

CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE AMOSTRAS DE EPS POR MEIO DE ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Characterization of Geotechnical Behaviour of EPS Samples
by Laboratory Tests

José Orlando Avesani Neto*

Benedito de Souza Bueno**

RESUMO – O poliestireno expandido (EPS) foi recentemente introduzido no Brasil como material de baixa massa específica para construções de aterros sobre solos moles e encontros de pontes. Devido este fato, não há nenhuma experiência consolidada em ensaios deste produto de um ponto de vista geotécnico no Brasil. Este artigo apresenta resultados de uma pesquisa de laboratório com ensaios mecânicos e hidráulicos, com o objetivo de caracterizar amostras de EPS para o uso geotécnico. Os testes mecânicos compreenderam não somente a compressão uniaxial, mas também ensaios de compressão cíclica, importante em projetos de pavimentos, e o cisalhamento direto da interface. Os ensaios hidráulicos incluíram absorção de água e permeabilidade. Os resultados mostram que o EPS possui uma grande resistência, apesar da baixa massa específica, e boas propriedades geotécnicas para uso na área de engenharia geotécnica.

SYNOPSIS – Expanded polystyrene (EPS) has been recently introduced in Brazil as lightweight material for construction of embankments on soft soils and bridge abutments. Despite this fact, there is no consolidated experience in testing this product from a geotechnical point of view in Brazil. This paper presents the research data on mechanical and hydraulic laboratory tests, characterizing the EPS samples for geotechnical use. The mechanical tests comprised not only static unconfined compression, but also cyclic unconfined compression tests aiming pavement design, and the direct shear test. The hydraulic tests included water absorption and water permeability. The results show that EPS has a great resistance, although its very low density, and good geotechnical properties for applications in geotechnical engineering works.

PALAVRAS CHAVE – Geossintéticos, geoexpandido de poliestireno expandido (EPS), caracterização.

1 – INTRODUÇÃO

O uso do poliestireno expandido (EPS) e do poliestireno extrudado (XPS) na engenharia civil já possui uma aplicação reconhecida na construção civil devido sua alta capacidade como isolante térmico e acústico e na absorção de impactos e recalques. Porém, o seu emprego como geossintético (associado ao solo) tem uma utilização mais recente.

Na engenharia geotécnica esse material, manufaturado em blocos de formatos prismáticos – chamado de geoexpandido e *geofoam*, possui propriedades que permitem sua utilização em diversas aplicações. Por ser um material de baixa massa específica (cerca de 100 vezes inferior a de

* Mestre, Engenheiro Civil do Centro de Tecnologia de Obras de Infra-estrutura do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT. E-mail: avesani@ipt.br

** Professor Titular do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC – USP). E-mail: bsbueno@sc.usp.br

solos, consequência do processo de fabricação) e possuir uma resistência mecânica relativamente alta, sua utilização como aterro é bem difundida, principalmente em regiões com solo de fundação de baixa capacidade de suporte (solos moles) que ocorrem em costas litorâneas, por exemplo. Por causa dessas características, espera-se que o geoexpandido resista às cargas como aterro e não comprometa o solo de fundação. Todavia, além desta aplicação “clássica” do EPS, pode-se destacar também a sua utilização como base e sub-base de estradas, alívio de empuxos e pressões em muros de arrimo e taludes, proteção de infra-estruturas como galerias e tubulações em centros urbanos e encontro de pontes. Nestas aplicações, os blocos de EPS sofrem solicitações dos mais variados tipos, tornando-se necessário o estudo da resposta do material frente estas diferentes solicitações.

Estudos já realizados mostram que o EPS, frente a uma solicitação de compressão uniaxial simples de curta duração possui uma curva característica de tensão versus deformação. Após um limite da fase elástica próximo a uma deformação de 1%, verifica-se um trecho plástico no qual o material sofre um “endurecimento”, ganhando resistência com a deformação. Como o EPS não possui um valor de resistência bem definido, é usual considerá-la para um valor de deformação de 10 %. Muitos autores sugerem uma relação da resistência à compressão uniaxial simples com a massa específica, destacando-se os trabalhos de Horvath (1994) e de Duskov (1997).

Por ser um polímero, o EPS é altamente influenciável pela variação da temperatura. Yeo e Hsuan (2006) estudaram o material em solicitações de compressão de curto prazo com variação da temperatura. Seus resultados mostram que com a variação da temperatura também se obtém uma variação no comportamento da resistência de forma inversamente proporcional, com uma queda na resistência de cerca de 15% para uma variação de 35°.

Duskov (1997), simulando a utilização de amostras de EPS em base de estrada por meio de ensaios de compressão uniaxial cíclica, verificou a grande plastificação dos corpos de prova quando solicitados por uma carga superior ao limite elástico do material ao longo dos 100.000 ciclos aplicados. Athanasopoulos *et al.* (1999), Stark et al. (2004) e Bueno (2005) também realizaram ensaios de compressão uniaxial cíclica com amostras de EPS e obtiveram uma redução significativa do módulo de elasticidade das amostras ao longo dos ciclos aplicados.

Horvath (1994) cita que há dois modos de cisalhamento que despertam o interesse em blocos de EPS. O cisalhamento interno de blocos, nos quais não há uma ruptura aparente das amostras e que são pouco freqüentes, e o cisalhamento de interface entre blocos, que constitui um importante parâmetro de estabilidade em obras com solicitações horizontais.

Como a massa específica do EPS é cerca de 50 vezes menor que da água, a absorção em relação as massas resulta em valores extremamente elevados. Dessa forma é usual se expressar a absorção em relação aos volumes de água absorvida e do material. Duskov (1997) realizou ensaios com amostras de EPS para quantificar a absorção de água e obteve valores reduzidos e uma proporcionalidade com a massa específica dos corpos de prova.

Deste modo, no programa experimental realizado, a resposta do EPS foi avaliada por meio de ensaios mecânicos de compressão uniaxial simples e cíclica e de cisalhamento direto da interface; e de ensaios hidráulicos como absorção de água e permeabilidade. Com este procedimento, realizou-se um estudo comparativo dos resultados com a massa específica com o objetivo de determinar possíveis relações de previsão do comportamento do material, expandindo o seu estudo e auxiliando na compreensão do EPS.

Para informações mais detalhadas dos procedimentos empregados e dos resultados obtidos do programa de ensaios apresentados neste artigo, recomenda-se a consulta de Avesani Neto (2008). Além dos ensaios aqui apresentados, Avesani Neto (2008) apresenta ainda outros ensaios mecânicos realizados com blocos de EPS (a saber: compressão triaxial, cisalhamento direto e fluência por compressão) e ensaios de perda de massa por ataque de roedores.

2 – ENSAIOS DE LABORATÓRIO

2.1 – Materiais Utilizados

Os blocos de EPS utilizados nessa pesquisa foram escolhidos de acordo com sua massa específica de forma a se abranger a maior parte dos valores utilizados nas práticas de projeto. Foi escolhida também a realização de ensaios com blocos de EPS contendo materiais reciclados e de massa específica elevada de modo a se antecipar materiais com propriedades que possam ter utilidade futura. Os ensaios realizados foram propostos de modo a se determinar a resposta do EPS frente algumas das solicitações mais comuns que estarão atuando sobre o material em utilizações da prática.

Todos os corpos de prova de EPS utilizados em todos os ensaios foram preparados previamente. Nessa etapa de preparação, as amostras foram devidamente medidas e pesadas de acordo com a ASTM C 303 (1996). O Quadro 1 exibe todas as estatísticas das medições feitas em todos os corpos de prova ensaiados. Nota-se por ela que os valores de massa específica possuem uma pequena variação entre as amostras, sendo essa variação perfeitamente aceitável na realização dos ensaios.

Quadro 1 – Estatística das amostras de EPS.

