

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No desenvolvimento deste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios descritos no capítulo três. Estes ensaios têm o objetivo de estudar e avaliar o comportamento das misturas (solo-fibra) procurando melhorar os parâmetros de resistência das areias.

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA AREIA E MISTURAS

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização que foram realizados na areia pura e algumas misturas selecionadas cujos procedimentos foram explicados no tópico 3.1. Na tabela 11 mostram-se os resultados que serão discutidos posteriormente de forma independente.

Tabela 11: Propriedades físicas da areia e das misturas.

Característica	A0C0	A025C25	A025C50	A050C25	A050C50
G _s	2,704	2,689	2,682	2,672	2,651
E	0,67	0,69	0,71	0,72	0,74
e _{max}	0,79	0,82	0,83	0,84	0,86
e _{min}	0,56	0,57	0,59	0,60	0,62

Com os resultados dos índices de vazio nos CPs e os índices de vazios limites das misturas foi possível conferir o valor da densidade relativa C_R para a areia e as misturas ensaiadas neste tópico ($C_R = 50\%$), aplicou-se a equação 3,1 apresentada no item 3.1.1

As curvas granulométricas são apresentadas e discutidas no tópico 4.1.2.

4.1.1 Densidade Real dos Grãos

A densidade real dos grãos da areia pura ensaiada ($G_s = 2,704$) sofreu uma diminuição do seu valor de acordo com o aumento do teor e comprimento de fibra

utilizada. A mistura A050C50 foi a que apresentou a maior redução atingindo um valor de menos 1,96% em relação à areia pura, onde se pode dizer que quanto maior teor e comprimento da fibra, maior a redução do Gs.

4.1.2 Análise Granulométrica

Foi realizado o peneiramento da areia pura e também quatro misturas selecionadas, identificando que as curvas granulométricas não apresentam variações de consideração em relação à areia pura, isto devido a que o peso das fibras utilizadas nas misturas é pequeno, por este motivo a curva granulométrica não apresenta modificações fortes. Na figura 16 apresentam-se as curvas granulométricas estudadas.

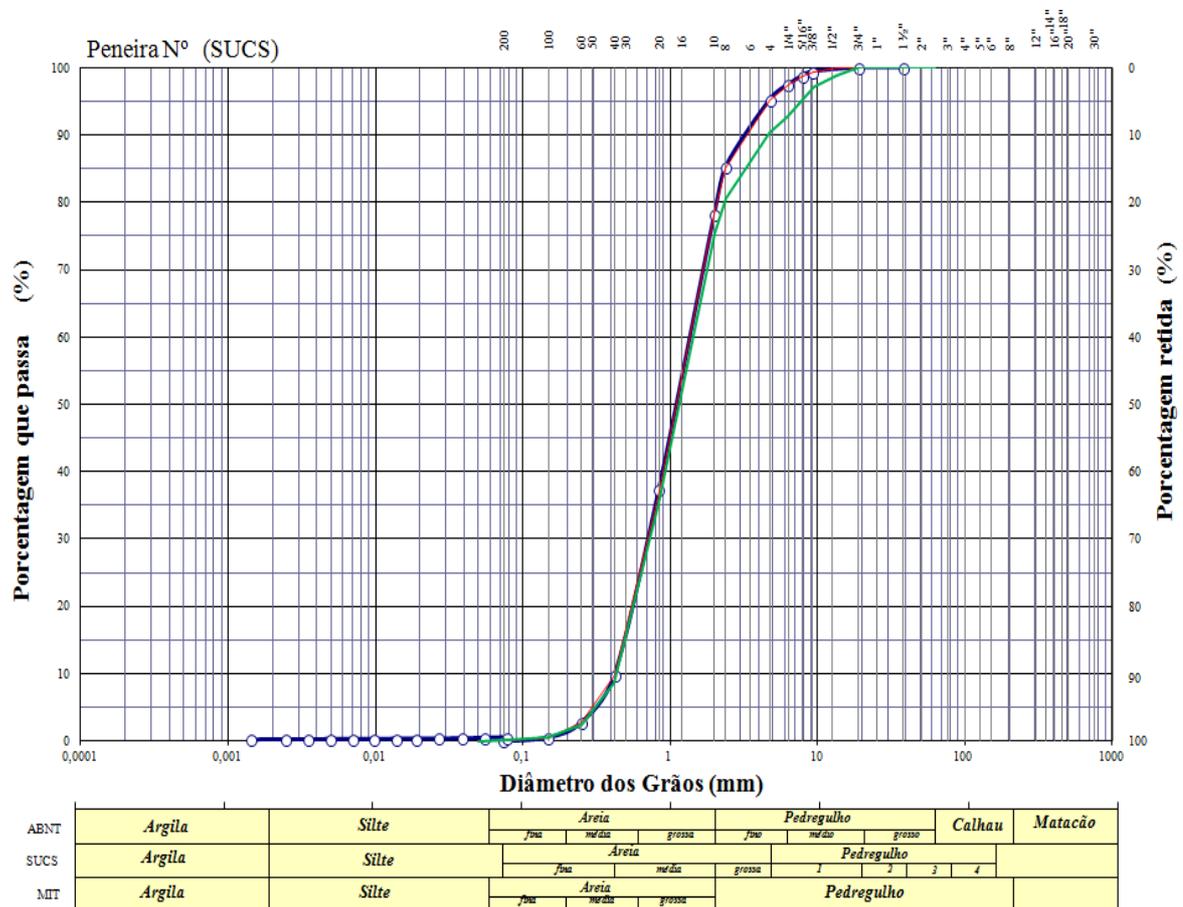


Figura 12: Distribuição de curvas granulométricas.

Na tabela 12 mostra-se um resumo dos índices físicos da curva granulométrica da areia pura, os quais ajudam a classificar ao solo como uma areia uniforme bem graduada com baixa presença de grava e sem presença de material orgânico (SW) de acordo ao Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS).

Tabela 12: Índices Físicos da Areia

Índices Físicos	Valor
Coeficiente de não uniformidade "CNU"	4,25
Coeficiente de Curvatura "Cc"	1,06
Diâmetro efetivo D_{10}	0,40
Diâmetro médio, D_{60}	1,70
Diâmetro a 30%, D_{30}	0,85

4.1.3

Índice de Vazios máximo e mínimo

Pelas propriedades avaliadas anteriormente e os resultados obtidos dos índices de vazios máximos e mínimos na tabela 11, pode-se dizer que quanto maior o teor de fibras maior os valores dos parâmetros e_{max} e e_{min} . Tal influencia também foi detectada para o comprimento, já que, para um mesmo teor, quanto maior o comprimento, maior os valores dos parâmetros. Isto poderia ser justificado ao espaço que vem a ocupar as fibras em lugar dos grãos de areia.

4.2

Ensaio Triaxiais

Neste item serão apresentados, interpretados e discutidos os resultados dos ensaios triaxiais CID, em compressão axial, executados em amostras do solo arenoso (A0C0) e misturas com teores e comprimentos de fibra de coco diferentes. Estes resultados serão separados em duas partes, a primeira parte apresentará os resultados dos ensaios triaxiais realizados na areia pura e as misturas que utilizaram a fibra de coco em sua forma natural. Na segunda parte apresentaram-se os resultados da mistura que tinha mostrado o melhor desempenho na primeira parte e será submetida a processos de impermeabilização com o fim de conferir se a impermeabilização gera modificações nos resultados dos parâmetros de resistência da mistura.

Com o ensaio triaxial foi possível medir e determinar a condutividade hidráulica em misturas que mostraram maiores mudanças no comportamento físico devido ao teor e comprimento de fibra, também foi possível elaborar os gráficos das curvas tensão desviadora vs. Deformação axial (tensão-deformação), e deformação volumétrica vs. deformação axial (variação volumétrica) com as quais se elaborará o gráfico das trajetórias

de tensões efetivas arbitrando o valor da deformação axial para todos os ensaios em 14% de deformação, após a verificação de que as curvas dos gráficos tensão-deformação não apresentam picos de ruptura.

A partir das trajetórias de tensões efetivas se obtém as envoltórias de resistência no diagrama $p' \times q$, conhecido como diagrama de Lambe, para cada mistura e a areia pura, com a mesma pode-se determinar os parâmetros de resistência do solo, que são α' , a' , ϕ' e c' . A metodologia estabelecida para este trabalho foi descrita no item 3.3.2 inciso "e". Onde são mostradas as equações 3.7 e 3.8 as quais determinam os valores p' e q , de onde se obtém os parâmetros de resistência α' e a' , que servem para determinar os parâmetros de resistência ϕ' e c' com a aplicação das equações 3.9 e 3.10.

4.2.1

Misturas Areia-Fibra de coco

Aqui são apresentados os resultados dos ensaios triaxiais da areia pura e seis misturas compostas com fibra de coco natural, para uma melhor interpretação dos resultados e gráficos serão realizados diferentes tipos de comparações entre as misturas e a areia natural.

4.2.1.1

Controle da condutividade hidráulica

Terminado o processo de saturação dos corpos de prova através de fases de percolação e contrapressão no equipamento triaxial, realizou-se a avaliação da condutividade hidráulica em misturas (A050C50, A075C25 e A075C50) e na areia pura, selecionando estas misturas pelo seu alto teor de fibra. A tabela 13 apresenta os resultados da condutividade hidráulica, mesmos que foram calculados com ajuda das equações 3.2; 3.3; 3.4 e 3.5 explicadas no item 3.3.2 inciso "c".

Tabela 13: Controle da condutividade hidráulica (k)

Mistura/ Solo	k (cm/min)	k (cm/seg.)
A0C0	0,1223	2×10^{-3}
A050C50	0,1450	$2,42 \times 10^{-3}$
A075C25	0,1712	$2,85 \times 10^{-3}$
A075C50	0,1759	$2,93 \times 10^{-3}$

Da tabela 13 observa-se que a areia pura está dentro dos parâmetros esperados, sendo um material permeável e que a inclusão das fibras aumenta a permeabilidade até o 46% na mistura com maior teor de fibra (A075C50), sem modificar a ordem de grandeza, o que poderia significar que a inclusão de fibras gera maiores vazios que são aproveitados pela água criando canais que ajudam a uma percolação mais rápida, mudança que tem uma correlação com a variação do índice de vazios não linear dependendo da forma de distribuição das fibras ao momento de amoldar o CP.

4.2.1.2

Comportamento Tensão Desviadora e Variação Volumétrica vs. Deformação Axial

Neste item serão mostradas, interpretadas e comparadas as curvas tensão-deformação e as curvas da variação volumétrica de cada uma das misturas avaliadas nas três tensões efetivas aplicadas (50, 100, 150 kPa) comparando-as com os resultados da areia pura quando os solos atingem uma deformação axial igual a 14% valor arbitrado que permitiram a elaboração das envoltórias de resistência.

Na figura 13, apresentam-se as curvas de tensão-deformação e de variação volumétrica, que correspondem aos ensaios triaxiais (CID) realizados à areia pura submetida a diferentes tensões confinantes, o comportamento da areia pura nas três curvas tensão-deformação apresenta um aspecto similar, aumentando a resistência de acordo com a maior tensão confinante aplicada, as curvas não mostram pico de resistência.

Das curvas de variação volumétrica mostra-se que a areia quando é submetida a tensões confinantes baixas apresenta uma tendência dilatante a diferença das outras duas tensões nas quais o compósito tende a comprimir-se.

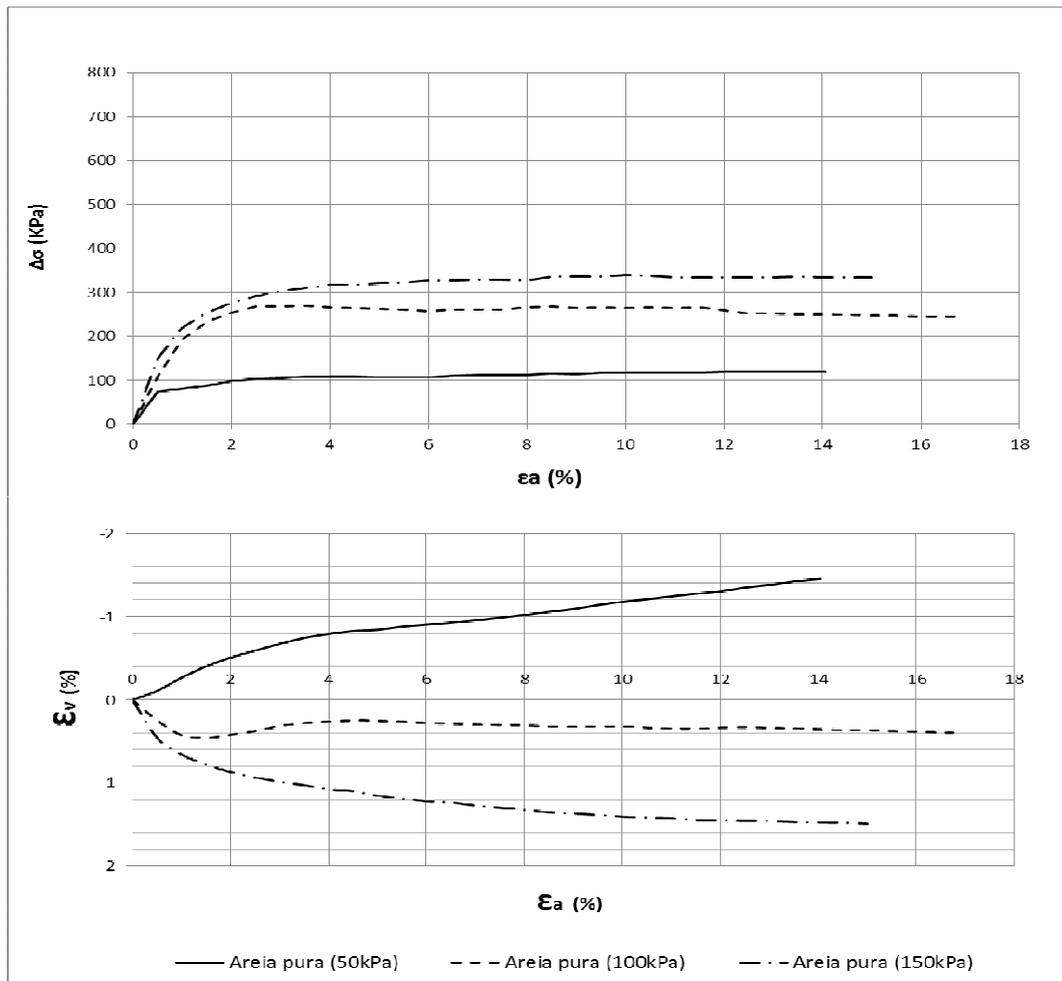


Figura 13: Curvas da Tensão - Deformação e de Variação Volumétrica para a areia pura em ensaios triaxiais.

