

4

Resultados e Análises

Este capítulo apresenta os resultados e as análises dos ensaios descritos no capítulo 3 para as amostras de solo puro e misturado com a fibra de coco. O objetivo desta tese é quantificar a melhoria do comportamento do solo misturado com a fibra quando submetido a um carregamento estático, cuja aplicação prática seria, por exemplo, no uso de solo de fundações, camadas de aterros sanitários e aterros sobre solos moles. Assim, a apresentação dos resultados é feita através de gráficos, que relacionam a variação da tensão desviadora com a deformação axial, e de envoltórias de resistência do solo.

4.1.

Ensaio de Caracterização Física

4.1.1.

Densidade Real dos Grãos

A densidade real dos grãos (G_s) do solo puro ensaiado foi encontrada através da média obtida em quatro ensaios, tendo havido uma variação de 1,2 %. O resultado encontrado foi um G_s de 2,72. O solo utilizado foi pesquisado anteriormente. Resultados obtidos por outros pesquisadores podem ser vistos na tabela 4.1

4.1.2.

Limites de Atterberg

Seguindo as normas NBR 6459/1984 – Determinação do Limite de Liquidez e NBR 7180/1984 – Determinação do Limite de Plasticidade, foi obtido para o Limite de Liquidez (LL) e para o Limite de Plasticidade (LP) do solo puro, respectivamente, os valores de 54% e 38%. O índice de plasticidade (IP), definido como a diferença entre os valores do Limite de Liquidez e do Limite de Plasticidade, é de 16%

Valores para esses índices encontrados por outros pesquisadores podem ser vistos na tabela 4.1

4.1.3.

Densidade Real dos Grãos

O ensaio de análise granulométrica do solo argiloso forneceu um comportamento comparável com o obtido em pesquisas precedentes. As porcentagens de material passantes na peneira #200 e retidas nesta, são parecidas. O solo argiloso coluvionar da campo experimental da Puc é classificado como CH, sendo uma argila arenosa.

A Tabela 4.1 apresenta um resumo da distribuição granulométrica obtida em pesquisas anteriores. A curva granulométrica do solo argiloso utilizado neste trabalho é apresentado na Figura 4.1.

Tabela 4.1 - Caracterização Física do solo argiloso coluvionar do Campo Experimental II da PUC-Rio (Ramirez, 2012)

Autor	Prof. (m)	Gs	Ped. + Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	LL	LP	IP	SUCS
Sertã (1986)	1.00 - 1.45	2,75	26,25	73,75		71	35	36	MH
	2.00 - 2.45	2,73	28,13	71,87		75	49	26	MH
	3.00 - 3.45	2,74	45,63	54,37		72	45	27	MH
Marinho (1986)	3.60	2,75	35	3	62	65	38	27	MH
Lins (1991)	2.00 - 2.40	2,74	34	4	62	78	32	46	MH
	3.00 - 3.40	2,74	34	4	62	73	34	39	MH
Dylac (1994)	3.00	2,77	24	5	71	70	30	40	MH
	6.00	2,76	31	6	63	82	43	39	MH
Beneveli (2002)	1.50	2,76	33	9	59	56	31	25	CH
Soares (2005)	1.00	2,74	41	5,5	53,5	54	28	26	CH
Ramirez (2012)	2.00	2,72	36,4	10,8	52,7	53	39	14	CH

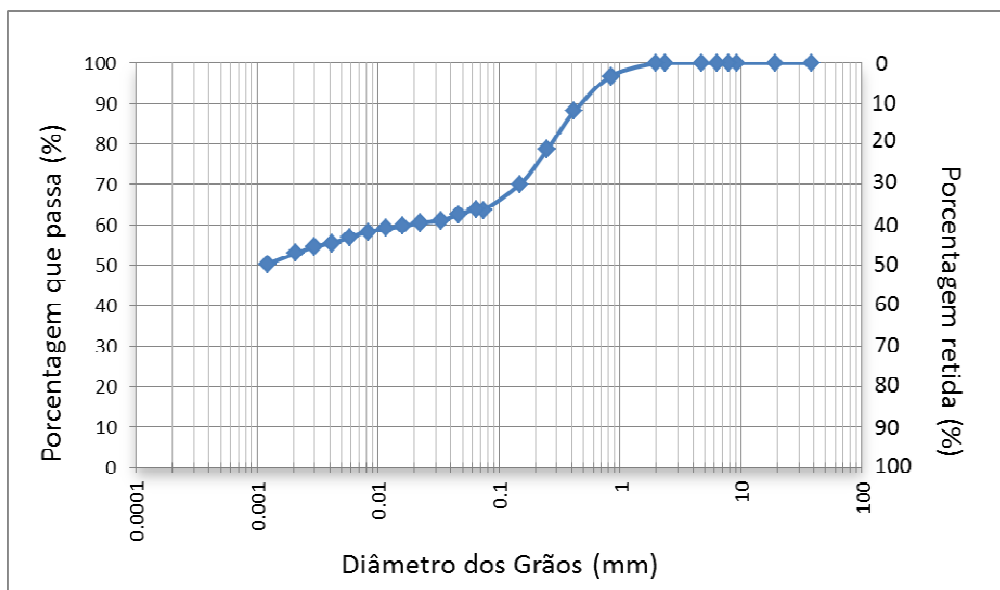


Figura 4.1 - Distribuição granulométrica do solo argiloso

4.2. Ensaio de Caracterização Mecânica

4.2.1. Ensaio de Compactação Proctor Normal

As figuras 4.2 e 4.3 apresentam a curva de compactação Proctor Normal do solo puro e misturado com os teores de fibra moída, bem como a do solo puro e misturado com os teores de fibra cortada. A Tabela 4.2 apresenta os valores de umidade ótima ($w_{ót}$) e do peso específico máximo ($\gamma_{dmáx}$). Foi possível perceber que a introdução da fibra, seja ela cortada ou moída, contribui para a diminuição do peso específico da mistura.