EPS	Massa Específica (kg/m³)			Desvio Padrão	Variação (%)
	Máximo	Mínimo	Média		
10 (reciclado)	15,40	12,00	13,03	0,58	4,42
10	13,10	10,30	11,69	0,65	5,58
14,5	15,50	14,00	14,68	0,37	2,49
17	20,00	16,60	18,79	0,61	3,26
20	25,50	20,70	22,18	1,18	5,34
30	38,60	30,30	33,19	1,95	5,88
40	43,70	38,60	41,03	2,03	4,95

Antes da realização de todos os ensaios cada amostra foi colocada em uma sala climatizada com temperatura de 23 °C e umidade relativa do ar de 50 % por um período não inferior a 24 horas.

2.2 – Ensaio de Compressão Uniaxial Simples

O ensaio de compressão uniaxial em materiais plásticos celulares é normalizado pela ASTM 1621 de 2000. Consiste em um simples ensaio de compressão com as dimensões e massa das amostras previamente determinadas. Através desse ensaio determina-se a curva tensão versus deformação do material.

A realização dos ensaios de compressão uniaxial se procedeu numa máquina de ensaios com controle da taxa de deformação. A Figura 1 mostra um ensaio de compressão uniaxial em um bloco de EPS em andamento.

Para a realização deste ensaio, empregaram-se corpos de prova cúbicos com 100 mm e 50 mm de lado. Foram feitos ensaios com variação da temperatura, entre 23 °C e 72 °C, variando de 7 em 7 °C. As velocidades de execução do ensaio variavam entre 5 mm/min e 50 mm/min.

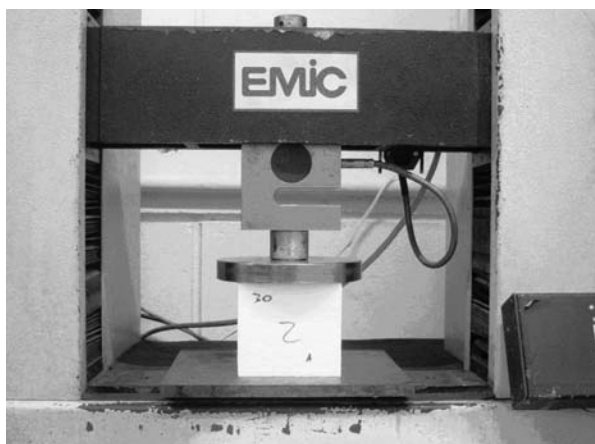


Fig. 1 – Ensaio de compressão uniaxial.

2.3 – Ensaio de Compressão Uniaxial Cíclica

O ensaio de compressão cíclica realizado se assemelha ao ensaio de compressão simples, porém, no cíclico não há elevação da carga além de um limite extremo suportado pela amostra, nem abaixo de um valor limite superior pré-estabelecido.

No ensaio de compressão cíclica tentou-se reproduzir as condições de carga cíclica sofridas por um material que compõe a base de uma estrada. Utilizou-se uma sobrecarga de 20 kPa correspondente a aproximadamente uma camada de 1 m de solo acima da camada de geoexpandido de EPS. Para a frequência de repetição da carga, utilizou-se 1 Hz, ou seja, cada aplicação e remoção da carga durou apenas 1 s, sendo 0,50 s de aplicação e 0,50 s de remoção da mesma (gráfico dente de serra). Para tal, utilizou-se uma máquina servo controlada, marca MTS, do Laboratório de Mecânica das Rochas, do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos. A Figura 2 exibe o equipamento utilizado na realização deste ensaio.

Para a realização deste ensaio, definiram-se duas deformações limites para se aplicar às amostras. Uma superior ao limite de elasticidade do material (cerca de 1%) com valores superiores a 5%,



Fig. 2 – Equipamento utilizado no ensaio de compressão cíclica.

de forma a se plastificar o corpo de prova, e outra no patamar elástico com valores inferiores a 1 % (cerca de 0,8%).

Foi adotado um total de dez mil ciclos para cada ensaio, sendo registrado durante o ensaio as tensões e as deformações em uma taxa de 5 registros para cada ciclo (5 registros por segundo).

2.4 – Ensaio de Cisalhamento Direto de Interface

O ensaio de cisalhamento direto em solos é normatizado pela ASTM D 3080 de 1998. Contudo, foram feitas algumas alterações no ensaio com EPS em vista de tratar-se de um cisalhamento de interface.

Para a realização do ensaio de cisalhamento direto de interface colocaram-se em contato duas placas do material com uma determinada tensão de confinamento. Na fase de cisalhamento, aplicou-se um deslocamento relativo entre as placas medindo-se simultaneamente a força necessária para o deslocamento e a magnitude do deslocamento. Esse ensaio foi realizado em um equipamento típico para ensaios em solos. A Figura 3 exibe o equipamento utilizado no ensaio.

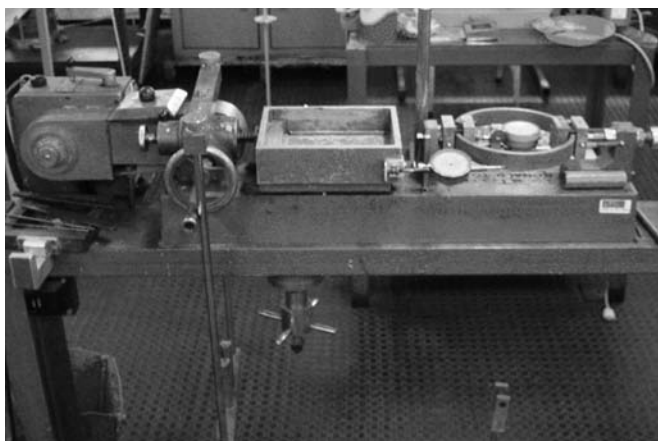


Fig. 3 – Equipamento de ensaio de cisalhamento direto.

As tensões de confinamento utilizadas foram de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 kPa, escolhidas de modo a tentar representar situações de campo, na qual um aterro de geoexpandido possui baixo peso. A velocidade de execução de ensaio adotada foi de 0,50 mm/min.

2.5 – Ensaio de Absorção de Água

O ensaio de absorção de água foi realizado de acordo com a norma ASTM C 272 de 2001. O procedimento do ensaio consiste na total imersão dos corpos de prova em água destilada por um período de 24 horas. Após esse tempo, a amostra é retirada, enxugada, secando-se a água excedente na superfície e pesada. Obtém-se a massa de água absorvida pelo material subtraindo-se o valor da massa saturada pela massa seca obtida anteriormente por meio de secagem em estufa com temperatura de 95°C por um tempo não inferior a 24 horas. A relação da massa de água absorvida pela massa seca do material determina a absorção de água em percentagem. Porém, como a massa do EPS é muito reduzida, é usual expressar a absorção de água em termos de percentagem de volume (relação entre volume de água absorvido pelo volume do corpo de prova).

A Figura 4 esquematiza o ensaio de absorção de água por imersão.

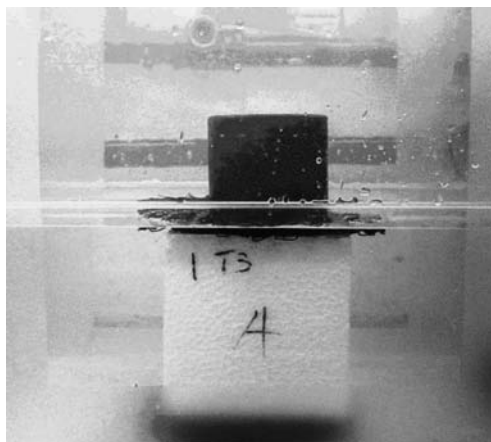


Fig. 4 – Ensaio de absorção de água.

2.6 – Ensaio de Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade foi realizado de maneira análoga àqueles realizados com amostras de solo. Utilizou-se uma câmara de permeabilidade na qual a amostra é inserida entre camadas de brita, para promover uma uniformização do fluxo de água, com as laterais do corpo de prova devidamente impermeabilizadas através da utilização de parafina e bentonita.

Com a câmara de ensaio pronta, colocou-se a mesma no aparato que aplicará o gradiente hidráulico e desenvolverá o fluxo para a saturação. É importante promover a saturação total do sistema deixando-se o ar contido na câmara escapar pelo respiro da tampa. A Figura 5 exibe a câmara posicionada no aparato, saturada e pronta para a realização do ensaio.

