

4

Apresentação e Discussão dos Resultados

4.1

Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental da presente pesquisa. Para a realização deste programa experimental foi utilizada uma areia proveniente da cidade de Osório, e as fibras foram providenciadas pela companhia Química Suiza S.A (Peru). Essa areia já foi objeto de pesquisa de muitos autores, o que permitiu fazer algumas comparações com resultados obtidos em outras pesquisas. A determinação das propriedades físicas da areia foi realizada por CASAGRANDE (2005).

Com o objetivo de facilitar a apresentação e a análise dos resultados obtidos, os resultados dos ensaios triaxiais foram divididos em primeira e segunda fase. A primeira fase compreende os ensaios triaxiais de compressão realizados na areia não reforçada e reforçada com fibras de polipropileno no teor de 0,5% em relação ao peso seco da matriz de areia. Estes ensaios de compressão triaxial foram realizados com a finalidade de fazer uma comparação com os resultados obtidos por CASAGRANDE (2005), e dessa maneira poder aferir o funcionamento do equipamento triaxial desenvolvido.

A segunda fase compreende os ensaios triaxiais de extensão realizados com o objetivo de avaliar o comportamento da areia e da mistura areia-fibra sob solicitações de extensão.

Para um maior entendimento, inicialmente serão abordadas as definições e notações básicas com relação aos parâmetros de tensão e deformação utilizados ao longo do presente estudo e a seguir serão apresentados os resultados e as respectivas análises.

4.2

Definições e Notações Básicas

Para os ensaios triaxiais, os invariantes de tensão q (tensão de desvio) e p' (tensão efetiva média normal) foram calculados com as formulações de Cambridge, quanto aos

parâmetros de resistência do solo utilizou-se a formulação da inclinação da envoltória de resistência (M) obtida no espaço p' vs q e os parâmetros de deformabilidade, ε_{vol} (deformação volumétrica) e ε_{ax} (deformação axial), utilizados na apresentação gráfica dos resultados, são definidos como:

$$q = (\sigma'_1 - \sigma'_3) \quad (4.1)$$

$$p' = \frac{1}{3}(\sigma'_1 + 2\sigma'_3) \quad (4.2)$$

$$\varepsilon_v = (\varepsilon_{ax} + 2\varepsilon_r) \quad (4.3)$$

$$M = \frac{6 \text{Sen} \phi'}{3 - \text{Sen} \phi'} \quad (4.4)$$

Onde: σ'_1 e σ'_3 são as tensões efetivas principais maior e menor respectivamente;

p' é a tensão efetiva média normal;

q é a tensão de desvio;

ε_{ax} e ε_{vol} são as deformações totais axial e volumétrica, respectivamente;

M é a inclinação da envoltória de resistência no espaço p' vs q .

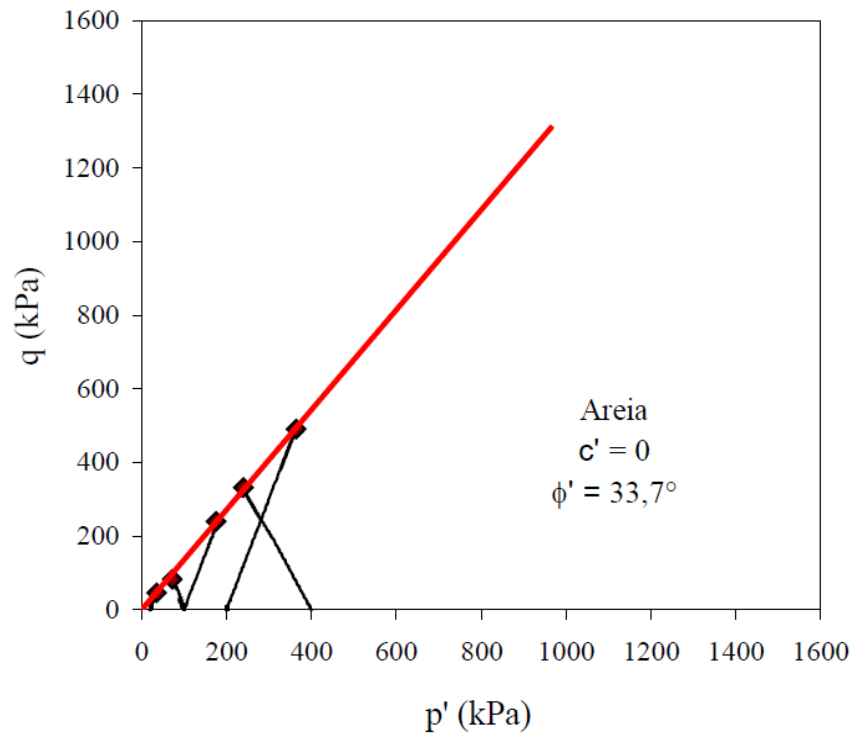
4.3

Ensaio de Compressão Triaxial

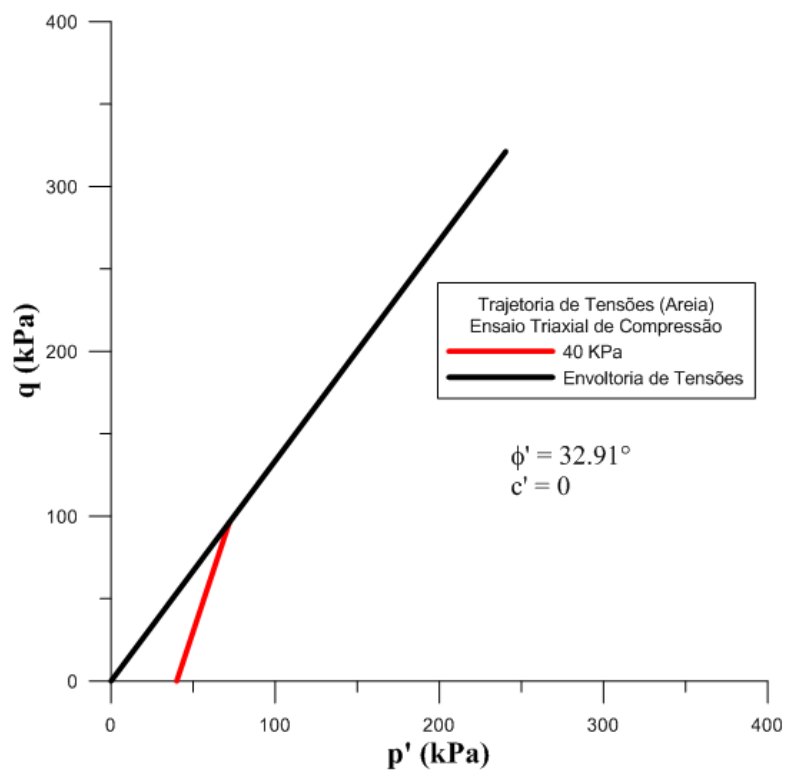
Foram realizados dois ensaios triaxiais de compressão, um com areia não reforçada e o segundo com a mistura areia-fibra. Cabe mencionar que tais ensaios não têm a finalidade de avaliar o comportamento do material estudado, na verdade, os ensaios tiveram a finalidade de testar o funcionamento do equipamento triaxial desenvolvido, já que os resultados obtidos nesses ensaios foram comparados com os resultados obtidos por CASAGRANDE (2005), com a mesma areia e o mesmo teor de fibras dentro da mistura.