Na figura 14, apresentam-se as curvas de tensão-deformação e de variação volumétrica, que correspondem aos ensaios triaxiais (CID) realizados à areia pura e a mistura A025C25 submetidas a diferentes tensões confinantes, mostrando-se que o comportamento da mistura nas três curvas tensão-deformação apresentam aspectos similares aos da areia pura, ressaltando que a adição de fibras aumentou a resistência de acordo com a maior tensão confinante aplicada, melhorando a resistência em mais de 50% em relação à resistência da areia pura, sem mostrar resistência de pico.

Das curvas de variação volumétrica o comportamento das curvas da areia e da mistura são semelhantes, mostrando que quando a mistura é submetida a baixas tensões confinantes se apresenta uma tendência dilatante na curva a diferença das outras duas tensões nas quais o compósito tende a comprimir-se.

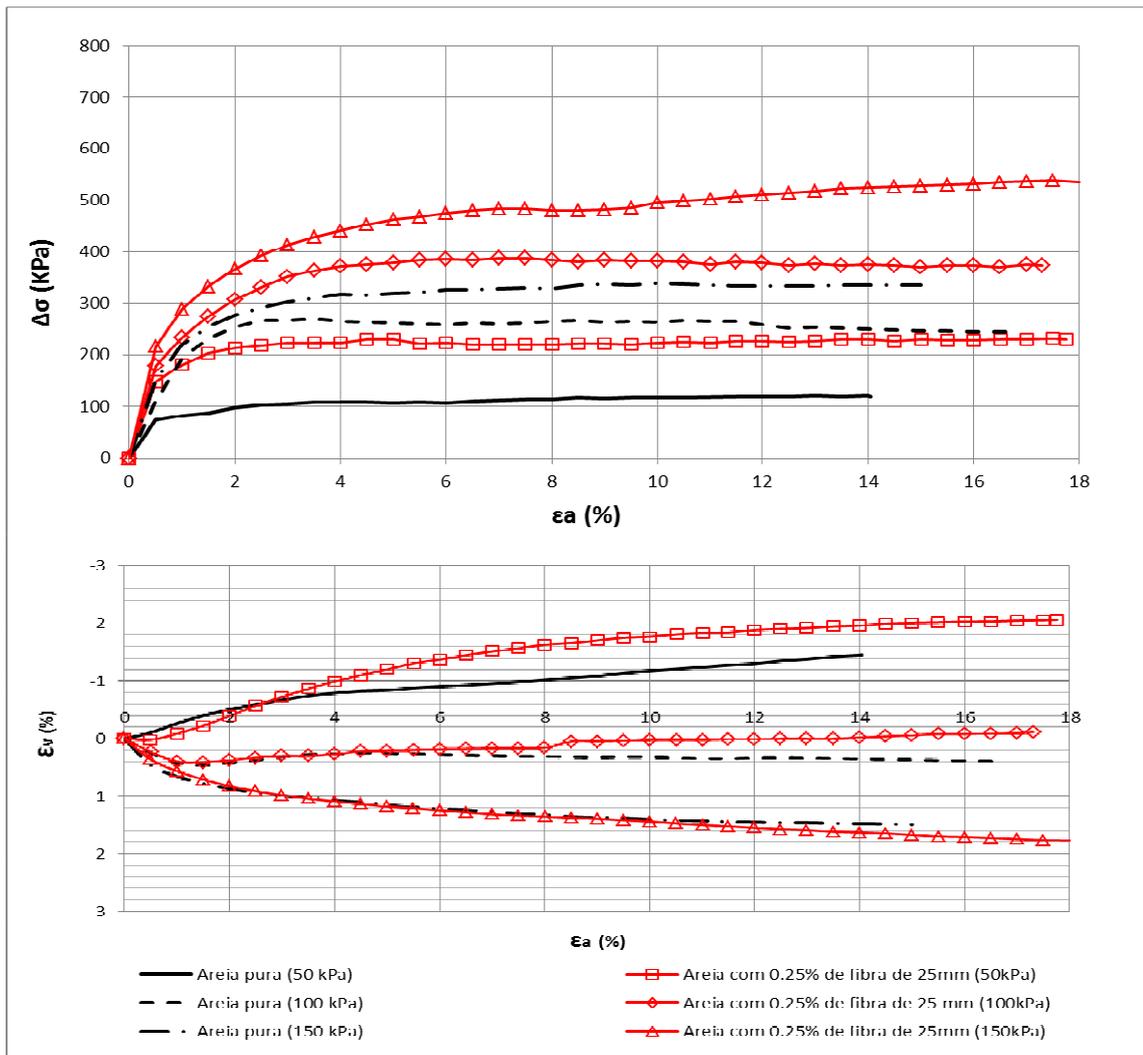


Figura 14: Curvas Tensão – Deformação e de Variação Volumétrica da areia pura e a mistura A025C25 em ensaios triaxiais.

Na figura 15, apresentam-se as curvas de tensão-deformação e de variação volumétrica, que correspondem aos ensaios triaxiais (CID) realizados à areia pura e a mistura A025C50 submetidas a diferentes tensões confinantes, mostrando-se que o comportamento da mistura nas três curvas tensão-deformação apresentam aspectos similares aos da areia pura, aumentando a resistência em mais de 39% em relação à areia pura, não se mostra resistência de pico, atingindo-se uma resistência residual após o 6% de deformação axial.

Nas curvas de variação volumétrica o comportamento da areia e da mistura são semelhantes, mostrando-se variações mais representativas do que a mistura com o mesmo teor e comprimento mais curto, também se observa que quando a mistura é submetida a baixas tensões confinantes se apresenta uma tendência dilatante na curva a diferença das outras duas tensões nas quais o compósito tende a comprimir-se.

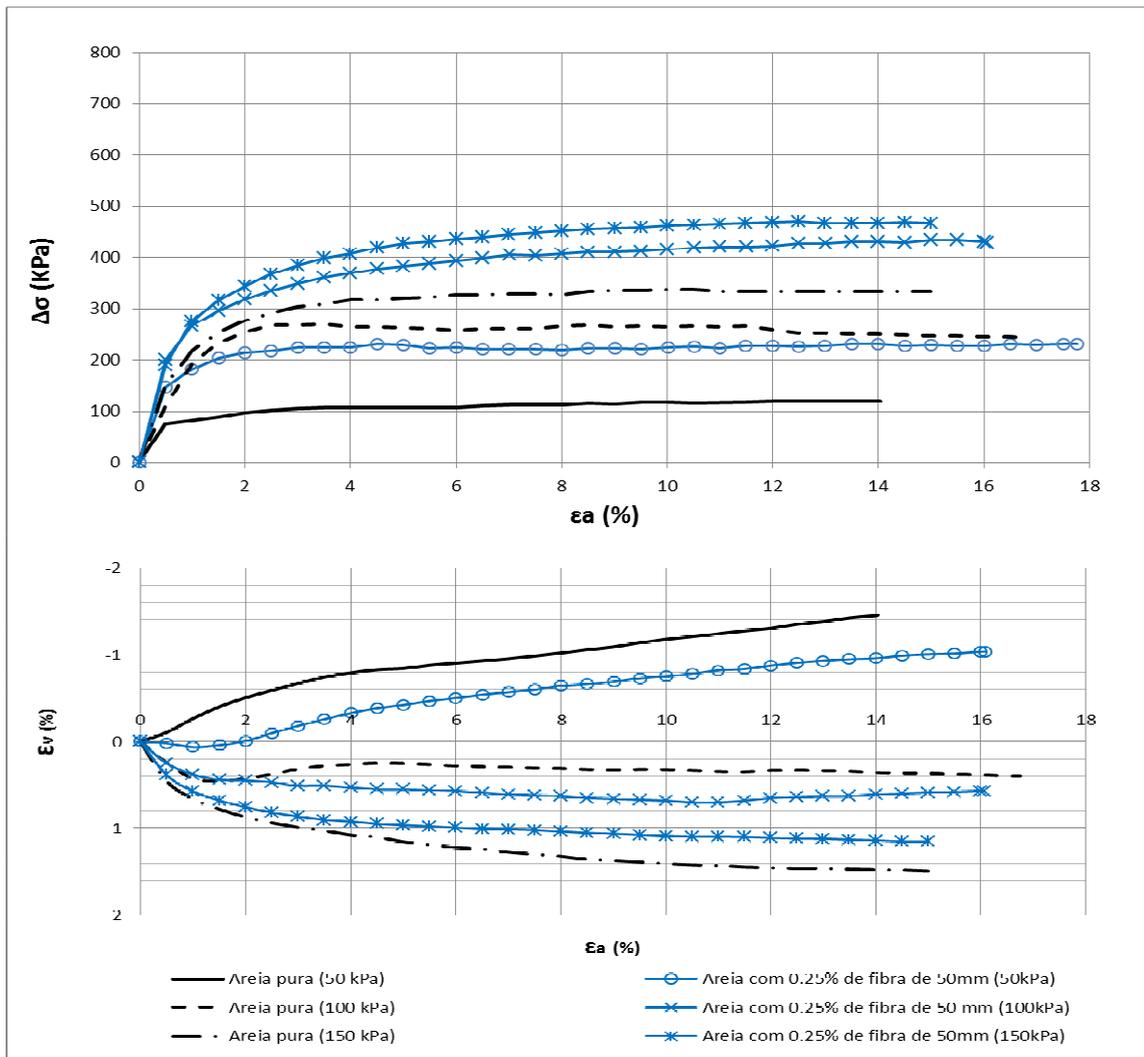


Figura 15: Curvas Tensão – Deformação e de Variação Volumétrica da areia pura e a mistura A025C50 em ensaios triaxiais.

Na figura 16, apresentam-se as curvas de tensão-deformação e de variação volumétrica, que correspondem aos ensaios triaxiais (CID) realizados à areia pura e a mistura A050C25 submetidas a diferentes tensões confinantes, mostrando-se que o comportamento das curvas tensão-deformação da mistura nos três estágios de carga apresentam pequenas variações em relação ao aspecto das curvas da areia pura, aumentando a resistência em mais de 53%, as curvas não mostram pico de resistência, e percebe-se que quando é atingido o 14% de deformação axial ainda a resistência esta aumentando levemente.

Nas curvas de variação volumétrica a mistura ainda mantém o comportamento da areia pura mostrando pequenas variações, também se observa que quando a mistura é submetida a baixas tensões confinantes se apresenta uma tendência dilatante na curva a diferença das outras duas tensões nas quais o compósito tende a comprimir-se.

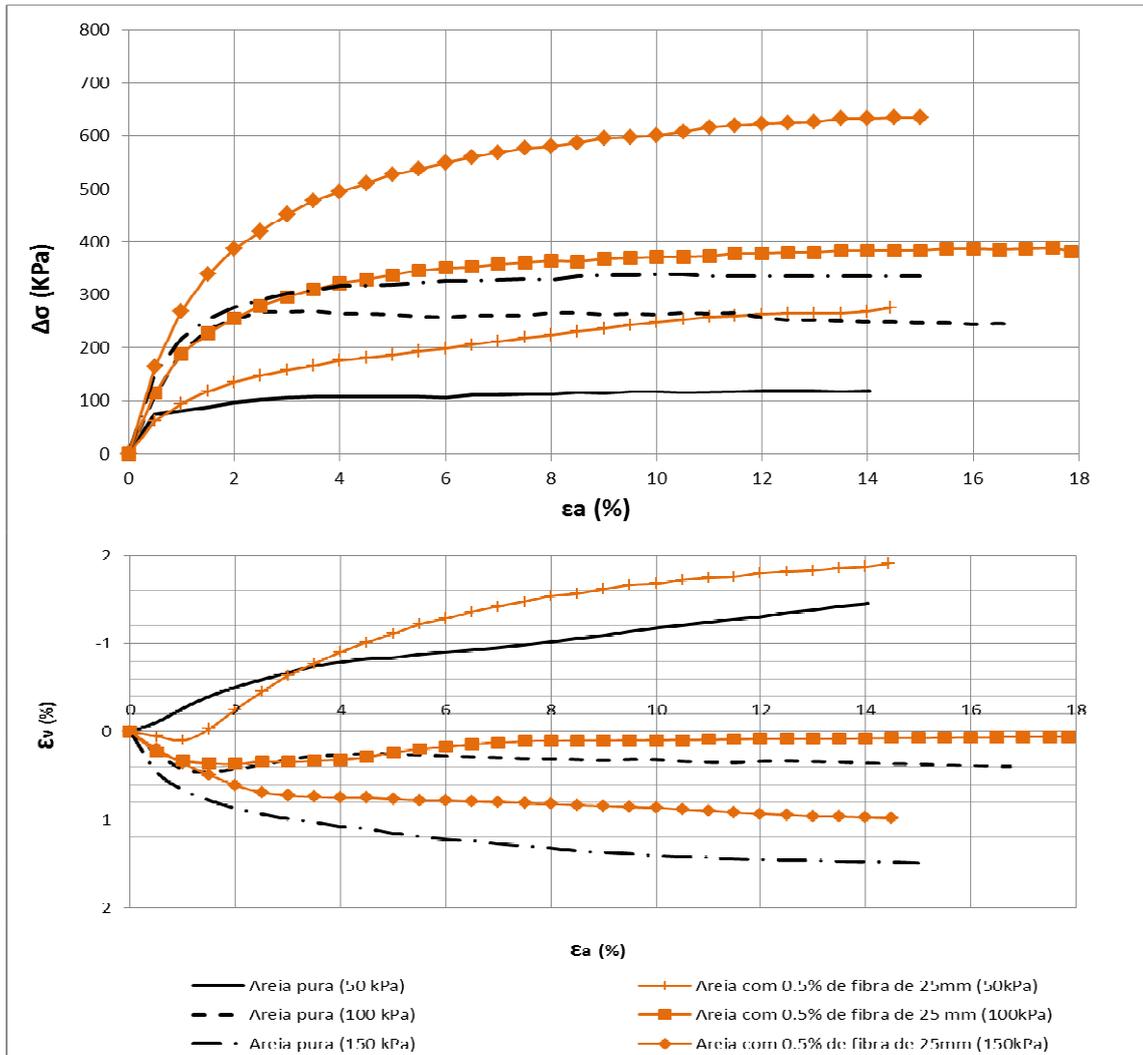


Figura 16: Curvas Tensão – Deformação e de Variação Volumétrica da areia pura e a mistura A050C25 em ensaios triaxiais.

