

4 Resultados e Análises

Neste capítulo são apresentados os resultados e as análises dos ensaios descritos no capítulo 3 para as amostras dos três tipos de solo e misturas solo-EPS. Inicialmente serão expostos e analisados os resultados realizados em argila e logo após, os ensaios executados em areia e na bentonita, todos para a avaliação do comportamento mecânico dos materiais citados reforçados e não reforçados com EPS. Esses ensaios têm o objetivo de melhorar a compreensão do comportamento do material em estudo.

4.1. Ensaio de Caracterização Física

4.1.1.

Solo Argiloso

A caracterização física do solo argiloso utilizado no presente estudo foi obtida por Ramírez (2012), que utilizou este em sua pesquisa.

Peso Específico (Gs)

O valor do Gs para o solo argiloso foi obtido através da média aritmética de quatro determinações, sendo que a variação máxima foi de 1,1 %. O valor do Gs foi 2,72.

Análise Granulométrica

Na Figura 4.1 é apresentada a curva granulométrica obtida para o solo puro. Segundo Ramírez (2012), o ensaio de análise granulométrica do solo argiloso forneceu um comportamento comparável com o obtido em pesquisas precedentes. Assim, para amostras situadas em profundidades parecidas as porcentagens de material passantes na peneira #200 e retidas nesta, são similares.

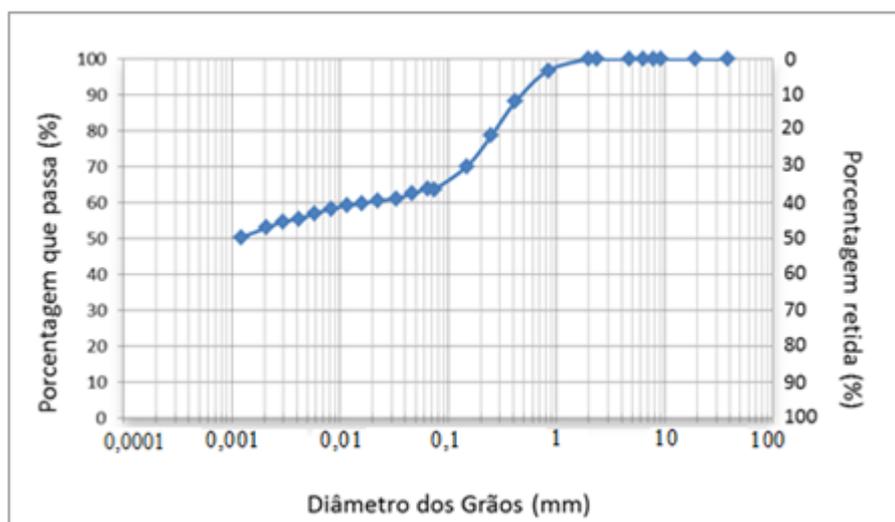


Figura 4.1 - Distribuição granulométrica do solo argiloso (Ramírez, 2012).

Limites de Atterberg

A partir dos resultados obtidos no laboratório, tem-se que o Limite de Liquidez do solo argiloso é igual a 53% e o Limite de Plasticidade igual a 39%, resultando em um Índice de Plasticidade ($IP = LL - LP$), igual a 14%. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), o solo em estudo é classificado como CH, correspondendo a uma argila arenosa de média plasticidade.

4.1.2.

Solo Arenoso

Índices Físicos

Este material caracteriza-se por ser uma areia média, limpa e mal-graduada. Durante a caracterização do material não se observou a presença de matéria orgânica. Os índices físicos do material são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Índices físicos do solo arenoso.

| Índices Físicos | Solo Arenoso |
|--|--------------|
| Densidade real dos grãos (Gs) | 2,65 |
| Coefficiente de uniformidade (C_u) | 1,9 |
| Coefficiente de curvatura (C_c) | 1,0 |
| Diâmetro efetivo (D_{10}) | 0,33 mm |
| Diâmetro médio (D_{50}) | 0,58 mm |
| Índice de vazios (<i>emínimo</i>) | 0,51 |
| Índice de vazios (<i>emáximo</i>) | 0,74 |

Análise Granulométrica

Na Figura 4.2 é apresentada a curva granulométrica obtida para a areia. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), as areias com menos de 5% de finos, apresentando $C_u < 6$ e $1 < C_c < 3$, como o material em questão, são classificadas como SP. Dessa maneira, se trata então de uma areia mal-graduada.

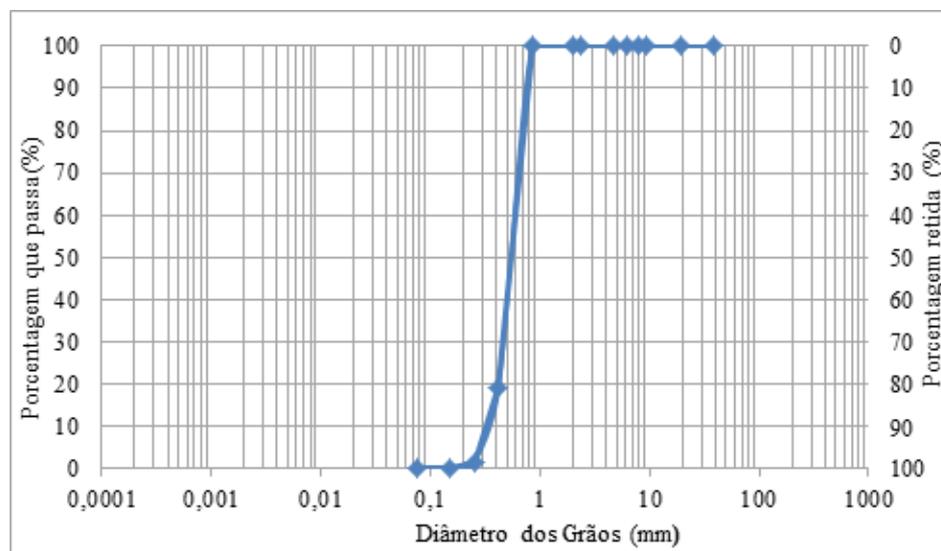


Figura 4.2 - Curva granulométrica do solo arenoso.

4.1.3.

Bentonita

Peso Específico (Gs)

O valor do Gs para a bentonita foi obtido através da média aritmética de quatro determinações, sendo que a variação máxima foi de 1,1 %. O valor do Gs encontrado foi 2,90.

Análise Granulométrica

A curva granulométrica da bentonita, obtida através de ensaios de sedimentação, está apresentada na Figura 4.3.

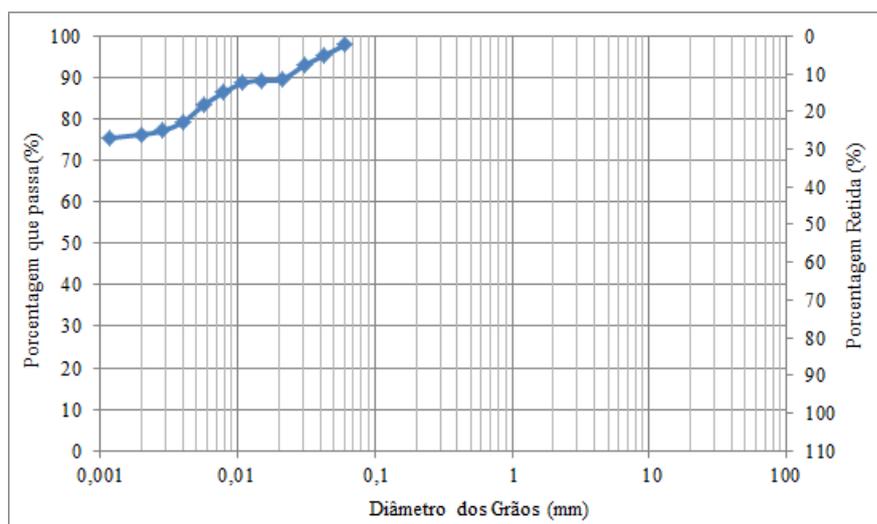


Figura 4.3 - Distribuição granulométrica da bentonita.

Limites de Atterberg

A partir dos resultados obtidos no laboratório, tem-se que o Limite de Liquidez da bentonita é igual a 368,4% e o Limite de Plasticidade igual a 53,7%, resultando em um Índice de Plasticidade igual a 314,7%.

4.2. Ensaio de Caracterização Mecânica

4.2.1. Solo Argiloso

Ensaio de Compactação Proctor Normal

Na Figura 4.4 é apresentada as curvas de compactação Proctor Normal obtidas para o solo argiloso e misturas. A partir do gráfico, observa-se que a inserção das pérolas de EPS diminui a massa específica seca máxima do material, e que este valor decresce à medida que o teor de EPS aumenta. A umidade ótima possui o mesmo comportamento.

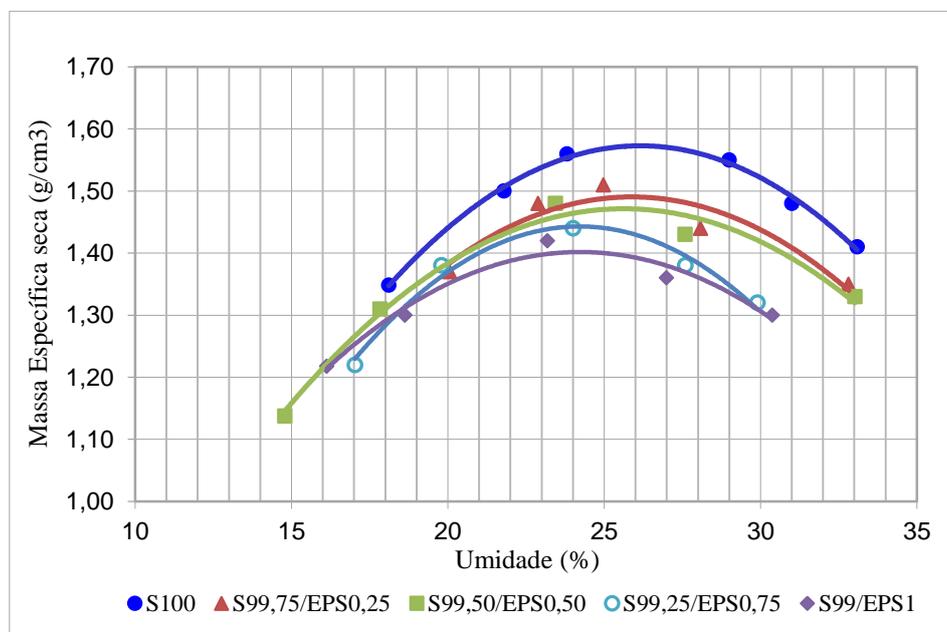


Figura 4.4 - Curvas de compactação Proctor Normal do solo argiloso e misturas.

Na Tabela 4.2 é apresentado um resumo dos valores de umidade ótima e massa específica seca máxima para o solo argiloso e misturas, determinados através da análise do gráfico.

Tabela 4.2 - Resultados dos ensaios de compactação Proctor Normal para o solo argiloso e misturas.

| Material/Mistura | Umidade ótima (%) | Massa Específica Seca Máxima (g/cm ³) |
|------------------|-------------------|---|
| S100 | 26,2 | 1,58 |
| S99,75/EPS0,25 | 26,0 | 1,49 |
| S99,50/EPS0,50 | 26,0 | 1,47 |
| S99,25/EPS0,75 | 24,5 | 1,44 |
| S99/EPS1 | 24,5 | 1,40 |

O mesmo solo argiloso já foi estudado em outras pesquisas, por exemplo, Beneveli (2002), na qual seu comportamento submetido ao ensaio de Compactação Proctor Normal apresentou resultado similar ao apresentado neste trabalho.

Ensaio Triaxiais CID

Os resultados dos ensaios triaxiais CID, em compressão axial, realizados em amostras de solo argiloso e misturas solo-EPS serão apresentados nesse item. As misturas possuíam teores de pérolas de EPS de 0,25%, 0,50%, 0,75% e 1%, em relação ao peso do solo seco, e as tensões efetivas que foram aplicadas em todos os casos são 50, 150 e 300 kPa.

As trajetórias, envoltórias de resistência e os parâmetros de resistência ao cisalhamento, assim como uma análise da influência do teor de pérolas de EPS no comportamento das amostras durante o cisalhamento, serão apresentadas nesse item.

- **Comportamento Tensão Desviadora e Variação Volumétrica versus Deformação Axial**

Na Figura 4.5 estão apresentadas as curvas tensão desviadora (σ_v) e variação volumétrica (ϵ_v) versus deformação axial (ϵ_a), correspondentes aos ensaios do tipo CID, para a matriz de solo argiloso, nas tensões confinantes efetivas de 50, 150 e 300 kPa.

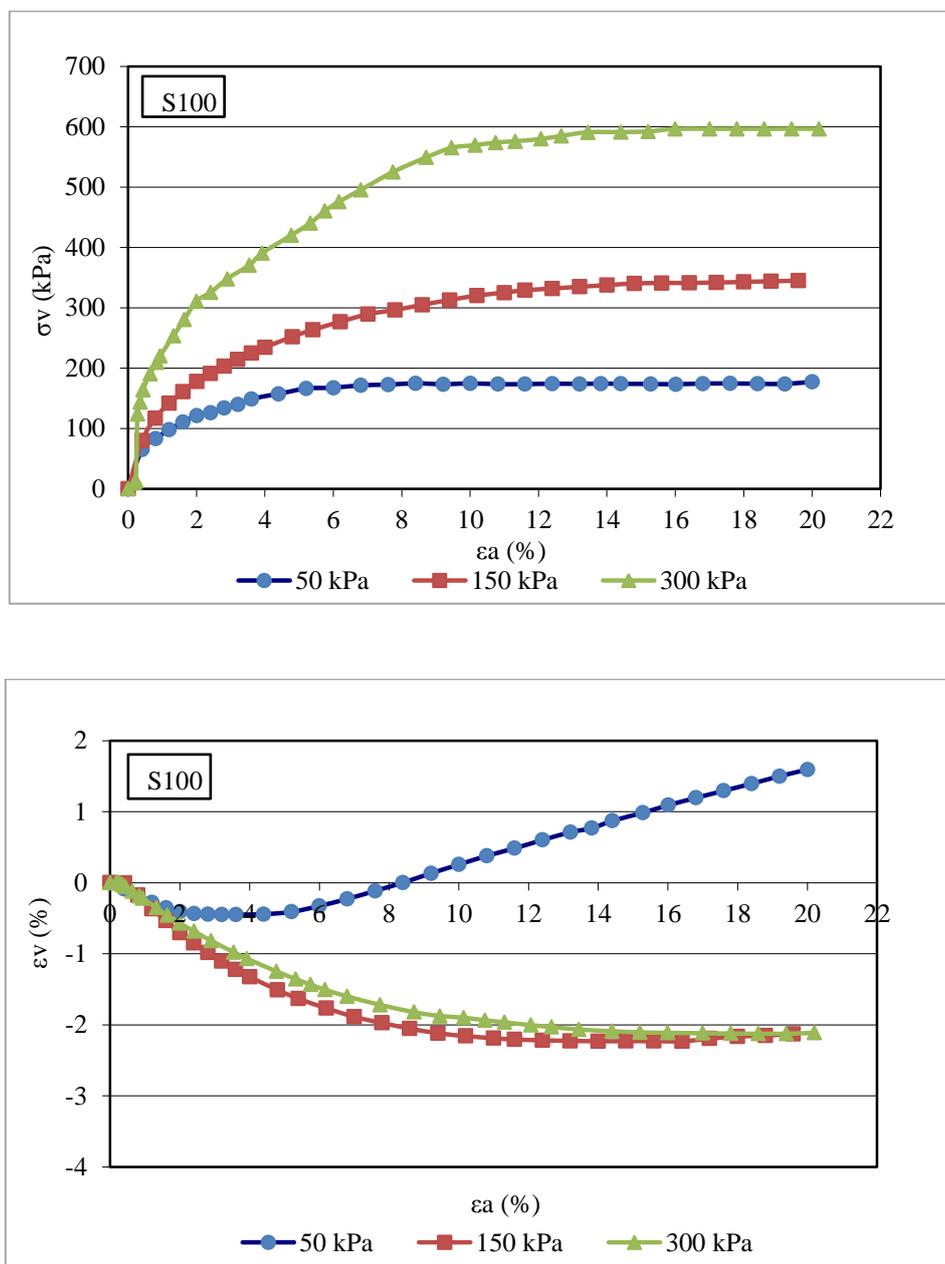


Figura 4.5 - Curvas da tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para o solo argiloso em ensaios triaxiais.

