EPS no ano de 2000 no cenário mundial. A Europa foi a maior produtora destes produtos, responsável por 40% do total. A distribuição da produção de EPS no mundo é encontrada na Figura 2.1.

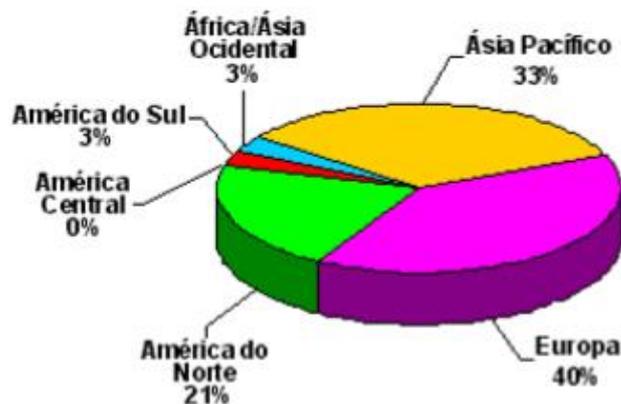


Figura 2.1 - Produção Mundial de EPS em 2000: 2,95 milhões de toneladas.

Fonte: (ABRAPEX, 2000).

Na mesma pesquisa feita pela ABRAPEX foi realizado um levantamento da distribuição do EPS por segmento no mundo constatando que a construção civil é responsável por grande parte do consumo do EPS, segundo é apresentado na Figura 2.2. A grande utilização na construção civil acontece devido às características isolantes, leveza e resistência do material.

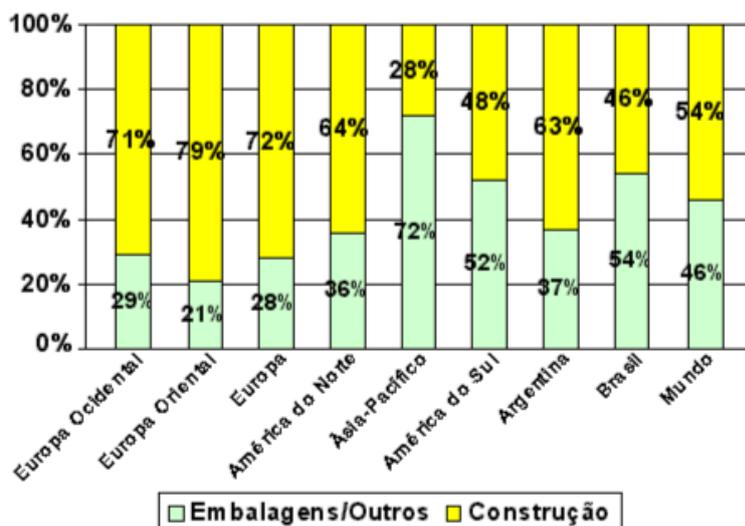


Figura 2.2 - Distribuição do EPS por segmento no mundo em 2000.

Fonte: (ABRAPEX, 2000).

No cenário nacional, o Brasil apresentou uma produção de EPS de aproximadamente 40 mil toneladas em 2000, conforme divulgado pela ABRAPEX (2000), distribuída em diversos municípios. De acordo com a Figura 2.3, o município

de São Paulo/SP foi o maior transformador apresentando 13.333 t/ano, seguido pelo município de Joinville/SC, com 8.600 t/ano, que se destaca no Brasil como um dos maiores pólos de transformação de EPS.