Na figura 17, apresentam-se as curvas de tensão-deformação e de variação volumétrica, que correspondem aos ensaios triaxiais (CID) realizados à areia pura e a mistura A050C50 submetidas a diferentes tensões confinantes, mostrando-se que o comportamento das curvas tensão-deformação da mistura nos três estágios de carga apresentam maiores variações no aspecto em relação às curvas da areia pura e a anterior mistura que tinha o mesmo teor, mas comprimento mais curto, aumentando a resistência em mais de 73% em relação com a areia pura, as curvas não mostram pico de resistência, e percebe-se que atingindo o 14% de deformação axial ainda existe ganho de resistência.

Nas curvas de variação volumétrica da mistura mostram-se maiores mudanças no comportamento respeitando o formato das curvas da areia pura, também é observado que a mistura tende a compactar-se nos três estágios de carga, expandindo-se levemente quando é aplicada a tensão confinante baixa.

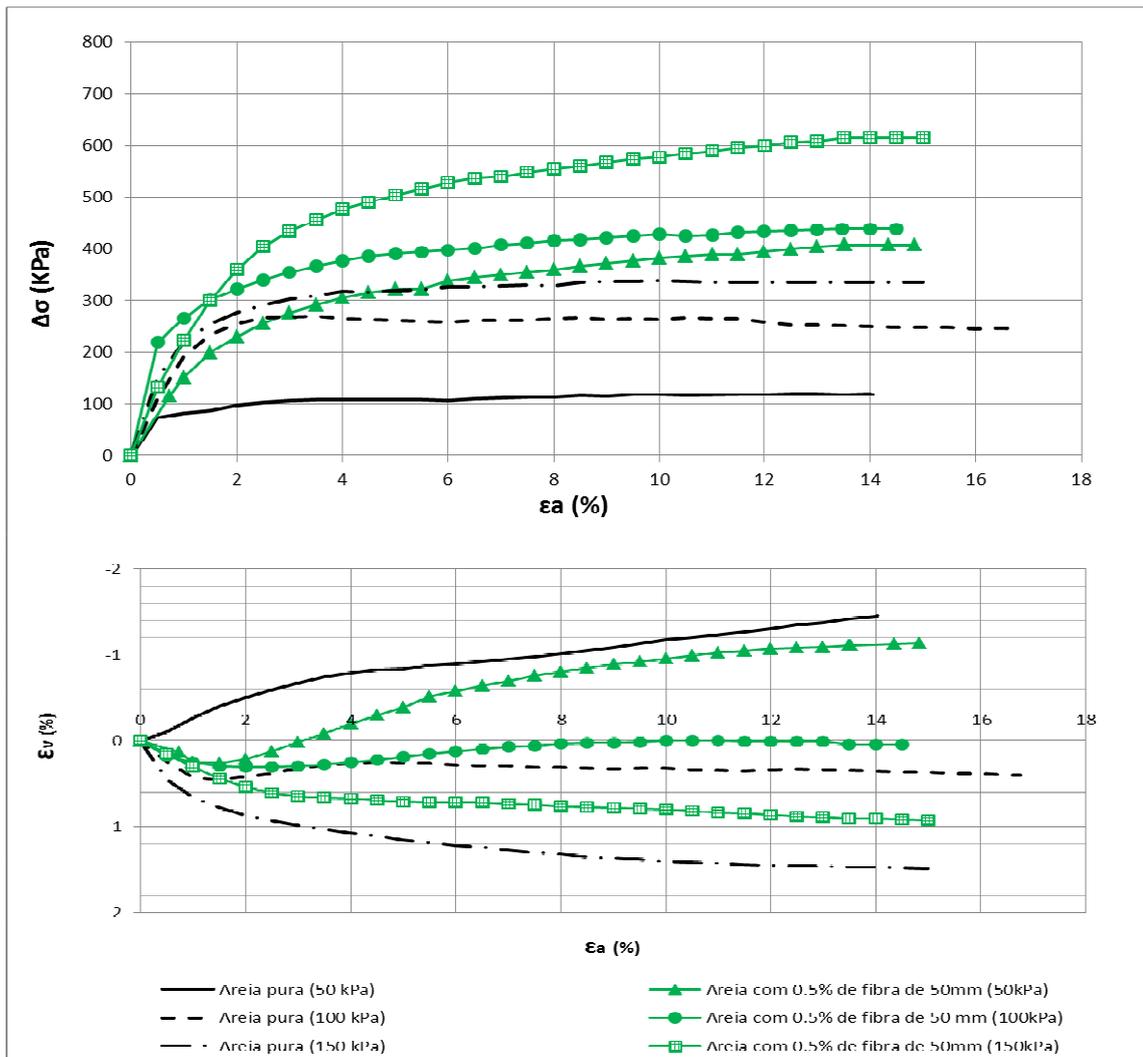


Figura 17: Curvas Tensão – Deformação e de Variação Volumétrica da areia pura e a mistura A050C50 em ensaios triaxiais.

Na figura 18, apresentam-se as curvas de tensão-deformação e de variação volumétrica, que correspondem aos ensaios triaxiais (CID) realizados à areia pura e a mistura A750C25 submetidas a diferentes tensões confinantes, mostrando-se que o comportamento das curvas tensão-deformação da mistura aumentou a resistência em mais de 94% devido à adição de maior teor de fibras, provocando uma maior variação no aspecto da resistência em relação com a deformação, caracterizando-se como um comportamento elasto-plástico de enrijecimento, as curvas não mostram pico de resistência, e ressalta-se que existe ainda ganho de resistência após os 18% de deformação axial.

Nas curvas de variação volumétrica da mistura mostram-se maiores mudanças no comportamento respeitando o formato das curvas da areia pura, também é observado que a mistura tende a compactar-se nos três estágios de carga, expandindo-se levemente quando é aplicada a tensão confinante baixa.

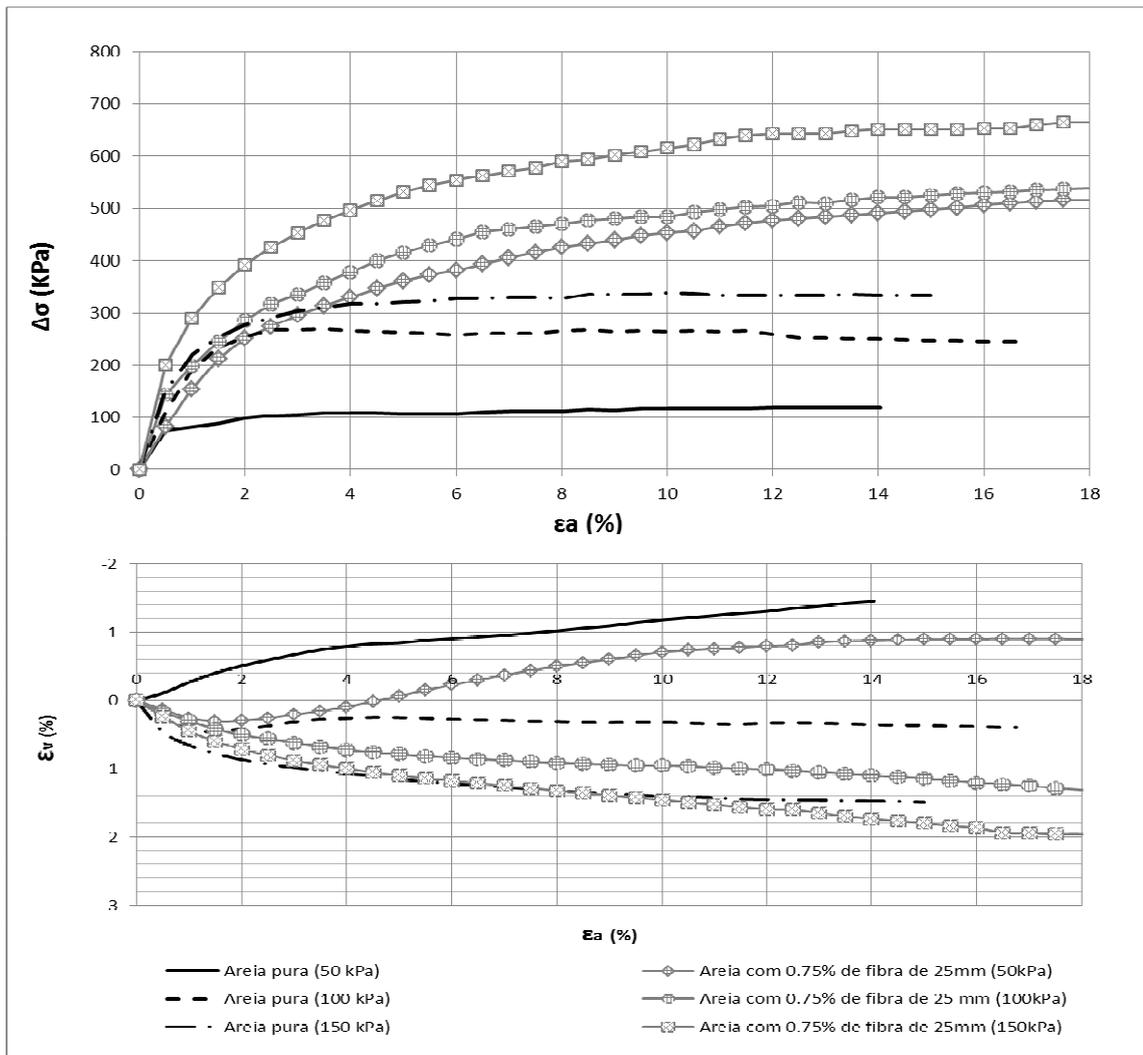


Figura 18: Curvas Tensão – Deformação e de Variação Volumétrica da areia pura e a mistura A075C25 em ensaios triaxiais.

Na figura 19, apresentam-se as curvas de tensão-deformação e de variação volumétrica, que correspondem aos ensaios triaxiais (CID) realizados à areia pura e a mistura A750C50 submetidas a diferentes tensões confinantes, mostrando-se que o comportamento das curvas tensão-deformação da mistura aumentou a resistência em mais de 106% devido à adição de maior teor e comprimento das fibras, provocando uma maior variação no aspecto da resistência em relação com a deformação, caracterizando-se como um comportamento elasto-plástico de enrijecimento, as curvas não mostram pico de resistência, e ressalta-se que existe ainda ganho de resistência após os 18% de deformação axial.

Nas curvas de variação volumétrica da mistura mostram-se maiores mudanças no comportamento respeitando o formato das curvas da areia pura, também é observado que a mistura tende a compactar-se nos três estágios de carga, expandindo-se levemente quando é aplicada a tensão confinante baixa.

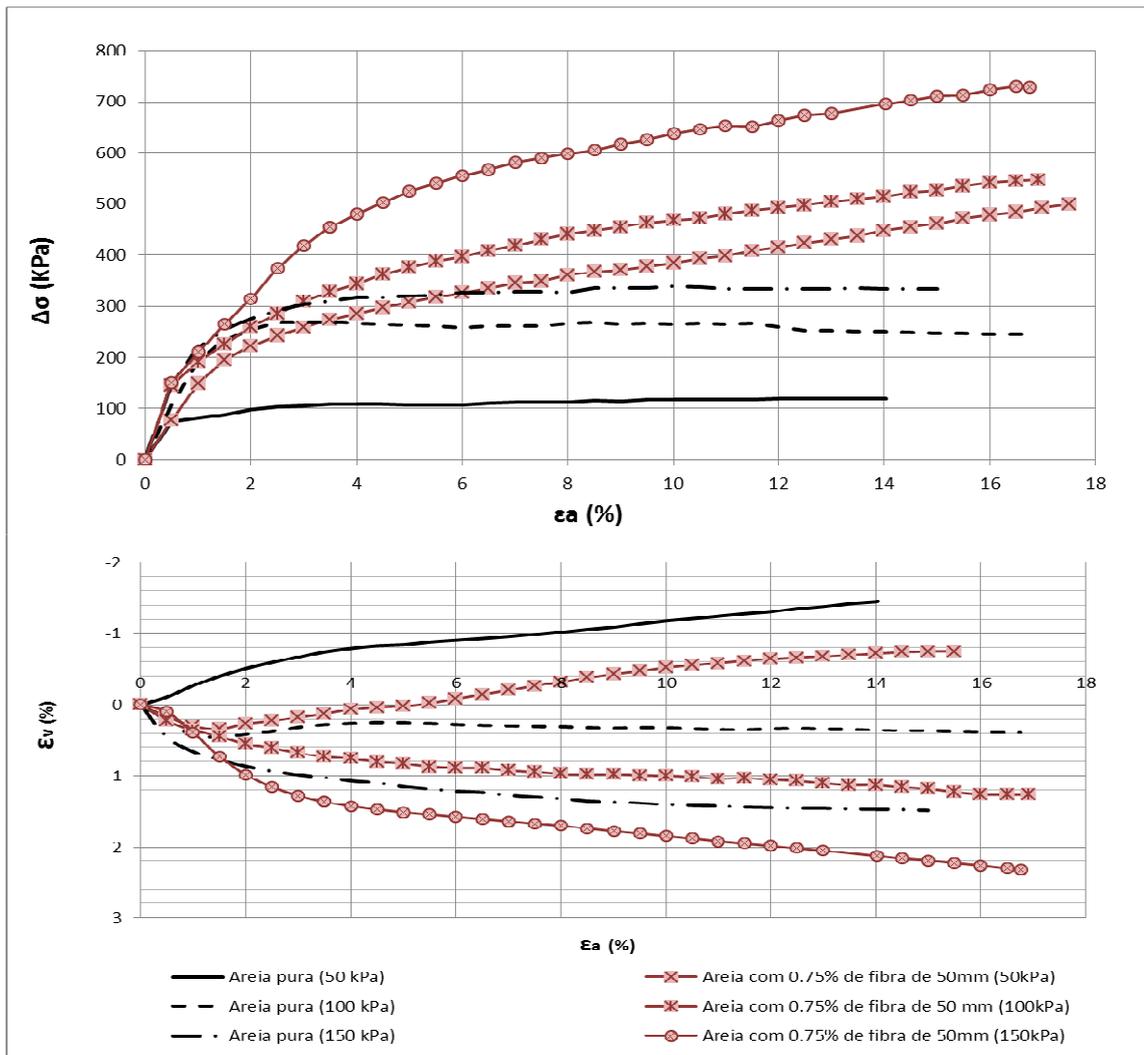


Figura 19: Curvas Tensão – Deformação e de Variação Volumétrica da areia pura e a mistura A075C50 em ensaios triaxiais.