Na Figura 4.6 estão apresentadas as curvas tensão desviadora (σ_v) e variação volumétrica (ε_v) versus deformação axial (ε_a), correspondentes aos ensaios do tipo CID, para a mistura S99,75/EPS0,25 nas tensões confinantes efetivas de 50, 150 e 300 kPa.

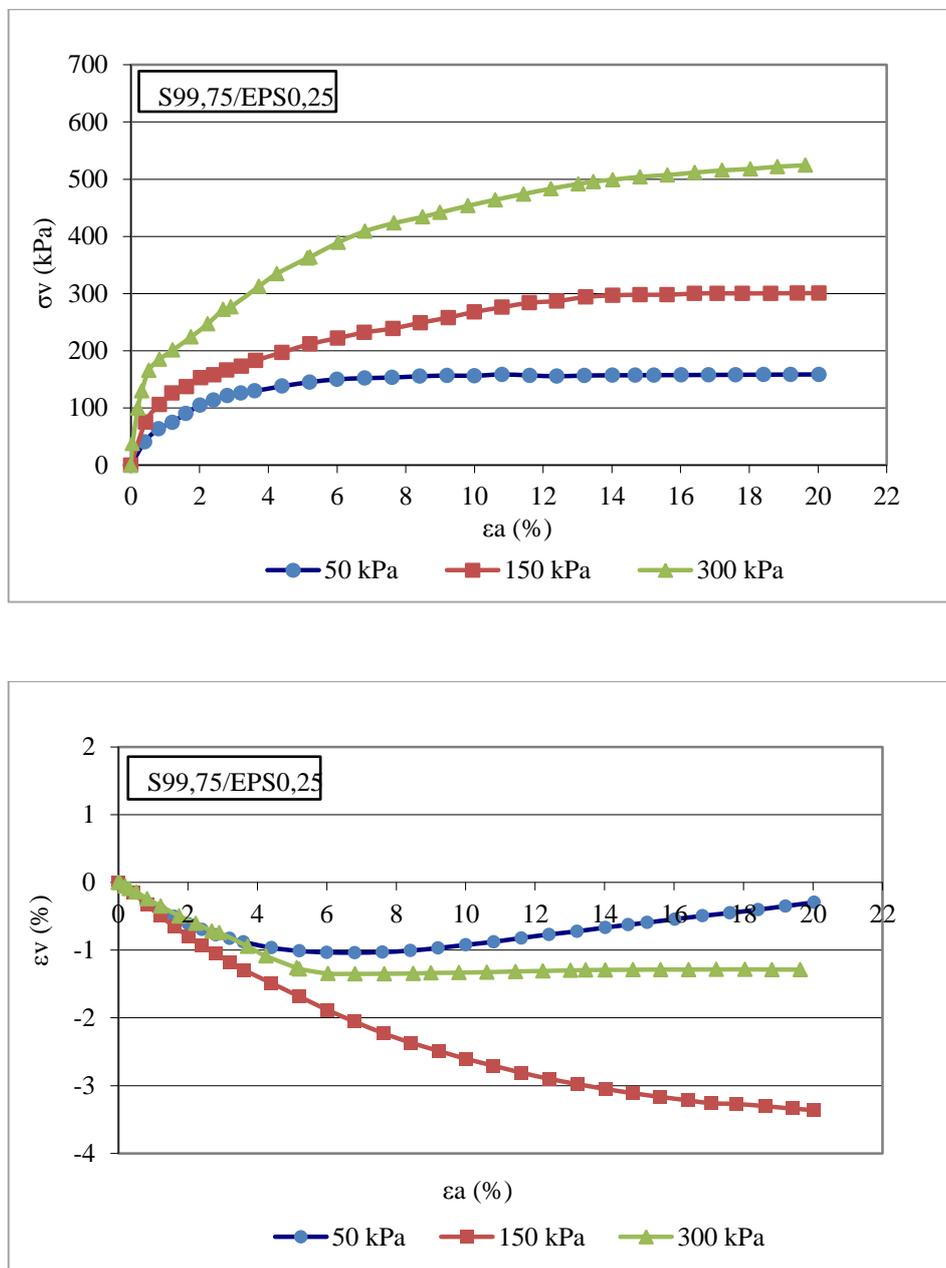


Figura 4.6 - Curvas da tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para a mistura S99,75/EPS0,25 em ensaios triaxiais.

Na Figura 4.7 estão apresentadas as curvas tensão desviadora (σ_v) e variação volumétrica (ε_v) versus deformação axial (ε_a), correspondentes aos ensaios do tipo CID, para a mistura S99,50/EPS0,50 nas tensões confinantes efetivas de 50, 150 e 300 kPa.

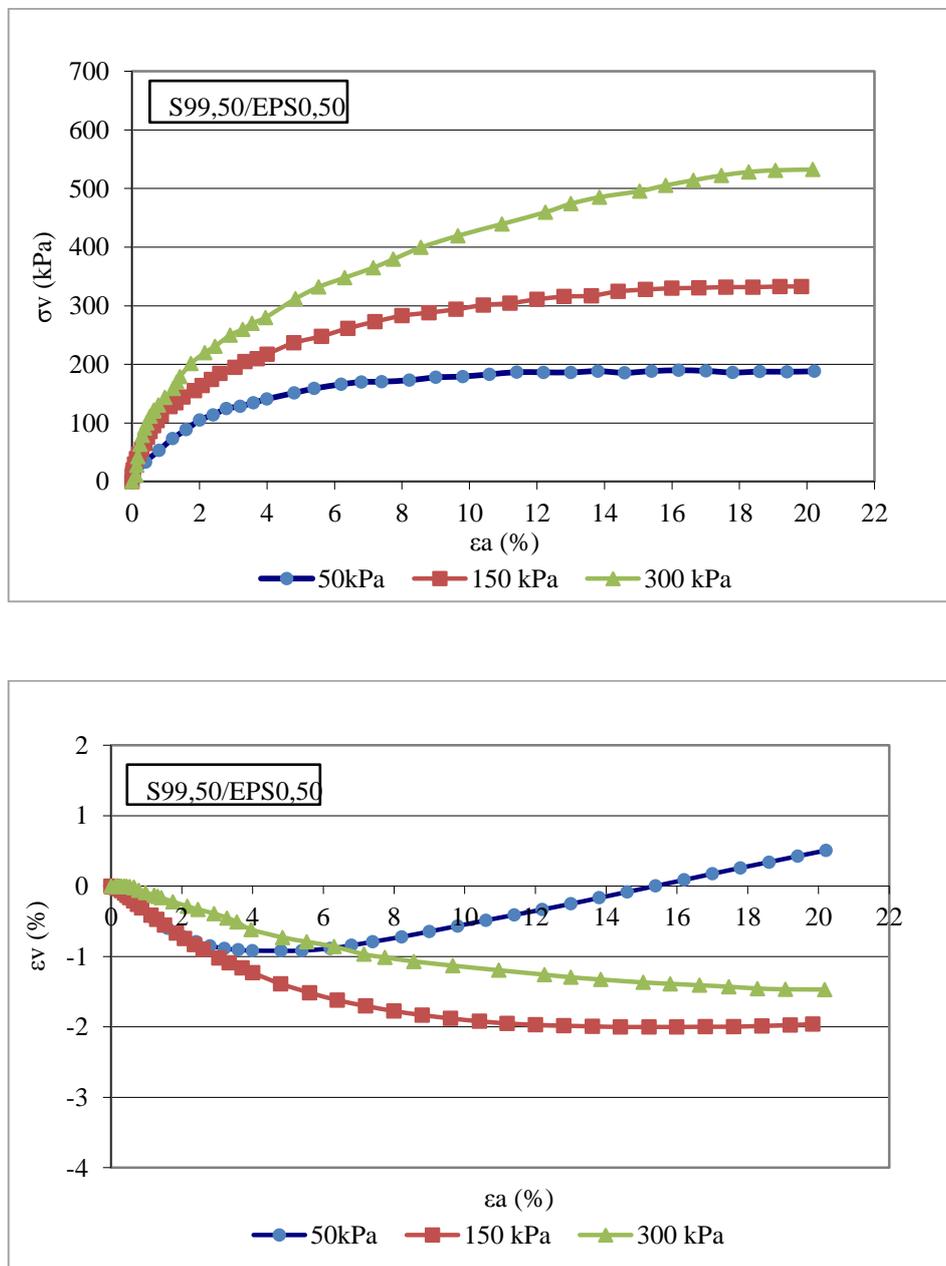


Figura 4.7 - Curvas da tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para a mistura S99,50/EPS0,50 em ensaios triaxiais.

Na Figura 4.8 estão apresentadas as curvas tensão desviadora (σ_v) e variação volumétrica (ε_v) versus deformação axial (ε_a), correspondentes aos ensaios do tipo CID, para a mistura S99,25/EPS0,75 nas tensões confinantes efetivas de 50, 150 e 300 kPa.

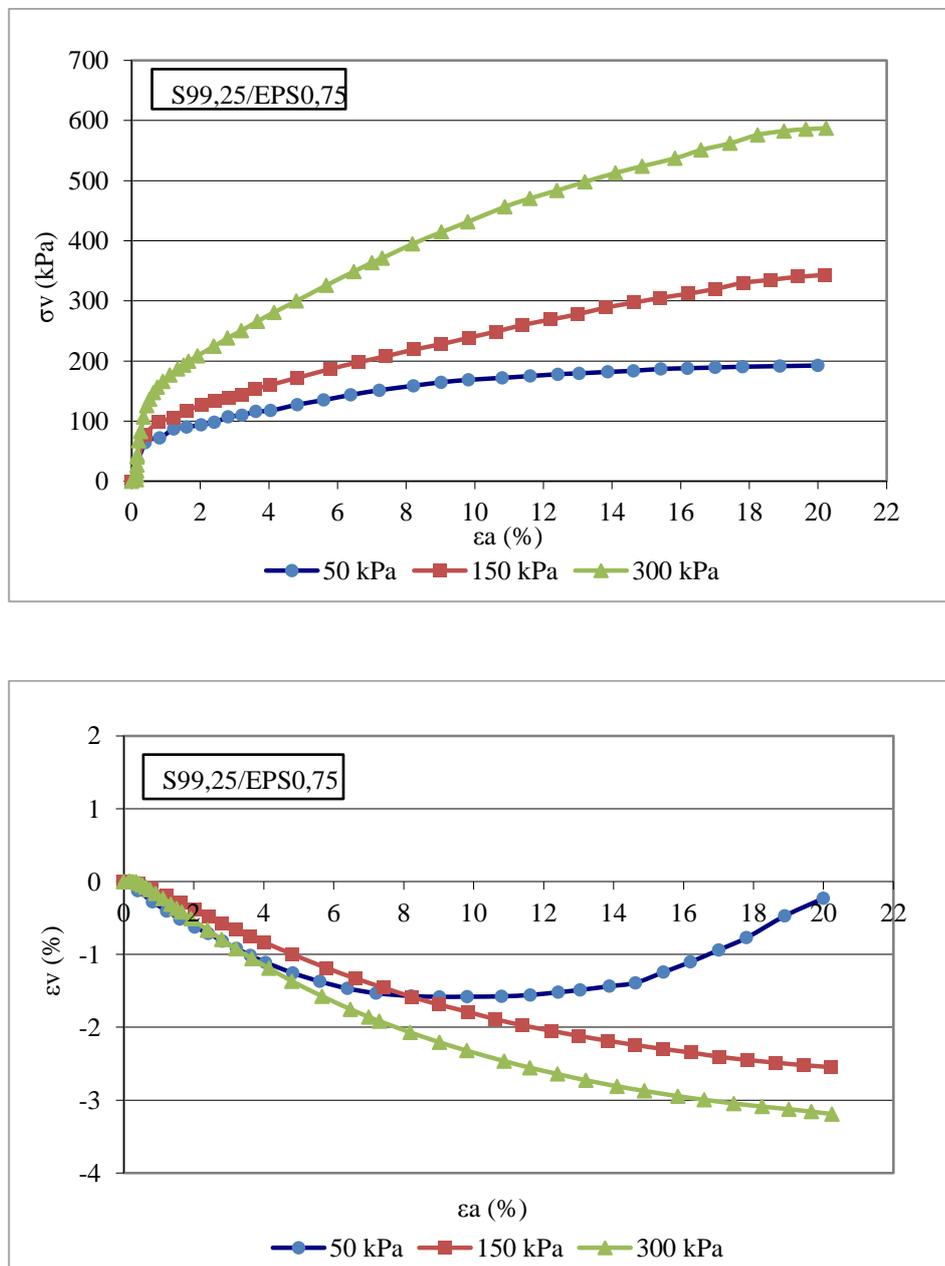


Figura 4.8 - Curvas da tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para a mistura S99,25/EPS0,75 em ensaios triaxiais.

Na Figura 4.9 estão apresentadas as curvas tensão desviadora (σ_v) e variação volumétrica (ϵ_v) versus deformação axial (ϵ_a), correspondentes aos ensaios do tipo CID, para a mistura S99/EPS1 nas tensões confinantes efetivas de 50, 150 e 300 kPa.

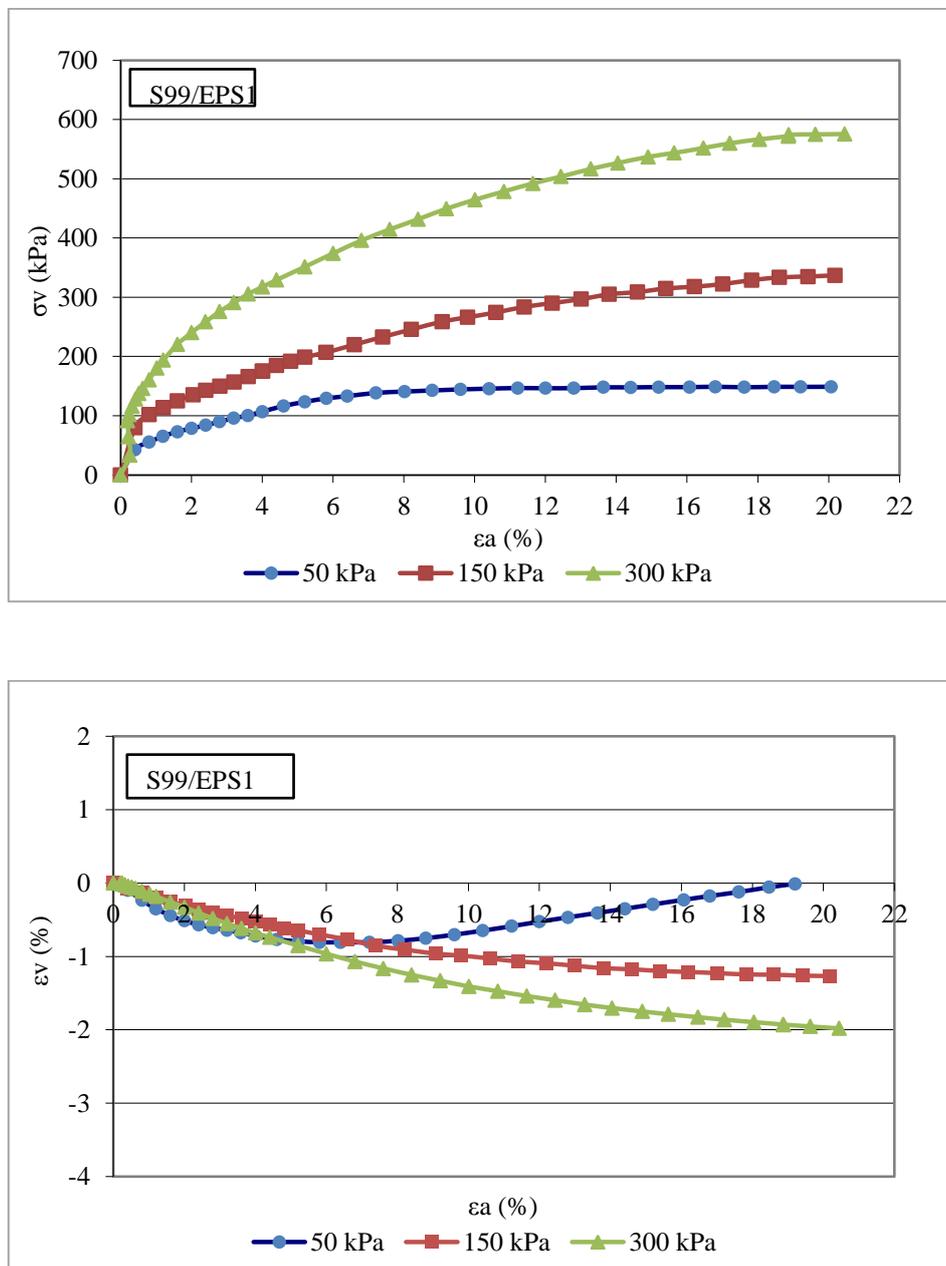


Figura 4.9 - Curvas da tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para a mistura S99/EPS1 em ensaios triaxiais.