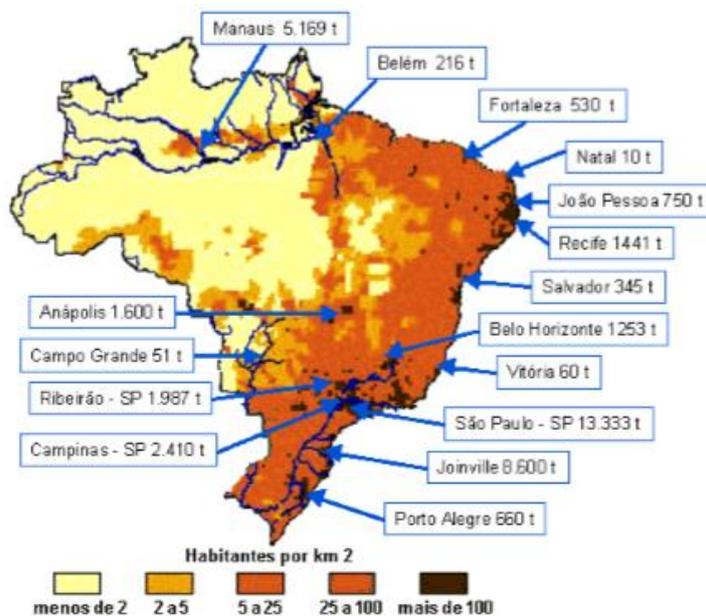


Figura 2.3 - Transformação de EPS no Brasil em 2000, principais municípios.

Fonte: (ABRAPEX, 2000).

No ano de 2007, a produção de EPS no Brasil aumentou, foram produzidas 55 mil toneladas de isopor e outras 2 mil toneladas foram importadas com equipamentos eletrônicos e diferentes bens trazidos do exterior. Conforme dados da Plastivida, em 2008 foram produzidos no Brasil cerca de 62,9 mil toneladas de Poliestireno Expandido (EPS) e aproximadamente 20 mil toneladas de Poliestireno Extrusado (XPS), totalizando cerca de 82,9 mil toneladas de isopor. Desse total, estima-se que retornaram ao processo produtivo com destino à reciclagem cerca de 7 mil toneladas, ou seja, apenas 8,4% de tudo o que foi produzido.

2.1.3.

O EPS e seu Impacto ao Meio Ambiente

O descarte de EPS é um problema enfrentado por diversas cidades grandes bem como as capitais, que já encontram muitos problemas com esse tipo de material, que vem saturando os aterros sanitários. O isopor sozinho não polui nem contamina o solo, mas como leva centenas de anos para se decompor, acaba ocupando muito espaço, diminuindo a área útil dos lixões. Além disso, na natureza o isopor leva 150 anos para ser degradado, conforme estimativas.

Algumas empresas por não terem onde descartar esse material acaba fazendo verdadeiras atrocidades ao queimarem grandes quantidades, normalmente à noite, o que agrava em muito o problema do aquecimento global, causador das constantes alterações climáticas, bem como aumenta a poluição do ar. Conforme foi observado anteriormente, no Brasil são fabricados toneladas de EPS por ano, segundo dados da ABRAPEX, isso sem falar nas embalagens que vem com produtos tipo exportação. Grande parte deste produto vai direto para os lixões.

Além disso, se descartado indevidamente na água, pode ser ingerido por animais aquáticos prejudicando muito sua saúde e todo ecossistemas que deles depende. Como se pode observar, o baixo custo e a versatilidade dos produtos de EPS se tornam muito mais caros na hora de dar uma destinação adequada a esses materiais após seu uso.

A leveza e baixa densidade, as principais características do EPS, também são responsáveis por dificultar sua reciclagem. Como se constitui principalmente de ar, quando derretido, seu volume cai para 10% do original. Somando isso à dificuldade de transportar esse material por ocupar muito espaço, poucas empresas se interessam por reciclar, ou mesmo, coletar o EPS (CBB RECICLA, 2013).

Quanto à classificação do EPS em relação ao tipo de resíduo sólido, a Associação Brasileira de Normas Técnicas publicou, no dia 31 de maio de 2004, a versão atualizada da norma NBR 10.004 (Classificação de Resíduos Sólidos). Esta norma técnica brasileira classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente. Os resíduos sólidos podem apresentar periculosidades em função de suas características físicas, químicas ou infecto-contagiosas. A NBR 10.004/04 classifica os resíduos sólidos visando orientar sua disposição final e ao conhecimento em si de sua periculosidade. Assim, os resíduos sólidos se classificam em classe 1 (perigosos) e

classe 2 (não perigosos). Os resíduos classe 2 dividem-se em classe 2A, que são os reativos, e classe 2B, que são os não reativos. O processo de classificação tem como base a origem dos resíduos e a sua constituição química. Quando não pode ser realizada a classificação do resíduo através da identificação da origem e sua comparação com as tabelas da referida norma, faz-se necessária a realização de análises químicas dos extratos lixiviados e extrato solubilizado do resíduo, segundo as normas NBR 10.005 e NBR 10.006, respectivamente. Os resíduos de EPS são classificados como classe 2B. (Chagas, Berreta-Hurrado & Gouvêa, 2011).