Para o caso das duas misturas com fibra moída, as curvas de compactação foram bem parecidas e apresentaram densidade máxima próxima a $1,52 \text{ g/m}^3$, contra cerca de $1,57 \text{ g/m}^3$ da densidade máxima do solo puro. Quanto a umidade ótima, o solo puro, bem como a mistura de 1%, apresentaram valores parecidos, cerca de 24,5% enquanto a mistura com 0,5% apresentou um valor discretamente maior, de 25%.

Com respeito à compactação das misturas com fibras cortadas, pode-se dizer, baseando-se nos resultados dos ensaios, que a inclusão das fibras diminuiu a densidade da mistura com respeito ao solo puro. Contudo, não foi possível

estabelecer uma relação direta entre o aumento do teor de fibra e a diminuição da densidade, quer dizer, uma amostra com um maior teor de fibra não é necessariamente menos densa que uma amostra com um menor teor de fibra.

Também não foi possível estabelecer uma relação direta entre a variação do teor de fibras e o valor da umidade ótima. A amostra compactada com 0,75% de teor de fibra apresentou uma umidade ótima inferior a do solo puro. A amostra com 1,0% de fibra apresentou uma umidade ótima similar a do solo puro e as demais amostras apresentaram umidades ótimas maiores que a do solo puro. Os valores de densidade máxima encontradas para as fibras cortadas variam entre $1,48 \text{ g/m}^3$ e $1,55 \text{ g/m}^3$, ou seja, entre $0,02 \text{ g/m}^3$ e $0,09 \text{ g/m}^3$ a menos que a densidade máxima do solo puro, enquanto a umidade ótima para essas misturas variam entre 23% e 26%, ou seja, 1,5% a mais e a menos do que a umidade ótima do solo puro. Chama a atenção o fato de as curvas de compactação com as fibras cortadas tenderem a ser assimétricas, fugindo um pouco do formato parabólico, característico em resultados de ensaios de compactação.

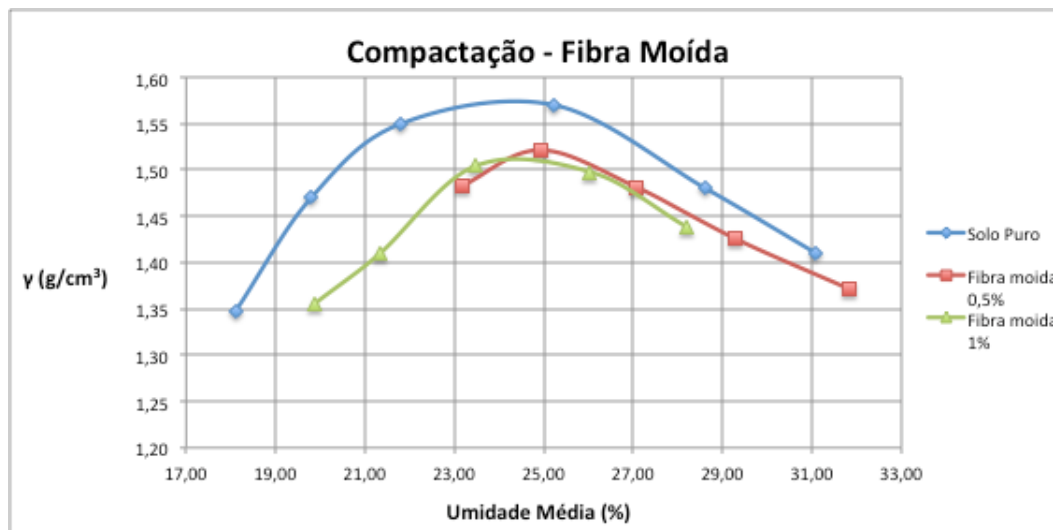


Figura 4.2 – Curvas de compactação do solo puro e da fibra moída

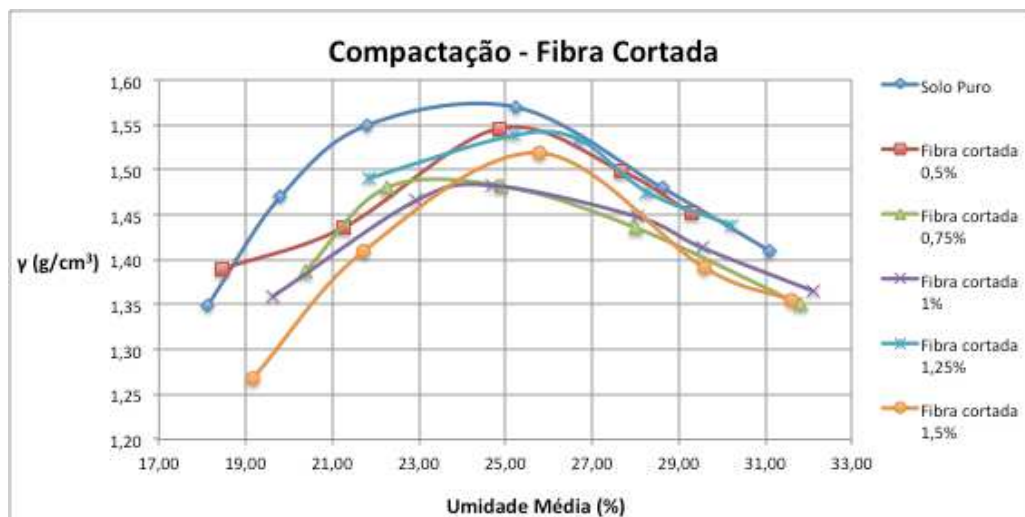


Figura 4.3 – Curvas de compactação do solo puro e da fibra cortada

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de compactação Proctor Normal para o solo e misturas de solo-fibra