• Influência do Teor de Pérolas de EPS

Neste item são apresentadas as curvas de tensão desviadora e variação volumétrica versus deformação axial do solo puro e das misturas, correspondentes aos ensaios do tipo CID em compressão axial, nas tensões confinantes efetivas de 50, 150 e 300 kPa, sendo que agora é feita uma comparação em relação ao teor de pérolas de EPS. Dessa maneira, serão apresentadas as curvas do solo puro com cada tipo de mistura.

Na Figura 4.10 estão apresentadas as curvas da tensão desviadora e variação volumétrica versus deformação axial para as amostras de solo argiloso (S100) e mistura S99,75/EPS0,25.

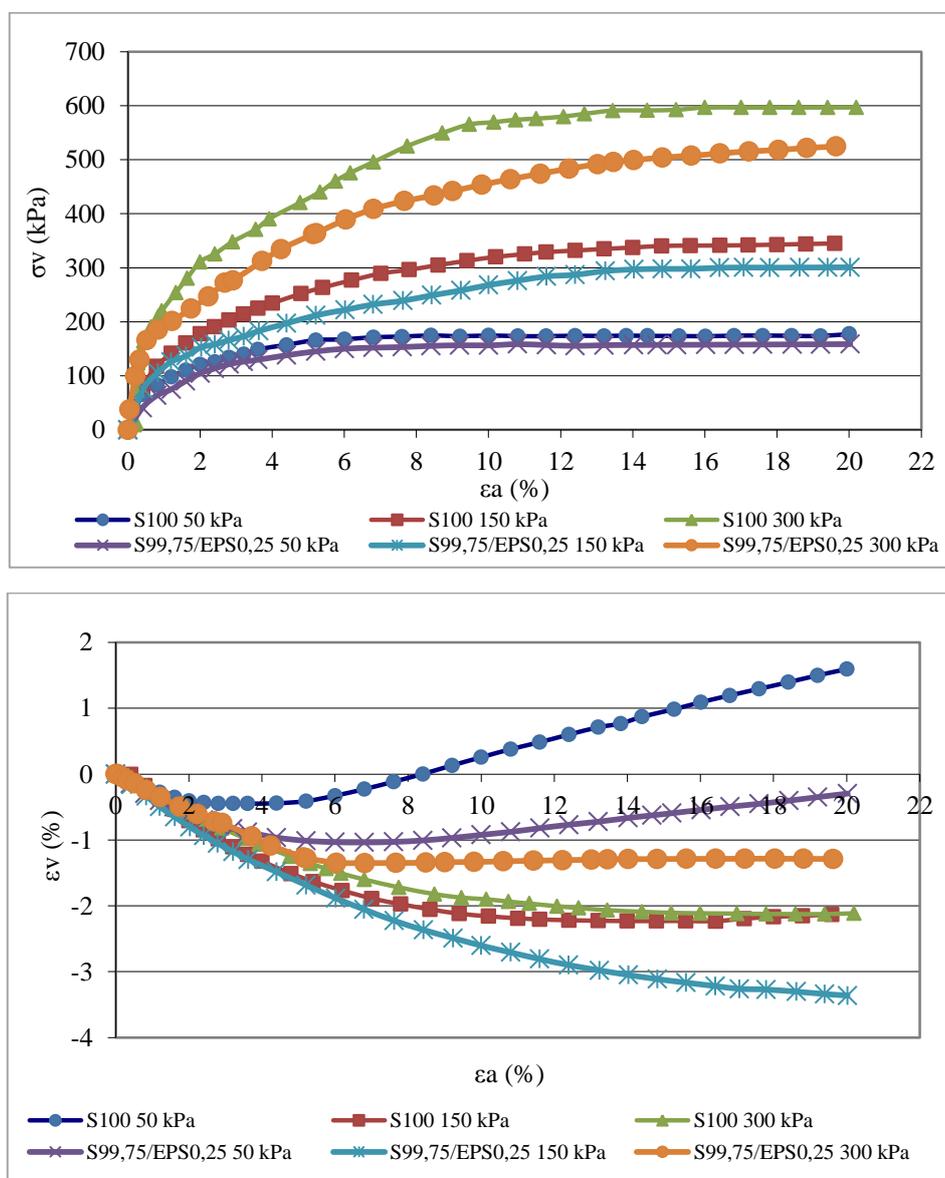


Figura 4.10 - Curvas da tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial das amostras S100 e S99,75/EPS0,25 em ensaios triaxiais.

Nota-se que para a tensão confinante de 50 kPa, o corpo de prova de solo puro (S100) apresenta o comportamento semelhante ao da mistura S99,75/EPS0,25, porém o solo puro possui maior resistência ao cisalhamento para deformações axiais similares.

O mesmo comportamento é observado para as tensões confinantes efetivas de 150 e 300 kPa, porém observa-se que à medida que a tensão confinante aumenta, a diferença entre os valores das resistências do solo puro e da mistura fica maior. Assim, para a mistura de S99,75/EPS0,25, conclui-se que tensões confinantes efetivas mais baixas apresentam os valores de resistência mais próximo ao solo puro.

Com relação à variação de volume do corpo de prova de solo puro, na tensão de 50 kPa, nota-se uma compressão inicial seguida de uma expansão em 8 mm de deformação axial, enquanto que no caso da mistura S99,75/EPS0,25, a expansão foi retardada em relação ao solo puro. Para tensões maiores, observa-se que após a compressão os corpos de prova tendem a uma estabilização. Na tensão de 150 kPa, os corpos de prova S100 e S99,75/EPS0,25 apresentaram maior compressão, onde a estabilização do corpo de prova puro ficou similar ao do mesmo corpo de prova na tensão de 300 kPa.

Na Figura 4.11 estão apresentadas as curvas da tensão desviadora e variação volumétrica versus deformação axial para as amostras de solo argiloso (S100) e mistura S99,50/EPS0,50.

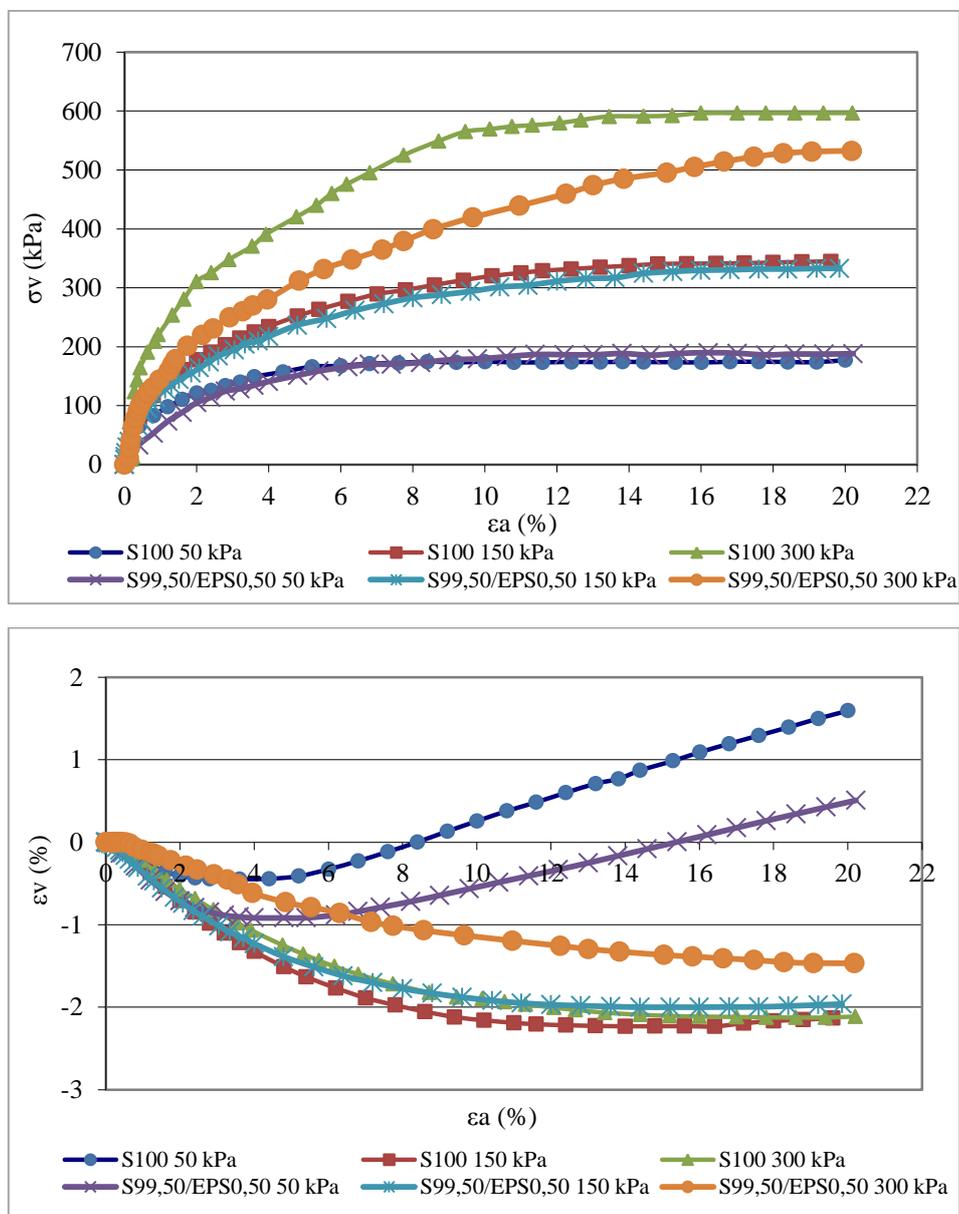


Figura 4.11 - Curvas da tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial das amostras S100 e S99,50/EPS0,50 em ensaios triaxiais.

Para a tensão confinante de 50 kPa, o corpo de prova de solo puro apresenta valores de resistência ao cisalhamento ligeiramente maior do que a mistura S99,50/EPS0,50 até a deformação axial de 6%. Após essa deformação, os valores da tensão cisalhante para os dois materiais ficam iguais, onde na deformação axial de aproximadamente 10%, a mistura S99,50/EPS0,50 apresenta o comportamento melhor em relação à resistência.

Na tensão confinante de 150 kPa, para os mesmos valores de deformação axial, o solo puro apresentou maior resistência ao cisalhamento. O mesmo comportamento é observado para a tensão confinante de 300 kPa. Da mesma maneira que ocorreu na mistura S99,75/EPS0,25 para as tensões de 150 e 300 kPa, quanto maior a tensão confinante, maior é a diferença entre a resistência ao cisalhamento para a mesma deformação axial dos materiais, com valores maiores para o solo sem a adição das pérolas de EPS. Além disso, para a mistura de S99,50/EPS0,50 na tensão confinante de 300 kPa, a resistência de pico da mistura ocorreu para uma deformação axial maior.

Para a mistura S99,50/EPS0,50, em relação à variação volumétrica, foi observado o mesmo comportamento do que na mistura S99,75/EPS0,25 uma vez que para a tensão de 50 kPa se observa uma compressão inicial seguida de uma expansão. Essa expansão foi retardada em relação ao solo puro, porém ocorreu anterior à mistura S99,75/EPS0,25. Nas tensões de 150 kPa, os dois materiais apresentaram comportamento bem similar, porém no caso da tensão de 300 kPa a mistura apresentou uma menor compressão em relação ao solo puro.

Na Figura 4.12 estão apresentadas as curvas da tensão desviadora e variação volumétrica versus deformação axial para as amostras de solo argiloso (S100) e mistura S99,25/EPS0,75.

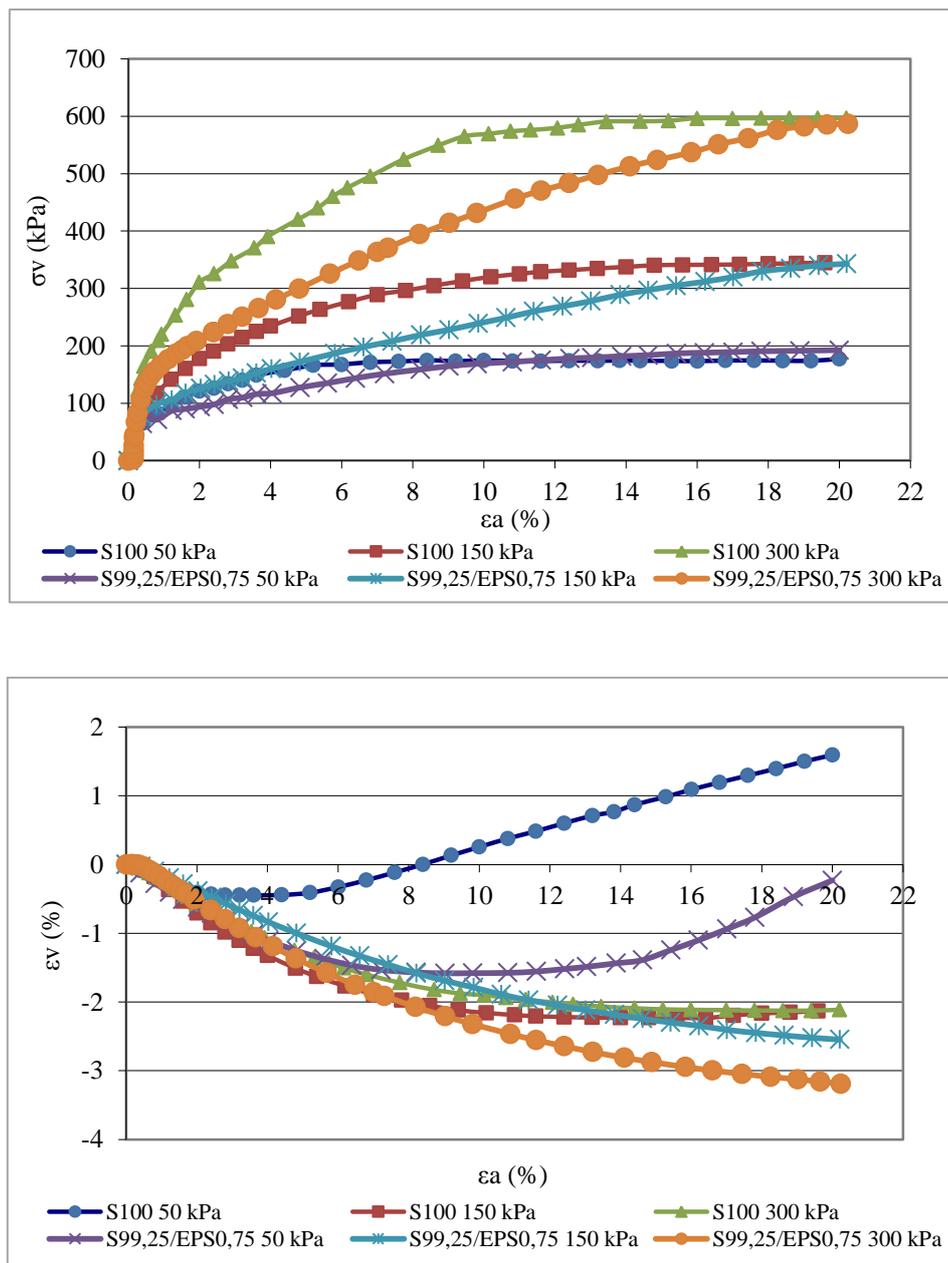


Figura 4.12 - Curvas da tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial das amostras S100 e S99,25/EPS0,75 em ensaios triaxiais.

Para a mistura S99,25/EPS0,75, na tensão confinante de 50 kPa, o solo puro apresenta melhor comportamento até a deformação axial de 11%. A partir dessa deformação, os dois materiais apresentam o mesmo valor de tensão para uma mesma deformação. Após a deformação de 14,5% a mistura apresenta valores mais elevados do que o solo argiloso puro para a mesma deformação.