2.2. Solos Reforçados

De acordo com Casagrande (2005), “Entende-se por melhoria ou reforço de solos a utilização de processos físicos e/ou químicos que visem o melhoramento das propriedades mecânicas dos solos. Procura-se o aumento da resistência do solo tratado e a diminuição de sua compressibilidade e de sua permeabilidade. O termo melhoria de solos está associado ao tratamento através de processos químicos, enquanto que o termo reforço está associado à utilização de inclusões em aterros ou taludes”.

A técnica para reforçar o solo tem sido muito utilizada. Alguns dos materiais usados para esse fim são fibras (PET, vidro, polipropileno), borracha moída, geossintéticos, entre outros.

Gray e Ohashi (1983) desenvolveram um modelo teórico para estudar o comportamento de uma areia reforçada com fibras. Os autores executaram ensaios de cisalhamento direto com areia, nos estados fofo e denso, reforçada com fibras naturais, sintéticas e metálicas. Com os resultados obtidos nos ensaios, eles concluíram que a inclusão da fibra aumenta a resistência ao cisalhamento de pico e reduz a queda pós-pico. Outra conclusão foi a existência de uma tensão de confinamento crítica onde, abaixo desta, as fibras são arrancadas e, acima desta, as fibras são alongadas. As fibras com módulo baixo comportaram-se como uma inclusão extensível, ou seja, não romperam durante o ensaio. O aumento do comprimento das fibras resultou num aumento da resistência, porém, esse aumento é verificado até certo limite, a partir do qual, este efeito não é mais observado.

Shewbridge e Sitar (1989) avaliaram o mecanismo de desenvolvimento da zona de cisalhamento de um solo granular reforçado com vários tipos de fibras. Ensaio em

equipamento de cisalhamento direto foram realizados, cujas dimensões eram maiores que as convencionais. Para o solo reforçado, a zona de cisalhamento era mais larga e aumentava com a concentração, rigidez e aderência entre o solo e o reforço. Após um amplo programa experimental, os autores concluíram que o aumento da resistência é função das propriedades da areia (gradação, tamanho e forma das partículas) e da fibra (teor, relação l/d e módulo). A resistência diminui com o aumento do tamanho médio e da esfericidade das partículas de areia, por outro lado, há um acréscimo da resistência com o aumento do coeficiente de uniformidade da areia, do teor de fibras, do módulo das fibras e da relação l/d . O modelo proposto pelos autores para prever o comportamento do solo reforçado com fibras é baseado num modelo aplicado a concreto reforçado com fibras. Em geral, há um razoável ajuste entre os valores experimentais e os previstos pelo modelo. Entretanto, ainda há a necessidade de um melhor refinamento do modelo, principalmente em relação à estimativa da espessura da zona de cisalhamento.

Montardo (2000) e Consoli (2002) apud Heineck (2002) investigaram os efeitos da inclusão de fibras sintéticas de diferentes propriedades mecânicas, distribuídas aleatoriamente, o comportamento de um solo arenoso, artificialmente cimentado e não-cimentado e chegaram às seguintes conclusões: fibras relativamente rígidas (fibras de vidro e PET) exercem efeito mais pronunciado na resistência de ruptura, ao passo que fibras relativamente flexíveis (fibras de polipropileno) exercem efeito mais pronunciado no modo de ruptura e no comportamento último; a inclusão de fibras de PET ou de vidro aumentou, tanto a resistência à compressão, quanto à resistência a tração da matriz cimentada, enquanto que as fibras de polipropileno não aumentam estas duas variáveis; a inclusão de fibras de polipropileno no compósito cimentado alterou o comportamento do material na ruptura, que era frágil, para dúctil, sendo que a inclusão de fibras de PET e de vidro não modificaram o modo de ruptura; a inclusão de qualquer tipo de fibra aumentou a capacidade de absorção de energia de deformação, de forma mais acentuada para comprimentos de fibras maiores; a rigidez inicial não foi afetada pela inclusão das fibras de PET e de vidro porém ela é drasticamente reduzida com a inclusão de fibras de polipropileno.