Teor de fibra	Densidade máx. (g/cm ³)	Umidade ótima (%)
Solo Puro	1,575	24,5
Fibra moida 0,5%	1,520	25,0
Fibra moida 1,0%	1,510	24,4
Fibra cortada 0,5%	1,550	25,2
Fibra cortada 0,75%	1,490	23,4
Fibra cortada 1,0%	1,485	24,0
Fibra cortada 1,25%	1,540	26,0
Fibra cortada 1,50%	1,520	25,8

4.2.2. Ensaio Triaxiais CID

São apresentados aqui os resultados dos ensaios triaxiais, realizados em amostras do solo puro e em misturas com a fibra de coco moída nos teores 0,5% e 1,0%, e também, as misturas de solo com fibra cortada nos teores de 0,5%, 0,75%, 1,0%, 1,25% e 1,5%. Todas as misturas foram submetidas a ensaios triaxiais CID, em compressão axial, confinados nas tensões de 50kPa, 150kPa e 300kPa. Serão apresentadas, mais precisamente, os resultados na forma de gráficos de tensão desviadora x deformação axial, deformação volumétrica x deformação axial e a

trajetória de tensões efetivas. As trajetórias de tensões efetivas são obtidas com o valor da tensão desviadora para uma deformação axial arbitrada em 15%, uma vez que as curvas obtidas nos gráficos de tensão desviadora x deformação axial para a fibra cortada não apresentaram um pico de ruptura, fazendo-se necessário a adoção de uma porcentagem de deformação padrão escolhida para que fosse feita a comparação dos parâmetros de resistência obtidos em cada teor ensaiado. Ressalta-se também que os ensaios triaxiais realizados foram encerrados ao atingir uma deformação axial de 18%. 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 para o solo puro, com a qual se pode determinar os parâmetros de resistência do solo, que são α' , a' , ϕ' e c' . A metodologia estabelecida para esse ensaio foi descrita no apêndice dessa pesquisa. As equações A.4 e A.5 do apêndice mostram como se determina os valores de p' e q , com os quais se obtém os parâmetros de resistência α' e a' , e também mostram as equações A.6 e A.7 que correlacionam esses aos parâmetros de resistência ϕ' e c' . Nos gráficos das figuras 4.4, 4.6, 4.8, 4.15, 4.17 e 4.19, que apresentam curvas da tensão desviadora (σ_d) versus deformação axial (ϵ_a), pode-se perceber a existência de uma linha preta vertical passando sobre a deformação correspondente a 15%, cujo objetivo nada mais é do que facilitar a visualização dos pontos das curvas, que serviram como referência para se obter os valores utilizados nas envoltórias de resistência das amostras ensaiadas.

Além disso, será feita uma análise com o objetivo de avaliar o quanto a tensão efetiva influencia na interação entre as duas fases do compósito.

As figuras 4.4, 4.6 e 4.8 apresentam curvas da tensão desviadora (σ_d) x deformação axial (ϵ_a), de misturas do solo com fibra moída, confinadas nas tensões efetivas de 50kPa, 150kPa e 300kPa, respectivamente. As figuras 4.5, 4.7 e 4.9 apresentam curvas da variação volumétrica (ϵ_v) x deformação axial (ϵ_a), de misturas do solo com fibra moída, confinadas nas tensões efetivas de 50kPa, 150kPa e 300kPa, respectivamente.