Na tensão confinante de 150 e 300 kPa, o solo puro apresenta melhor comportamento em relação a mistura S99,25/EPS0,75 para as mesmas deformações

axiais, porém a resistência de pico da mistura ocorre para uma deformação axial maior. Esse mesmo comportamento foi observado para a tensão confinante de 150 kPa.

Com relação à variação de volume dos corpos de prova, a mistura S99,25/EPS0,75 apresenta comportamento similar ao das outras misturas citadas anteriormente, porém nesse caso a mistura S99,25/EPS0,75 na tensão de 300 kPa apresenta maior compressão, diferente do que ocorreu nos casos anteriores.

Na Figura 4.13 estão apresentadas as curvas da tensão desviadora e variação volumétrica versus deformação axial para as amostras de solo argiloso (S100) e mistura S99/EPS1.

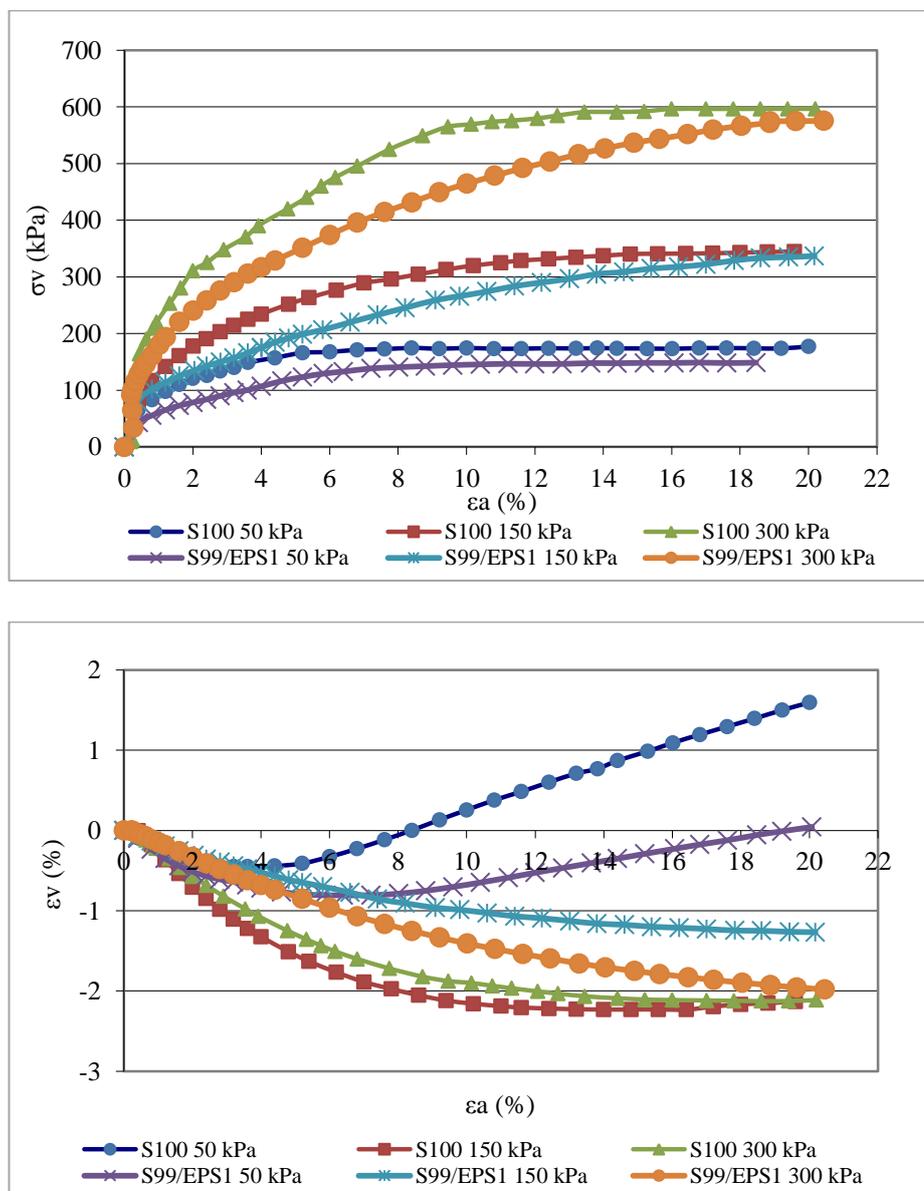


Figura 4.13 - Curvas da tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial das amostras S100 e S99/EPS1 em ensaios triaxiais.

Na tensão confinante de 50kPa, o solo puro apresentou melhor comportamento em relação à resistência do que mistura S99/EPS1. Nas tensões confinantes de 150 e 300 kPa, observa-se que a resistência de pico para ambas as tensões na mistura S99/EPS1 ocorreu para deformações maiores do que para o solo puro e a resistência residual ficou similar para os dois materiais.

No gráfico da deformação volumétrica versus deformação axial, observa-se que com a adição de 1% de EPS na tensão de 50 kPa, a expansão é retardada em relação do solo puro. Em tensões maiores, o corpo de prova comprime mais, sendo que o corpo de prova puro apresentou maior compressão em relação a mistura para essas tensões.

A partir dos gráficos anteriores pode-se observar que a adição das pérolas de EPS no solo argiloso coluvionar apresenta melhores resultados para baixas tensões de confinamento. Para altas tensões de confinamento, apesar do resultado ter sido melhor para o solo puro, existe um certo paralelismo nas curvas com EPS, as quais não apresentam um pico e sim um aumento progressivo de resistência. Dessa maneira, para grandes deformações, as quais não foi possível alcançar nos ensaios triaxiais realizados, pode ser que a resistência da mistura solo-EPS ultrapasse a do solo puro.

- **Envoltórias e Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento**

Nas Figuras 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18 estão ilustradas, respectivamente, as envoltórias e parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo argiloso e das misturas S99,75/EPS0,25, S99,50/EPS0,50, S99,25/EPS0,75 e S99/EPS1. Na Figura 4.19 é apresentado um comparativo das envoltórias do solo puro e das quatro misturas. As envoltórias estão plotadas no espaço $p':q$.

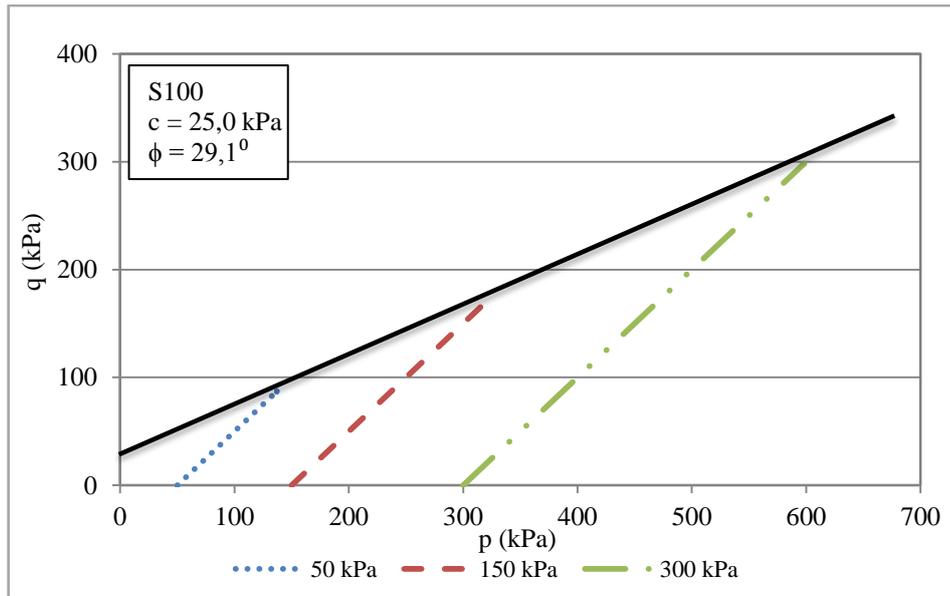


Figura 4.14 - Envolvória e parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo argiloso S100.

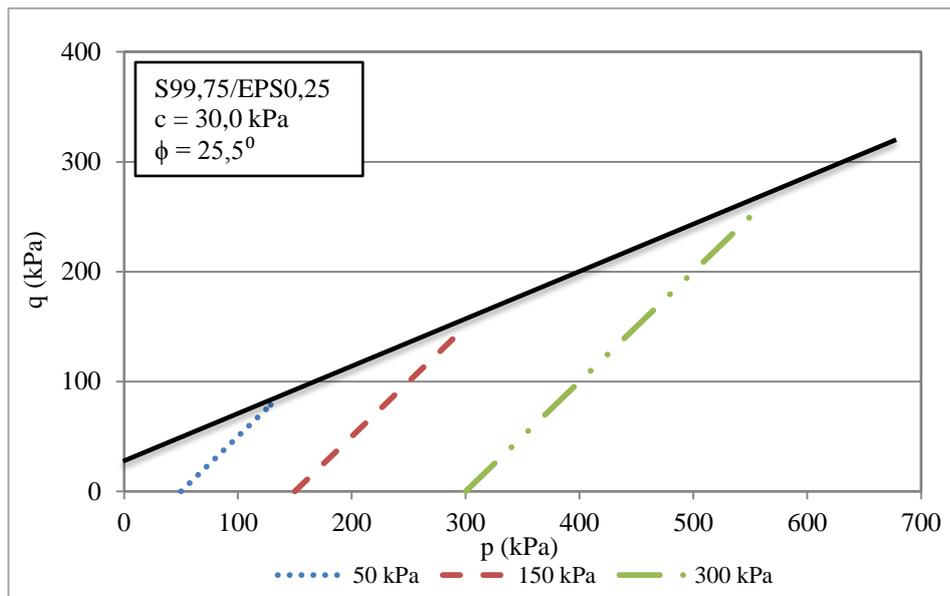


Figura 4.15 - Envolvória e parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura S99,75/EPS0,25.

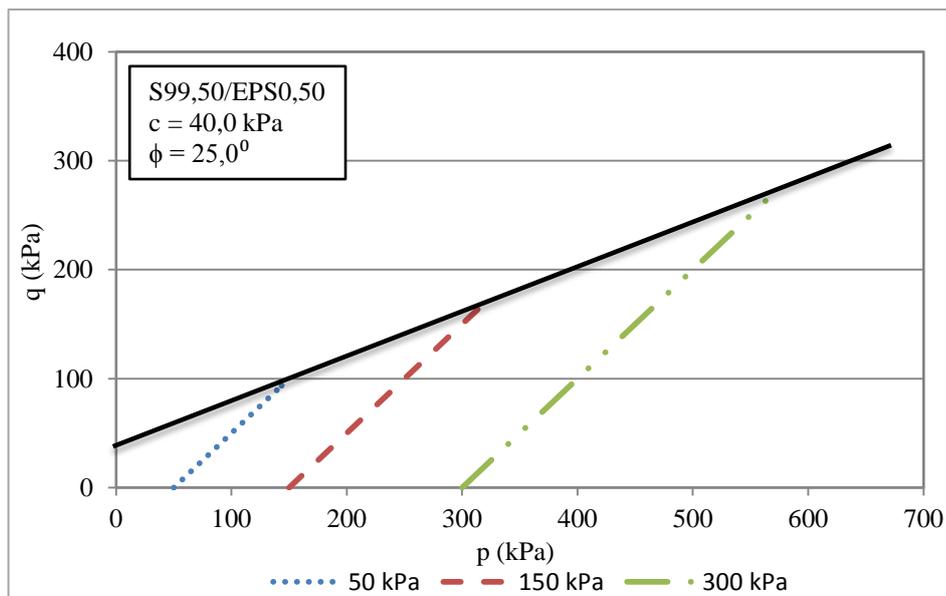


Figura 4.16 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura S99,50/EPS0,50.

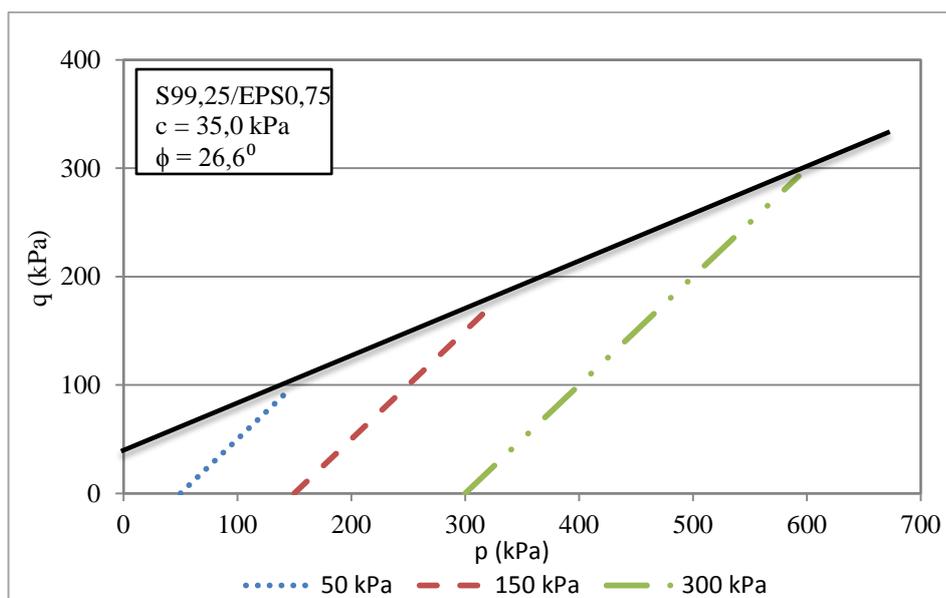


Figura 4.17 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura S99,25/EPS0,75.

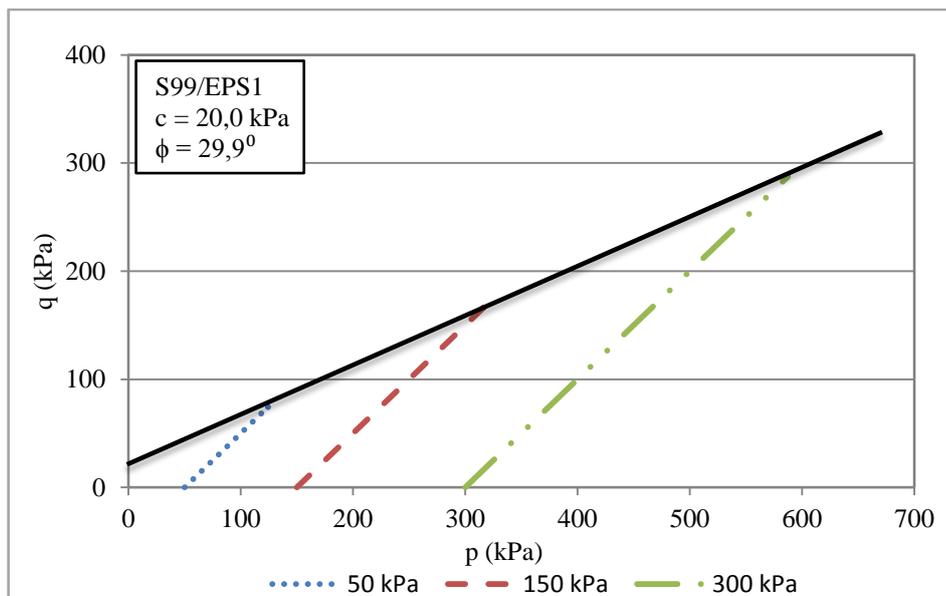


Figura 4.18 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura S99/EPS1.

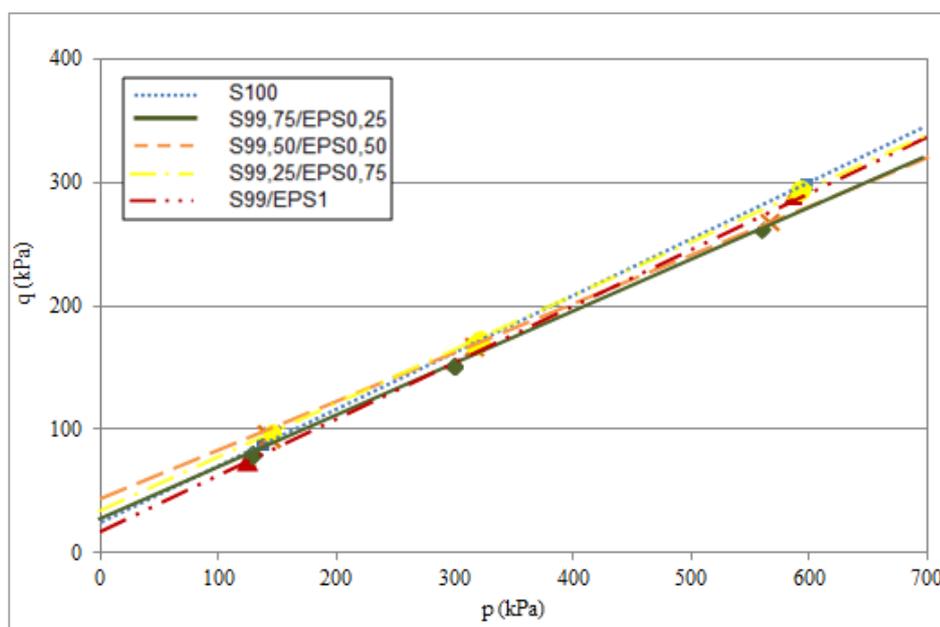


Figura 4.19 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo puro e das misturas.