Para a realização do ensaio, deixou-se estabelecer um fluxo contínuo pelo sistema de forma a se obter uma saturação total da amostra. O ensaio se procedeu de duas formas: para amostras que se constatou uma permeabilidade mais elevada, realizou-se o ensaio com carga hidráulica constante, que se mede o volume de água que atravessa a amostra em um determinado tempo. E para as amos-

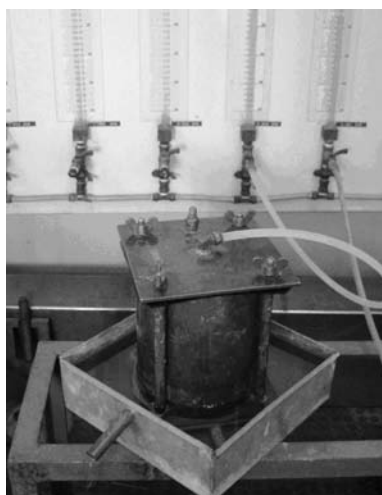


Fig. 5 – Câmara do ensaio de permeabilidade pronta para a realização do ensaio.

tras que se constatou uma permeabilidade reduzida, o ensaio realizado foi o de carga hidráulica variada, que se mede a variação da carga hidráulica imposta à amostra (variação do gradiente) em um determinado tempo.

3 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 – Ensaio de Compressão Uniaxial Simples

A Figura 6 exibe os resultados de 5 amostras de EPS de 30 kg/m³ com dimensões cúbicas de 100 x 100 x 100 mm, ensaiadas a uma velocidade de 15 mm/min e temperatura de 23°C.

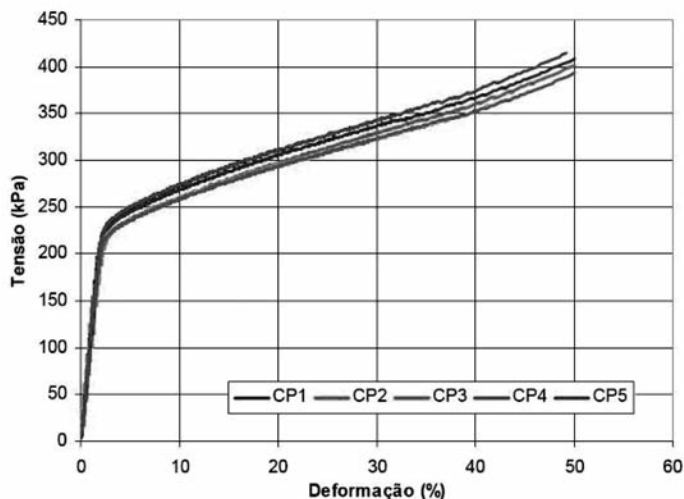


Fig. 6 – Resultado do ensaio de compressão uniaxial da amostra de EPS de 30 kg/m³.

Na Figura 6 nota-se a curva típica tensão – deformação do material, na qual há uma região elástica até o valor de cerca de 2 % de deformação, e a parcela plástica (após 2 % de deformação) na qual o material sofre um endurecimento. Portanto, a curva de compressão do EPS pode ser descrita por apenas três pontos característicos: o módulo tangente da fase elástica, adotado para o valor de 1 % de deformação; a tensão de transição da fase elástica para a fase de plastificação do material, adotada para uma deformação de 2 % - ponto esse em que há uma mudança na inclinação da curva, e módulo tangente da fase de endurecimento (ou taxa de ganho de resistência da fase de endurecimento), adotado para uma deformação de 10 %.

Foi realizado um total de 350 ensaios com as variações acima descritas. Por meio destes foi possível montar a estatística das resistências de cada massa específica ensaiada, exibida no Quadro 2. Deste Quadro fica clara a relação direta da massa específica com a resistência do material. O EPS é largamente influenciado por esta propriedade, possuindo uma grande amplitude de resistência (50 a 300 kPa) para uma pequena faixa de variação de massa específica (10 a 40 kg/m³).

Nota-se que a resistência dos plásticos celulares rígidos é dada pelo valor da tensão correspondente a uma deformação de 10%, e as resistências exibidas no Quadro são os valores máximos, mínimos e médios dentro do universo obtido com todos os ensaios.

Com os dados dos ensaios também foi possível determinar uma correlação entre a resistência do EPS e sua massa específica. A Figura 7 exibe o resultado de todos os ensaios feitos com o material e a correlação proposta.

Quadro 2 – Estatística de todos os ensaios de compressão uniaxial realizados.

Massa Específica (kg/m³)	Resistência (kPa)			Desvio Padrão	Variação (%)
	Máximo	Mínimo	Média		
30	300,21	222,96	264,05	17,21	6,52
20	199,02	139,32	157,62	13,92	8,83
17	127,35	103,38	115,02	7,42	6,45
14,5	87,05	72,31	79,46	5,04	6,35
10	61,98	50,10	55,25	3,05	5,52
10 (reciclado)	59,88	47,57	53,52	2,89	5,40

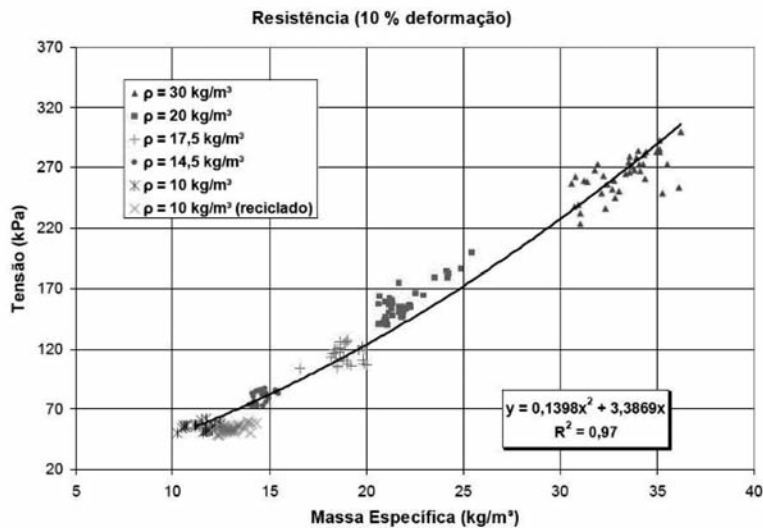


Fig. 7 – Relação entre resistência (correspondente a deformação de 10%) e massa específica para diversas amostras de EPS.

A relação entre resistência e densidade proposta possui um ótimo coeficiente de correlação, visível na Figura 7. O fato de se adotar uma relação reside na facilidade e na simplicidade de se modelar seu comportamento, e que represente adequadamente os valores esperados em uma faixa acima da densidade de 10 kg/m³ que é o valor mínimo usual em projetos de caráter geotécnico. Valores de massa específica inferiores a este são raramente utilizados no meio geotécnico devido à pobreza de propriedades requeridas para sua utilização.

Por motivo de comparação e de projeto com a utilização do geoexpandido fora da zona de plastificação, foi desenvolvido também um gráfico com todos os valores de tensão para uma deformação correspondente a 1 % de todos os blocos ensaiados. Deste gráfico foi obtido mais uma correlação entre a tensão (deformação igual a 1 %) e massa específica, exibidos na Figura 8.

Para a caracterização completa do material, determinou-se os três pontos característicos (módulo de elasticidade na fase elástica, tensão de transição de fases e módulo tangente da fase de endurecimento) e gerou-se curvas desses valores em função da massa específica. Essas curvas podem ser observadas nas Figuras 9, 10 e 11.