As Figuras 4.1 e 4.2 (a e b) exibem uma comparação dos resultados obtidos por CASAGRANDE (2005), com os resultados obtidos no programa experimental proposto na

presente dissertação respectivamente. Ressalta-se que os gráficos estão apresentados em diferentes escalas.

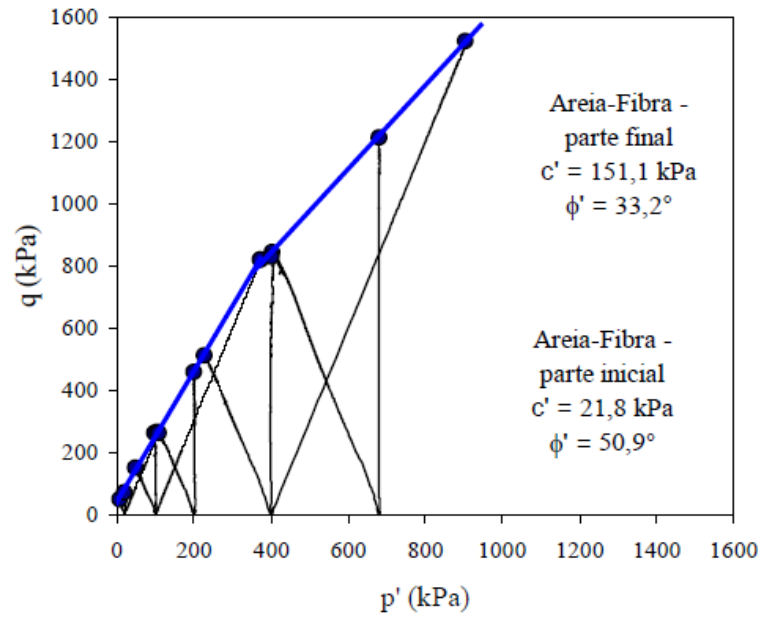


(a)

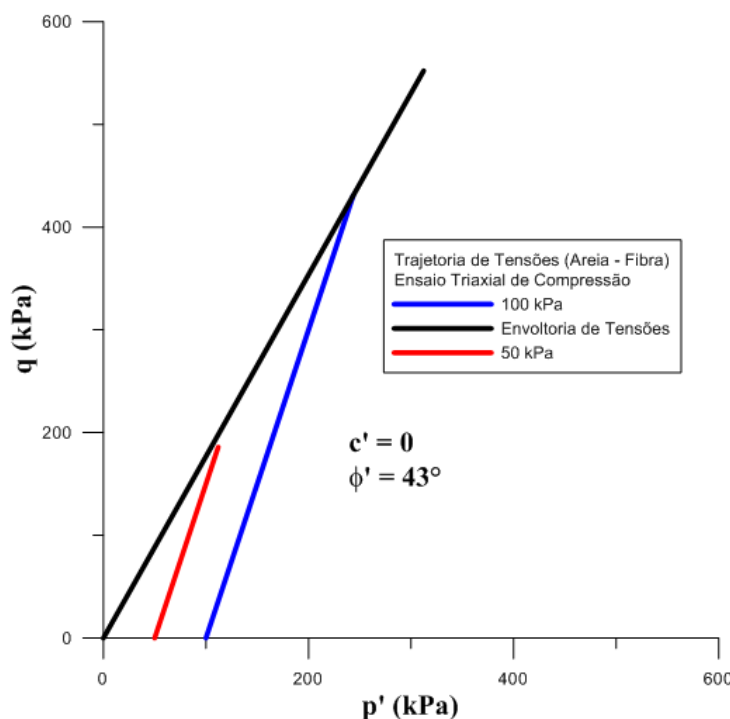


(b)

Figura 4.1 – Parâmetros de resistência da areia submetida a ensaios de compressão obtidos por: (a) CASAGRANDE (2005), (b) presente dissertação.



(a)



(b)

Figura 4.2 – Parâmetros de resistência da mistura submetida a ensaios de compressão obtidos por: (a) CASAGRANDE 2005, (b) presente dissertação.

Das envoltórias de resistência apresentadas, no caso dos ensaios triaxiais de compressão realizados por CASAGRANDE (2005), observa-se uma linearidade quase perfeita. No caso dos ensaios realizados à mistura areia-fibra obteve-se uma bi-linearidade das envoltórias, ou seja, a existência de uma envoltória curvilínea-linear cruzando a origem é hipoteticamente prevista, não havendo a imposição de um intercepto coesivo à mistura areia-fibra. Porém, para efeitos gráficos e quantitativos dos parâmetros de resistência, as envoltórias foram apresentadas na forma bi-linear, onde pode ser observado o ponto de inflexão entre as partes inicial e final das mesmas.

Quanto à comparação dos resultados obtidos por CASAGRANDE (2005) e os obtidos na presente dissertação pode-se observar uma similitude nos parâmetros de resistência, a variação nos parâmetros encontra-se na taxa de 2,3% no caso da areia. No caso da mistura areia-fibra o resultado obtido encontra-se na média das duas envoltórias encontradas por CASAGRANDE (2005), essa variação obtida em ambos os estudos é atribuída a vários fatores descritos a seguir.

- Compactação dos corpos de prova: a compactação em ambos os estudos foi realizada manualmente sem levar em consideração o número e a força dos golpes em cada camada compactada;
- Tamanho das amostras: as amostras testadas por CASAGRANDE (2005), tinham 1,5” de diâmetro por 3” de comprimento, enquanto as amostras testadas na presente dissertação foram de 4” de diâmetro por 8” de comprimento;
- Saturação da amostra: a saturação dos corpos de prova foi conferida com a variação de volume observada em cada estágio de aplicação de contrapressão, quando a variação de volume apresentava entre 0 e 0,5 cm³, assumia-se que o solo encontrava-se saturado, mesmo ele apresentando um parâmetro B de Skempton no máximo de 0,80, enquanto CASAGRANDE (2005), atingiu valores de B na taxa de 0,95;
- Tamanho das fibras: o tamanho das fibras empregadas por CASAGRANDE (2005), foi de 24 mm quando as fibras empregadas na presente dissertação tiveram um comprimento de 19,3 mm.