4.2.1.3

Quadros comparativo das curvas tensão-deformação por comprimento de fibra

A seguir serão avaliados os comportamentos das curvas tensão- deformação e resistências das misturas em relação aos comprimentos das fibras (25 e 50 mm) separando-as em gráficos por tensão efetiva aplicada, tentando identificar a influencia dos teores de fibra em cada mistura.

a. Misturas com comprimentos de fibra de coco de 25 mm

Na figura 20 observa-se que para tensões confinantes baixas (tensão efetiva de 50 kPa) as três misturas comparadas apresentam melhorias na resistência em relação com a areia pura, também observa-se que para a areia pura e a mistura A025C25 apresentam

curvas tensão-deformação com aspecto similar, onde foi alcançada a resistência residual. Para as misturas A050C25 e A075C25 as curvas tensão-deformação mostram uma semelhança de comportamento aumentando a resistência passando o 14% de deformação axial. Ressalta-se que a mistura que obteve a maior resistência para uma tensão confinante de 50 kPa foi a A075C25, influenciada pelo alto teor de fibra.

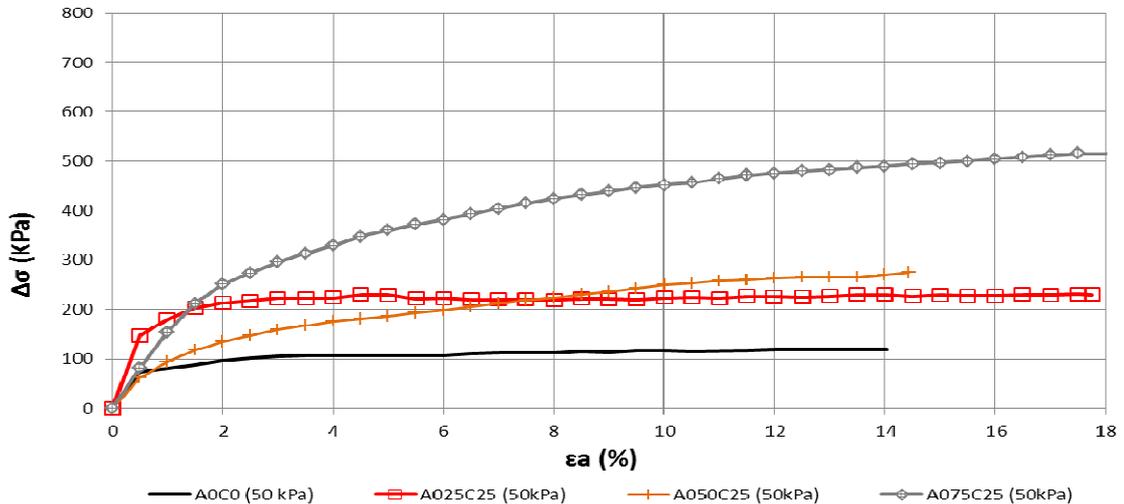


Figura 20: Curvas da tensão - deformação para areia pura e misturas com comprimento de fibra igual a 25 mm em ensaios triaxiais de 50 kPa de tensão efetiva.

Já na figura 21 para a aplicação de tensões efetivas de 100 kPa as misturas A025C25 e A050C25 apresentam um comportamento muito similar respeitando o comportamento da curva da areia pura a qual atinge a resistência residual após o 6% de deformação axial, comportamento diferente na mistura A075C25 quem ainda aumenta a resistência ao alcançar a deformação axial de 14%, destacando novamente o alto teor de fibra. Ressalta-se que a mistura que obteve a maior resistência foi novamente a A075C25.

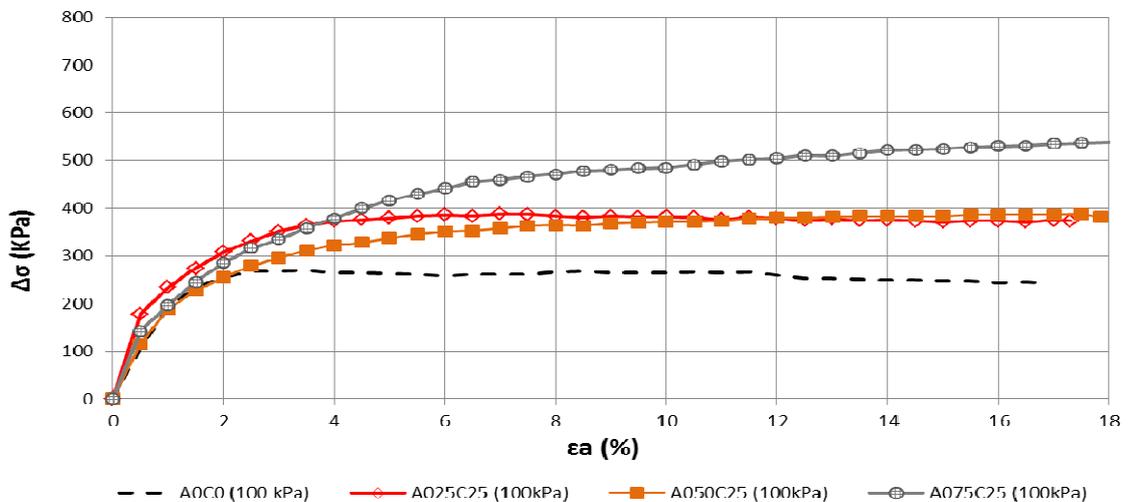


Figura 21: Curvas da tensão - deformação para areia pura e misturas com comprimento de fibra igual a 25 mm em ensaios triaxiais de 100 kPa de tensão efetiva.

Na figura 22 observa-se que o comportamento das curvas entre misturas varia menos, as misturas A050C25 e A075C25 apresentam valores de resistência similares aumentando levemente após o 14% de deformação axial, a diferença da mistura A025C25 que alcança a resistência residual quando a deformação axial é igual a 10%. A mistura que obteve a maior resistência é novamente a A075C25 ressaltando que a mistura A050C25 mostra resultados muito parecidos.

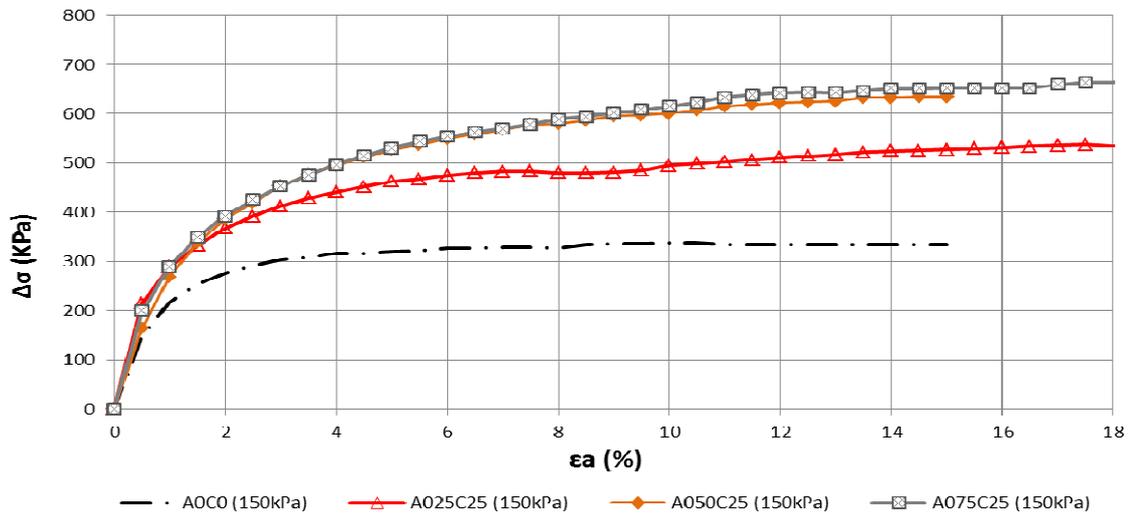


Figura 22: Curvas da tensão - deformação para areia pura e misturas com comprimento de fibra igual a 25 mm em ensaios triaxiais de 150 kPa de tensão efetiva.

É importante destacar que as misturas preparadas com o comprimento de 25 mm não apresentam grandes variações na gráfica da variação volumétrica (fator avaliado no tópico anterior), e sim ajuda a melhorar as resistências da areia pura.

b. Misturas com comprimentos de fibra de coco de 50 mm

Considerando a tensão confinante como parâmetro para comparar os comportamentos das misturas da figura 23 pode-se dizer que quando são aplicadas baixas tensões confinantes (tensão efetiva de 50 kPa) às misturas, todas melhoram a resistência, além de apresentar curvas tensão-deformação com um aspecto similar entre elas, com a diferença que as misturas A050C50 e A075C50 continuam aumentando a resistência após atingido o 14% na deformação axial, comportamento que é diferente para a mistura A025C50 que alcança a resistência residual ao atingir uma deformação axial de 6%. A mistura que mostrou a maior resistência foi a A075C50 com resultados muito próximos da mistura A050C50.

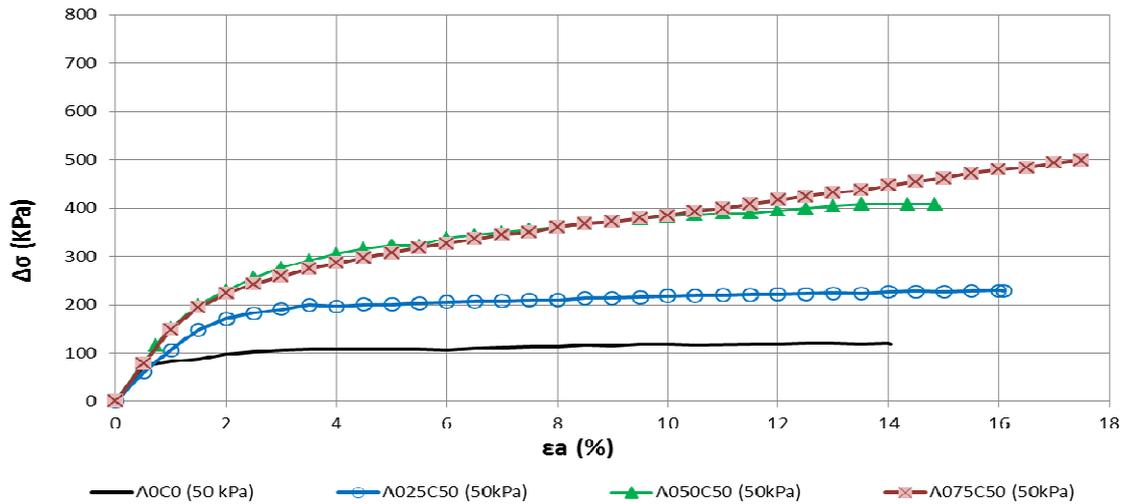


Figura 23: Curvas da tensão - deformação para areia pura e misturas com comprimento de fibra igual a 50 mm em ensaios triaxiais de 50 kPa de tensão efetiva.

Na figura 24 para as misturas submetidas a tensões efetivas de 100 kPa mostra-se um comportamento similar nos três teores de fibra, com a diferença que a mistura A075C50 ainda ganha resistência ao atingir a deformação axial de 14%, e as misturas A025C50 e A050C50 tendem a alcançar a resistência residual ao atingir a deformação axial igual a 10%. A mistura que mostra a maior resistência é a A075C50 ressaltando que as outras duas misturas apresentam valores de resistência muito próximos.

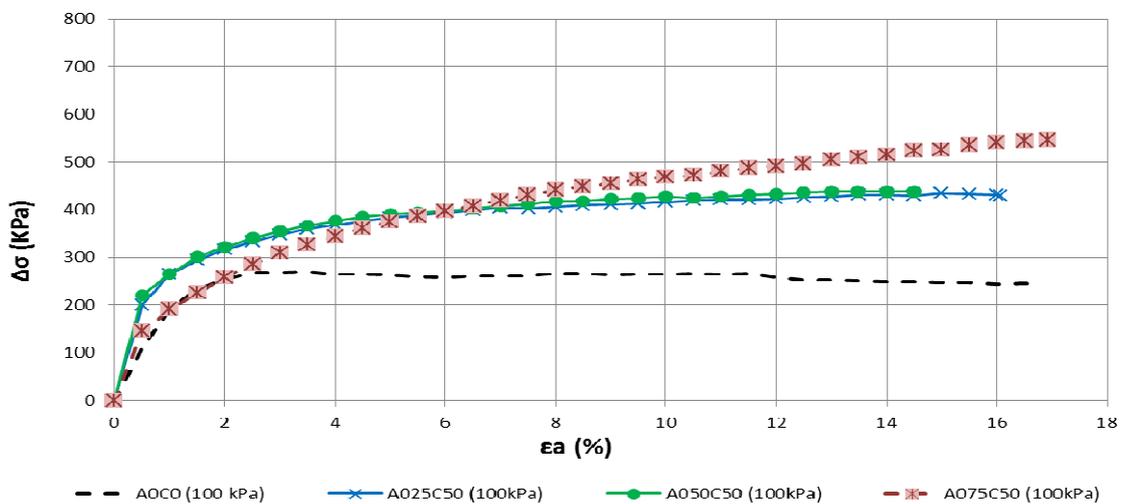


Figura 24: Curvas da tensão - deformação para areia pura e misturas com comprimento de fibra igual a 50 mm em ensaios triaxiais de 100 kPa de tensão efetiva.

Para as misturas submetidas a tensões efetivas de 150 kPa observa-se na figura 25 que as três curvas tensão-deformação apresentam um aspecto semelhante melhorando a resistência consideravelmente, mostrando uma maior proximidade nos resultados entre as misturas A050C50 e A075C50, onde os dois CP ainda se encontram aumentando a resistência após alcançar o 14% de deformação axial. Para a mistura A025C50 ao igual que

nas anteriores avaliações o CP tende a alcançar a resistência residual, o que poderia significar que a quantidade das fibras é pequena e deixaram de trabalhar.

A mistura que obteve a maior resistência foi a A075C50.