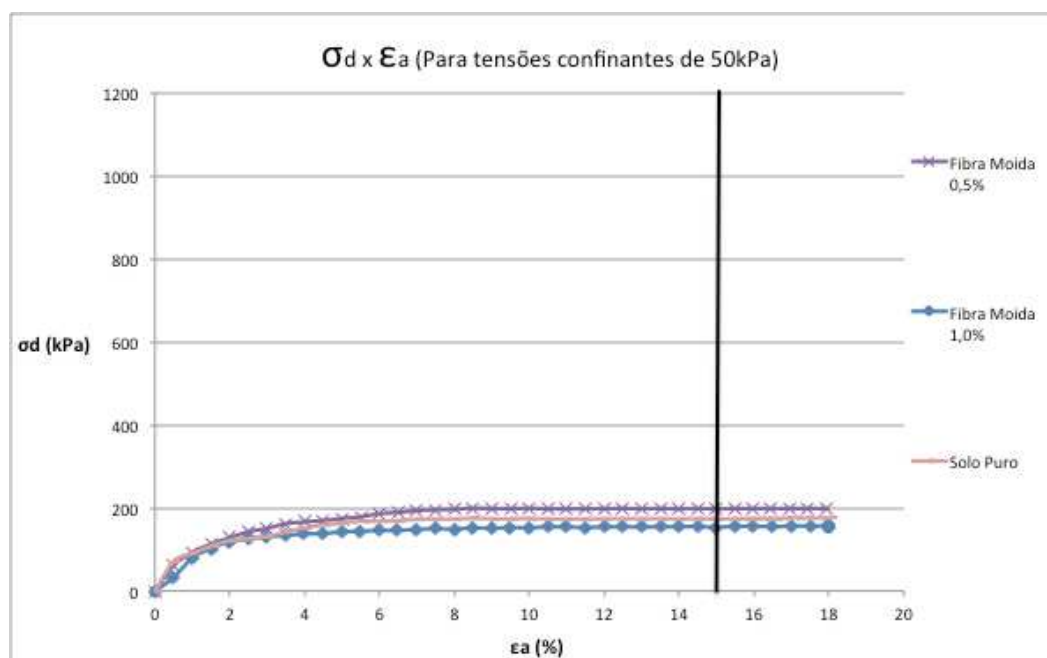


Figura 4.4 - Gráfico σ_d (kPa) x ϵ_a (%) para fibra moída com tensão confinante de 50kPa

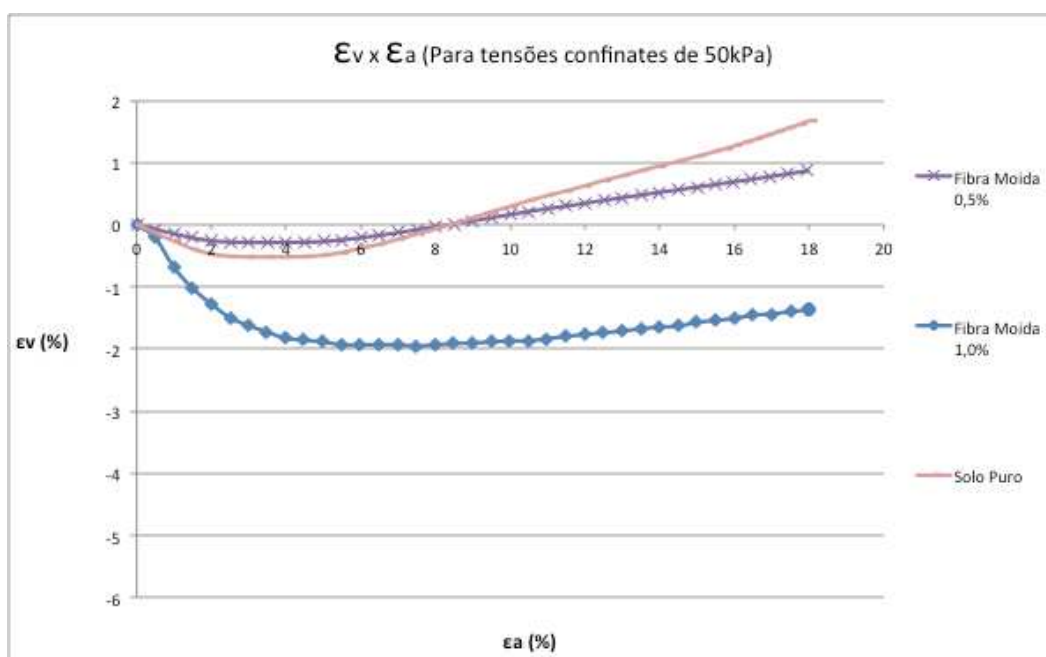


Figura 4.5 - Gráfico ϵ_v (%) x ϵ_a (%) para fibra moída com tensão confinante de 50kPa

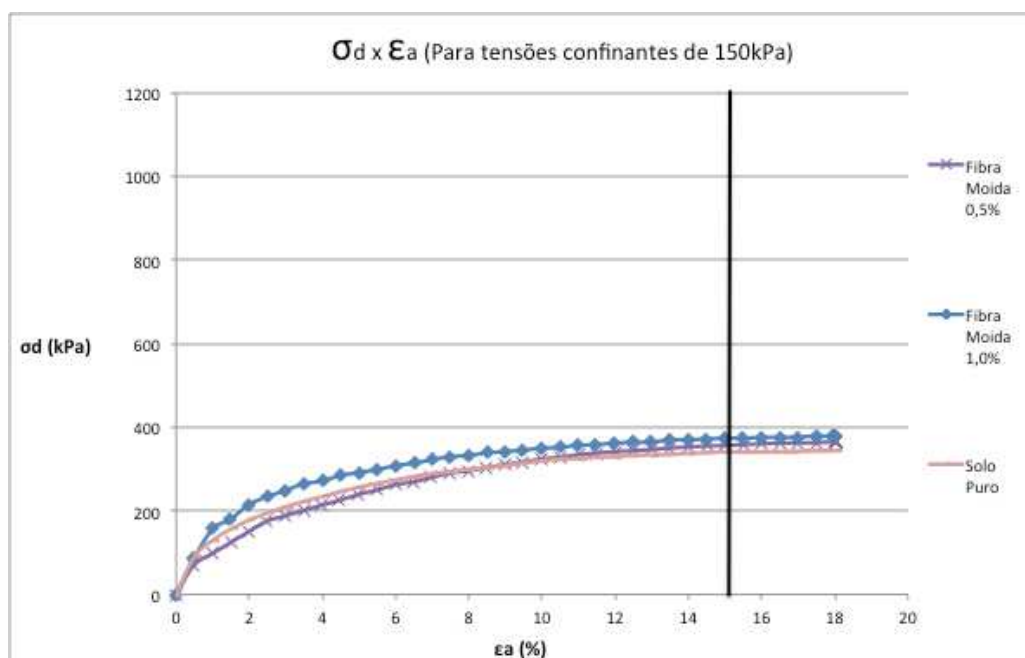


Figura 4.6 - Gráfico σ_d (kPa) x ϵ_a (%) para fibra moída com tensão confinante de 150kPa