Dos resultados obtidos podemos chegar à conclusão que o equipamento encontra-se em ótimas condições para iniciar os ensaios triaxiais de extensão correspondentes ao programa experimental proposto na presente dissertação. Na Tabela 4.1 encontram-se listados os resultados obtidos por CASAGRANDE (2005) e na presente dissertação, para os ensaios triaxiais drenados de compressão.

Tabela 4.1 – Comparação dos parâmetros de resistência obtidos por CASAGRANDE 2005 e dos resultados obtidos no presente estudo nos ensaios triaxiais drenados de compressão.

Material	Areia		Areia – Fibra			
Parâmetro de Resistência	c	ϕ'	c		ϕ'	
CASAGRANDE (2005)	0	33.7°	21.8	151.1	50.9°	33.2°
Resultados Obtidos	0	32.91°	0		43°	

4.4

Ensaaios Triaxiais de Extensão

O presente item apresenta os resultados do programa experimental proposto com a finalidade de avaliar o comportamento da areia e a mistura areia-fibra e poder determinar a influência da adição das fibras à areia em estudo. Para tal efeito foram realizados oito ensaios triaxiais de extensão, quatro para a areia e quatro na mistura areia fibra. As tensões efetivas de confinamento empregadas nos ensaios foram de 50, 100, 200 e 300 kPa. Para as misturas foram fixados o teor de fibra de 0,5%, calculado em relação à massa seca da matriz da areia, comprimento das fibras de 19,3 mm, diâmetro das fibras de 0,03 mm, peso específico aparente seco (15 kN/m^3 correspondente a uma densidade de 50%) e umidade de 10%.

4.4.1

Mecanismo de deformação

A deformação das amostras de areia e a mistura areia-fibra em ensaios triaxiais drenados sob solicitações de compressão já tem sido estudada por muitos autores, chegando todos à conclusão de que tanto as amostras de areia, quanto as amostras areia-fibra apresentam uma forma do tipo barril durante a fase de cisalhamento. Quanto aos ensaios triaxiais de extensão realizados na presente dissertação, foi observada uma diferença entre as amostras de areia e areia-fibra no mecanismo de deformação.

As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam os mecanismos de deformação de uma amostra de areia sem reforço e reforçada com fibras de polipropileno submetida a ensaios triaxiais de extensão.

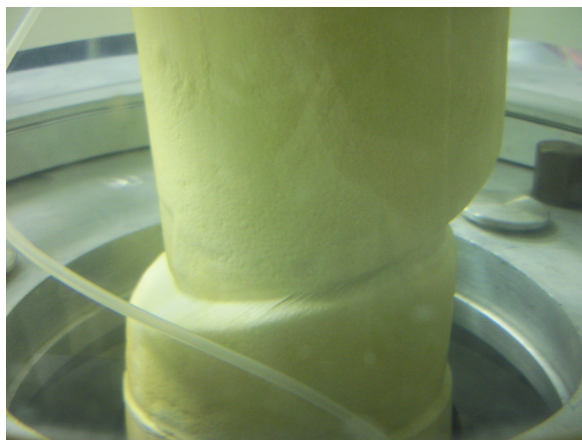


Figura 4.3 – Mecanismo de deformação da amostra da areia submetida a ensaios de extensão.



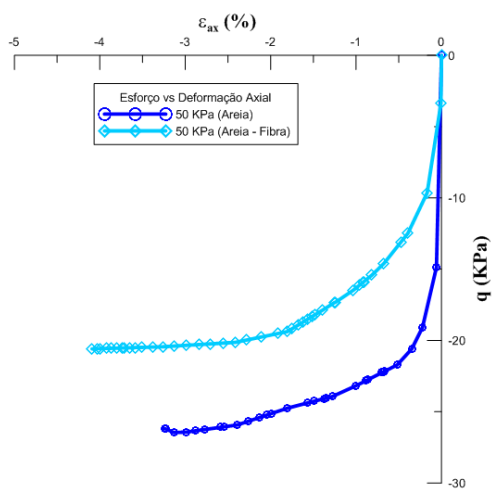
Figura 4.4 – Mecanismo de deformação da amostra da mistura areia-fibra submetida a ensaios de extensão.

Na Figura 4.3 pode-se observar a presença de uma superfície de ruptura na diagonal da amostra, essa superfície de ruptura foi gerada na base da amostra. Na Figura 4.4 apresenta-se o mecanismo de deformação da amostra nos ensaios realizados na mistura de areia-fibra, onde observa-se uma compressão das amostras na base, essa compressão expande-se até o centro da amostra.

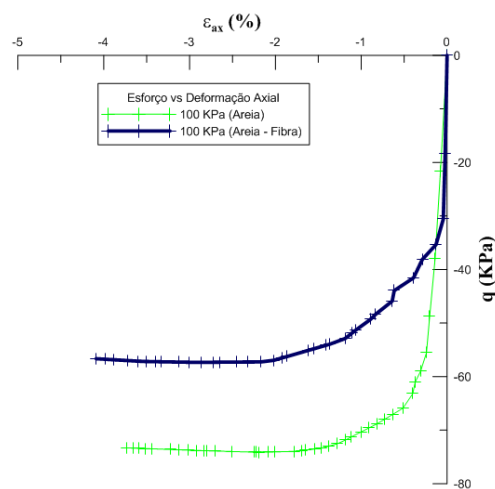
4.4.2

Comportamento Tensão desviadora e Deformação volumétrica vs Deformação Axial.

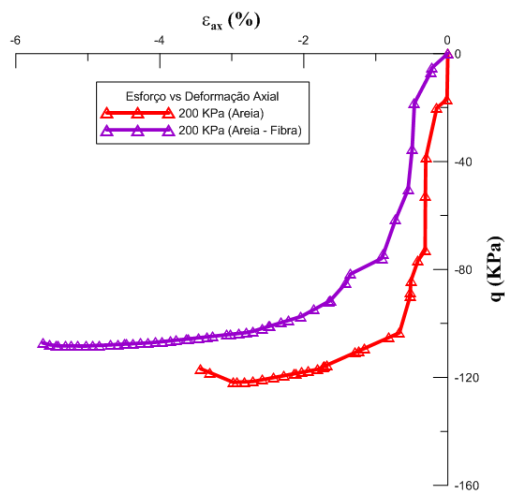
As Figuras 4.5 (a, b, c e d) exibem as comparações dos gráficos tensão desviadora vs deformação axial dos ensaios triaxiais drenados de extensão realizados na areia e na mistura areia-fibra, a diferentes tensões efetivas de confinamento. Ressalta-se que para uma melhor visualização os gráficos estão apresentados em diferentes escalas.