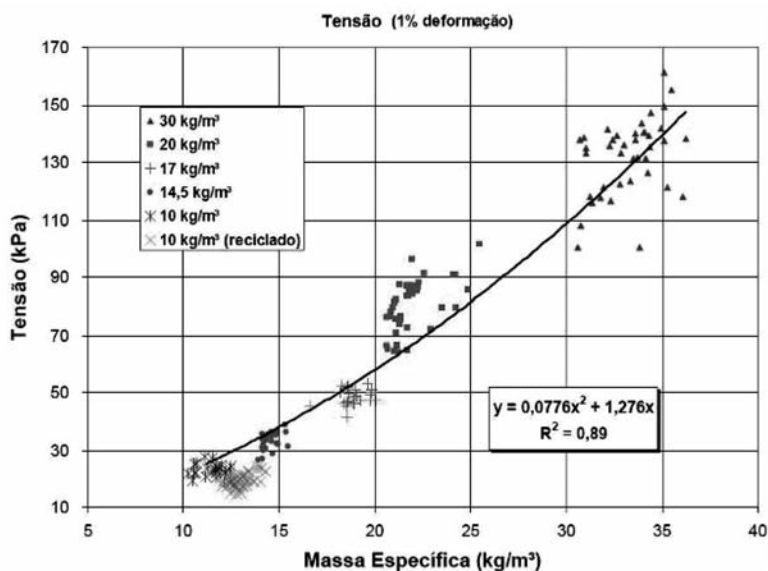


Fig. 8 – Relação entre resistência (correspondente a deformação de 1%) e massa específica para diversas amostras de EPS.

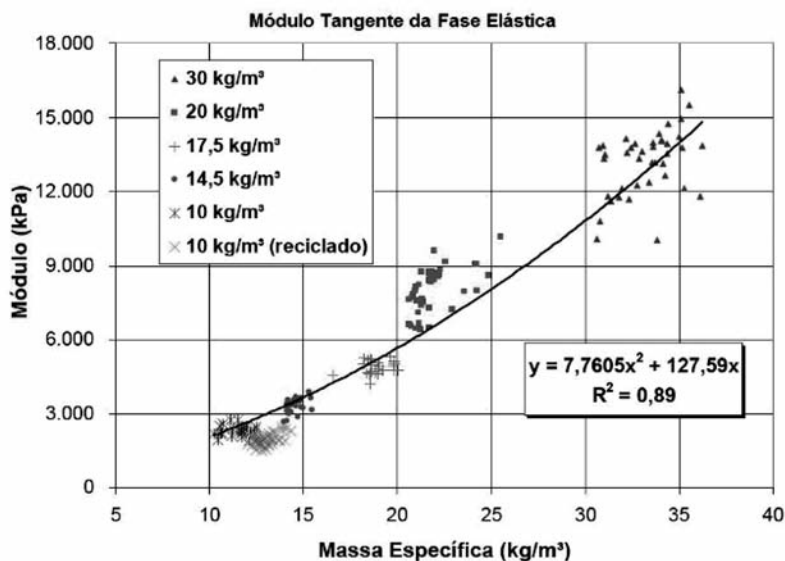


Fig. 9 – Relação entre o módulo de elasticidade da fase elástica do material e sua massa específica para diversas amostras de EPS.

Por meio destas Figuras, nota-se novamente a ótima correlação existente com a massa específica. Percebe-se também a redução do módulo na fase de endurecimento em relação à elástica. Essa característica deve-se também à redução da inclinação da curva de compressão do material após a tensão de transição.

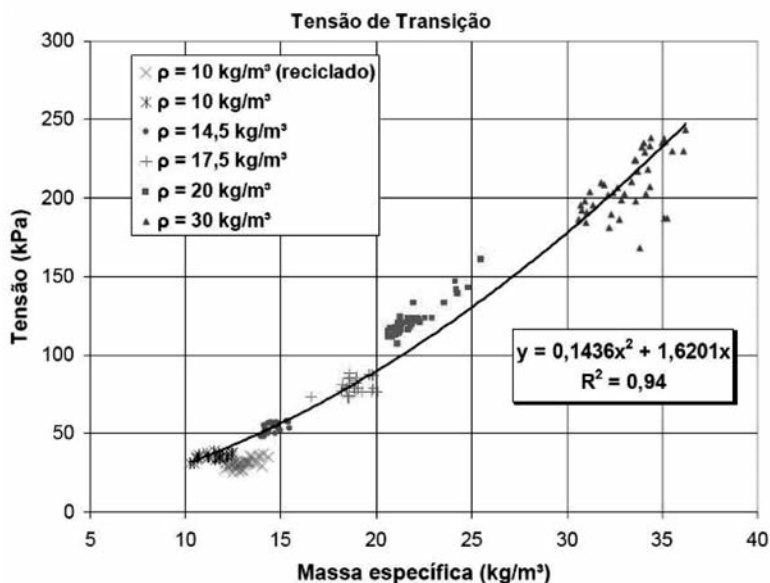


Fig. 10 – Relação entre a tensão de transição da fase elástica para a fase plástica do material e sua massa específica para diversas amostras de EPS.

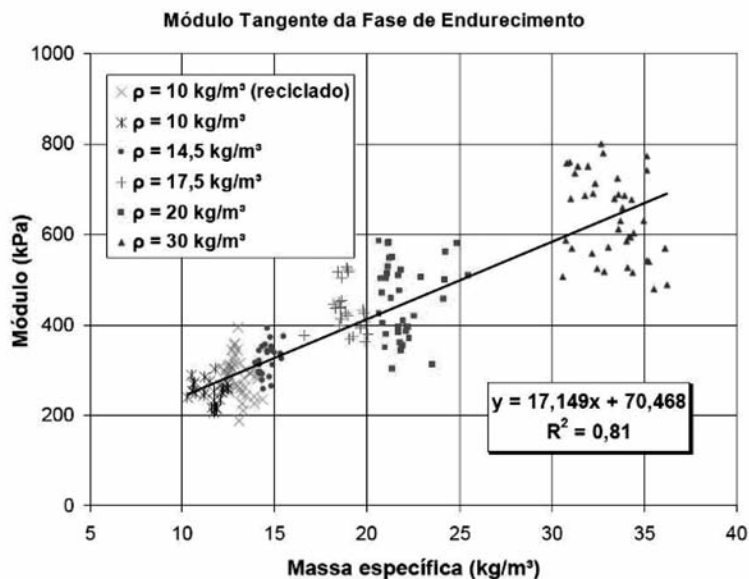


Fig. 11 – Relação entre o módulo tangente da fase de endurecimento do material e sua massa específica para diversas amostras de EPS.

3.1.1 – Influência da Temperatura na Compressão Simples

A influência da temperatura na resistência (para uma deformação de 10 %) de polímeros e plásticos é verificada para diversos materiais, e para o poliestireno expandido pode ser verificado

na Figura 12. As temperaturas utilizadas variaram de 23°C a 72 °C com incrementos de 7 °C. O valor da resistência é a média de três ensaios realizados para cada temperatura.

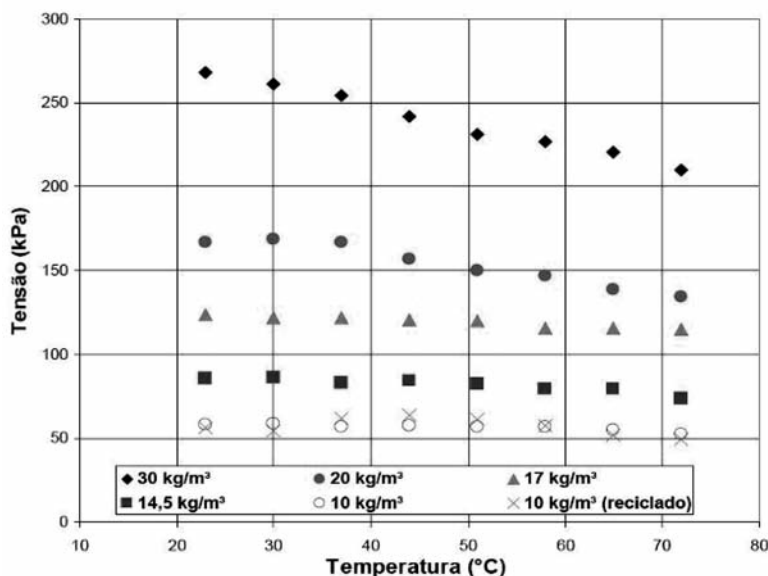


Fig. 12 – Resistência (10 % de deformação) de amostras de EPS para diferentes valores de temperaturas.