A Tabela 4.3 apresenta os parâmetros de resistência do solo argiloso e de cada mistura solo-EPS no ponto correspondente a deformação axial de 18%.

Tabela 4.3 - Resumo do ângulo de atrito e coesão do solo argiloso e de cada mistura solo-EPS.

| Material/Mistura | Coesão (kPa) | Ângulo de atrito (°) |
|------------------|--------------|----------------------|
| S100 | 25 | 29,1 |
| S99,75/EPS0,25 | 30 | 25,5 |
| S99,50/EPS0,50 | 40 | 25,0 |
| S99,25/EPS0,75 | 35 | 26,6 |
| S99/EPS1 | 20 | 29,9 |

A partir dos resultados obtidos, observa-se que a inserção das pérolas de EPS ao solo argiloso gera um aumento na coesão até uma porcentagem de 0,50% de EPS enquanto que o valor do ângulo de atrito diminui até essa porcentagem. Em teores maiores de pérolas de EPS, como nas misturas com 0,75% e 1%, nota-se que o valor da coesão decresce, uma vez que o valor do ângulo de atrito aumenta.

Assim, pode-se concluir a partir da tabela 4.3 que a adição das pérolas de EPS ao solo argiloso acarretou em melhora no comportamento do solo nas 4 misturas realizadas, uma vez que um dos parâmetros de resistência sempre aumenta com a adição do EPS

4.2.2. Solo Arenoso

Ensaio Triaxiais CID

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios triaxiais CID, em compressão axial, executados em amostras do solo arenoso (A100) e misturas com teores de pérolas de EPS de 0,50 e 0,75%, em relação ao peso do solo seco. As tensões efetivas aplicadas foram de 50, 150 e 300 kPa, em todos os casos. As trajetórias, envoltórias, parâmetros de resistência ao cisalhamento e uma análise da influência do

teor de pérolas de EPS no comportamento das amostras durante o cisalhamento são apresentados neste item.

- **Comportamento Tensão Desviadora e Variação Volumétrica versus Deformação Axial**

Na Figura 4.20 estão apresentadas as curvas da tensão desviadora e variação volumétrica versus deformação axial, correspondentes aos ensaios do tipo CID, para a matriz de solo arenoso, em compressão axial nas tensões confinantes efetivas de 50, 150 e 300 kPa.

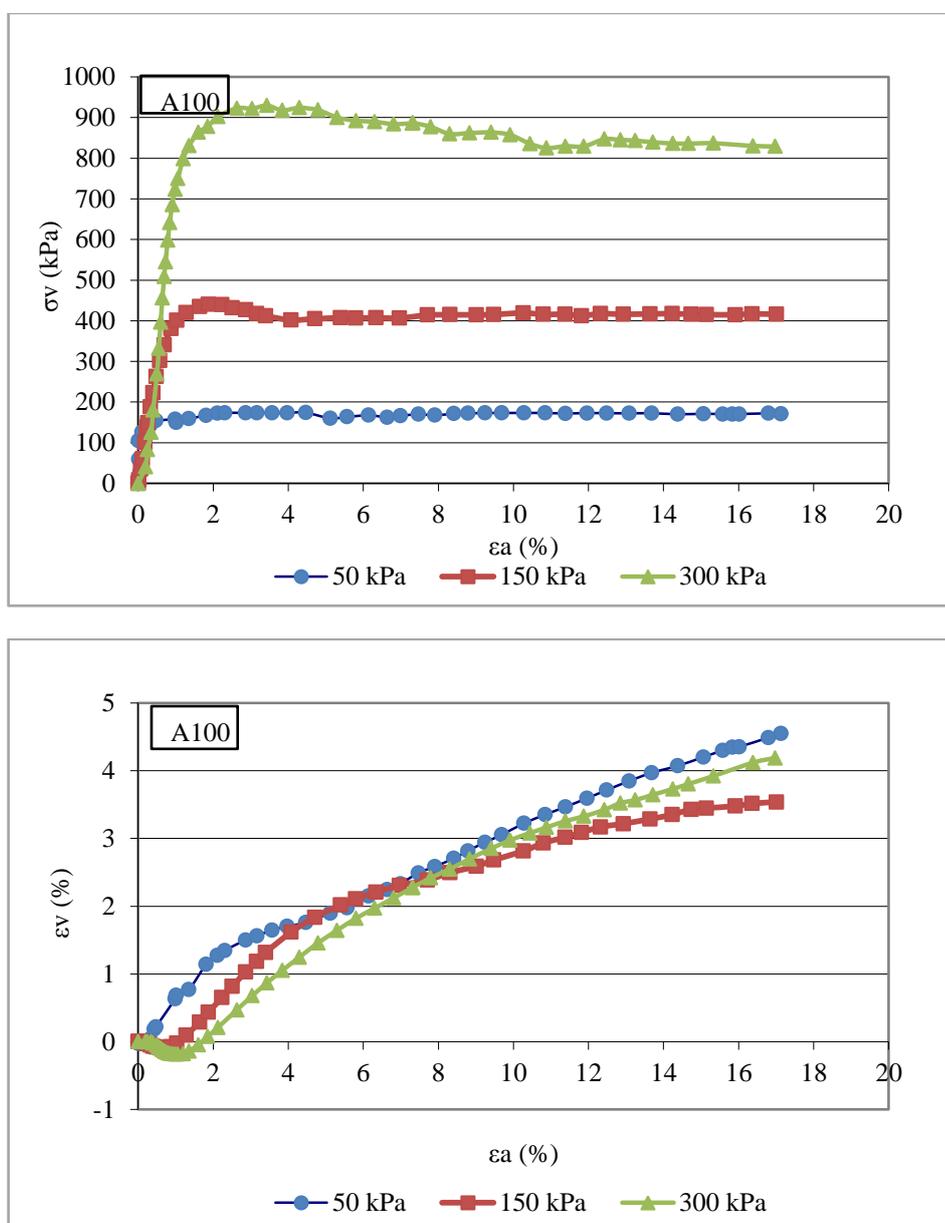


Figura 4.20 - Curvas da tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para o solo arenoso em ensaios triaxiais.

Na Figura 4.21 estão apresentadas as curvas da tensão desviadora e variação volumétrica versus deformação axial, correspondentes aos ensaios do tipo CID, para a mistura A99,50/EPS0,50, em compressão axial nas tensões confinantes efetivas de 50, 150 e 300 kPa.

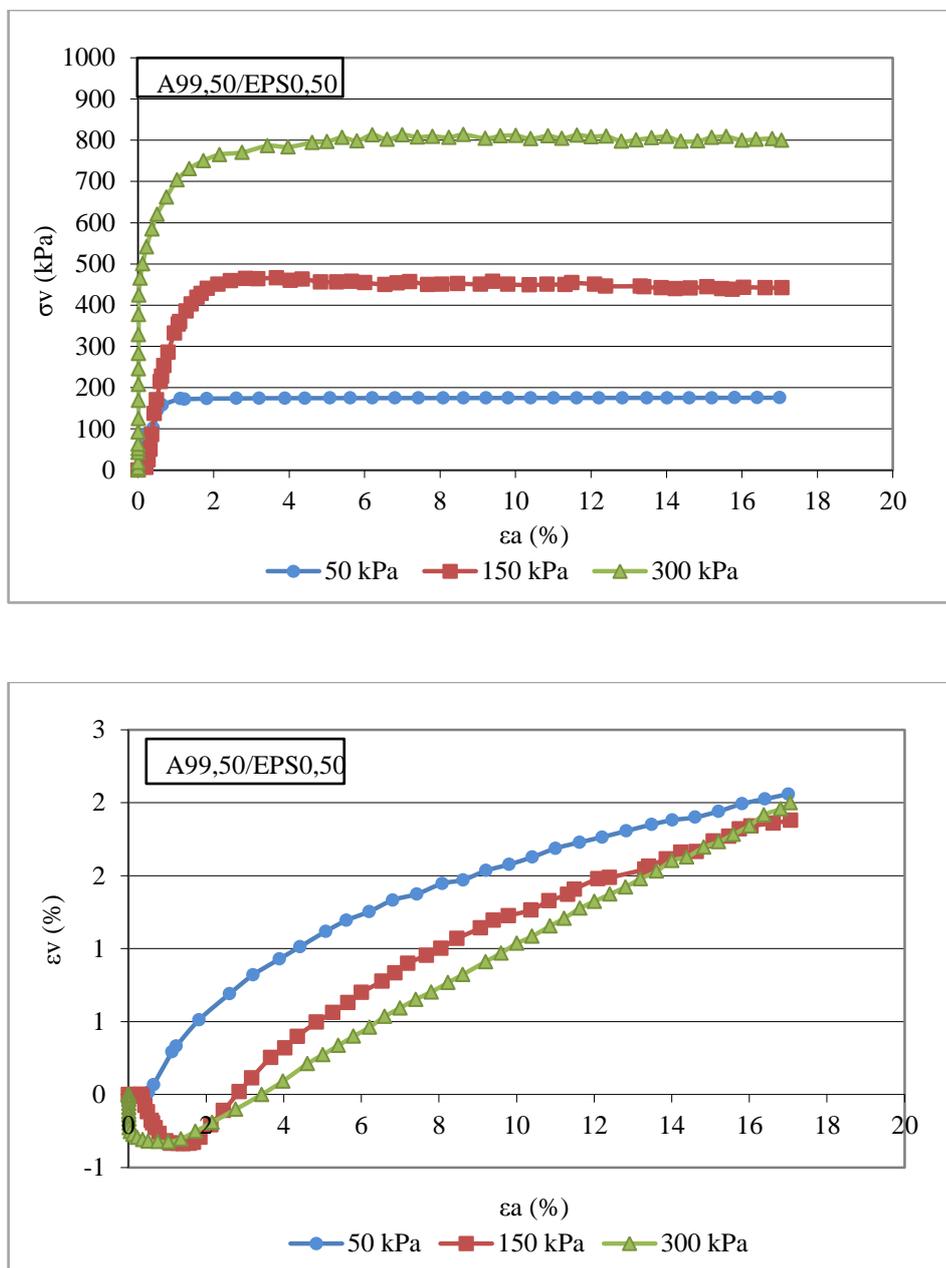


Figura 4.21 - Curvas da tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para a mistura A99,50/EPS0,50 em ensaios triaxiais.

Na Figura 4.22 estão apresentadas as curvas da tensão desviadora e variação volumétrica versus deformação axial, correspondentes aos ensaios do tipo CID, para a

mistura A99,25/EPS0,75 em compressão axial nas tensões confinantes efetivas de 50, 150 e 300 kPa.

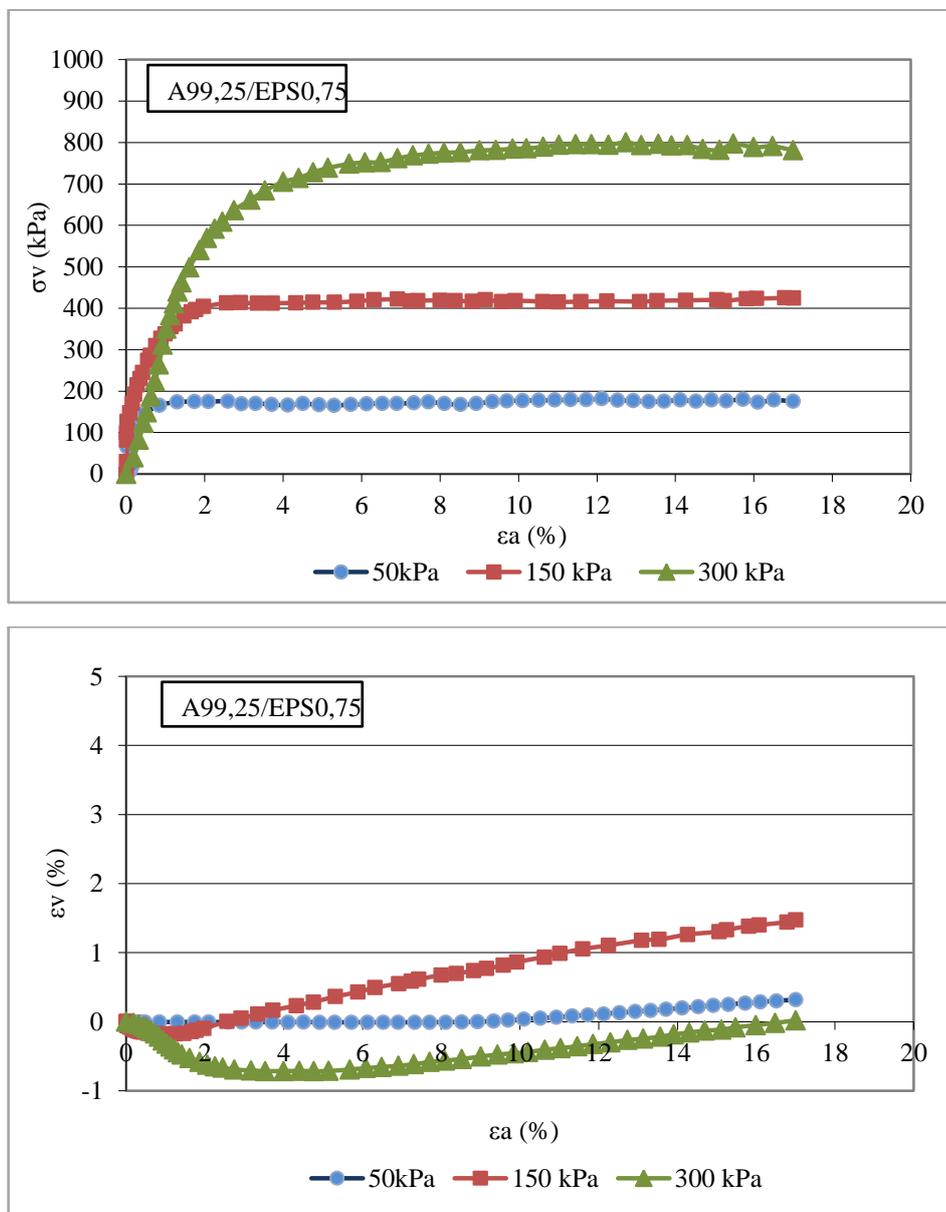


Figura 4,22 - Curvas da tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para a mistura A99,25/EPS0,75 em ensaios triaxiais.

- **Influência do Teor de Pérolas de EPS**

Na Figura 4.23 estão apresentadas as curvas da tensão desviadora e variação volumétrica versus deformação axial, correspondentes aos ensaios do tipo CID em compressão axial, para as amostras de solo arenoso A100 e mistura A99,50/EPS0,50, nas tensões confinantes efetivas de 50, 150 e 300 kPa.