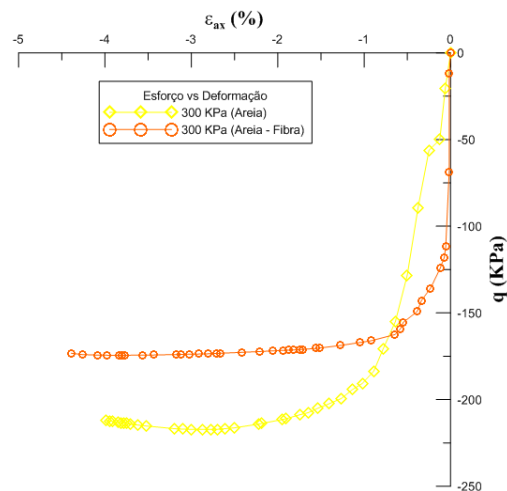
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.5 – Gráfico tensão desviadora vs deformação axial nas tensões efetivas de confinamento (a) 50kPa, (b) 100 kPa, (c) 200 kPa e (d) 300 kPa.

A Figura 4.6 apresenta todas as curvas tensão desviadora vs deformação axial obtidas nos ensaios triaxiais de extensão realizados na areia e na mistura areia-fibra, para efeitos de comparação.

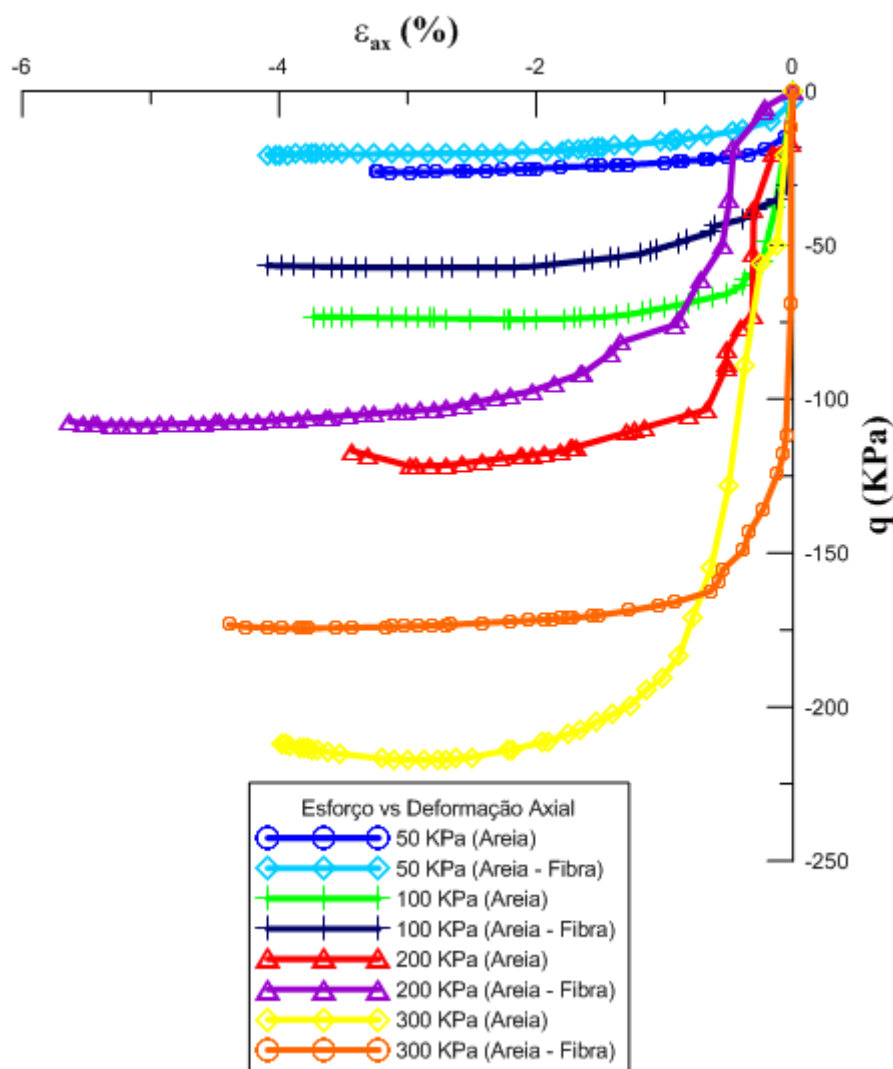


Figura 4.6 – Curvas tensão desviadora vs deformação axial de todos os ensaios triaxiais drenados de extensão realizados.

De maneira geral pode-se observar que a inclusão das fibras de polipropileno ao solo altera o comportamento resistente da matriz do solo quando submetido a solicitações de extensão, porém essa alteração não gera um aumento nos parâmetros de resistência da matriz do solo, pelo contrário, origina uma queda nos parâmetros de resistência em todas as comparações dos ensaios triaxiais de extensão realizados na areia e na mistura areia-fibra, para cada tensão efetiva de confinamento. Essa diminuição na tensão de ruptura encontra-se na taxa de 25% da tensão obtida nos ensaios realizados na areia.

A deformação axial atingida na ruptura, nos ensaios triaxiais drenados de extensão na mistura areia-fibra, é maior do que as deformações atingidas pelos corpos de prova de

areia, isso quer dizer que mesmo não oferecendo uma maior resistência, a fibra permite que o solo consiga uma maior deformação antes deste se romper.

Foi postulado por FEUERHAMEL (2000) e CASAGRANDE (2001) que no comportamento resistente dos solos reforçados podem ser definidas três etapas: uma etapa inicial, onde o comportamento é controlado basicamente pela matriz de solo, uma segunda etapa, na qual o comportamento do material compósito é comandado conjuntamente pela matriz e pelas fibras, e uma etapa final, onde o comportamento do material é comandado essencialmente pelas fibras. Neste estudo não se conseguiu definir essas três etapas antes mencionadas podendo afirmar que esse comportamento resistente do material compósito obedece a solicitações de compressão, onde a adição das fibras proporciona ao solo um aumento na resistência. Por isso quando o material compósito é solicitado a esforços de extensão o comportamento resistente do material é comandado pela matriz da areia e a presença das fibras dentro da matriz pode dificultar o contato entre as partículas do solo prejudicando a resistência do material.

Segundo DIAMBRA et al (2010), na compressão triaxial o aumento da resistência foi induzida pela presença das fibras, mas nos ensaios de extensão o benefício das fibras é muito limitado quanto à resistência. Os autores atribuem esse efeito à orientação das fibras dentro da mistura, já que no método de moldagem dos corpos de prova (compactando em camadas com a finalidade de manter a densidade desejada) a maioria das fibras encontra-se orientadas na direção horizontal. DIAMBRA et al. (2007a) encontrou que 97% das fibras tem uma orientação entre $\pm \pi/4$ com relação ao plano horizontal. Dessa maneira, quando a mistura é solicitada, a extensão as fibras não oferece um aumento na resistência do solo, pelo contrário, elas dificultam o contato entre as partículas do solo, originando uma queda na resistência do material.