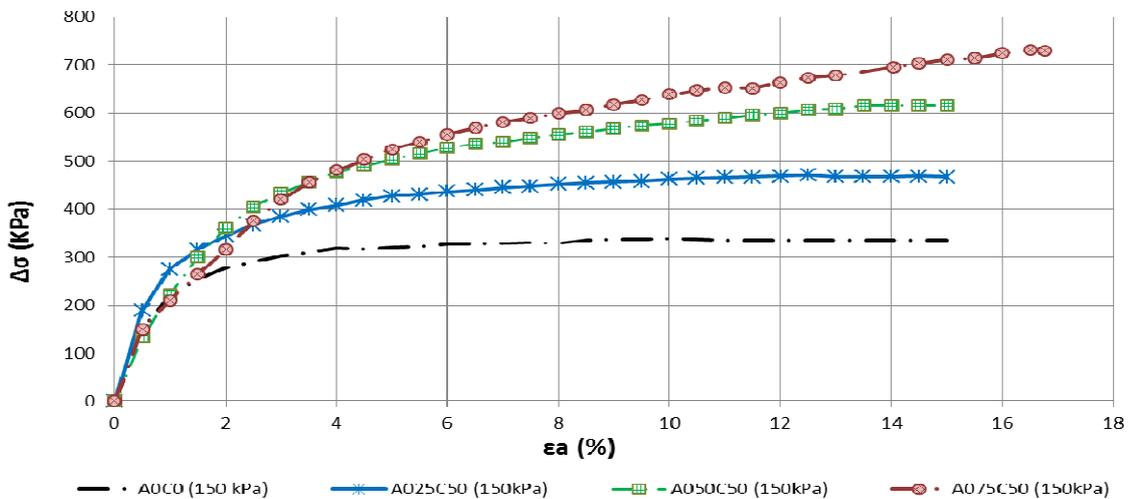


Figura 25: Curvas da tensão - deformação para areia pura e misturas com comprimento de fibra igual a 50 mm em ensaios triaxiais de 150 kPa de tensão efetiva.

As resistências atingidas pelas misturas submetidas a tensões efetivas de 50 kPa dão resultados muito próximos à aplicação de tensões efetivas de 100 kPa, resultados que mostram que as fibras de coco podem ser usadas em soluções de obras geotécnicas a baixas profundidades resistindo altos carregamentos.

4.2.1.4

Quadros comparativo das curvas tensão-deformação por teor de fibra

Neste tópico apresentam-se as curvas tensão-deformação das misturas separadas pelo teor de fibra utilizada, avaliando o comportamento quando existe uma variação de comprimento das fibras e tensões confinantes para os distintos teores de fibra 0,25; 0,50; e 0,75%.

a. Misturas com teores de 0,25% de fibra de coco

A figura 26 apresenta as curvas tensão-deformação para a areia pura e misturas com 0,25% de teor de fibra em ensaios triaxiais. Percebendo que todas mostram um comportamento similar, melhorando a resistência em relação à deformação axial, sem mudar o aspecto de curva da areia pura, o que poderia significar que a adição de fibras de coco em teores menores à areia pura melhora a resistência sem mudar o comportamento de forma repentina.

Mostra-se na figura 26 que quando as misturas são submetidas a tensões efetivas iguais a 50 kPa tem-se um comportamento das curvas semelhante, alcançando valores da resistência residual muito parecidos após atingir a deformação axial igual a 14%, ressaltando que a mistura A025C25 atinge essa resistência antes do que a mistura A025C50.

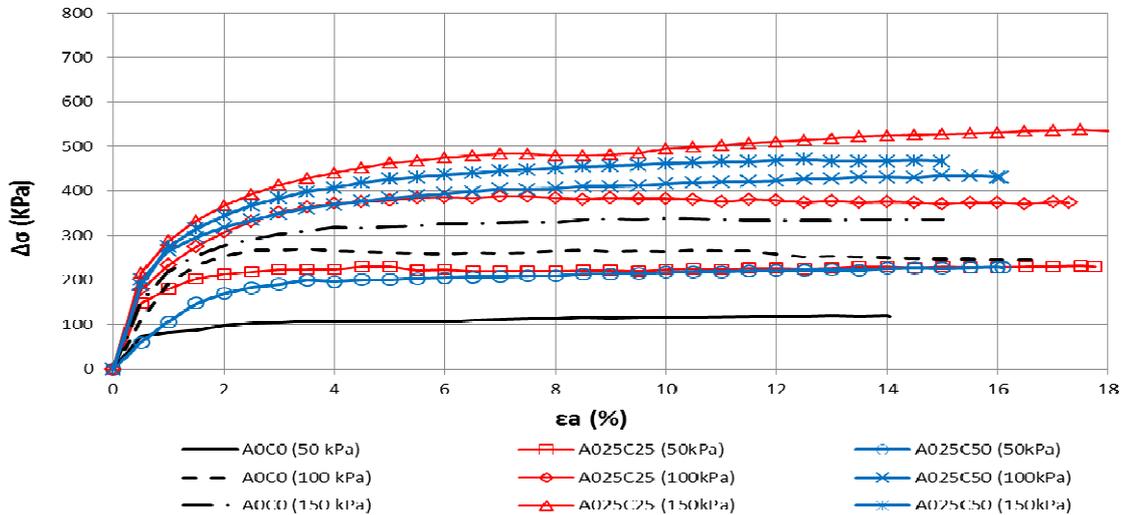


Figura 26: Curvas da tensão - deformação para areia pura e misturas com 0,25% de teor de fibra em ensaios triaxiais.

Para as tensões efetivas de 100 e 150 kPa, mostram que o comportamento das curvas são similares, o que permite ressaltar que os compósitos com baixo teor de fibra de coco conseguem alcançar a resistência residual quando são atingidas deformações axiais iguais a 6%, o que significa que as fibras utilizadas em baixos teores trabalham mais no início do cisalhamento.

b. Misturas com teores de 0,50% de fibra de coco

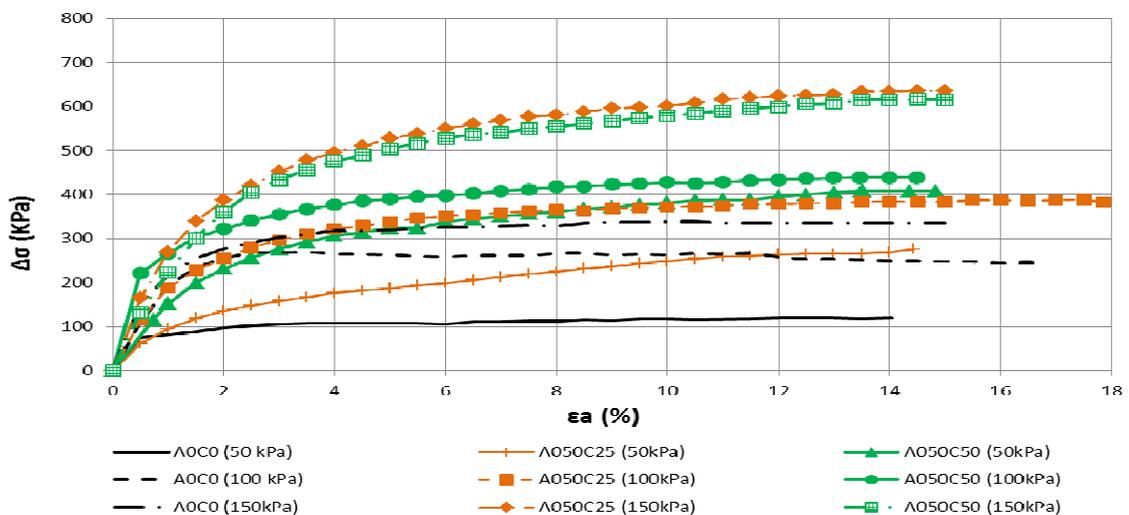


Figura 27: Curvas da tensão - deformação para areia pura e misturas com 0,50% de teor de fibra em ensaios triaxiais.

Na figura 27 apresentam-se as curvas tensão-deformação para a areia pura e misturas com 0,50% de teor de fibra em ensaios triaxiais, onde da para perceber que as misturas mostram um comportamento similar ao longo da curva, variando o ganho de resistência de acordo à tensão confinante aplicada, mudando levemente o aspecto da curva de areia pura, o que poderia significar que a adição de fibras de coco em teores intermédios melhora a resistência sem mudar de forma brusca o comportamento.

Quando são aplicadas as tensões efetivas de 50 kPa a mistura A050C50 aumenta a resistência mais do que a mistura A050C25. Mostrando um comportamento diferente quando é aplicada a tensão efetiva de 100 kPa que mostra que as resistências ganhadas pelas misturas são semelhantes, mostrando um melhor comportamento a mistura A050C50. Para a aplicação de tensões efetivas de 150 kPa as duas misturas se mostram com resistência maiores e o comportamento semelhante, o que indica que para CP destas características o comprimento não tem muita influencia.

As resistências atingidas pelas misturas preparadas com este teor de fibra são maiores do que as resistências alcançadas pelas misturas com teores de 0,25% de fibra, ademais é importante notar que independentemente das mudanças mostradas no aspecto das curvas tensão-deformação, as misturas ainda tendem a repetir o aspecto das curvas da areia pura.

c. Misturas com teores de 0,75% de fibra de coco

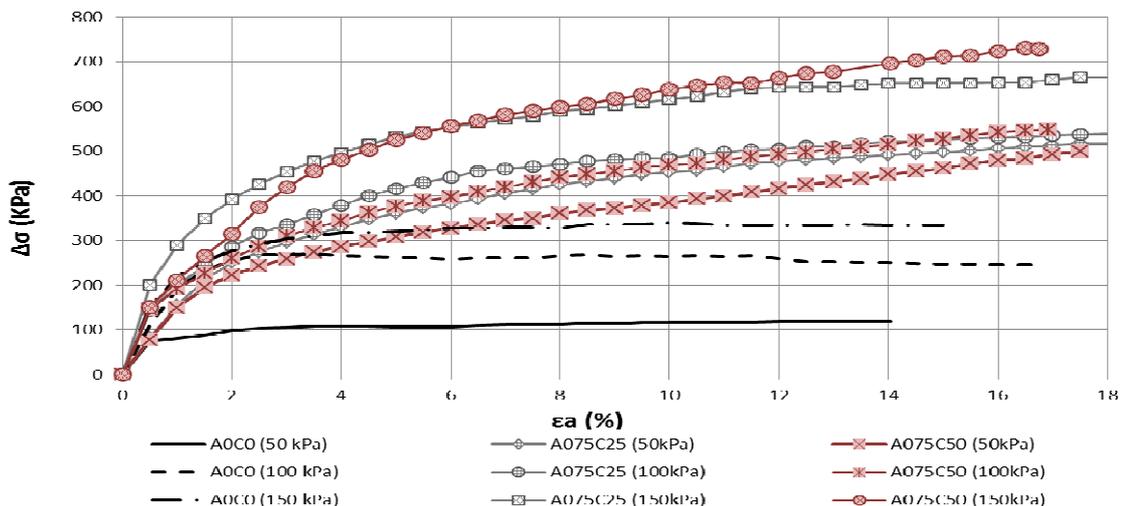


Figura 28: Curvas da tensão - deformação para areia pura e misturas com 0,75% de teor de fibra em ensaios triaxiais.

A figura 28 apresenta as curvas tensão-deformação para a areia pura e misturas com 0,75% de teor de fibra em ensaios triaxiais. Mostrando que as misturas apresentam um comportamento similar, variando o ganho de resistência de acordo à tensão confinante

aplicada, mudando o aspecto da curva da areia pura, o que significa que a adição de fibras de coco em teores altos melhora a resistência, mudando o comportamento da areia pura.

Para este teor de fibra quando são aplicadas tensões efetivas de 50 kPa mostra-se que a resistência ganha obtve valores muito próximos às misturas submetidas a tensões efetivas de 100 kPa. Já para tensões efetivas de 150 kPa as curvas variam mais e mostram resistências maiores, observando que se alcança a resistências de mais de 300 kPa para deformações axiais de 4% e ainda aumentando a resistência após atingido o 14% de deformação.

Os CPs que tem maior teor de fibra tendem a comprimir-se mais do que os CPs com menor teor, ou seja, apresentam uma maior variação volumétrica, situação que poderia produzir maiores recalques nas obras geotécnicas nos processos de carregamento. Se bem as resistências ganhadas com este teor de fibra são mais altas do que as resistências das misturas com o teor de 0,50%, os resultados de ambos os teores mostram-se muito próximos.

4.2.1.5 Envoltórias e Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento

No presente item apresentam-se as envoltórias de resistência ao cisalhamento das misturas separadas por teor de fibra, e comparam-se com a trajetória resistência da areia pura, com o fim de avaliar a influência e o efeito que tem o comprimento da fibra para cada mistura.

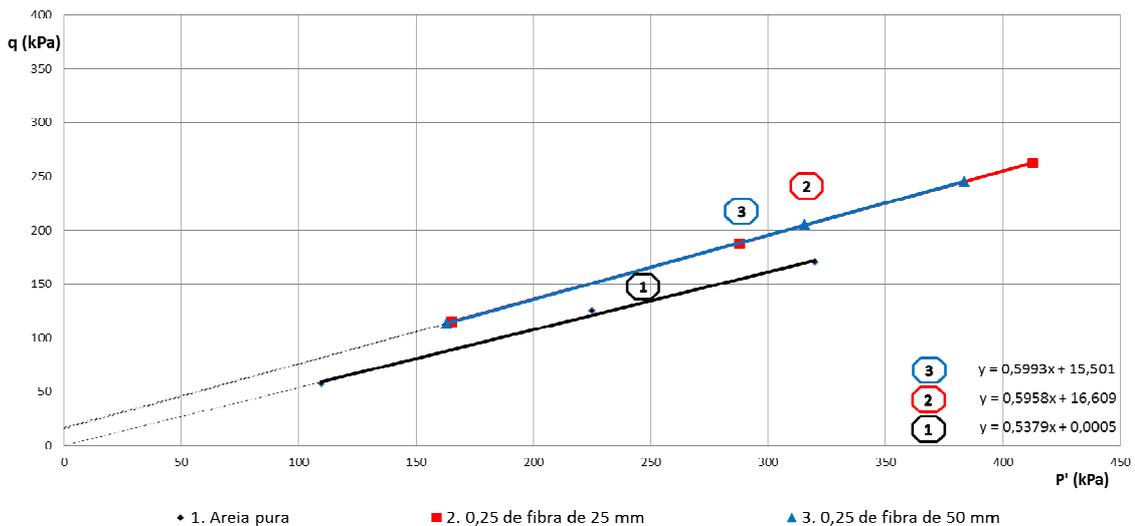


Figura 29: Envoltória de resistência ao cisalhamento da areia pura e misturas com teor de 0,25% de fibra de coco.