Da análise da Figura 12 nota-se uma grande influência da temperatura na resistência para amostras de EPS com valores de massa específica superiores (20 e 30 kg/m³), atingindo reduções de resistência da ordem de 30 % para variações da temperatura em cerca de 50°. Entretanto, o material com menor massa específica não é significativamente afetado pela temperatura. Esta disfunção no resultado por ser explicada pela própria massa específica. Amostras com valores mais elevados de massa específica possuem uma menor quantidade de vazios (preenchidos com ar) interno, e conseqüentemente uma maior parcela do polímero que é significativamente mais afetado pela variação da temperatura do que o ar dos vazios. Por outro lado, uma menor massa específica possui um maior valor de vazios e uma menor parcela do polímero, sendo menos influenciada no todo pela temperatura.

3.2 – Ensaio de Compressão Uniaxial Cíclica

A Figura 13 exibe o resultado do ensaio de compressão cíclica na amostra de EPS em formato cúbico com 100 mm de lado de 20 kg/m³.

Observando a Figura 13, percebe-se que, como o corpo de prova que foi submetido a uma tensão dentro da faixa elástica do material, praticamente não sofreu uma deformação acumulada ao longo dos 10.000 ciclos em que a amostra foi submetida. Por outro lado, pode-se notar que a amostra que foi submetida a uma tensão acima da tensão elástica (na fase plástica) sofreu uma grande deformação acumulada.

Para uma melhor análise gerou-se, para este mesmo corpo de prova, um gráfico da deformação acumulada pelos ciclos de aplicação de carga. Este gráfico pode ser observado na Figura 14.

Observa-se da Figura 14 a extrema plastificação ao longo dos 10.000 ciclos que a amostra sofre quando solicitada com uma carga dentro da faixa plástica. Por outro lado, para uma solicitação na faixa elástica o material praticamente não exibe deformação acumulada.

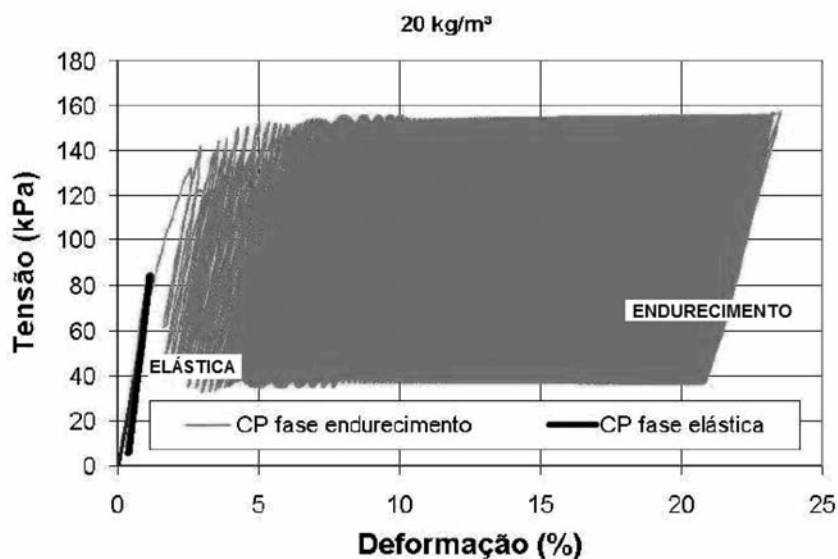


Fig. 13 – Curva tensão x deformação da amostra de EPS de 20 kg/m³.

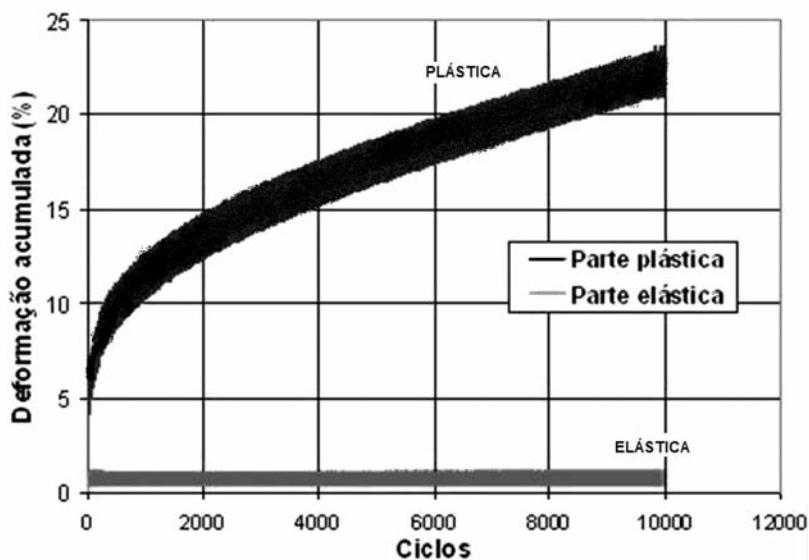


Fig. 14 – Deformação acumulada pelos ciclos da amostra de EPS de 20 kg/m³.

A Figura 15 exibe o resultado do ensaio de compressão cíclica com as outras amostras do material.

Nota-se desta Figura que todas as amostras possuem o mesmo comportamento sofrendo uma plastificação excessiva apenas quando solicitada por uma carga acima do limite elástico.

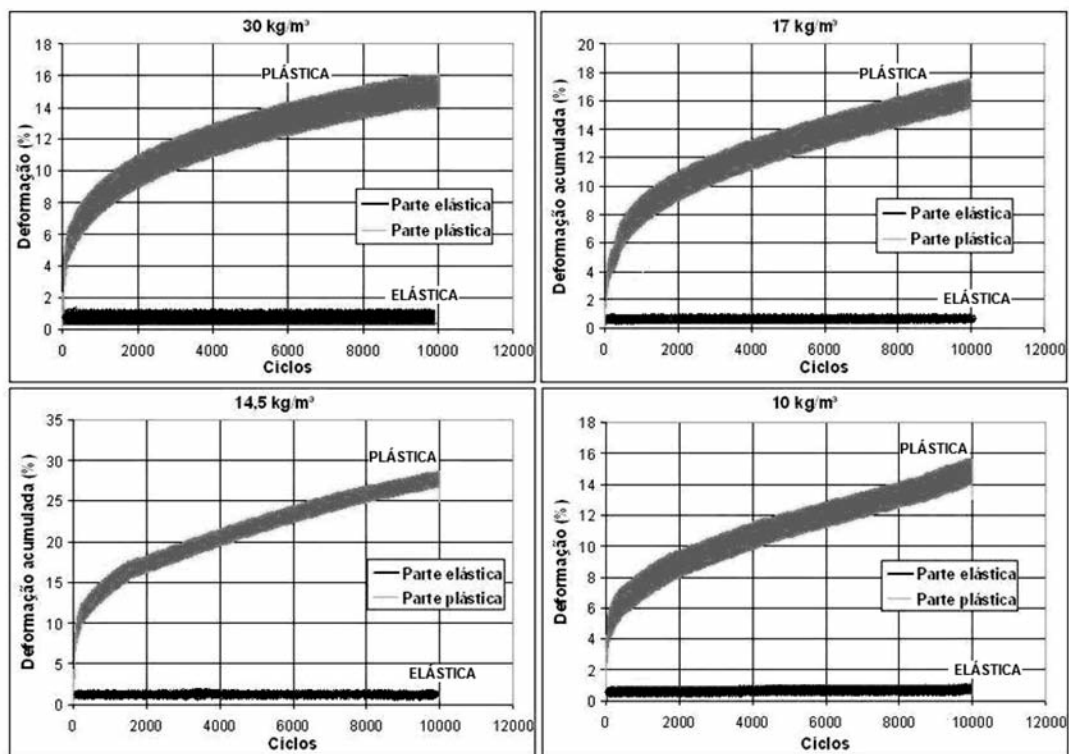


Fig. 15 – Resultado do ensaio de compressão cíclica com as outras amostras de EPS.