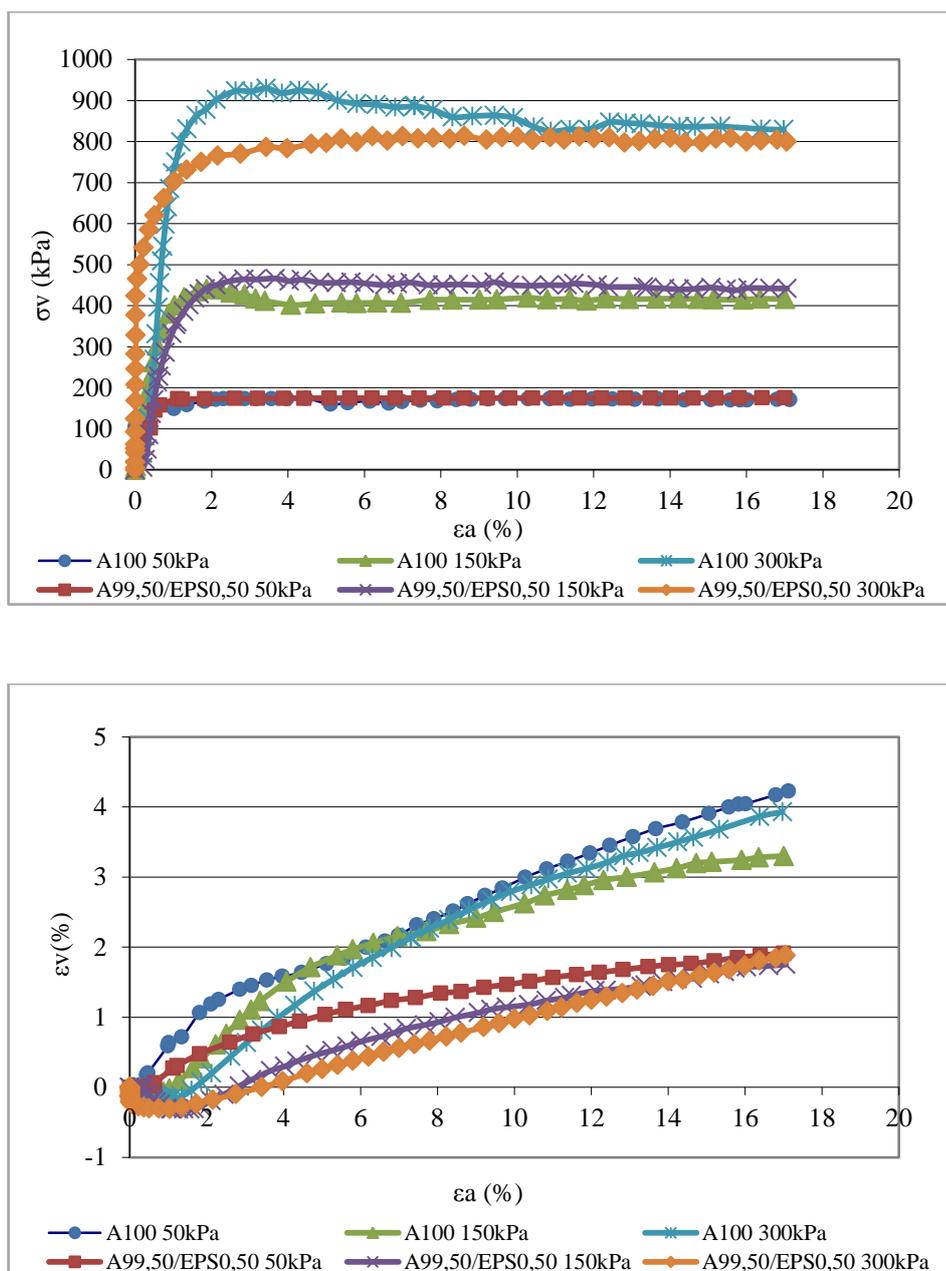


Figura 4.23 - Curvas da tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial das amostras A100 e A99,50/EPS0,50 em ensaios triaxiais.

Na tensão confinante de 50 kPa, o comportamento do solo puro fica similar ao da mistura A99,50/EPS0,50 enquanto que na tensão confinante de 150 kPa a resistência de pico dos dois materiais apresenta valores parecidos, porém a resistência residual da mistura é maior. Já para tensões maiores, como no caso de 300 kPa, a areia pura apresenta resistência de pico e residual maior do que para a mistura A99,50/EPS0,50.

A partir do gráfico da deformação volumétrica versus deformação axial, nota-se uma compressão inicial seguida de uma expansão para todas as amostras de solo. No caso do solo arenoso, todas as amostras que estão isentas de pérolas de EPS expandiram mais em relação à mistura A99,50/EPS0,50 para um mesma deformação axial.

Na Figura 4.24 estão apresentadas as curvas da tensão desviadora e variação volumétrica versus deformação axial, correspondentes aos ensaios do tipo CID em compressão axial, para as amostras de solo arenoso A100 e mistura A99,25/EPS0,75, nas tensões confinantes efetivas de 50, 150 e 300 kPa.

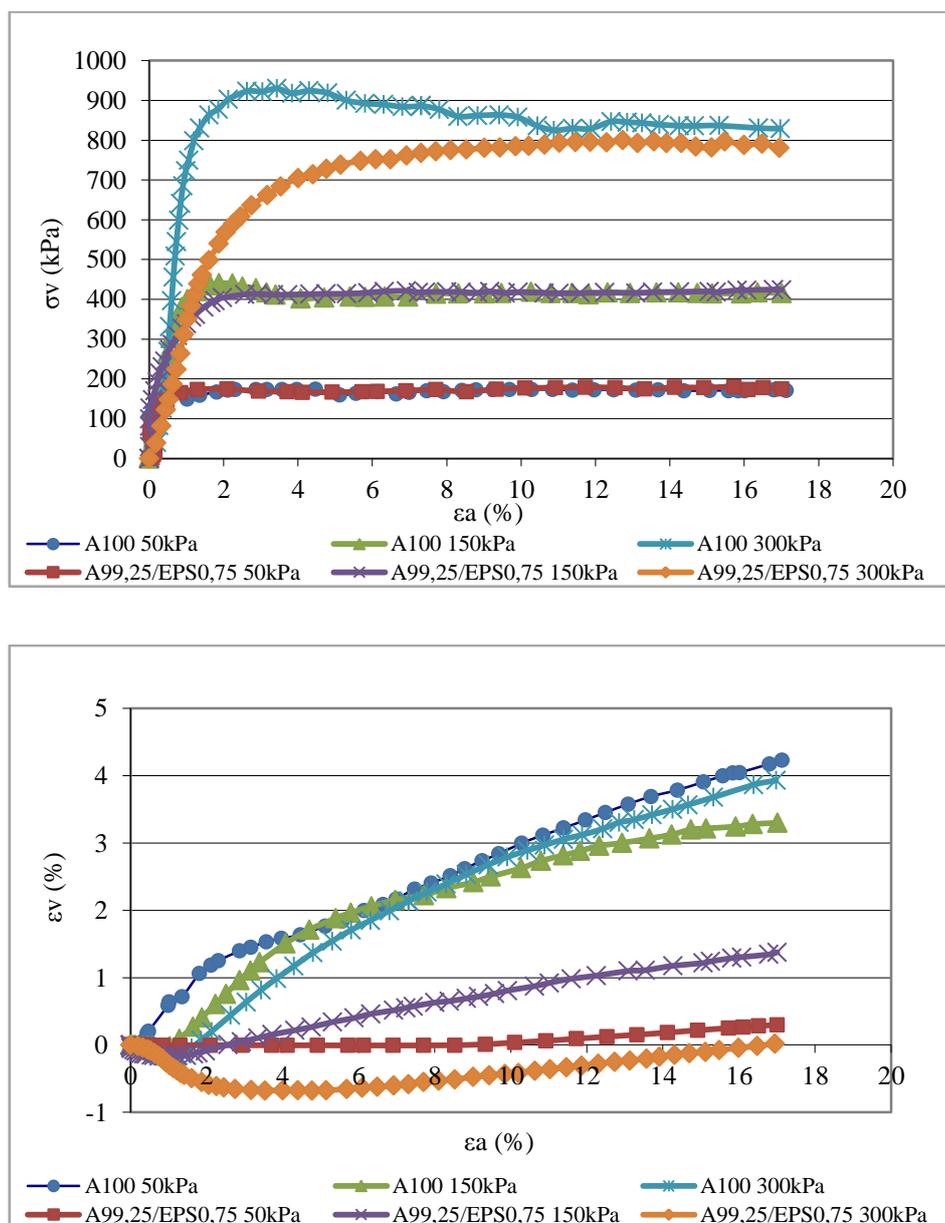


Figura 4.24 - Curvas da tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial das amostras A100 e A99,25/EPS0,75 em ensaios triaxiais.

Para a tensão confinante de 50 kPa, o comportamento do solo puro é similar ao da mistura A99,25/EPS0,75. Na tensão confinante de 150 kPa, a resistência de pico da areia pura apresenta valor mais elevado em relação a mistura, porém a resistência residual da mistura fica com valores similares. E para tensão de 300 kPa, o comportamento da curva fica parecido com o da mistura A99,50/EPS0,50, uma vez que a areia pura apresenta resistência de pico e residual maior do que na mistura.

Com relação à variação de volume dos corpos de prova para a mistura A99,25/EPS0,75, o comportamento é similar ao da mistura A99,50/EPS0,50, uma vez que o solo puro tende a expandir mais do que as duas misturas.

A partir dos ensaios, observa-se que para a adição de pérolas de EPS em solos arenosos o comportamento é melhor para tensões intermediárias, aproximadamente 150 kPa. Assim, nota-se que cada material tem um comportamento particular, uma vez que nos solos arenoso foi diferente do comportamento do solo argiloso, onde que ocorreu melhoras para baixas tensões.

• Envoltórias e Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento

Nas Figuras 4.25, 4.26 e 4.27 estão ilustradas, respectivamente, as envoltórias e parâmetros de resistência ao cisalhamento do solos arenoso e das misturas A99,50/EPS0,50 e A99,25/EPS0,75. Na Figura 4.28 é apresentado um comparativo das envoltórias do solo puro e das duas misturas. As envoltórias estão plotadas no espaço $p':q$.

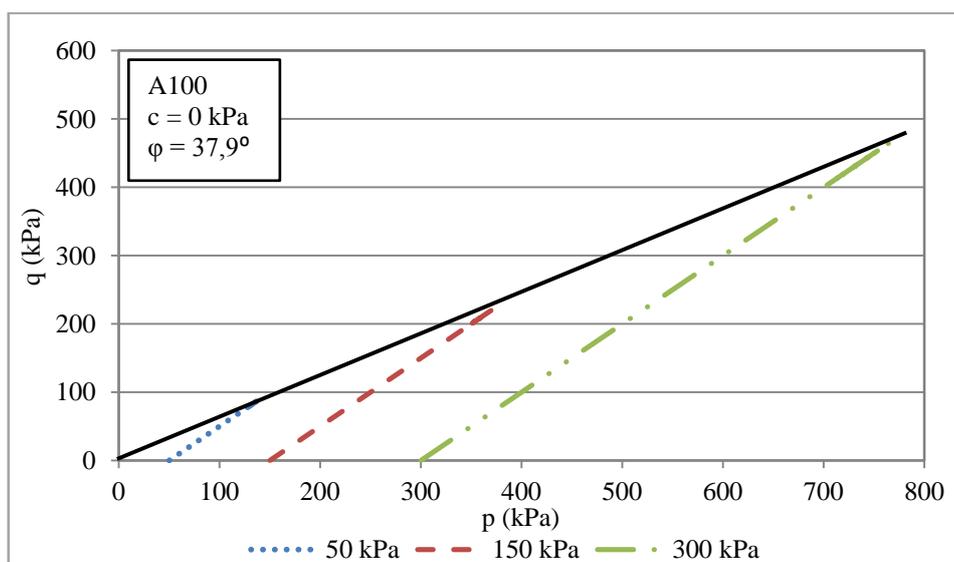


Figura 4.25 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo arenoso A100.

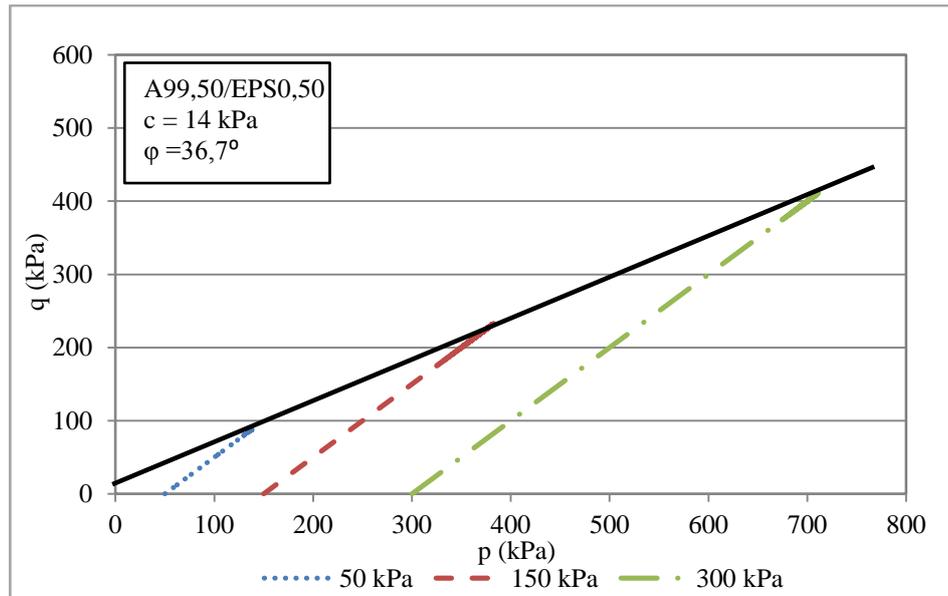


Figura 4.26 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura A99,50/EPS0,50.

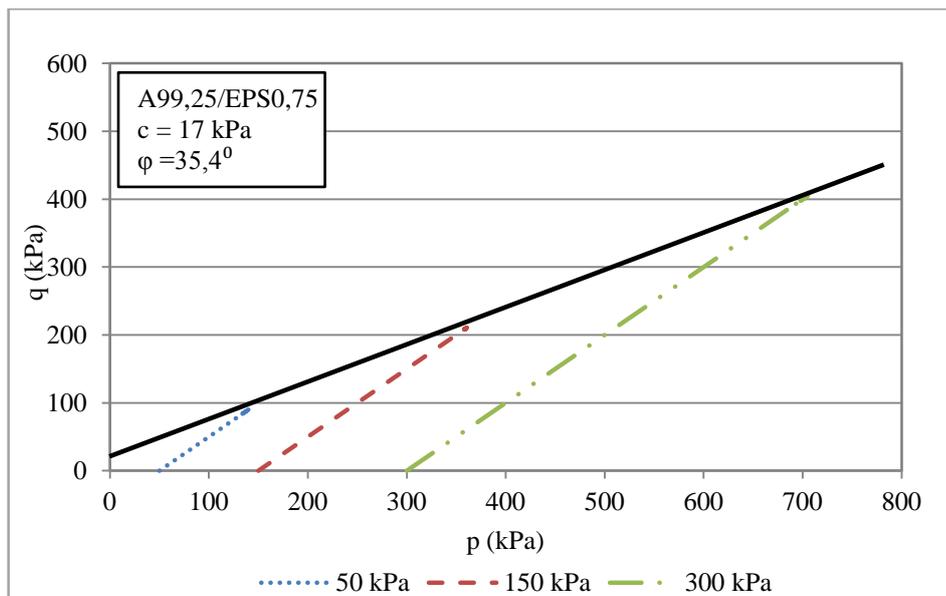


Figura 4.27 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura A99,25/EPS0,75.

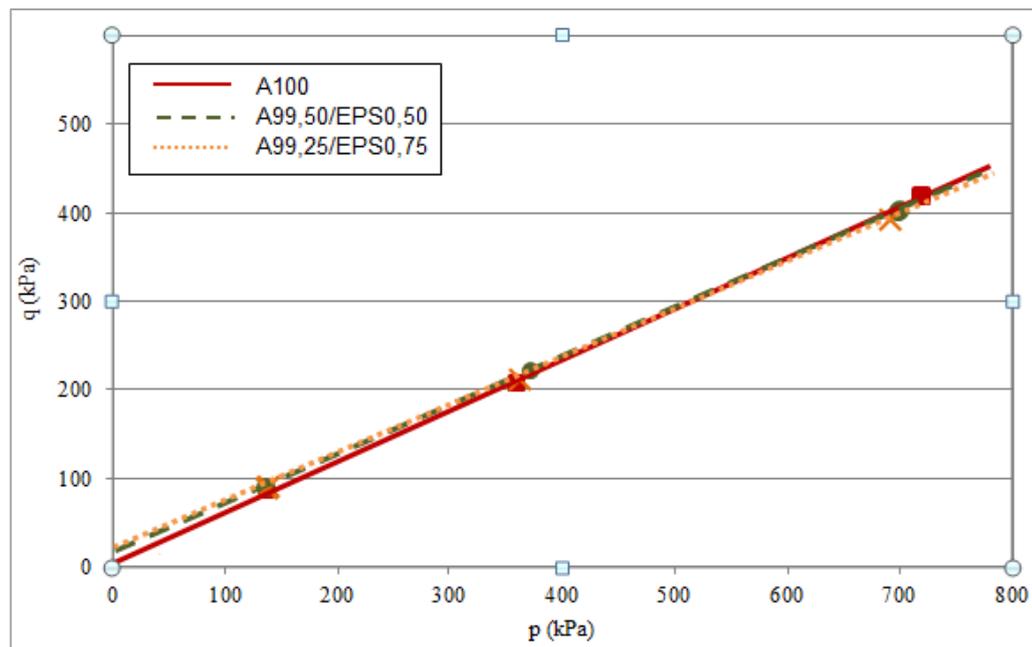


Figura 4.28 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo puro e das misturas.