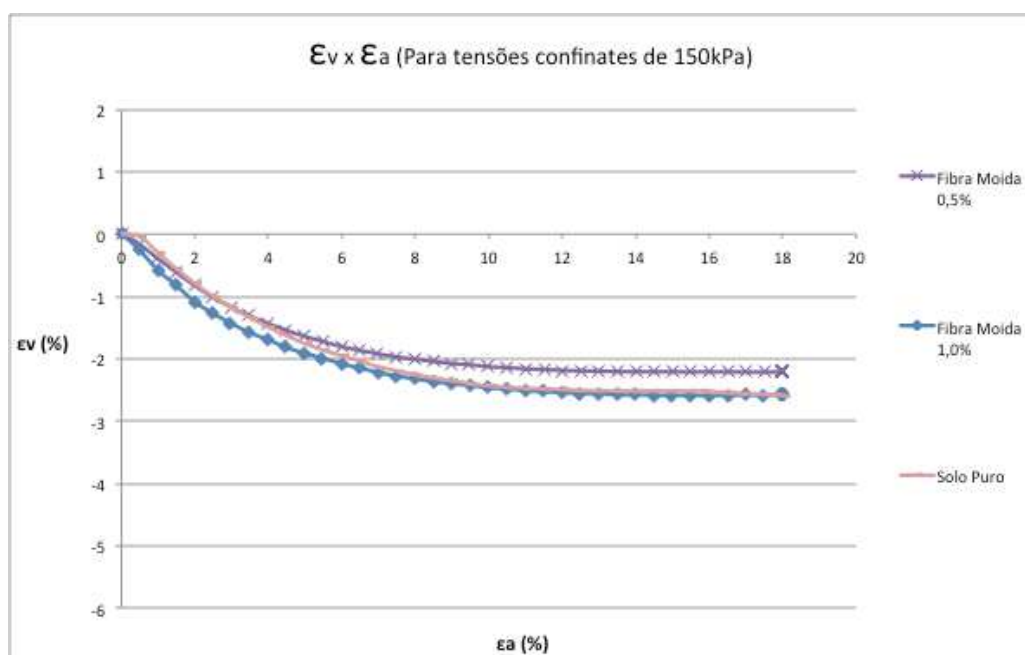


Figura 4.7 - Gráfico ϵ_v (%) x ϵ_a (%) para fibra moída com tensão confinante de 150kPa

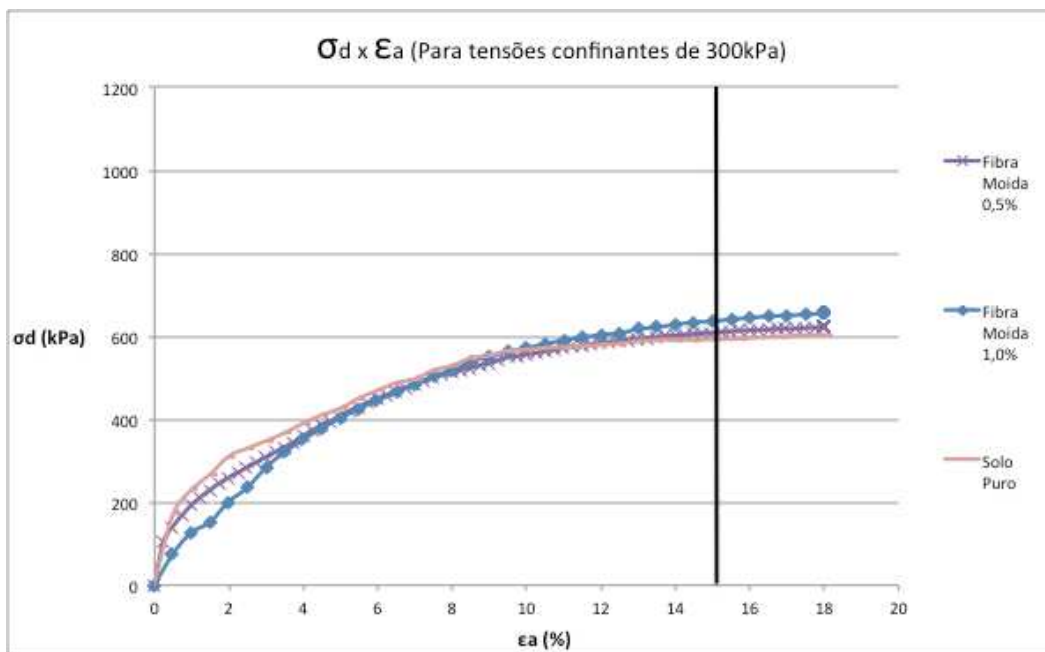


Figura 4.8 - Gráfico σ_d (kPa) x ϵ_a (%) para fibra moída com tensão confinante de 300kPa