3.3 – Ensaio de Cisalhamento Direto da Interface

A Figura 16 exibe os resultados dos ensaios de cisalhamento direto da interface na amostra de EPS de 20 kg/m³ para confinamentos de 10, 20, 30 e 40 kPa.

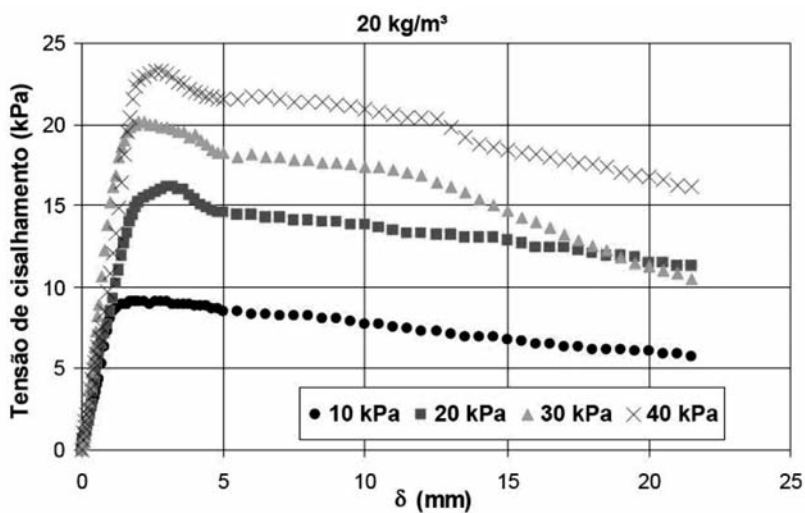


Fig. 16 – Ensaio de cisalhamento direto realizado na amostra de EPS de 20 kg/m³.

O comportamento do EPS no cisalhamento se assemelha ao comportamento de amostras de solo, conforme visualizado na Figura 16. Há um valor de pico para a tensão de cisalhamento seguido de uma redução da tensão devido a uma alteração da superfície de contato dos blocos.

Dos resultados obtidos para o valor de pico, traçou-se as envoltórias de resistência (Figura 17).

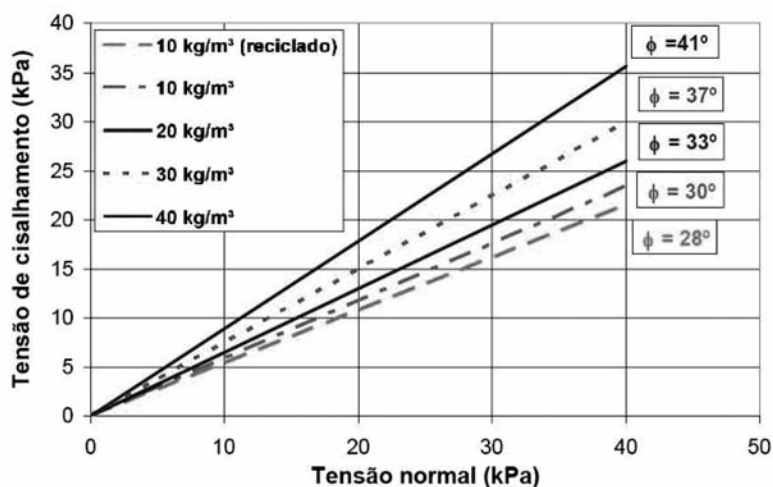


Fig. 17 – Envoltórias de pico das amostras de EPS através de ensaios de cisalhamento direto.

Analisando-se a Figura 17, nota-se que o material possui uma envoltória típica para valores de massa específica mais elevados (30 e 40 kg/m³). Mas, para as massas específicas de 10 kg/m³ (virgem e reciclada) e 20 kg/m³, a envoltória é ligeiramente curva para elevados valores de tensão confinante. Pode-se verificar também que para maiores valores de tensão normal as amostras de EPS com maiores massas específicas possuem maior resistência, enquanto para menores valores de confinamento as amostras de menores massas específicas possuem maior resistência. Esse fenômeno se deve a maior plastificação sofrida pelas amostras de menor massa específica (menor resistência à compressão) para altas cargas de confinamento. Para valores de confinamento reduzido (sem plastificação excessiva) a sua superfície com maior rugosidade incrementa o atrito entre os blocos, porém, para confinamentos mais elevados a plastificação é excessiva em ambos os blocos, tornando a transferência de carga menos eficiente e, conseqüentemente, reduzindo o atrito de interface. A Figura 18, uma relação entre o ângulo de atrito e a tensão de confinamento, exhibe mais claramente esse comportamento.

Nota-se, de acordo com esta Figura que, com o aumento do confinamento há uma redução do valor do ângulo de atrito das amostras de massa específica mais baixa (10 e 20 kg/m³). Para as amostras de massa específica mais altas (30 e 40 kg/m³) essa redução não é evidenciada nem para tensões mais elevadas como 50 e 60 kPa. Devido a este fenômeno, apenas as amostras de EPS de 30 e 40 kg/m³ foram submetidas a tensões normais de 50 e 60 kPa. Por outro lado, para valores de confinamento menores (como 10 kPa) as amostras de massa específica reduzidas possuem valor de ângulo de atrito maiores devido a maior rugosidade da superfície destas.

Da análise dos resultados também se observou que há uma proporcionalidade entre o ângulo de atrito obtido por este ensaio e a massa específica do material. Para valores superiores de massa específica, há um aumento do ângulo de atrito. Dessa forma foi possível determinar uma relação entre o ângulo de atrito médio dos ensaios com cada amostra pela média das massas específicas dos corpos de prova. Esta relação forneceu uma correlação linear entre essas duas grandezas. A Figura 19 exhibe a curva obtida bem como a equação de melhor ajuste.

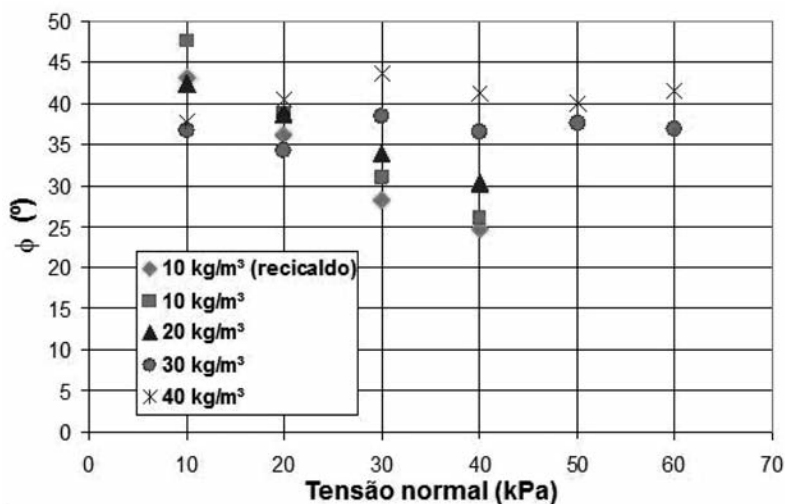


Fig. 18 – Redução do ângulo de atrito em amostras de baixa densidade com o aumento da tensão normal.

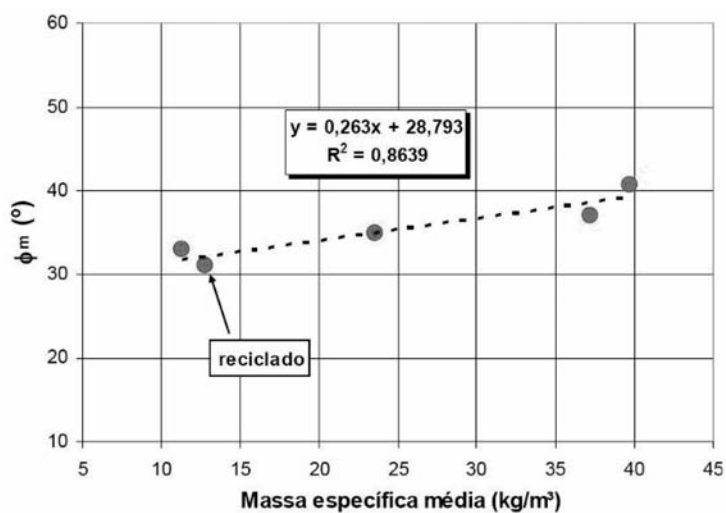


Fig. 19 – Relação entre o ângulo de atrito médio e a massa específica.