A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros de resistência do solo arenoso e de todas as misturas solo-EPS no ponto correspondente a deformação axial de 17%.

Tabela 4.4 - Resumo ângulo de atrito e coesão do solo arenoso e de cada mistura solo-EPS.

| Material/Mistura | Coesão (kPa) | Ângulo de atrito (°) |
|------------------|--------------|----------------------|
| A100 | 0 | 37,9 |
| A99,50/EPS0,50 | 14 | 36,7 |
| A99,25/EPS0,75 | 17 | 35,4 |

A partir dos resultados obtidos, nota-se que a inserção das pérolas de EPS ao solo arenoso gera um aumento na coesão (aparente) nas misturas A99,50/EPS0,50 e A99,25/EPS0,75 enquanto que o valor do ângulo de atrito diminui nessas duas misturas.

Desta maneira, é possível observar que o solo argiloso apresentou o comportamento similar ao solo arenoso, uma vez que quando a adição das pérolas de EPS leva ao aumento da coesão, ocorre uma redução do ângulo de atrito e vice-versa.

No caso do solo argiloso, a adição de 0,50% de pérolas de EPS ocasionou a um aumento na coesão e 15 kPa e levou a uma redução do ângulo de atrito em 4,1° em relação ao solo puro, enquanto que no solo arenoso a mesma porcentagem levou a um aumento na coesão de 14 kPa e a uma redução no ângulo de atrito em 1,2°.

Com a adição de 0,75% de pérolas de EPS ao solo arenoso, este solo apresentou o mesmo comportamento do que com a mistura de 0,50%, apresentando aumento da coesão e redução do ângulo de atrito enquanto que no solo argiloso o comportamento foi diferente, ocorrendo redução da coesão e aumento do ângulo de atrito. Esse mesmo comportamento do solo argiloso para a mistura de 0,75% foi observada para a mistura com 1% de pérolas de EPS.

4.2.3.

Bentonita

Ensaio de Cisalhamento Direto

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados para o solo puro e em misturas com 0,50 e 0,75% de pérolas de EPS, aplicando-se tensões verticais iguais a 50, 100 e 300 kPa, com o intuito de se determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo e misturas.

As trajetórias, envoltórias de resistência e os parâmetros de resistência ao cisalhamento assim como uma análise da influência da tensão de confinamento e do teor de pérolas de EPS no comportamento das amostras durante o cisalhamento serão apresentadas nesse item.

- **Comportamento da Tensão Cisalhante e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal**

Na Figura 4.29 estão apresentadas as curvas da tensão desviadora e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal para a bentonita.

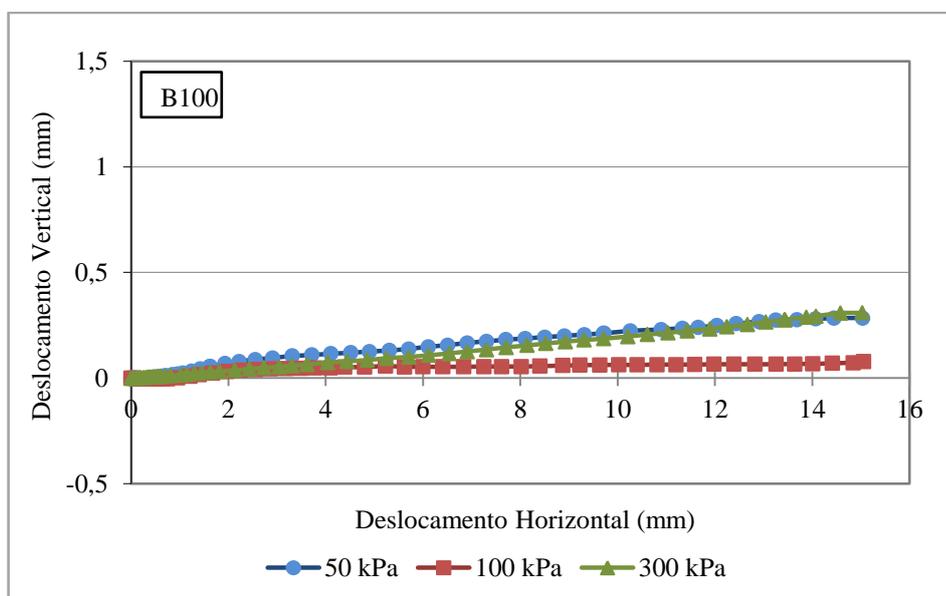
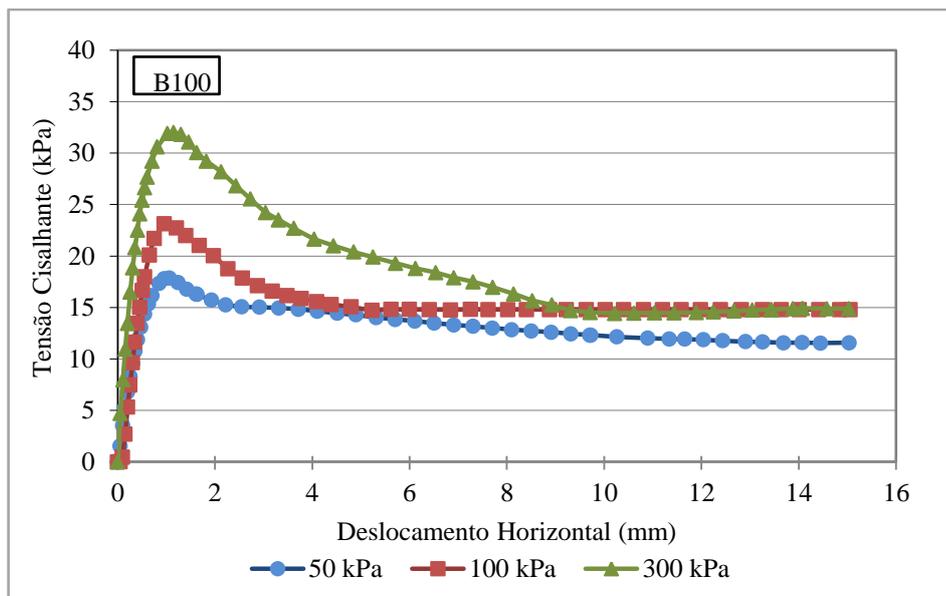


Figura 4.29 - Curvas da tensão desviadora e deslocamento vertical versus deformação axial para a bentonita em ensaio de cisalhamento direto.

Na Figura 4.30 estão apresentadas as curvas da tensão desviadora e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal para a mistura B99,50/EPS0,50.

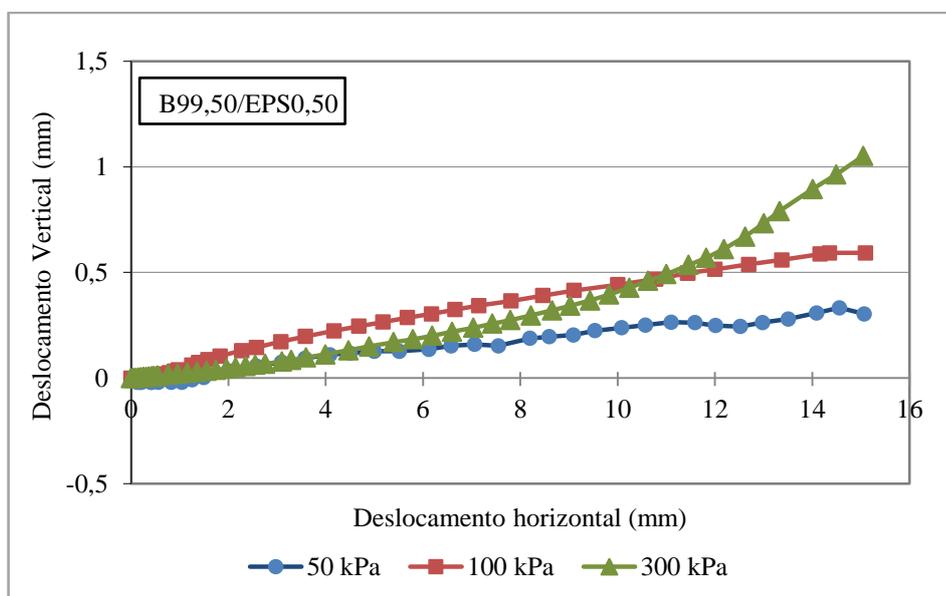
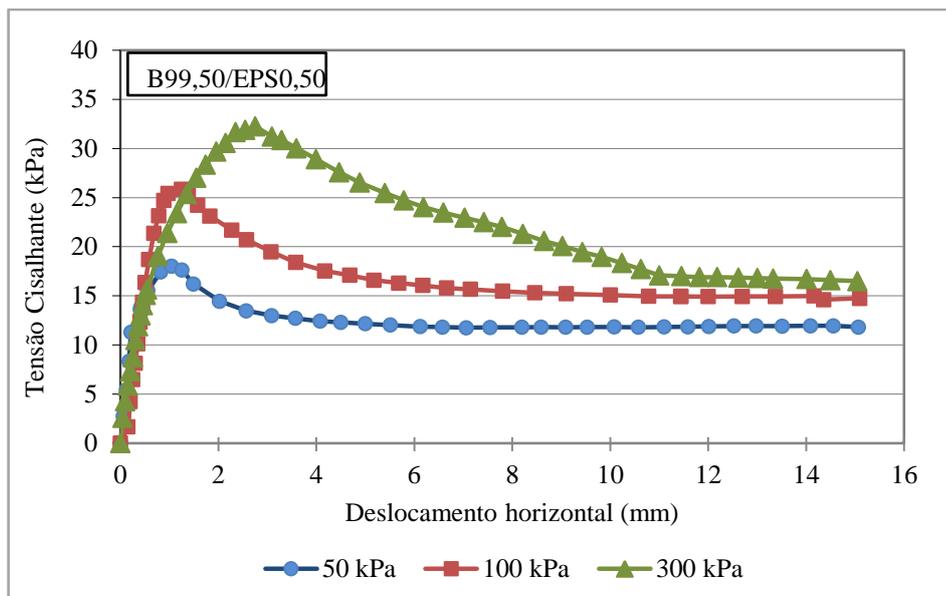


Figura 4.30 - Curvas da tensão desviadora e deslocamento vertical versus deformação axial para a mistura B99,50/EPS0,50 em ensaio de cisalhamento direto.

Na Figura 4.31 estão apresentadas as curvas da tensão desviadora e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal para a mistura B99,25/EPS0,75.

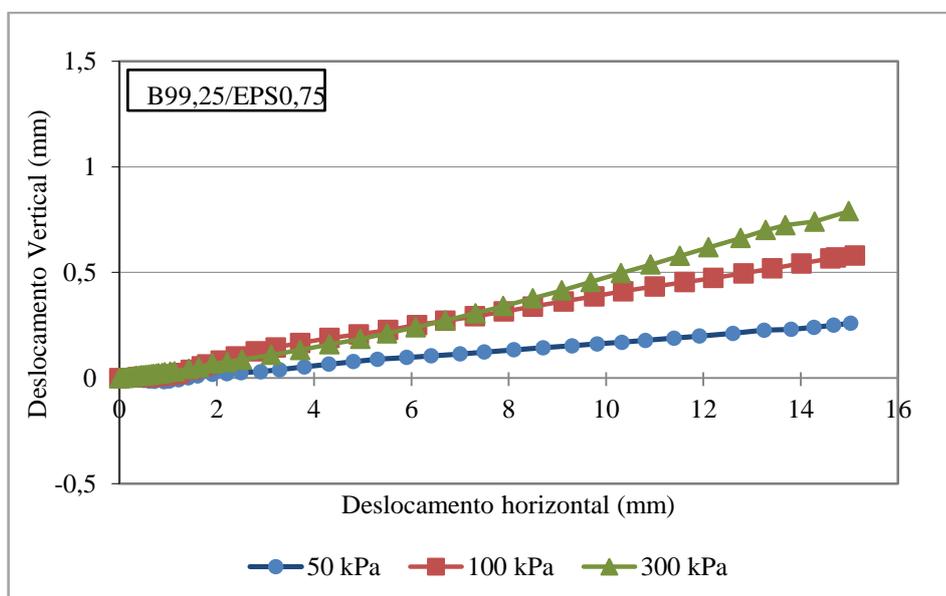
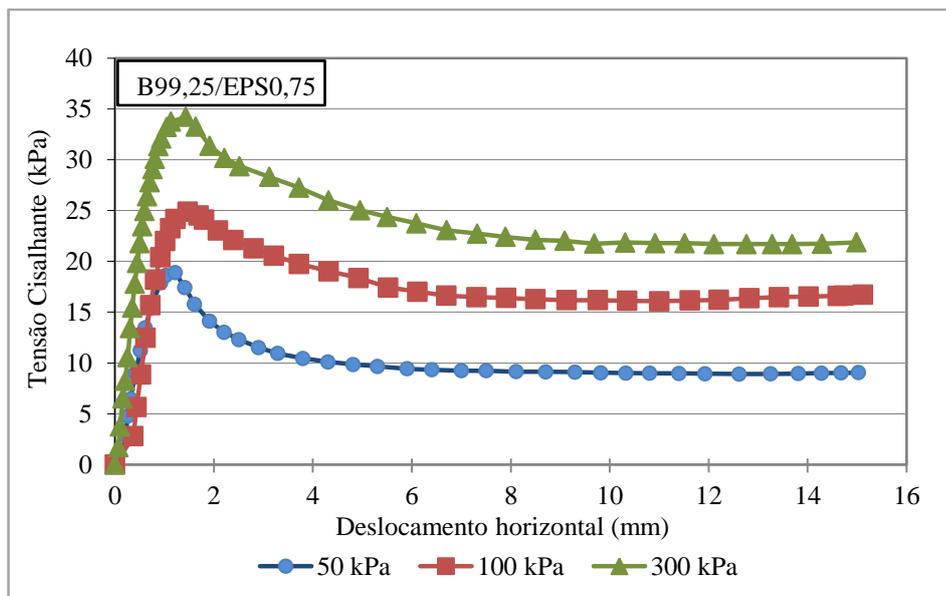


Figura 4.31 - Curvas da tensão desviadora e deslocamento vertical versus deformação axial para a mistura B99,25/EPS0,75 em ensaio de cisalhamento direto.

- **Influência do Teor de EPS**

Na Figura 4.32 estão apresentadas as curvas da tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas a partir do ensaio de cisalhamento direto para as amostras de bentonita B100 e mistura B99,50/EPS0,50, nas tensões de 50, 100 e 300 kPa.