Observou-se anteriormente que a adição de fibras de coco em um 0,25% do peso seco na areia pura melhorou sua resistência, mostrando uma pequena mudança no comportamento das curvas tensão- deformação das misturas (onde a mistura A025C25 obteve a maior resistência), resultados conferidos na figura 29 onde são apresentadas as trajetórias de resistência ao cisalhamento das misturas A025C25 e A025C50, mostrando que as trajetórias das misturas são similares, e aumentam discretamente a inclinação da trajetória de resistência com relação à trajetória da areia pura, o que significa um aumento no ângulo de atrito, além de gerar um aumento no intercepto coesivo, parâmetros que aumentam a resistência ao cisalhamento, os resultados obtidos desta figura são apresentados na tabela 14, mais adiante.

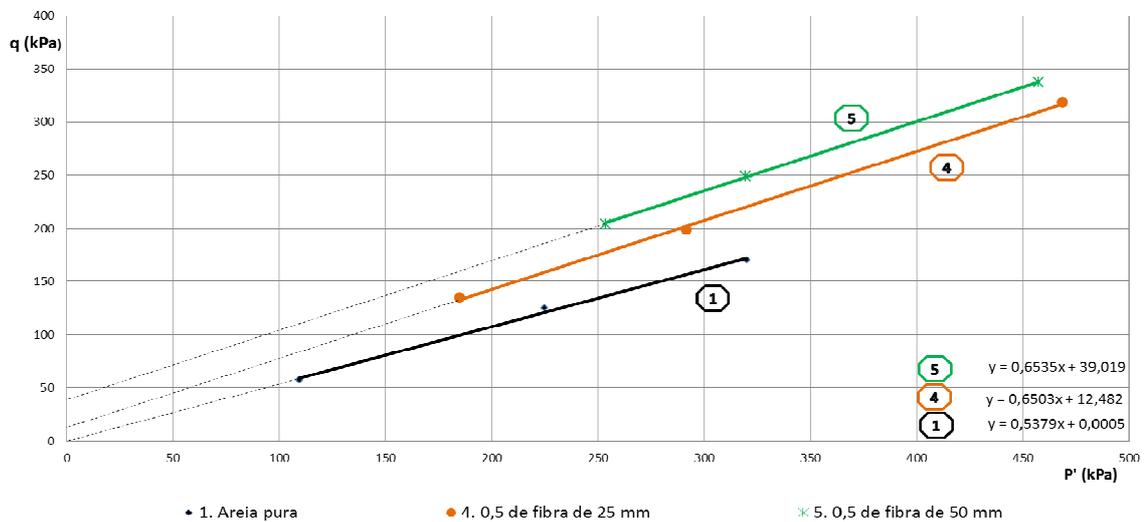


Figura 30: Envoltória de resistência ao cisalhamento da areia pura e misturas com teor de 0,50% de fibra de coco.

Na figura 30 percebe-se que as envoltórias de resistência ao cisalhamento das misturas com um teor de 0,50% de fibra de coco são semelhantes na inclinação da trajetória de resistência, mostrando um discreto aumento na inclinação da trajetória em relação à trajetória da areia pura o que define um aumento no ângulo de atrito, nos resultados do intercepto coesivo ressalta-se que a mistura A050C50 mostra que na presença de comprimentos de fibra maiores os resultados são maiores, ambas as misturas melhoraram os parâmetros de resistência em relação à areia pura, os valores destes parâmetros são apresentados na tabela 14, mais adiante.

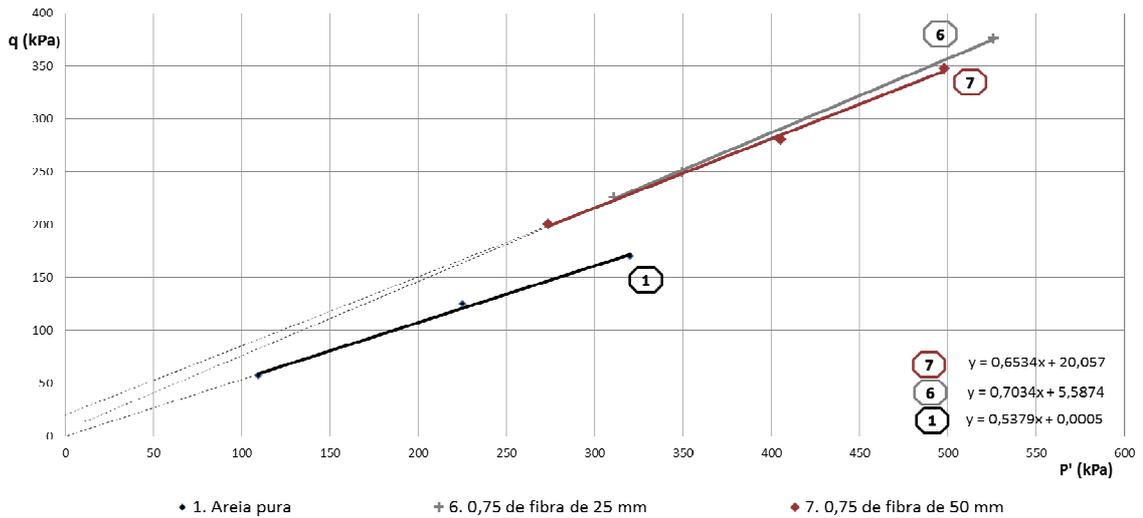


Figura 31: Envolvória de resistência ao cisalhamento da areia pura e misturas com teor de 0,75% de fibra de coco.

Da figura 31, percebe-se que as envolventórias de resistência ao cisalhamento das misturas com um teor de 0,75% de fibra de coco apresentam pequenas diferenças entre elas, variando levemente nos ângulos de atrito e aumentando o intercepto coesivo mostrando que a mistura A075C50 obtém maiores resultados, ambas as misturas melhoram em relação à areia pura. Os valores destes parâmetros são apresentados na tabela 14, mais adiante.

Na figura 32 apresentam-se todas as envolventórias de resistência ao cisalhamento obtidas neste estudo, seguida da tabela 14 onde são apresentados os parâmetros de resistência calculados com o uso das figuras 29, 30, 31 e as equações 3.9 e 3.10 apresentadas anteriormente.

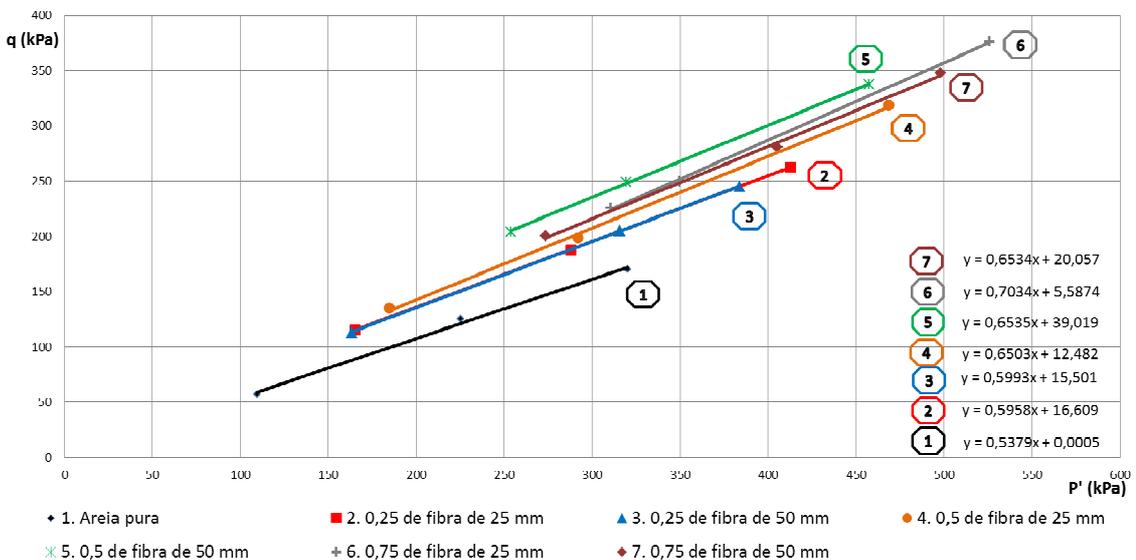


Figura 32: Envolvória de resistência ao cisalhamento da areia pura e misturas.

Tabela 14: Parâmetros de resistência ao cisalhamento da areia pura e misturas.

Mistura/ Solo	α' (°)	α'	c'	Φ' (°)
A0C0	0,00	28,36	0,00	32,54
A025C25	15,50	30,93	19,36	36,82
A025C50	16,61	30,79	20,68	36,57
A050C25	12,48	33,04	16,43	40,56
A050C50	39,02	33,16	50,43	39,31
A075C25	5,59	35,12	7,86	44,70
A075C50	20,06	33,16	26,50	40,80

Da figura 32 e da tabela 13 pode-se dizer que a adição de fibras em todas as misturas apresentaram melhorias na resistência ao cisalhamento, mas é preciso destacar que o comportamento da mistura A050C50 mostrou o melhor comportamento entre as misturas, atingindo a um ângulo de atrito igual a 39,31° e um intercepto coesivo de 50,43 kPa, ressaltando que as areias bem graduadas não apresentam coesão. O ângulo de atrito mais alto foi da mistura A075C25 com um intercepto coesivo de 7,86 kPa, material que teve essa variação no intercepto coesivo devido ao alto teor de fibra que impedia a união dos grãos (aglomeração de fibras) o que gerou maiores vazios no CP.

4.2.2

Mistura Areia – Fibra de coco impermeabilizada

A problemática gerada pela utilização de fibras vegetais envolve a durabilidade que tem as fibras à degradação pelo efeito do intemperismo, por este motivo foram investigados processos de impermeabilização às fibras naturais.

Informações obtidas na literatura relatam o emprego da sílica coloidal (microsílica) na impermeabilização da fibra, processo explicado no item 2.2.6. Este tratamento foi realizado na mistura A050C50 por apresentar os melhores resultados na avaliação anterior. Os resultados são apresentados a seguir.

4.2.2.1

Controle da condutividade hidráulica (mistura impermeabilizada)

Este item apresenta os resultados da condutividade hidráulica que foram calculados com ajuda das equações 3.2; 3.3; 3.4 e 3.5 explicadas no item 3.3.2 inciso "c".

Tabela 15: Controle da condutividade hidráulica (k)

Mistura/ Solo	k (cm/min)	k (cm/seg.)
A0C0	0,1223	2×10^{-3}
A050C50	0,1450	$2,42 \times 10^{-3}$
AI050C50	0,0611	$1,02 \times 10^{-3}$

Ressalta-se que a permeabilidade da mistura A050C50 aumento com a adição das fibras de coco sem variar a ordem de grandeza, mas mostrou-se como um material mais permeável, da tabela 15 identifica-se que a adição da fibra impermeabilizada reduz a permeabilidade da areia pura em um 49%, e um 58% em relação à mistura do mesmo teor de fibra sem impermeabilizar, o que significa que a sílica coloidal utilizada reage internamente no contato fibra solo, fechando os condutos que permitiam fluir a água sem reduzir a ordem de grandeza.

4.2.2.2

Comportamento Tensão Desviadora e Variação Volumétrica vs. Deformação Axial

A figura 33 apresenta as curvas de tensão-deformação e de variação volumétrica que representam os resultados da areia pura, da mistura A050C50 e da mistura impermeabilizada AI050C50 submetidas às tensões efetivas de 50, 100 e 150 kPa em ensaios triaxiais, com o fim de comparar todos os resultados e comportamentos mostrados até atingir uma deformação axial igual a 14%, identificando os efeitos da impermeabilização na nova mistura. Neste item as variáveis serão as tensões confinantes aplicadas aos CP.

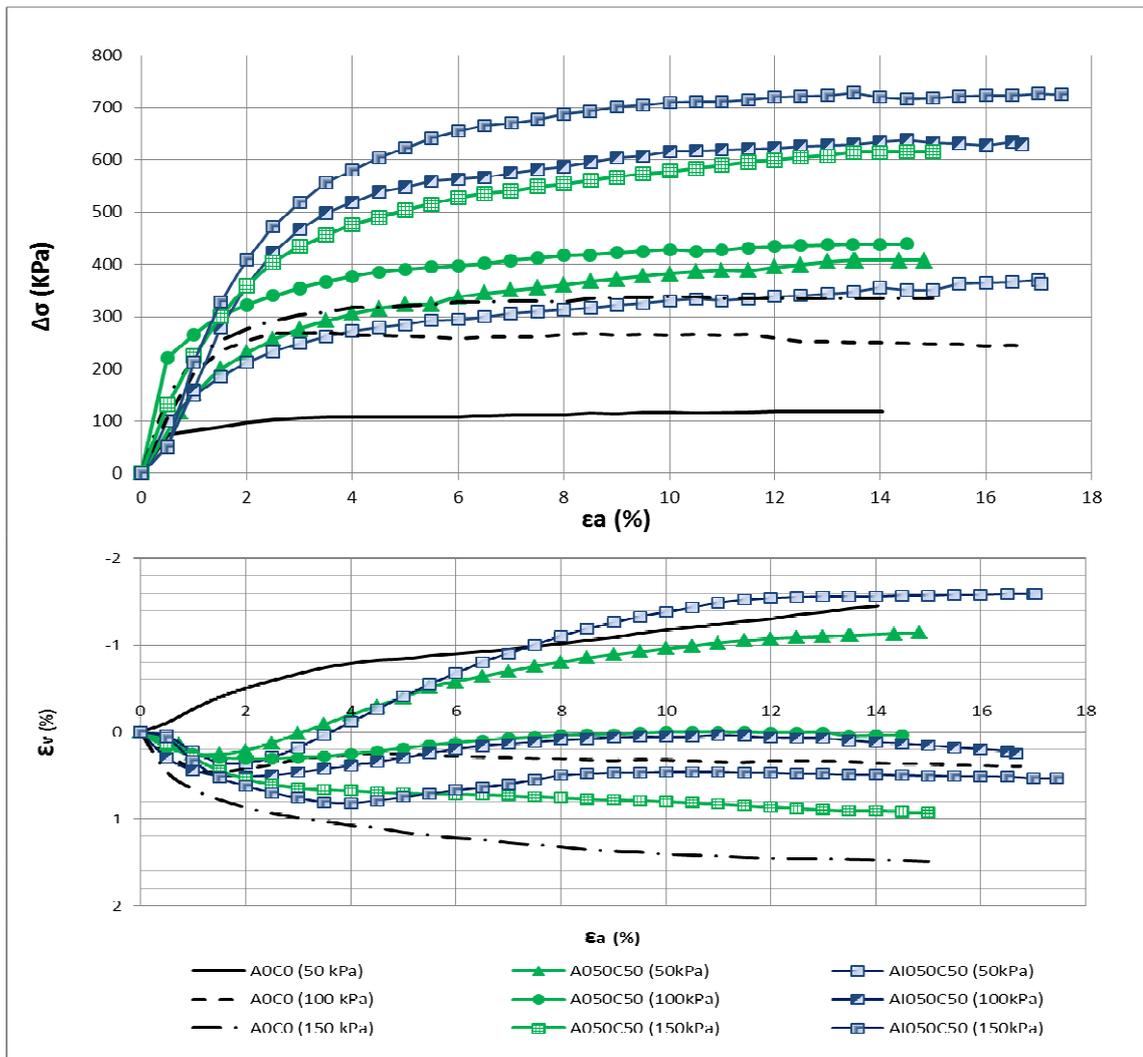


Figura 33: Curvas Tensão – Deformação e de Variação Volumétrica da areia pura e as misturas A050C50 e AI050C50 em ensaios triaxiais.