Pela Figura 19 nota-se a proporcionalidade entre o ângulo de atrito e a massa específica. O material reciclado, apesar de possuir uma massa específica maior, possui características mecânicas inferior ao material virgem. Observa-se também o valor considerável do ângulo de atrito para o material, que atinge um valor superior a 40 ° no caso do material de 40 kg/m³.

3.4 – Ensaio de Absorção de Água

A Figura 20 exhibe os resultados dos ensaios de absorção de água para 24 horas de submersão e o valor do teor de umidade higroscópico para cinco amostras de EPS com massa específica de 30 kg/m³ e formato cúbico com dimensões de 50 mm de lado.

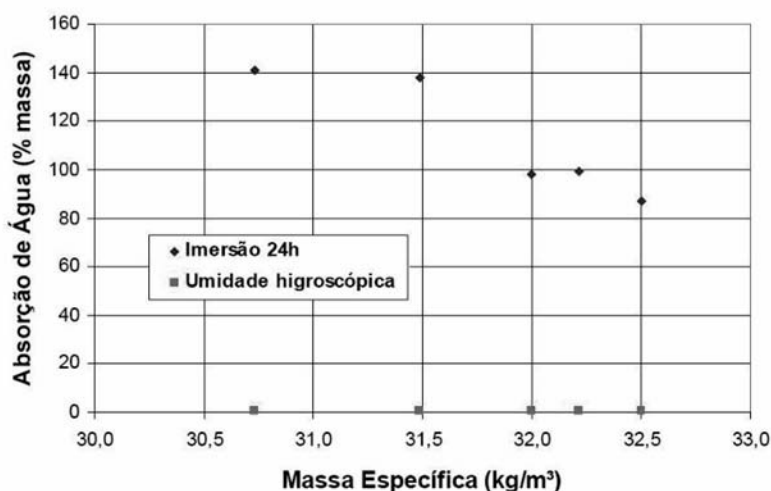


Fig. 20 – Resultado do ensaio de absorção de água com amostras de EPS com massa específica de 30 kg/m³ e formato cúbico com 50 mm de lado

Analisando-se esta Figura nota-se nitidamente que com o aumento da massa específica há um decréscimo da massa de água absorvida pelo material. Esse fenômeno pode ser explicado pela redução de vazios de amostras de maior densidade. Com um menor valor de vazios, há menos espaço para a absorção de água, reduzindo o valor registrado.

Cerca de 50 ensaios de absorção de água foram realizados com os mais variados valores de massa específica do material. Deste conjunto de dados, gerou-se um gráfico com os resultados de absorção máxima de água pela massa específica apresentado na Figura 21 e um com o teor de umidade higroscópica pela massa específica apresentado na Figura 22. São apresentadas também nestas, uma correlação entre as grandezas comparadas.

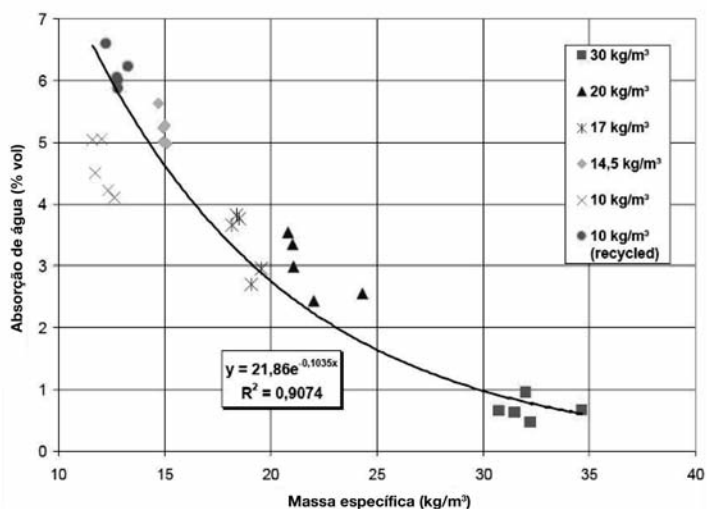


Fig. 21 – Resultados dos ensaios de absorção máxima de água com amostras de EPS em relação ao volume e correlação dessas com a massa específica.

Observa-se pela Figura 21 que a absorção máxima de água das amostras, em um período de 24 horas, não constituiu, inicialmente, um valor elevado, com uma absorção inferior a 7 % do volume dos corpos de prova. Contudo, se a análise for tecida pela elevação da massa específica do conjunto EPS mais água, esta absorção se mostra extremamente excessiva, gerando um valor de massa específica do conjunto da ordem 90 kg/m³. Com esta elevação perde-se uma característica de extremo valor do geoexpandido de EPS que é sua densidade reduzida, podendo inviabilizar sua utilização. Portanto, se faz necessário na prática a previsão de um sistema de impermeabilização funcional para evitar o contato direto dos blocos de EPS com a água. Da mesma forma, um sistema de drenagem adequado deve ser previsto, evitando este contato prejudicial e promovendo uma eficiente drenagem da água nas obras, impedindo também eventuais empuxos na estrutura.

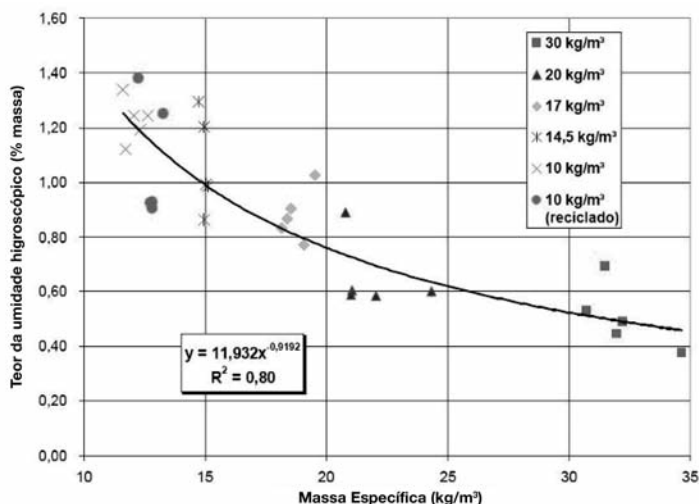


Fig. 22 – Resultados do teor de umidade higroscópica de amostras de EPS em relação a massa e correlação dessas com a massa específica.

O teor de umidade higroscópica do material, observado na Figura 22, possui um valor extremamente reduzido, inferior a 1,50 % da massa do corpo de prova.

Em ambos os casos, as correlações geradas com a massa específica possuem uma boa aproximação com os resultados obtidos nos ensaios, podendo ser utilizadas para se estimar um acréscimo de carga na fundação e outras influências em casos práticos.

3.5 – Ensaio de Permeabilidade

O Quadro 3 exibe o resultado do ensaio de permeabilidade com quatro amostras de massa específica diferentes de EPS. Cada corpo de prova permaneceu por um tempo mínimo de 48 horas para sua completa saturação e obtenção da estabilização do fluxo. Na determinação da permeabilidade, realizou-se um total de 3 ensaios por amostra na obtenção desse parâmetro.

Observa-se pelo Quadro 3, mais uma vez, a influência da massa específica nas propriedades do material. O valor da permeabilidade é inversamente proporcional à massa específica. Nota-se também a grande variabilidade desse parâmetro em relação ao valor da massa específica. Com variação desta de 10 para 30 kg/m³ (3 vezes), há uma variação de 3,66 x 10⁻³ para 1,32 x 10⁻⁶ (cerca de 1.000 vezes) no caso da permeabilidade média.