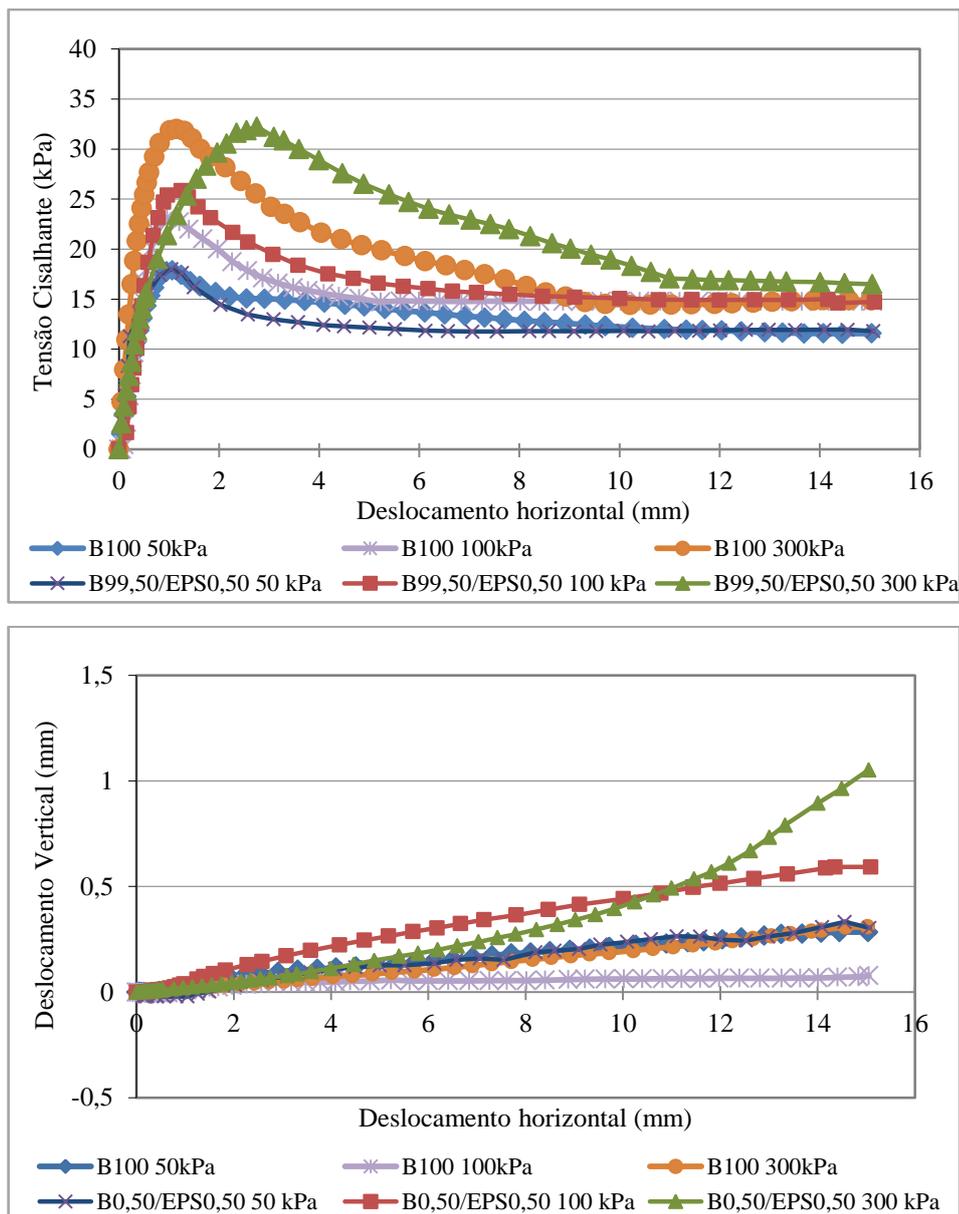


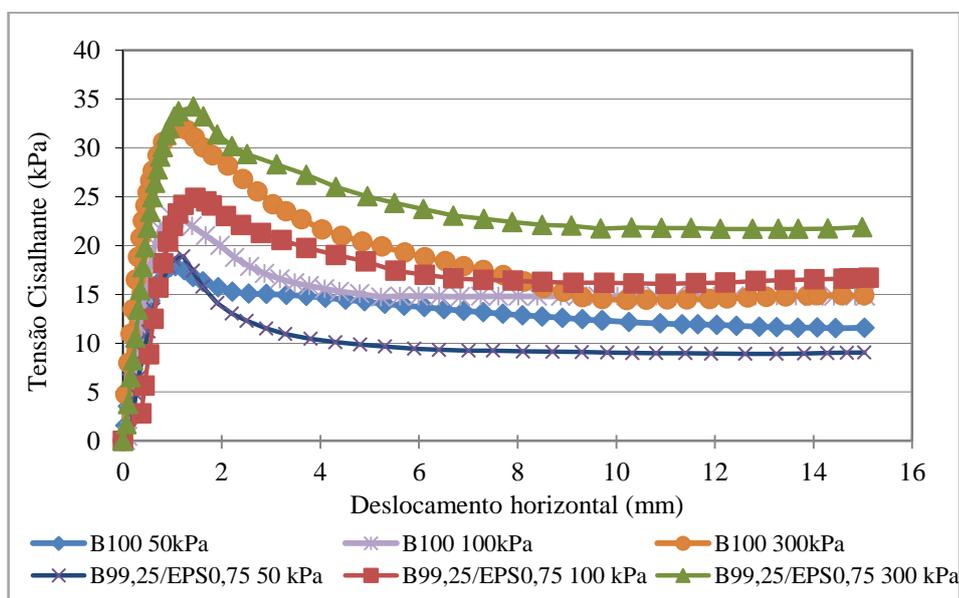
Figura 4.32 - Curvas da tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal das amostras B100 e B99,50/EPS0,50 em ensaios de cisalhamento direto.

Na tensão de 50 kPa, o solo puro e a mistura B99,50/EPS0,50 apresentam o mesmo valor da resistência de pico. Após esse valor, a tensão cisalhante para o solo puro se apresenta maior, porém na resistência residual, os dois materiais passam a possuir o mesmo valor. Na tensão de 100 kPa, a resistência de pico da mistura B99,50/EPS0,50 é maior, porém na resistência residual os valores ficam similares. E na tensão de 300 kPa, os valores da resistência de pico dos dois materiais são iguais, porém no caso da mistura esse valor ocorre a um deslocamento horizontal maior, aproximadamente 3% enquanto o solo puro ocorrem em 1,5%. Nota-se dos gráficos,

que para uma mesma deformação a mistura bentonita-EPS atingiu uma tensão cisalhante maior do que a bentonita pura.

No gráfico do deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, nota-se uma compressão inicial seguida de uma expansão que tende a se estabilizar em todos os corpos de prova, com exceção da mistura B99,50/EPS0,50, na tensão de 300 kPa. Além disso, nota-se que nos corpos de prova com a presença de EPS, nas tensões de 150 e 300 kPa, expandem mais, mostrando a influência do EPS na bentonita.

Na Figura 4.33 estão apresentadas as curvas da tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas a partir do ensaio de cisalhamento direto para as amostras de bentonita B100 e mistura B99,25/EPS0,75, nas tensões de 50, 100 e 300 kPa.



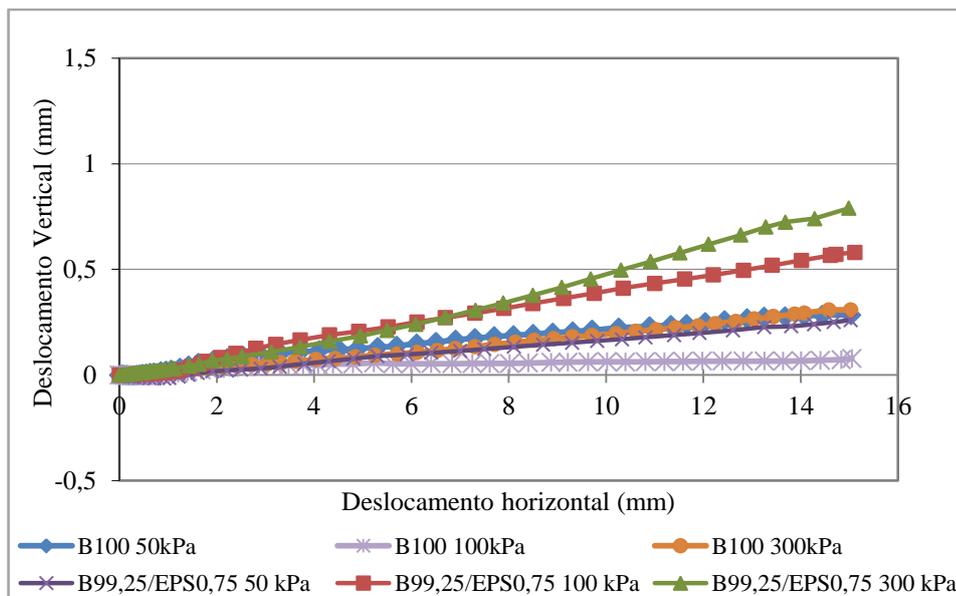


Figura 4.33 - Curvas da tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal das amostras B100 e B99,25/EPS0,75 em ensaios de cisalhamento direto.

Na tensão de 50 kPa, o solo puro e a mistura B99,50/EPS0,50 apresentam o mesmo valor da resistência de pico. Após esse valor, a tensão cisalhante para o solo puro se apresentar maior, porém na resistência residual, os dois materiais passam a possuir o mesmo valor. Na tensão de 100 kPa, a resistência de pico da mistura B99,50/EPS0,50 é maior, porém na resistência residual os valores ficam similares. E na tensão de 300 kPa, os valores da resistência de pico dos dois materiais são similares, porém no caso da mistura esse valor ocorre a um deslocamento horizontal maior, aproximadamente 3% enquanto o solo puro ocorrem em 1,5%.

O gráfico do deslocamento vertical versus deslocamento horizontal da mistura B99,25/EPS0,75 apresentou o mesmo comportamento da mistura B99,25/EPS0,75, uma vez que a inserção de EPS na bentonita levou a uma maior expansão dos corpos de prova a tensões maiores.

Através dos resultados, observa-se que a adição das pérolas de EPS na bentonita está apresentando melhores resultados para altas tensões de confinamento, a partir de 100 kPa já apresentou melhora, o mesmo comportamento foi visto para tensões de 300 kPa.

- **Envoltórias e Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento**

Nas Figuras 4.34, 4.35 e 4.36 estão ilustradas, respectivamente, as envoltórias e parâmetros de resistência máxima e residual da bentonita e das misturas B99,50/EPS0,50 e B99,25/EPS0,75.

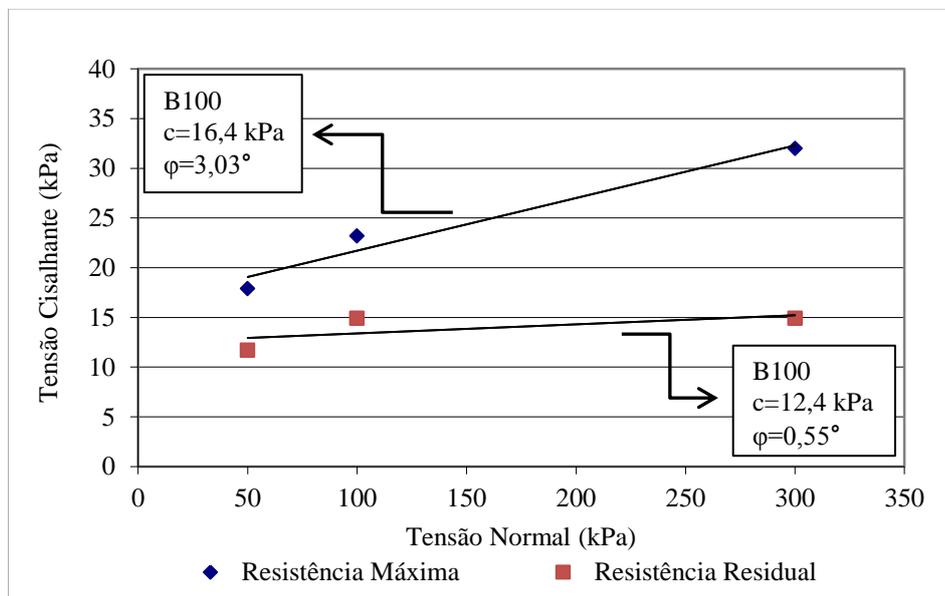


Figura 4.34 - Envoltória de resistência da bentonita.

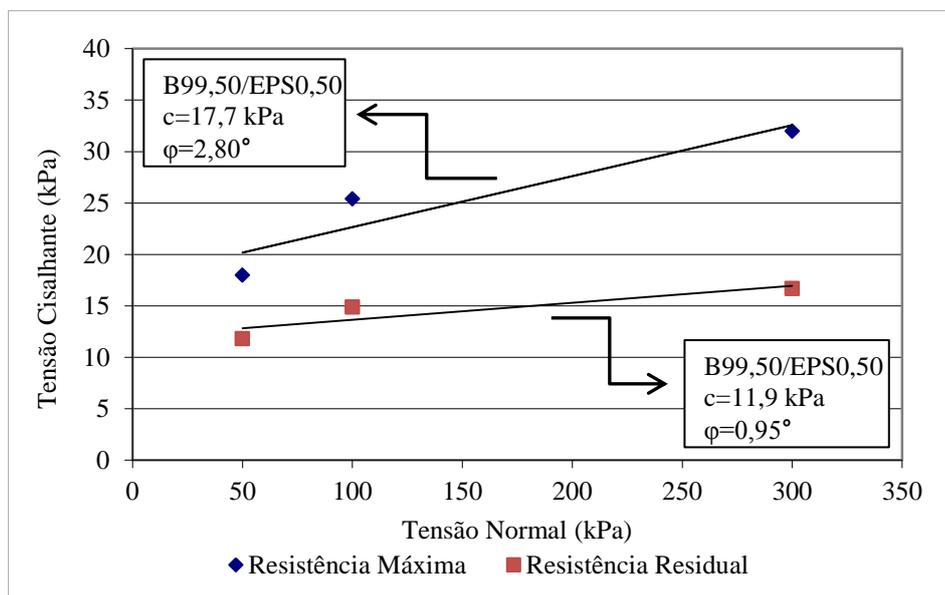


Figura 4.35 - Envoltória de resistência da mistura B99,50/EPS0,50.

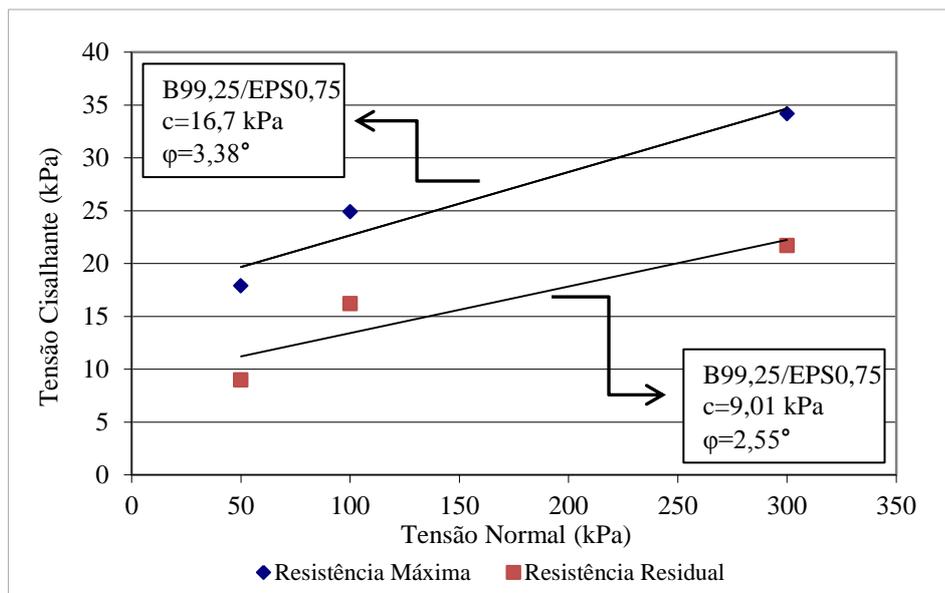


Figura 4.36 - Envoltória de resistência da mistura B99,25/EPS0,75.

A Tabela 4.5 apresenta os parâmetros de resistência máxima e residual do bentonita e de todas as misturas solo-EPS no ponto correspondente ao deslocamento horizontal de 15mm.

Tabela 4.5 - Resumo ângulo de atrito e coesão da bentonita e de cada mistura solo-EPS.

| Material/Mistura | Resistência Máxima | | Resistência Residual | |
|------------------|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Coesão (kPa) | Ângulo de atrito (°) | Coesão (kPa) | Ângulo de atrito (°) |
| B100 | 16,4 | 3,03 | 12,4 | 0,55 |
| B99,50/EPS0,50 | 17,7 | 2,80 | 11,9 | 0,95 |
| B99,25/EPS0,75 | 16,7 | 3,38 | 9,01 | 2,55 |

A partir dos resultados obtidos, observa-se que a adição das pérolas de EPS à bentonita, em relação a resistência máxima, gera um aumento na coesão da mistura B99,50/EPS0,50 e uma redução no ângulo de atrito em relação a bentonita pura, enquanto que na mistura B99,25/EPS0,75 tanto a coesão quanto o ângulo de atrito aumentam em relação aos valores da bentonita isenta de material.

No caso da resistência residual, nota-se que à medida que o teor de pérola de EPS aumenta o valor da coesão diminui e o ângulo de atrito aumenta. Isso enfatiza que as pérolas de EPS mudam o comportamento mecânico do material em termos de influência de resistência de pico e pós-pico.