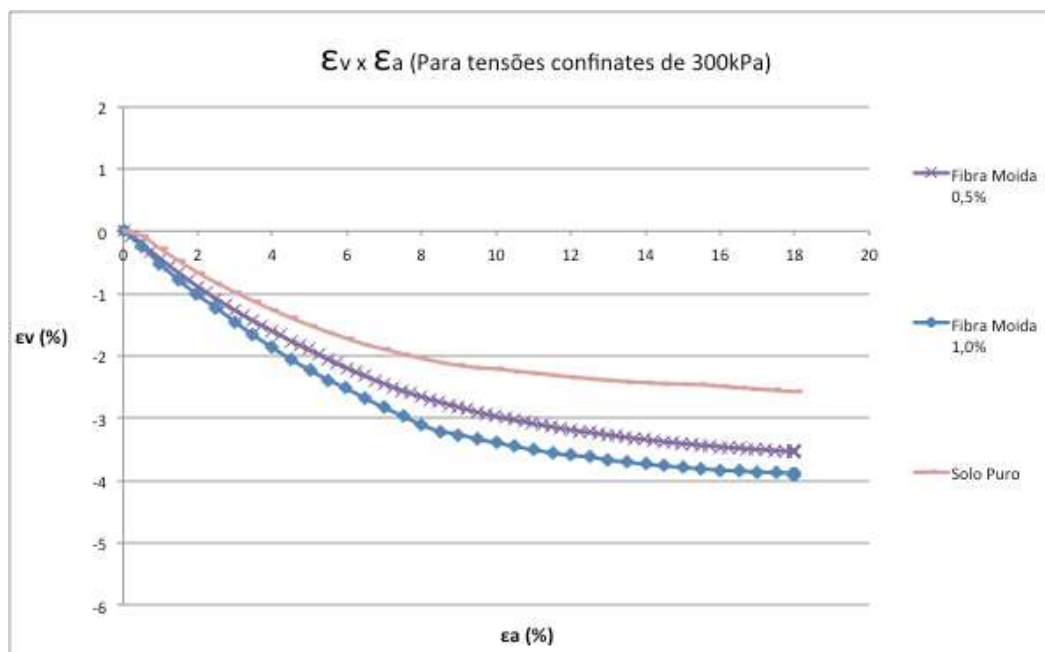


Figura 4.9 - Gráfico ϵ_v (%) x ϵ_a (%) para fibra moída com tensão confinante de 300kPa

Pode-se perceber pelo gráfico da figura 4.4, que para uma deformação de até 2% a relação σ_d x ϵ_a entre o solo puro e os dois teores é bem parecida. A partir dessa deformação, a mistura com 0,5% de fibra começa a apresentar uma

resistência superior a do solo puro e a da mistura com 1%. A partir dos 3% de deformação, a mistura com 1% de fibra também começa a apresentar uma resistência inferior ao solo puro (e portanto, pior também do que a mistura com 0,5% de fibra). Com 15% de deformação, valor arbitrado para se realizar a análise das envoltórias de resistência do solo nessa dissertação, pode-se perceber que a mistura com 0,5% de fibra apresentou uma resistência superior ao solo puro, que por sua vez, apresentou um resultado superior a da mistura com 1%. Em contraste a esses resultados, os ensaios de $\sigma_d \times \epsilon_a$ com tensão confinante de 150kPa, apresentados na figura 4.6, demonstraram uma maior resistência para a mistura com teor de fibra de 1%. Percebe-se que com meio por cento de deformação essa mistura já se mostra superior ao solo puro e à mistura com 0,5% de fibra. Com essa mesma deformação a mistura com 0,5% começa a apresentar um comportamento discretamente menos resistente do que o do solo puro, e que persiste até os 8% de deformação, momento em que esta mistura começa a superar o solo puro. Entretanto, até o fim deste ensaio, o que ocorreu com 18% de deformação, a mistura com 1% de fibra se mostrou mais resistente. Na figura 4.8, que apresenta o gráfico da tensão desviadora $\times$ deformação axial para uma tensão confinante de 300 kPa, a mistura com 1% de fibra apresenta inicialmente um comportamento menos resistente que as demais, contudo, por volta dos 4% de deformação, essa mistura começa a superar a mistura com 0,5% de teor de fibra e, por volta dos 8% de deformação, ela passa a superar também a amostra de solo puro, passando a se a mistura com maior resistência. O solo puro apresenta inicialmente o melhor comportamento, porém, a partir dos 8% de deformação é superado pela mistura com 1% de teor fibra e, a partir dos 11%, é superado pela mistura de 0,5% de teor de fibra.

O gráfico da figura 4.5, que relaciona a variação volumétrica e a deformação uniforme axial para os ensaios com 50 kPa de tensão confinante, mostra que a mistura com 1% de teor de fibra sofre uma contração volumétrica durante o cisalhamento até por volta dos 6% de deformação. O volume do corpo de prova se mantém constante até os 10% de deformação e a partir daí começa a sofrer uma expansão até o final do ensaio. Contudo, o volume de água que entra na amostra nas deformações finais é inferior ao volume de água que sai da amostra nas deformações iniciais. As amostras com solo puro e a mistura com 0,5% de teor de fibra apresentam uma curva de deformação volumétrica versus deformação axial

bem similar. Ambas as amostras sofrem uma contração volumétrica até os 4% de deformação, sendo esta contração significativamente menor do que a medida na amostra com 1% de teor de fibra. A partir daí começa a ocorrer uma expansão volumétrica. Por volta dos 8% de deformação o volume de ambos os corpos-de-prova voltam a ser iguais ao que era antes de se iniciar o cisalhamento. As amostras seguem expandindo até o final do ensaio.