Quadro 3 – Resultado do ensaio de permeabilidade.

EPS (kg/m³)	Massa Específica (kg/m³)	k (cm/s)				Desvio Padrão	Variação (%)
		Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Médio		
30	33,2	1,42E-06	1,29E-06	1,25E-06	1,32E-06	8,89E-08	6,73
20	22,2	2,39E-03	2,22E-03	2,10E-03	2,24E-03	1,46E-04	6,51
10	11,7	3,78E-03	3,65E-03	3,56E-03	3,66E-03	1,11E-04	3,02
10 (reciclado)	13	1,52E-02	1,35E-02	1,32E-02	1,40E-02	1,08E-03	7,70

Para uma melhor análise dos resultados, gerou-se um gráfico com esses valores. Por meio dele, obteve-se uma correlação entre a permeabilidade e a massa específica. O gráfico com a correlação pode ser observado na Figura 23.

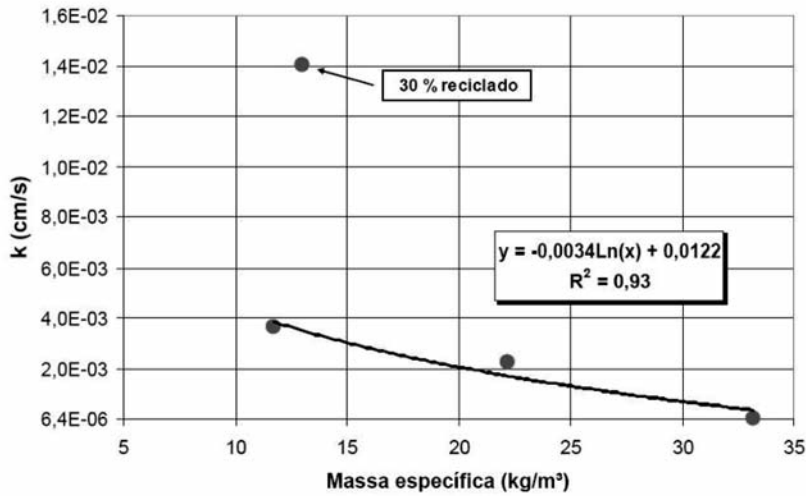


Fig. 23 – Resultado do ensaio de permeabilidade e correlação entre essa e a massa específica.

Nota-se pela Figura 23 que a amostra com material reciclado apesar de possuir uma massa específica superior, apresenta um coeficiente de permeabilidade maior. Isso se deve a composição do material reciclado que possui uma porosidade mais elevada.

Em vista desses resultados, podem-se obter utilizações com diferentes funções com o material, desde barreiras impermeabilizantes até drenos.

4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram realizados diversos ensaios mecânicos e hidráulicos em amostras de EPS de 10 (virgem e contendo material reciclado), 20, 14,5, 17, 20, 30 e 40 kg/m³ visando o estudo, a caracterização e a avaliação do material para seu emprego na Engenharia Geotécnica. As principais conclusões desse artigo são:

- Por meio dos ensaios de compressão uniaxial simples, concluiu-se que o material possui um pa-tamar elástico bem definido para uma deformação inferior a 2 %. A resistência (para uma de -

formação de 10 %) é alta, apesar da baixa massa específica do material. A relação entre a massa específica e as resistências para 1 e 10 % obtidas possuem um coeficiente de correlação elevado;

- A proposição de caracterizar o material por três parâmetros chave na solicitação à compressão (módulos tangente das fases elástica e de endurecimento, e tensão de transição) se mostrou simples e eficaz, podendo ser adotada e atribuída em ensaios posteriores;
- Com os ensaios de compressão uniaxial com variação da temperatura, verificou-se uma influência mais sensível da temperatura na resistência do EPS de 20 e 30 kg/m³, com decréscimos de cerca de 15 % e 25 %, respectivamente;
- A análise dos resultados de compressão uniaxial cíclica permitiu verificar a plastificação excessiva (deformação acumulada) sofrida pelo EPS ao longo dos ciclos quando solicitado por uma tensão acima do limite elástico;
- O ensaio de cisalhamento direto da interface mostrou que o comportamento do EPS se assemelha ao de uma amostra de solo, com um valor de pico bem definido. Os valores de ângulo de atrito obtidos foram altos, atingindo valores superiores a 40°. Notou-se a influência diretamente proporcional da massa específica nas envoltórias de resistência e no valor dos ângulos de atrito, obtendo-se uma relação com um bom ajuste;
- Por meio dos resultados dos ensaios de absorção de água, observou-se uma aparente absorção reduzida após 24 horas. Contudo, a elevação da massa específica por conta desta absorção é significativa, podendo inviabilizar a aplicação dos blocos de EPS;
- Do ensaio de permeabilidade verificou-se a grande variabilidade desta propriedade do material com a massa específica, obtendo-se permeabilidades compatíveis tanto com materiais drenantes como materiais de barreiras impermeáveis.
- Como observado dos ensaios realizados, a propriedade mais importante do EPS é a massa específica, com significante interferência em todas as características mecânicas e hidráulicas do material.

Por fim, destaca-se que o geoexpandido de EPS se mostra um material extremamente atraente para o emprego na Engenharia Geotécnica. Apesar de possuir um custo unitário relativamente elevado, sua utilização pode ser vantajosa pela facilidade e rapidez de execução em aterros, reduzindo drasticamente custos associados a prazos e a outros processos conexos de aterros convencionais. Além disto, sua utilização pode substituir com ampla eficiência e segurança tecnologias clássicas de construções sobre solos moles.

5 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento do mestrado do primeiro autor e ao Departamento de Geotecnia, e em especial ao Laboratório de Geossintéticos, ambos da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC – USP) pelo suporte técnico e infra-estrutura.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM C 272 (1996). *Standard Test Method for Water Absorption of Core Materials for Structural Sandwich Constructions*. In: Annual book of ASTM standards. New York.

- ASTM C 303 (1996). *Standard Test Method for Dimensions and Density of Performed Block – Type Thermal Insulation*. In: Annual book of ASTM standards. New York.
- ASTM D 1621 (2000). *Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics*. In: Annual book of ASTM standards. New York.
- ASTM D 3080 (1998). *Standard Test Method for Direct Shear Tests of Soils Under Consolidate Drained Conditions*. In: Annual book of ASTM standards. New York.
- Athanasopoulos, G. A.; Pelekis, P. C.; Xenaki, V. C. (1999). *Dynamic Properties of EPS Geofoam: An Experimental Investigation*. *Geosynthetic International*, v. 6, n. 3, pp. 171-194.
- Avesani Neto, J. O. (2008). *Caracterização do Comportamento Geotécnico do EPS através de Ensaio Mecânicos e Hidráulicos*. Dissertação de Mestrado da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 227 p.
- Bueno, B. S. (2005). *Avaliação Experimental do Comportamento Mecânico de Amostras de EPS*. Relatório Técnico, Laboratório de Geossintéticos, Departamento de Geotecnia EESC – USP. 13 p.
- Duskov, M. (1997). *Materials Research on EPS20 and EPS15 under Representative Conditions in Pavement Structures*. *Geotextiles and Geomembranes*. n. 15, pp. 147-181.
- Horvath, J. S. (1994). *Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam: An Introduction to Material Behavior*. *Geotextiles and Geomembranes*. n. 13, pp. 263-280.
- Stark, T. D.; Arellano, D.; Horvath, J. S.; Leshchinsky, D. (2004). *Geofoam Applications in the Design and Construction of Highway Embankments*. NCHRP Web Document 65 (Project 24-11). TRB of the National Academies (<http://www.national-academies.org>).
- Yeo, S. S.; Hsuan, Y. G. (2006). *The Compressive Creep Behavior of an Expanded Polystyrene Geofoam*. 8º Congresso Internacional de Geossintéticos. Yokohama, Japão. pp. 1639-1642.