No presente estudo não foi possível observar a orientação das fibras dentro nas amostras ensaiadas, mas segundo uma análise visual das faces laterais dos corpos de prova após os ensaios triaxiais drenados de extensão, foi observada essa orientação. A Figura 4.7 apresenta o estado final de um corpo de prova submetido a ensaios triaxiais drenados de extensão, onde pode-se observar algumas fibras com uma orientação quase horizontal. Essa observação corrobora as observações de DIAMBRA (2007), podendo atribuir o efeito da queda da resistência a esse fator.

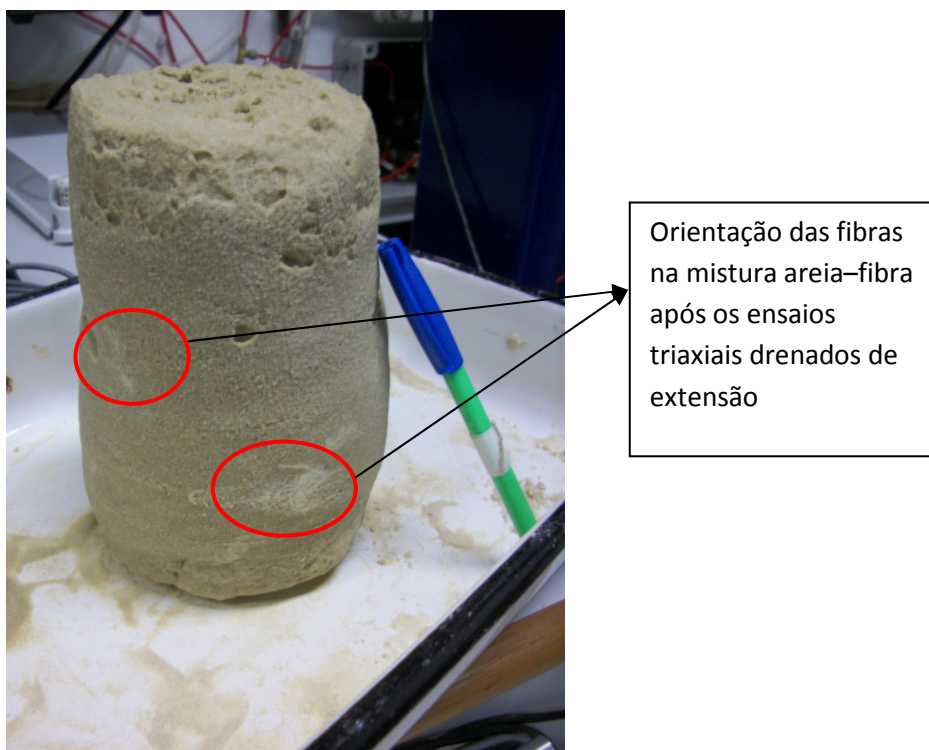
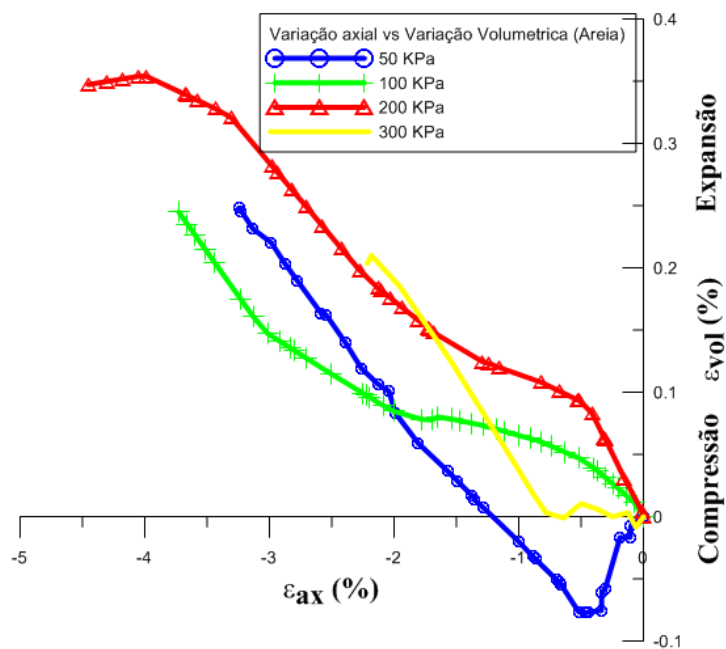
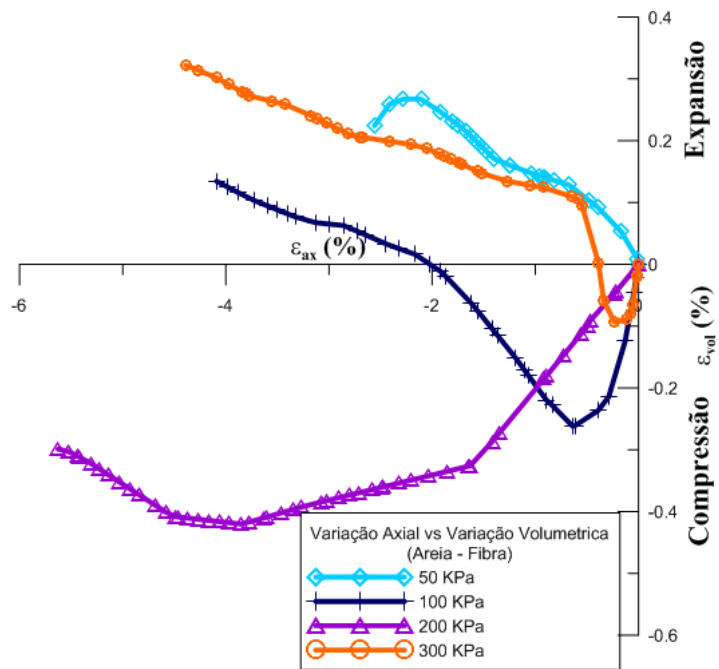


Figura 4.7 – Estado final do corpo de prova da mistura areia-fibra, observação orientação das fibras.

As Figuras 4.8 (a e b) apresentam os gráficos de deformação volumétrica vs deformação axial, correspondentes aos ensaios triaxiais drenados de extensão feitos na areia e na mistura areia-fibra a diferentes tensões de confinamento.



(a)



(b)

Figura 4.8 – Variação volumétrica vs Deformação axial (a) na areia, (b) na mistura areia-fibra.