Relacionando os gráficos das figuras 4.4 e 4.5, pode-se observar que tanto para o solo puro como para os dois teores de fibra moída, o momento em que o solo para de se contrair volumetricamente coincide aproximadamente com o momento em que a tensão desviadora passa a se tornar constante, a medida que os corpos-de-prova se deformam. Nota-se que até às deformações adotadas não foi possível verificar um pico de ruptura na curva tensão desviadora versus deformação axial. Observando os corpos-de-prova cisalhados, pode-se perceber a inexistência de um plano de falha.

A figura 4.7 apresenta o gráfico da variação volumétrica e a deformação axial para os ensaios com 150 kPa de tensão confinante. As 3 curvas referentes ao solo puro e aos 2 teores de fibra moída ensaiados apresentaram um resultado muito parecido, tanto no formato da curva como em seu dimensionamento. Ambas as curvas começaram a se contrair volumetricamente de forma mais acentuada durante as deformações iniciais e, gradativamente, foram se estabilizando. Por volta dos 12% de deformação, ambas as curvas pararam de se contrair, contudo, até o final desses ensaios, não houve expansão volumétrica. Pode-se notar que o crescimento da tensão desviadora ocorreu durante o período de contração volumétrica. À medida que os corpos-de-prova paravam de se contrair, a tensão desviadora ao longo do ensaio parava de crescer.

O gráfico da figura 4.9 apresentou um comportamento similar ao gráfico da figura 4.7. As 3 curvas começaram a se contrair volumetricamente de forma mais acentuada nas deformações iniciais e, gradativamente, foram se estabilizando, sendo que o solo puro sofreu uma contração volumétrica mais discreta que as duas misturas. Nenhum dos 3 ensaios sofreu expansão volumétrica até o final da fase de cisalhamento. Assim como no gráfico da figura 4.7, pode-se notar que a tensão desviadora diminui sua taxa de crescimento à medida que o corpo de prova diminui sua contração volumétrica.

Com respeito às envoltórias de resistência obtidas a partir das trajetórias de tensões e dos parâmetros de resistência do solo obtidos da própria envoltória, viu-se que praticamente não houve variação do ângulo de atrito. Com respeito à coesão, a mistura com 1,0% de teor de fibra apresentou um resultado muito próximo ao do solo puro, enquanto que a mistura com 0,5% de teor de fibra apresentou uma coesão um pouco superior. Os resultados dessas análises podem ser vistos na tabela 4.3 e no gráfico 4.14. Os gráficos com as envoltórias de resistência obtidas para o solo puro e para as misturas com 0,5% e 1,0% de fibra moída, são apresentados nas figuras 4.10, 4.11 e 4.12, respectivamente, bem como suas trajetórias de tensões efetivas. O gráfico da figura 4.13 reúne as envoltórias dos 3 ensaios.