Casagrande (2005) estudou o efeito da adição das fibras de polipropileno em solo arenoso através da realização de ensaios triaxiais. Conclui-se desse estudo que a inclusão das fibras de polipropileno ao solo proporcionou um crescimento constante da resistência com o aumento das deformações distorcionais, acarretando em um aumento

das deformações volumétricas de contração para as tensões efetivas médias iniciais altas, independentes da trajetória de tensões seguida pelo material.

Curcio (2008) avaliou o comportamento hidromecânico e mecânico de amostras de solo compactado reforçado com fibras de PET reciclado. A inserção de fibras reduziu a magnitude das fissuras de tração. Notou-se que o comportamento do material compósito em relação à resistência à tração parece ser inicialmente controlado apenas pela matriz de solo. À medida que crescem as deformações, o comportamento passa a ser controlado pela matriz e pelas fibras. A adição de 1% de fibras, além de favorecer o acréscimo da tensão de tração máxima do solo, retarda a abertura de fissuras e reduz a magnitude das mesmas, sem alterar as propriedades desejáveis na compactação e sem influenciar negativamente a condutividade hidráulica do solo quando utilizadas sob tensão confinante.

Ghazavi (2004) realizou ensaio de cisalhamento direto para misturas com 0%, 10%, 15%, 20%, 50%, 70% e 100% de borracha em um solo arenoso. A borracha utilizada tinha tamanho médio de 4,0 mm. Em geral as melhorias na resistência ao cisalhamento não foram significativas, contudo as resistências de pico das misturas aconteceram para deslocamentos horizontais maiores que no caso da areia pura, sendo que as curvas de tensão cisalhante x deslocamento horizontal não apresentaram um pico muito bem definido com relação à curva da areia pura. Nas envoltórias observa-se que para as misturas que têm entre 10% e 20% de borracha o valor do ângulo de atrito atingiu seus maiores valores.

Costa (2011) estudaram o comportamento de misturas compostas por solo laterítico e tiras de borracha de tamanho médio de 1,40 mm. através de ensaios de cisalhamento direto em amostras com 0%, 10%, 20%, 40% e 50% de borracha. As envoltórias de resistência de todas as misturas apresentaram maiores valores de resistência ao cisalhamento do que do solo puro. O máximo incremento aconteceu para a mistura com um teor de borracha de 40%. O deslocamento horizontal onde acontece a tensão cisalhante máxima das misturas é maior do que do solo puro. Estes deslocamentos horizontais correspondentes à tensão cisalhante máxima aumentam com o maior o teor de borracha da mistura.

Ramírez (2012) realizou ensaios triaxiais em misturas de argila-borracha e areia-borracha. A partir dos ensaios, observou-se que os compósitos atingem sua resistência de pico com deformações axiais maiores do que em relação ao solo puro. Este nível de deformação axial aumentou para as misturas com maiores teores de borracha. A

resistência pós-pico dos compósitos diminuiu lentamente com a deformação, fornecendo um comportamento dúctil durante o cisalhamento. Assim, notou-se que o comportamento mecânico dos compósitos depende do teor de borracha inserido no solo. Existe uma tendência de melhorar a resistência ao cisalhamento com o aumento do teor, sendo que a partir de certo teor (teores distintos para diferentes tipos de solo) a inserção de borracha é prejudicial em relação às propriedades do solo puro.

Outro material utilizado como reforço do solo é o geossintético. Segundo a NBR 12553/1991, geossintético é a denominação genérica de produtos poliméricos, podendo ser sintéticos ou naturais, que são industrializados e desenvolvidos para utilização em obras geotécnicas, que desempenham uma ou mais funções, entre as quais se destacam: reforço, filtração, drenagem, proteção, separação, impermeabilização e controle de erosão superficial. Há atualmente um grande número de geossintéticos desenvolvidos para diversas aplicações, sendo estes classificados em geotêxteis, geomembranas, geocompostos argilosos para barreira impermeável e para drenagem, georredes, geogrelhas, geocélulas e geomantas. Dentre estes, os mais utilizados para o reforço são o geotêxtil tecido e não tecido, geocomposto para drenagem, geogrelha e geocélula.

2.3.