Pode-se observar que o comportamento da areia sem reforço apresenta um comportamento inteiramente dilatante ao longo de todos os ensaios triaxiais de extensão. Esse comportamento é típico de uma areia densa.

No caso da mistura areia – fibra inicialmente apresenta um comportamento expansivo até atingir a ruptura, a partir desse ponto a mistura começa a se comprimir muito de maneira súbita. Esse efeito pode ser conferido de maneira visual com a deformação que sofre o corpo de prova durante a fase de cisalhamento. Só no caso do ensaio de 200 kPa de tensão efetiva foi observado um comportamento compressivo quase constante na taxa de 0.5% do volume inicial do corpo de prova.

De maneira geral pode-se dizer que a adição das fibras altera o comportamento da areia passando de um comportamento típico de uma areia densa a um comportamento de uma areia fofa.

4.4.3

Envoltórias e Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento

Nas Figuras 4.9 (a) e (b) e 4.10 (a) e (b) apresenta-se uma comparação das envoltórias e dos parâmetros de resistência ao cisalhamento da areia e da mistura areia-fibra submetidas a solicitações de compressão e de extensão. No caso da compressão são apresentados os gráficos obtidos por CASAGRANDE (2005), já que o solo estudado e o teor da fibra na mistura da presente dissertação são os mesmos empregados pela autora. Os resultados dos parâmetros de resistência obtidos para o solo e a mistura encontram-se listados na Tabela 4.2.

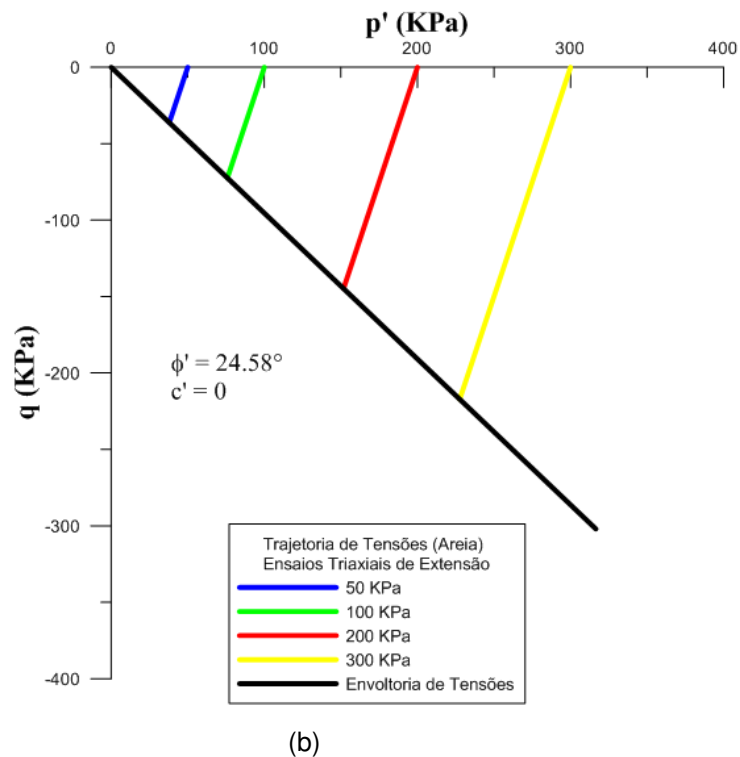
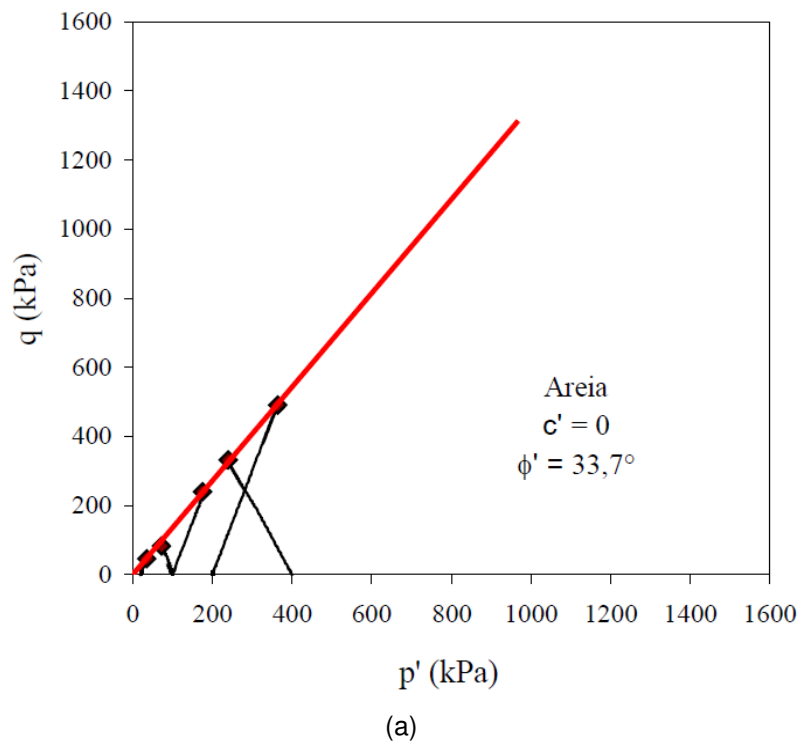
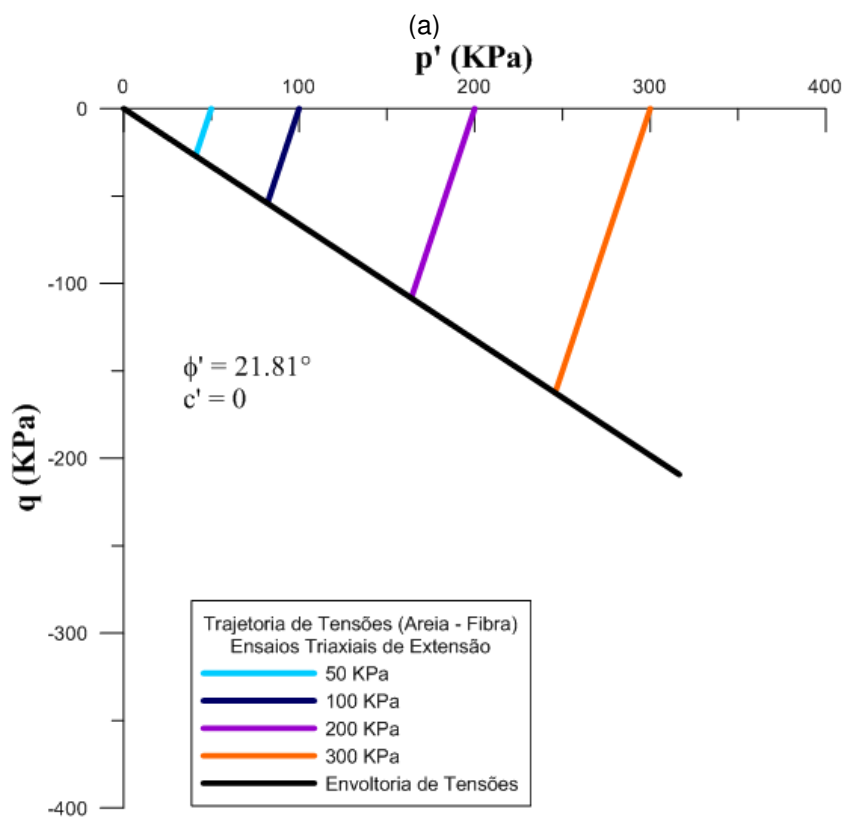
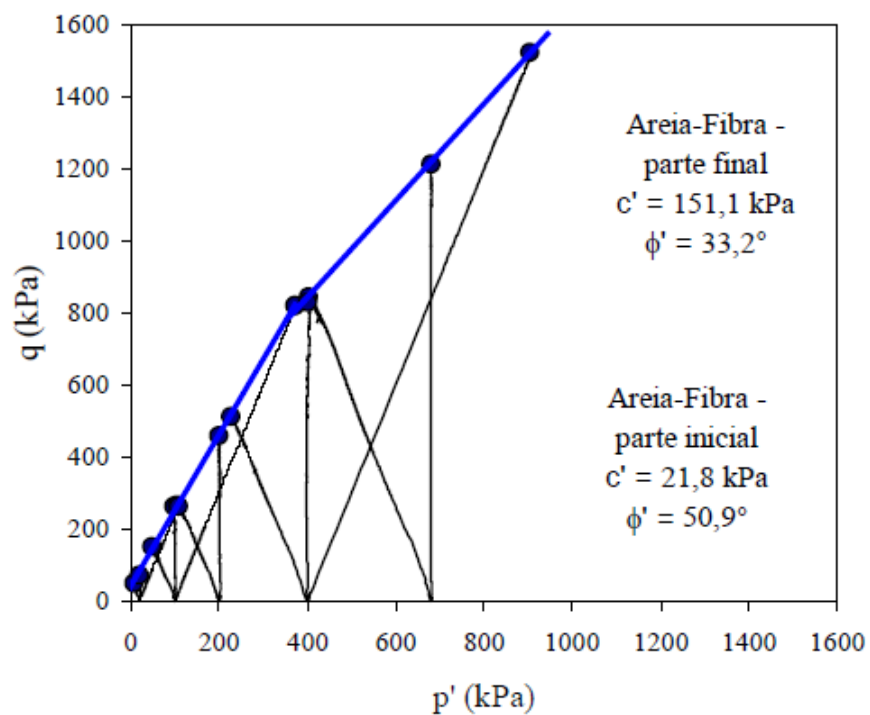