Observa-se na figura 33 que quando é aplicada a tensão efetiva de 50 kPa a mistura impermeabilizada diminui a resistência levemente em relação à resistência da mistura A050C50 mantendo o aspecto da curva da mistura base.

Na mistura submetida a tensões efetivas de 100 kPa observa-se que a mistura AI050C50 aumenta a resistência em mais de 100% com relação à areia pura, conservando o aspecto da curva tensão-deformação da mistura sem impermeabilizar a qual melhora a resistência em 50% em relação à areia pura.

Para a tensão efetiva de 150 kPa a mistura AI050C50 aumenta em mais de 160% e a mistura A050C50 aumenta em mais de 130% ambas medidas em relação à areia pura.

Em geral pode-se dizer que a resistência da mistura impermeabilizada AI050C50 melhora as condições da mistura A050C50 que já apresentou melhoras em relação à areia pura. O comportamento da mistura na gráfica de variação volumétrica é similar para ambas misturas mostrando um efeito de compressão seguido de uma leve dilatação quando é

aplicada a tensão efetiva de 50 kPa, comportamento contrario nas tensões efetivas de 100 e 150 kPa que tendem a comprimir-se.

4.2.2.3

Envoltória e Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento

Na figura 34 apresentam-se as envoltórias de resistência e na tabela 16 apresentam-se os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura impermeabilizada e comparada com os resultados da mistura sem impermeabilização e da areia pura.

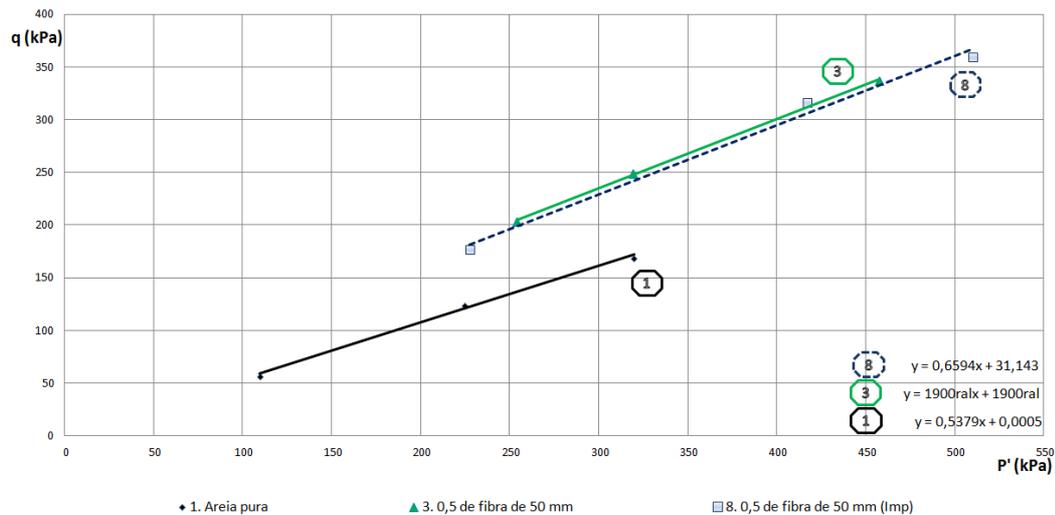


Figura 34: Envoltória de resistência ao cisalhamento da areia pura e as misturas A50C50 e AI050C50.

Tabela 16: Parâmetros de resistência ao cisalhamento da areia pura e as misturas A050C50 e AI050C50.

Mistura/ Solo	a'	α'	c'	Φ'
A0C0	0,00	28,36	0,00	32,54
A050C50	39,02	33,16	50,43	39,31
AI050C50	31,14	33,40	41,41	41,25

Da figura 34 e da tabela 16 pode-se dizer que a mistura impermeabilizada aumentou o ângulo de atrito em 4% e diminuiu a coesão aparente em 17%, valores que não indicam uma grande perda de resistência, tomando em conta que a resistência ao cisalhamento nas areias depende principalmente do ângulo de atrito.

4.3 Análise do alongamento e ruptura das fibras

Este tópico apresenta os resultados das medições realizadas às fibras de coco utilizadas nos CP da mistura A050C50 submetida aos três estágios de carga, com o objetivo de identificar os comprimentos finais das fibras em cada CP, avaliando a porcentagem de fibras que foram esticadas, quebradas e que mantiveram o comprimento após a fase de cisalhamento. A figura 35 apresenta o gráfico de barras que representa aos comprimentos medidos.

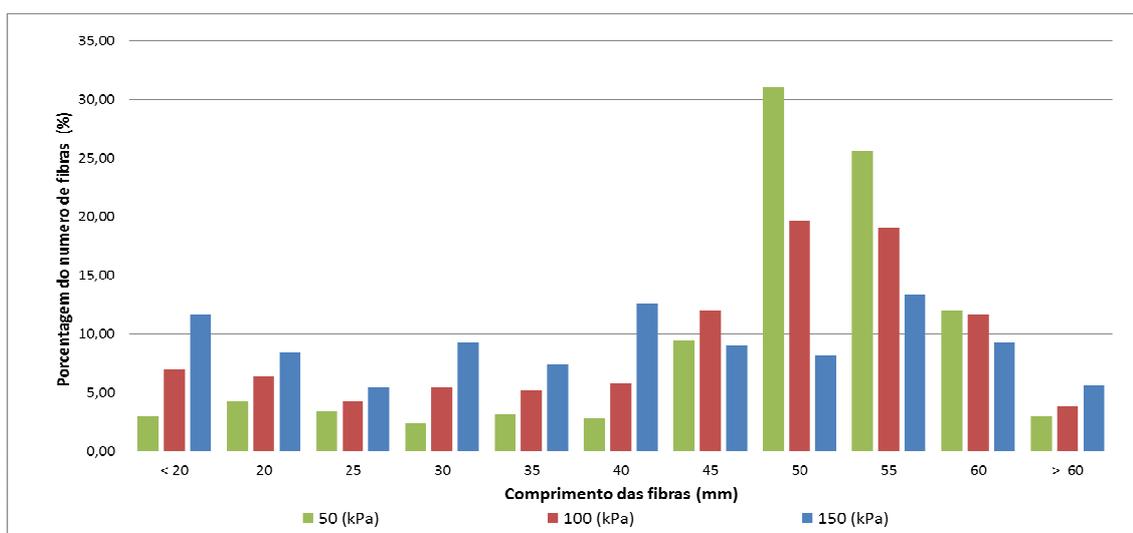


Figura 35: Comprimento final das fibras vs. porcentagem de fibras do mesmo comprimento na mistura A050C50 submetida nas três tensões efetivas estudadas.

Ressalta-se que as misturas avaliadas tinham um comprimento inicial de 50 mm com diâmetros variáveis (característica comum em fibras naturais), da figura 35 verifica-se que após o cisalhamento existe uma variedade ampla de comprimentos nas fibras.

Observa-se que para o ensaio realizado com a tensão confinante de 50 kPa, a variação de comprimentos nas fibras é menor, mantendo o 30% das fibras com 50 mm de comprimento, e mostrando por outro lado que existem algumas fibras que romperam e esticaram seu comprimento inicial.

No comportamento das fibras submetidas a tensões de 100 kPa a distribuição é mais variável do que o ensaio com a tensão de 50 kPa, mostrando que existe maior quantidade de fibras esticadas sem romper. Já para a tensão efetiva de 150 kPa as fibras esticaram-se mais e apresentaram maior quantidade de fibras quebradas, alcançando a uma porcentagem de mais de 10% de fibras com comprimentos menores a 20 mm e uma porcentagem de mais de 20% de fibras com comprimentos maior a 55 mm, comportamento que indica que as fibras trabalham na resistência ao cisalhamento, esticando-se e quebrando pelos altos

valores de carregamento aplicados (comportamento existente nos três ensaios). Por outro lado observa-se que algumas fibras mantiveram o comprimento inicial (50 mm), porém, não se sabe se estas fibras também sofreram extensão e foram levadas à ruptura voltando a se encontrar neste comprimento inicial.

O mecanismo ilustrado na figura 36 pode exemplificar estas observações, com a demonstração de que as altas tensões aplicadas em compressão isotrópica causam o movimento relativo dos grãos entre si, e conseqüentemente, este impõe tensões nas fibras localizadas entre os grãos de areia, que se alongam através de tensões de tração até atingirem a ruptura (Casagrande, 2005).

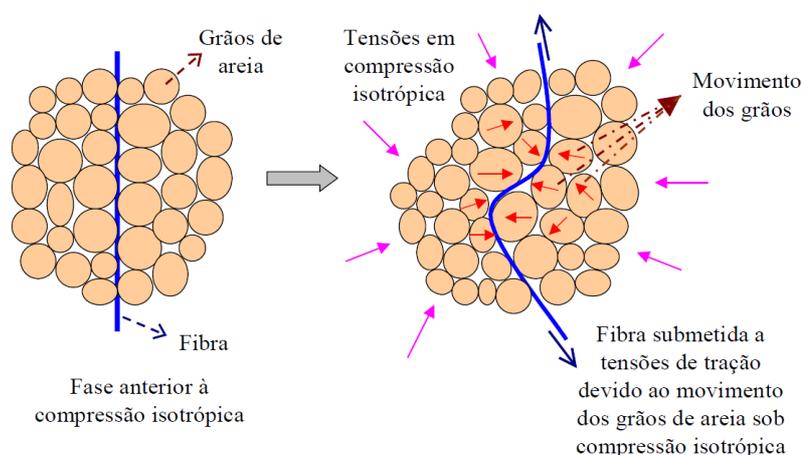


Figura 36: Representação do mecanismo de alongamento e ruptura das fibras submetidas à compressão isotrópica (Casagrande, 2005).

Isso indica que as fibras atuam de forma significativa dentro da matriz arenosa, provavelmente formando uma malha dentro desta, conectando os grãos e alongando-se em primeira instância para depois romperem, pois as fibras de coco podem-se deformar cerca de 30% antes da ruptura (Tomczak, 2010).

4.4 Ensaio de Tomografia

Foi selecionado o CP da mistura A075C50, mistura com alto teor de fibra de coco, a qual se utilizou com o fim de visualizar de melhor forma a distribuição interna das fibras através do ensaio de tomografia mediante o equipamento Xradia 510 (onde se obteve um total de 1004 imagens), as mesmas que foram processadas no software “Visual SI Advance” conseguindo modelar as imagens em formato 3D, permitindo-nos explorar o CP interna e externamente.

No presente tópico são apresentadas e interpretadas as imagens 3D mais representativas do CP, com o objetivo de observar e identificar o comportamento das fibras em sua distribuição, e comprimentos finais após a fase do cisalhamento, além de observar os efeitos da compressão e expansão nos grãos de areia (porosidade). As imagens do ensaio de tomografia apresentam-se em escala de cinzas, mostrando os vazios na cor preta, as fibras um cinza escuro e os grãos da areia em uma variação de cinzas (variação devida à composição química e propriedades dos grãos que permitem absorver os raios x).

As figuras 33, 34 e 35 são compostas por quatro imagens, as quais representam diferentes seções do CP, a imagem superior esquerda representa o corte transversal (XY), a imagem superior direita representa o corte longitudinal em Y por (YZ), a imagem inferior esquerda representa o corte longitudinal em X por (XZ) todos de uma mesma faixa e a imagem inferior direita representa o CP em 3D mostrada em diferentes ângulos.

Nas faixas selecionadas tentamos mostrar as distribuições mais representativas das fibras nos CPs.

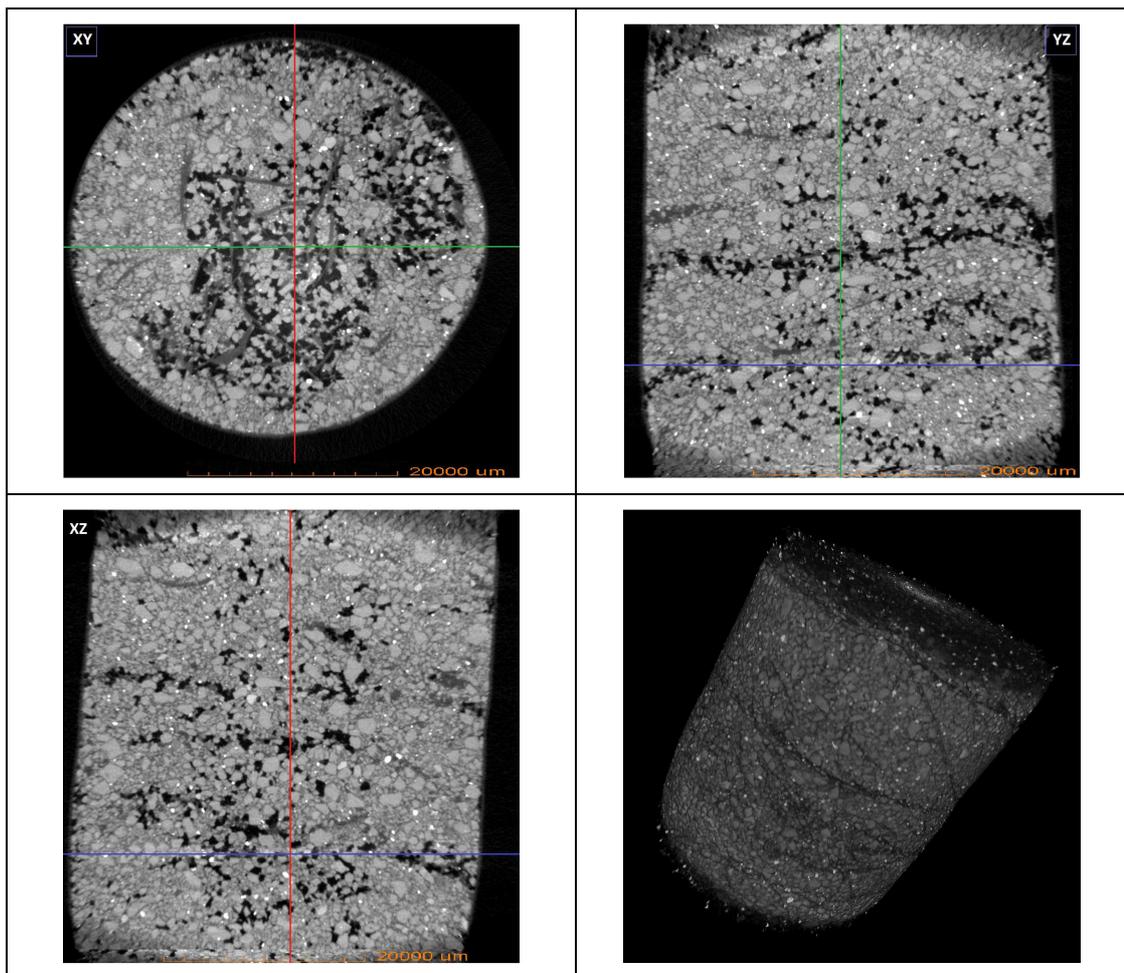


Figura 37: Imagens de tomografia 3D, seção transversal com fibras bem distribuídas.