Ensaio Experimentais com Uso de EPS

Abdelrahman (2013) estudaram o comportamento de amostras de areia misturadas com pérolas de EPS através de ensaios de compactação Proctor Normal. As curvas de compactação obtidas são mostradas na Figura 2.4. A partir dessa figura, o autor observou que com a adição de pérolas de EPS a densidade seca do material varia consideravelmente, reduzindo com o aumento do teor de pérolas de EPS, porém a umidade ótima não apresentou o mesmo comportamento. Esse fato pode ser atribuído a baixa densidade aparente e a baixa absorção de umidade por parte das pérolas de EPS (Abdelrahman, 2013).

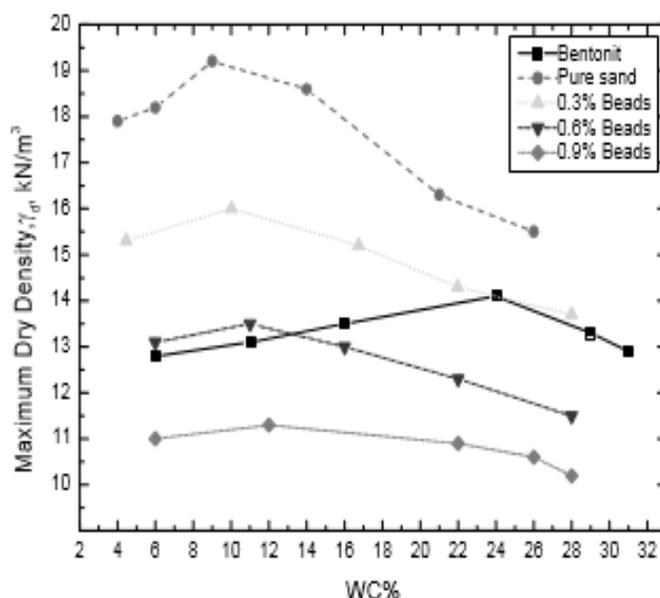


Figura 2.4 - Curvas de compactação das misturas de areia com diferentes teores de EPS na densidade de EPS de 0,16 kN/m³.

Fonte: (Abdelrahman, 2013).

Abdelrahman (2009) a partir de um outro estudo, concluiu que o aumento da densidade da pérola de EPS aumenta a densidade máxima seca do material para uma mesma porcentagem de pérolas de EPS.

Nattatmadja (2009) estudou o comportamento das argilas expansivas com índices de plasticidade (IP) variando de 22% a 53% misturados com pérolas de poliestireno expandido (EPS) em laboratório. Um dos motivos para esse estudo foi o fato de materiais de aterramento convencionais estarem se tornando mais escassos e caros, surgindo assim uma pressão crescente para usar materiais reciclados para esse fim. Apesar de sua abundância, solos expansivos são geralmente evitados uma vez que podem causar danos estruturais significativos às estruturas, tais como muros de contenção.

Para investigar o efeito da mistura de pérolas de EPS com argilas expansivas, três solos expansivos foram fabricados no laboratório, misturando areia fina com bentonita sódica em várias proporções. A bentonita pura rica em sódio disponível comercialmente foi misturada em diversas proporções com areia, de modo a simular a contração e a expansão características de solos expansivos. Com os teores de bentonita selecionados (16, 24 e 32%), três diferentes argilas artificiais (denominado SB16, SB24 e SB32) foram produzidas. A Figura 2.5 mostra uma curva típica de expansão livre de

um teste com a mistura SB16 indicando que mesmo após duas semanas, as amostras podem ainda inchar muito embora a uma taxa inferior.

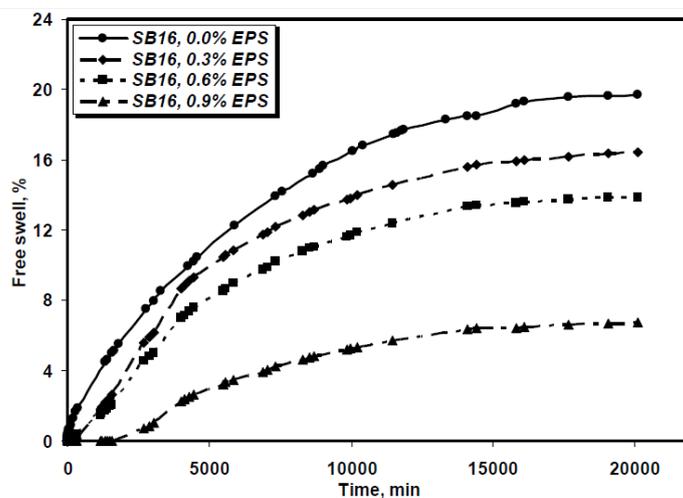


Figura 2.5 - Curva de expansão livre do solo com Índice de Plasticidade de 38% e com diferentes teores de EPS.