Figura 4,9 – Envoltória e parâmetros de resistência da areia submetida a ensaios triaxiais de (a) compressão (Casagrande, 2005) e (b) extensão.



(b)

Figura 4,10 – Envoltória e parâmetros de resistência da mistura areia-fibra submetida a ensaios triaxiais de (a) compressão (Casagrande, 2005) e (b) extensão.

De maneira geral pode-se observar que tanto na areia quanto na mistura areia-fibra os parâmetros de resistência são maiores quando solicitados à compressão. Essa diferença dos parâmetros (basicamente no ângulo de atrito, já que a coesão foi nula) encontra-se na taxa de 27% no caso da areia e 57% no caso da mistura areia-fibra. Essa diferença também foi obtida por CHENG-WEI CHEN (2010) em um estudo realizado em uma areia siltosa reforçada e não reforçada com fibras de polipropileno.

No caso dos ensaios triaxiais de extensão, foram obtidas envoltórias de resistência linear de acordo com os ensaios realizados, a diferentes tensões de confinamento, tanto na areia como na mistura areia-fibra. A areia apresenta parâmetros de resistência maiores do que os obtidos nos ensaios realizados na mistura areia-fibra. A diminuição no ângulo de atrito da mistura encontra-se na taxa de 11% do ângulo de atrito atingido pela areia. Segundo CHENG-WEI CHEN (2010) os parâmetros de resistência nos solos reforçados são levemente maiores na mistura areia siltosa-fibra comparados com os parâmetros obtidos na areia siltosa testada. Cabe destacar que as fibras empregadas por CHENG-WEI CHEN apresentam diferentes propriedades do que as empregadas na presente dissertação o comprimento das fibras foi de 50 mm, quanto ao teor de fibras, foi menor do que o teor empregado na presente dissertação (0,4% do peso seco da massa da matriz da areia siltosa), podendo influenciar esses fatores nos resultados obtidos, já que para um menor teor de fibra, os contatos entre as partículas de solo serão maiores, aumentando a resistência do solo em extensão.

Porém, como já foi mencionada no item anterior, essa queda dos parâmetros de resistência na mistura areia-fibra pode ser devido à orientação das fibras dentro do corpo de prova da mistura. (DIAMBRA 2010).

Tabela 4.2 – Parâmetros de resistência obtidos nos ensaios triaxiais de extensão.

Material	Areia		Areia-Fibra	
Parâmetro de Resistência	c'	ϕ'	c'	ϕ'
Ensaio de Extensão	0	24.58°	0	21.81°

4.4.4

Energia de Deformação Absorvida

Foi calculada a energia de deformação absorvida pela areia e a mistura areia-fibra na ruptura nos ensaios triaxiais de extensão realizados.

A Figura 4.11 ilustra os dados de energia absorvida para a areia e para a mistura areia-fibra para os diferentes níveis de tensão empregados nos ensaios triaxiais realizados.