Na figura 33 mostram-se as fibras bem distribuídas conseguindo espalhar-se em toda a secção transversal (corte XY). Nos cortes XZ e YZ pode-se observar novamente que a maioria dos arranjos das fibras são horizontais, percebendo que os alinhamentos verticais não alcançam mais de 20 mm de comprimento, ressaltando que na imagem 3D observam-se fibras distribuídas verticalmente pelo exterior. Também se observa no corte XY que a faixa selecionada localiza-se entre duas camadas de compactação do CP. Sobre a porosidade pode-se dizer que acontece maiormente sobre as juntas entre as camadas de compactação e também ao redor das fibras de coco.

Na figura 34 observa-se que há faixas onde se acumulou-se. Ressaltando que no momento da preparação das misturas com um teor de 0,75% de fibra já se apresentavam estes acúmulos, agrupando-se as fibras entre elas. Tais grupos são identificados nos cortes YZ e XZ como aparentes aglomerações de fibra, locais onde a compactação tende a apresentar-se na presença de altos carregamentos. Na imagem 3D observa-se que existem fibras que se arranjam em forma vertical externamente.

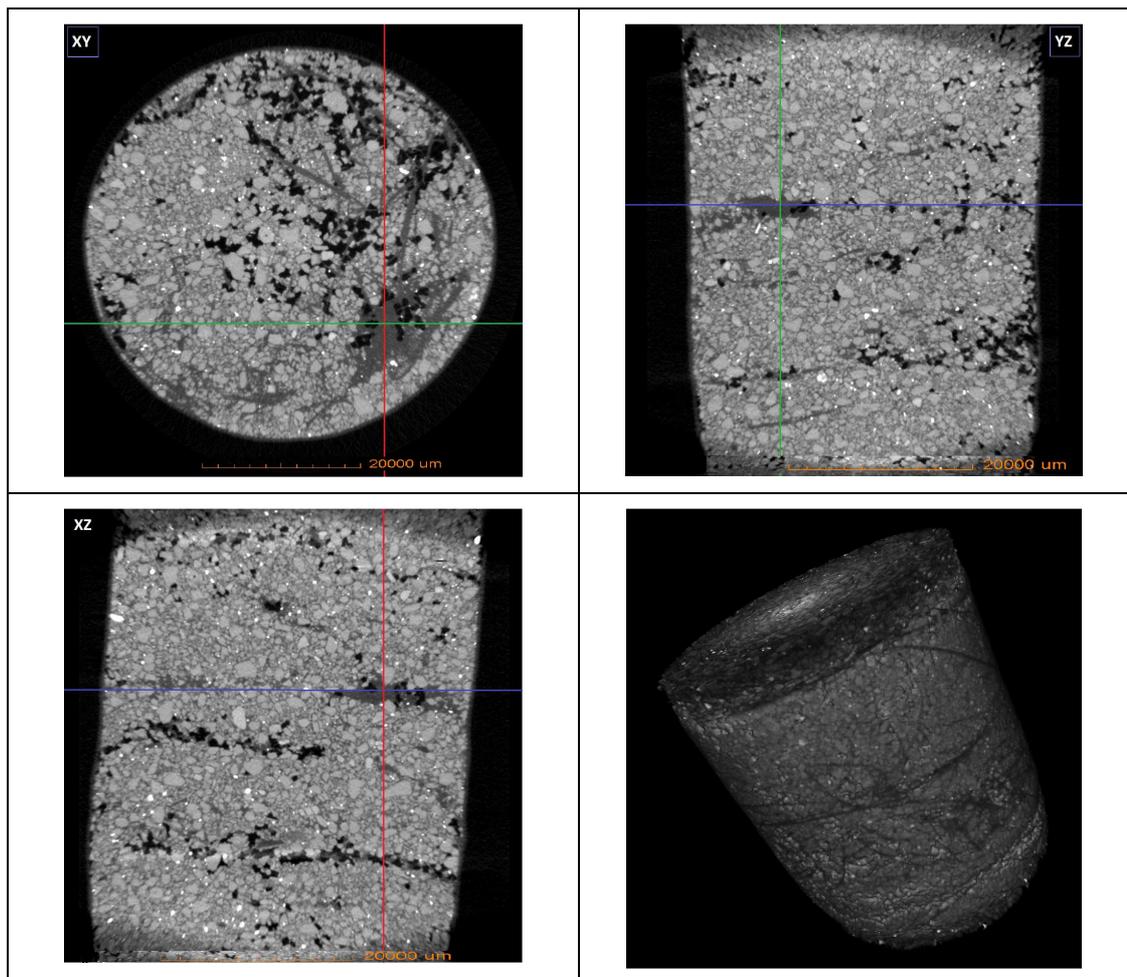


Figura 38: Imagens de tomografia 3D, secção transversal com fibras acumuladas.

Na figura 35 apresenta-se uma faixa mista que mostra as fibras bem espalhadas e também acumuladas, ressaltando que nos cortes XZ e YZ mostram-se fibras arranjadas verticalmente em comprimentos de 10 mm aproximadamente, nos cortes não se observaram fibras com comprimentos maiores a 30 mm o que poderia significar que as fibras estão dobradas ou quebradas em segmentos após a fase de cisalhamento. Também é importante ressaltar que pela forma de preparação dos CPs as fibras arranjam-se horizontalmente em sua maioria. Na imagem 3D observa-se o CP com uma seção cortada onde se mostram duas camadas de compactação, o arranjo entre os grãos com as fibras e a porosidade que se concentra maiormente nas juntas das camadas de compactação e ao redor das fibras.

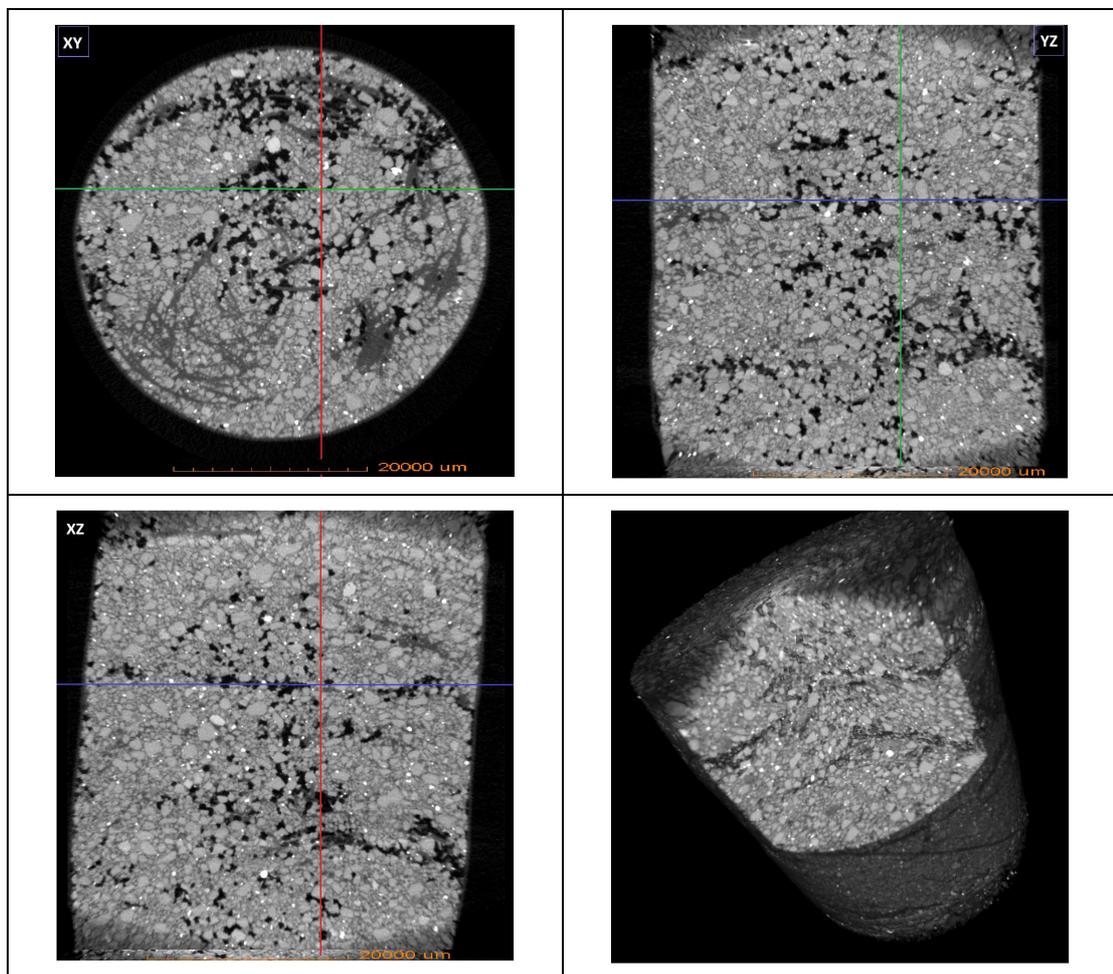


Figura 39: Imagens de tomografia 3D, seção transversal com alinhamentos.

Em geral, identificou-se que as fibras de coco na mistura A075C50 se espalharam de três formas no CP, na primeira as fibras distribuem-se de forma equitativa alinhando-se na maioria de forma horizontal, a segunda formando grupos de fibras mostrando-se em alguns pontos como camadas de fibra, e a terceira de forma mista mostrando fibras bem distribuídas e fibras acumuladas na mesma faixa. Também se percebeu que o efeito da tensão confinante e o carregamento induz que as fibras e os grãos de areia fiquem bem

aderidos entre sim. É importante ressaltar que a porosidade foi concentrada nas juntas das camadas de compactação e ao redor das fibras.

4.5

Comparação dos resultados com base na literatura existente

Dos resultados apresentados na revisão bibliográfica que pesquisaram sobre o reforço de solo com fibras de coco, as pesquisas feitas por Bolaños (2013) e Sotomayor (2014) são as que têm informação com a qual se pode realizar comparações dos resultados.

Antes de fazer comparações com os resultados obtidos da pesquisa de Bolaños (2013), é importante ter primeiramente presente quais são os pontos de diferencia com o presente trabalho, para originar conclusões acertadas e depois relacionar os resultados com o trabalho realizado na pesquisa de Sotomayor (2014).

Bolaños (2013) trabalhou com misturas de argila com fibra de coco moída e argila com fibras de coco cortada. Sendo identificado que os resultados da argila com a fibra moída não apresentaram os resultados esperados, obtendo melhores resultados com as misturas de argila e fibra cortada, motivo pelo qual o presente trabalho enfocou-se mais no estudo das fibras de coco cortadas. Bolaños (2013) determinou que a mistura que obteve os melhores resultados de resistência ao cisalhamento foi a mistura de argila com 1.5% de fibra de coco cortada em 20 mm de comprimento. Os resultados desta mistura serão comparados com os resultados da mistura que apresentou os melhores resultados nesta pesquisa nas tabelas 16 e 17.

Tabela 17: Tipos de misturas selecionadas para comparar

Estudo	Tipo de fibra	Comprimento da fibra (mm)	Porcentagem de fibra (%)
Bolaños (2013)	Coco cortada	20	1,50
Tamayo (2015)	Coco cortada	50	0,50

Tabela 18: Quadro comparativo dos parâmetros de resistência entre pesquisas

Estudo	Mistura	Φ' (°)	c' (kPa)
Bolaños (2013)	AR150C20	29,39	86,08
Tamayo (2015)	A050C50	39,31	50,43

A mistura de argila com fibra de coco aumento em 4° o ângulo de atrito e a coesão em 56,25 kPa em relação aos resultados do solo puro, na mistura de areia com fibra de coco aumentou o ângulo de atrito em 7° e a coesão em 50,43 kPa comparado com os resultados da areia pura. Os resultados mostram que as melhorias em ambos solos são semelhantes, e que as diferenças nos resultados tem relação com as propriedades próprias de cada solo independentemente do que as misturas tem diferentes teores e comprimentos já que pelos seus resultados representam as melhores misturas. Observar-se também que quando são aplicadas tensões efetivas altas o ganho de resistência por parte da fibra é menor do que a baixas tensões de confinamento.

Sobre a dissertação de Sotomayor (2014) mostra-se o uso das fibras em outros dois formatos, a primeira como manta e a segunda misturada em forma aleatória (fibra de coco cortada) ambas aplicadas em areia das mesmas características utilizadas em este trabalho, observando nas curvas carga-recalque o reforço de fibra em manta conseguiu uma diminuição maior do recalque, mas com um maior fissuramento superficial, enquanto que o reforço com as fibras colocadas aleatoriamente conseguiu uma menor redução dos recalques, mas uma melhor inibição da propagação de fissuras, ambos os resultados, comparados com a areia sem adição de fibras demonstraram uma maior resistência e redução do recalque ocorrido na areia pura.

Resultados que permitem recomendar o uso da fibra de coco como material de reforço já que é um material que agrega um incremento significativo na resistência mecânica do solo (areia e argila), além de diminuir os recalques na presença de carregamentos externos.