Fonte: Nattatmadja (2009).

A Figura 2.6 mostra que a adição de EPS nas argilas artificiais pode reduzir a contração volumétrica por até 50% dependendo a porcentagem da pérolas de EPS presente.

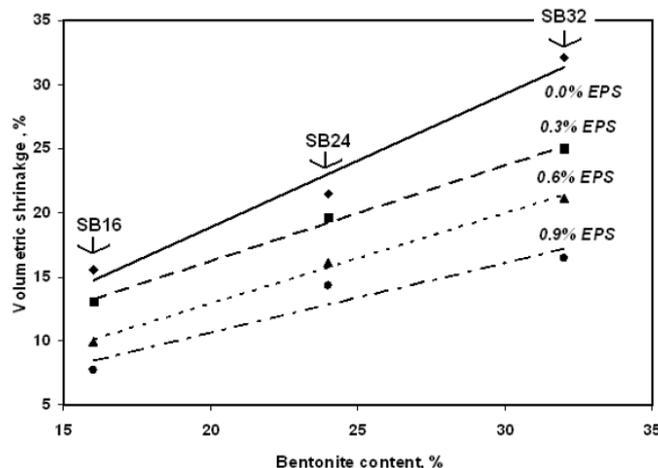


Figura 2.6 - Efeito da adição de pérolas de EPS na contração volumétrica.

Fonte: Nattatmadja (2009).

Nattatmadja (2009) estudou também a capacidade de um aterro para drenar a água, pois isso é um fator importante que afeta a estabilidade de um muro de contenção. Um aterro permeável vai permitir que a água flua rapidamente, de modo a não aumentar a magnitude da força horizontal que pode desestabilizar a parede. A variação de

condutividade hidráulica de SB24, com a adição de EPS é mostrado na Figura 2.7. É visto que a condutividade hidráulica da composição do solo do EPS aumenta ligeiramente com 0,3% , quando comparado com o solo de puro, mas com maior teor de EPS um aumento significativo pode ser esperado.

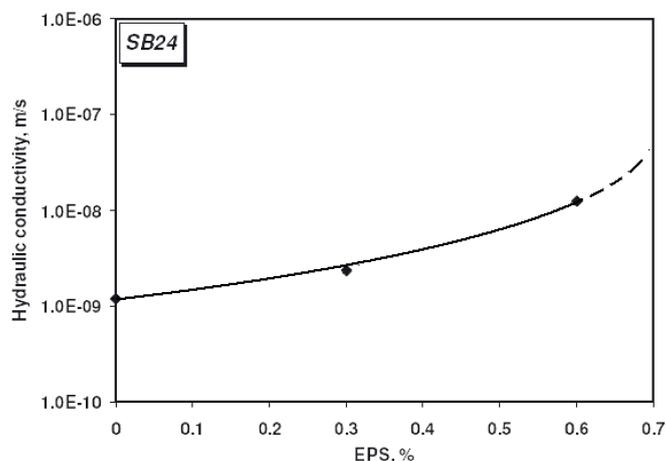


Figura 2.7 - Efeito da adição de pérolas de EPS na condutividade hidráulica.

Fonte: Nattatmadja (2009).

Dessa maneira, Nattatmadja (2009) concluiu que a adição de pérolas de EPS em um solo funciona bem como uma substituição parcial do solo. Em argilas expansivas, isto pode reduzir a magnitude da pressão de expansão e da expansão livre. Verificou-se também que quanto maior a quantidade de pérolas de EPS no solo, menor é o potencial de contração. Uma redução de cerca de 50 % na contração volumétrica pode ser esperada para um solo com um PI de 53 misturada com 0,9 % de pérolas de EPS , em massa. Assim, mostrou ser possível fazer um uso benéfico dos produtos de EPS e da argila expansiva, sendo um novo conceito que irá oferecer uma solução sustentável tanto para a habitação quanto para as indústrias de produção de EPS.