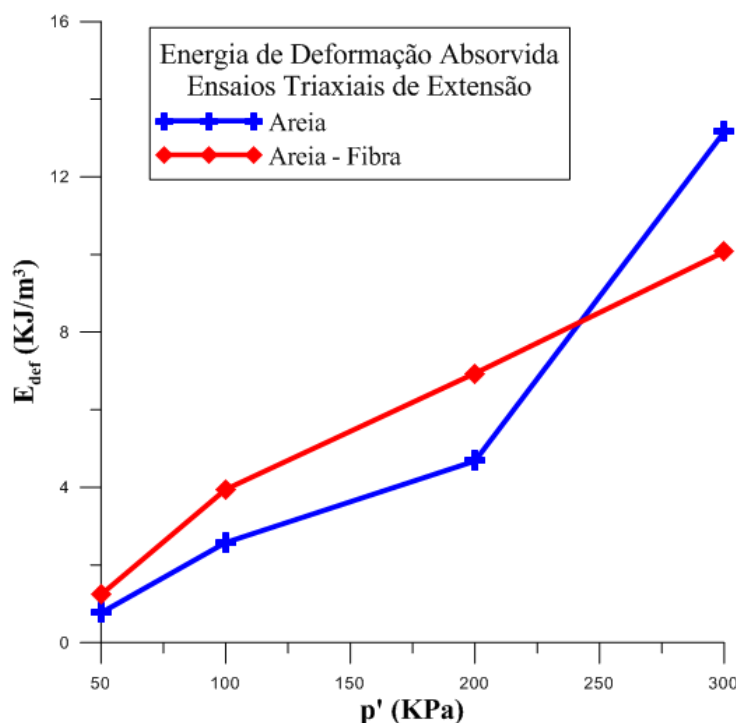


Figura 4.11 – Energia de deformação absorvida nos ensaios triaxiais de extensão realizados à areia e à mistura areia-fibra.

Observa-se que, para os níveis de tensão estudados, a taxa de aumento da energia de deformação absorvida não é linear. Pode-se observar também que a inclusão de fibras de polipropileno à matriz da areia estudada causa uma influência positiva na tenacidade para tensões efetivas médias iniciais abaixo dos 240 KPa, a partir de onde a matriz de areia apresenta uma maior energia de deformação.

Os resultados da energia de deformação absorvida para a areia e a mistura areia-fibra são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Variação da energia de deformação absorvida com as tensões efetivas médias iniciais.

p'	E_{def} (Areia) (KJ/m³)	E_{def} (Areia – Fibra) (KJ/m³)
50	0.77	1.24
100	2.58	3.95
200	4.68	6.94
300	13.16	10.07

4.4.5

Alongamento das Fibras

Com a finalidade de conferir a trabalhabilidade das fibras dentro do material compósito foi feita a medição do comprimento das fibras retiradas das amostras após a execução dos ensaios triaxiais de extensão. Observa-se que as fibras se alongaram em todos os ensaios realizados. A Figura 4.12 apresenta a variação dos comprimentos das fibras para cada ensaio executado na presente dissertação. Para um maior entendimento estes resultados são representados por um gráfico de barras. Os resultados plotados resultaram da média de 100 medições de fibras escolhidas aleatoriamente do interior do corpo de prova ensaiado.

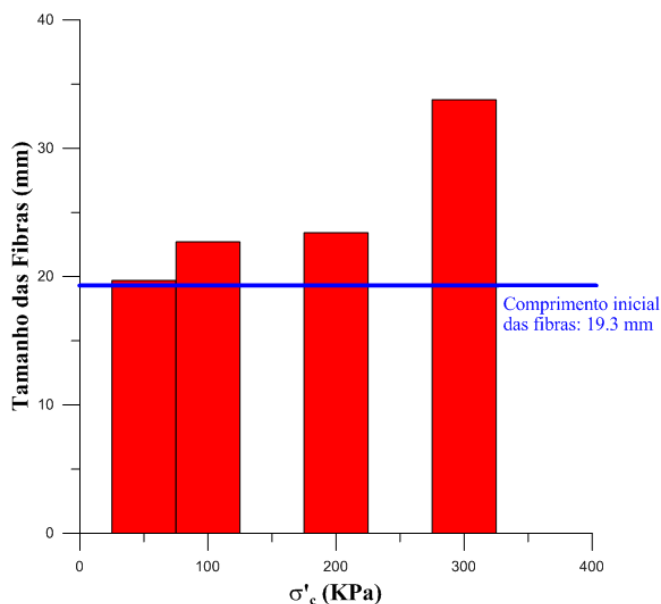


Figura 4.12 – Comprimento final das fibras vs Tensão confinante dos ensaios executados.

O gráfico indica que as fibras atuam de forma significativa dentro da matriz da areia, mesmo assim elas não contribuem com o aumento da resistência do material compósito, já que os parâmetros de resistência obtidos nos ensaios triaxiais de extensão realizados na mistura areia-fibra resultaram menores do que os resultados executados na matriz de areia. O alongamento das fibras atingiu até 75% do comprimento inicial das fibras (19,3 mm), sendo a máxima extensão delas 80%, segundo dados do fabricante. Porém, espera-se que a maiores tensões de adensamento as fibras poderiam começar a romper. A Figura 4.13 (a e b) mostra as medições feitas nas fibras de polipropileno, com o auxílio de um paquímetro.

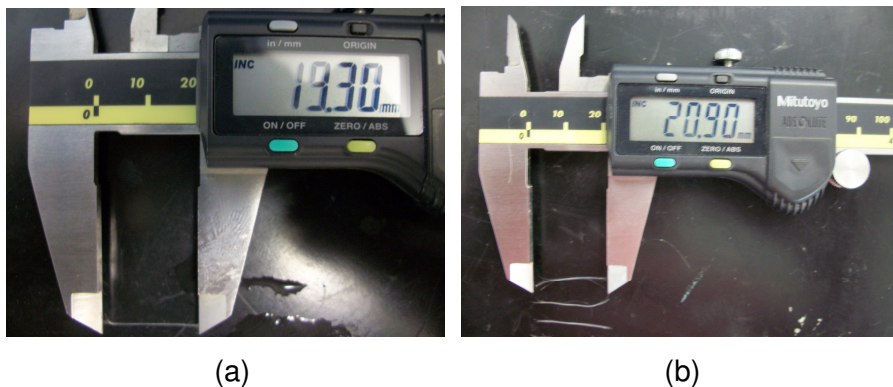


Figura 4.13 – (a) Comprimento inicial das fibras, (b) medida do comprimento final das fibras.

Na Tabela 4.4 são exibidos os resultados do comprimento final das fibras após os ensaios triaxiais de extensão a diferentes tensões de adensamento.

Tabela 4.4 – Comprimento final das fibras de polipropileno.

Tensão Efetiva confinante	Comprimento final (mm)	% de alongamento
50	19,70	2,07%
100	22,70	17,64%
200	23,42	21,36%
300	33,78	75,06%

CASAGRANDE (2005), analisou o comprimento final das fibras de uma mistura areia-fibra, submetida a ensaios de ring shear. Observou-se que as fibras tendem a sofrer grandes deformações plásticas de tração, independente do comprimento inicial das fibras, sendo solicitadas sucessivamente após estágios de alongamento, em primeira instância, e consequente ruptura ao sofrerem deslocamentos maiores.

No presente estudo foi observado também que o alongamento das fibras é maior quando a tensão de adensamento aumenta. Não foi observada a ruptura das fibras em nenhum ensaio, mas possivelmente para maiores tensões de adensamento as fibras poderiam começar a romper.