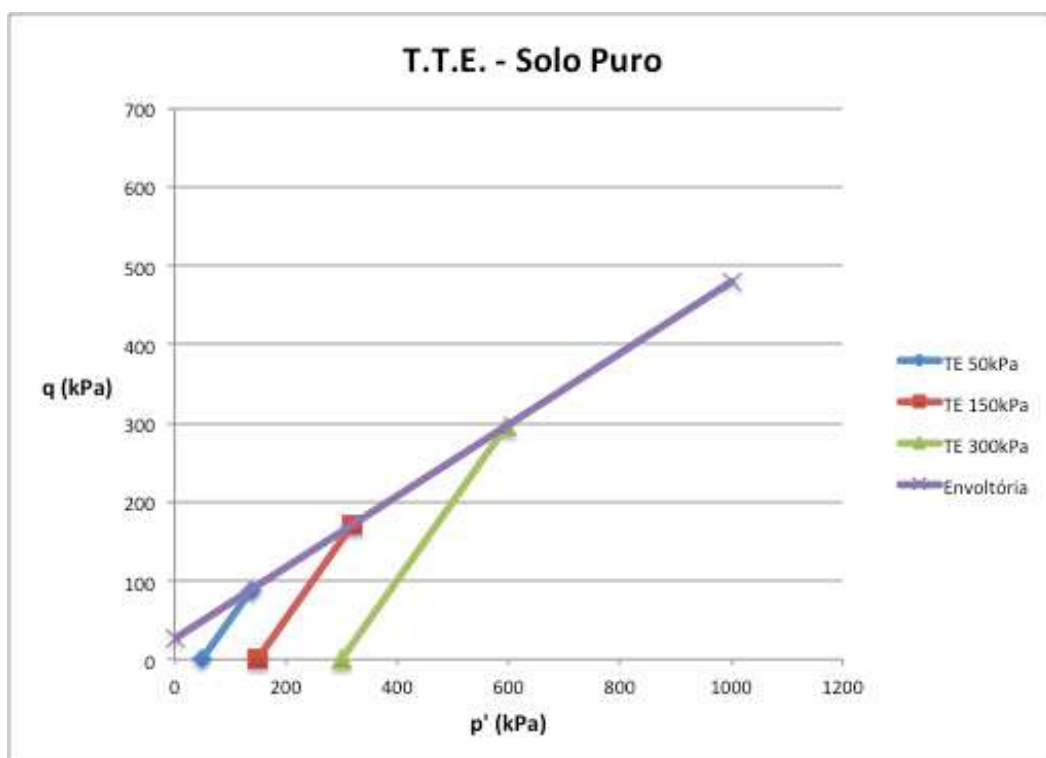


Figura 4.10 - Gráfico $p' \times q$ com envoltória do solo puro

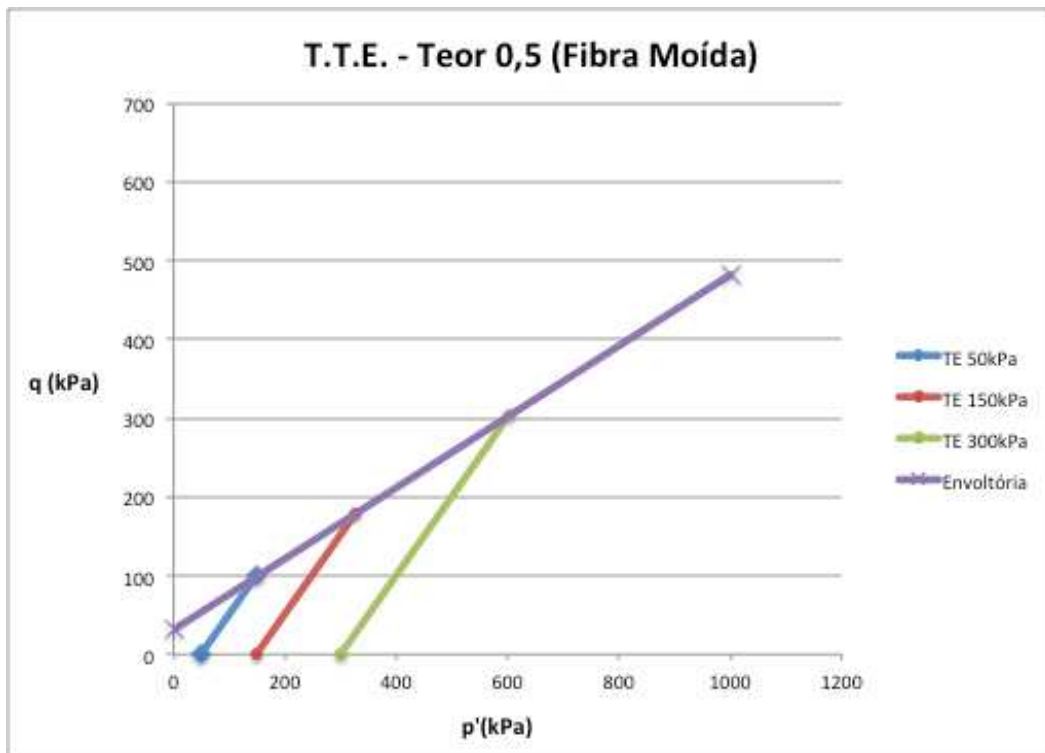


Figura 4.11 - Gráfico $p' \times q$ com envoltória do solo reforçado com 0,5% de fibra moída

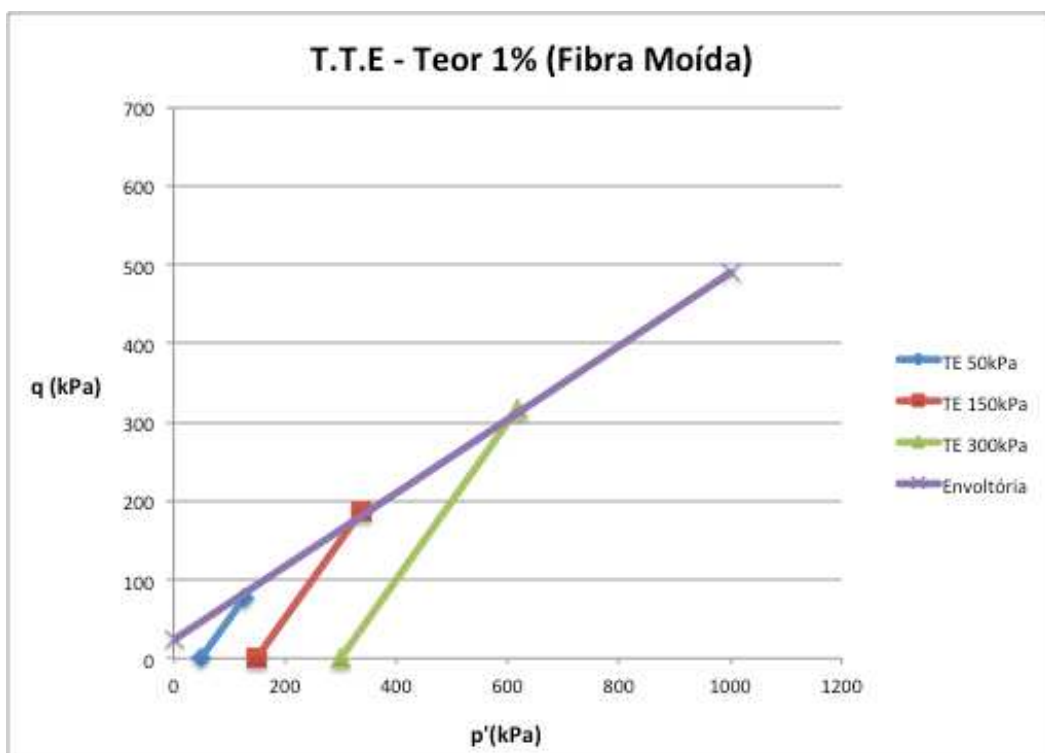


Figura 4.12 - Gráfico $p' \times q$ com envoltória do solo reforçado com 1,0% de fibra moída

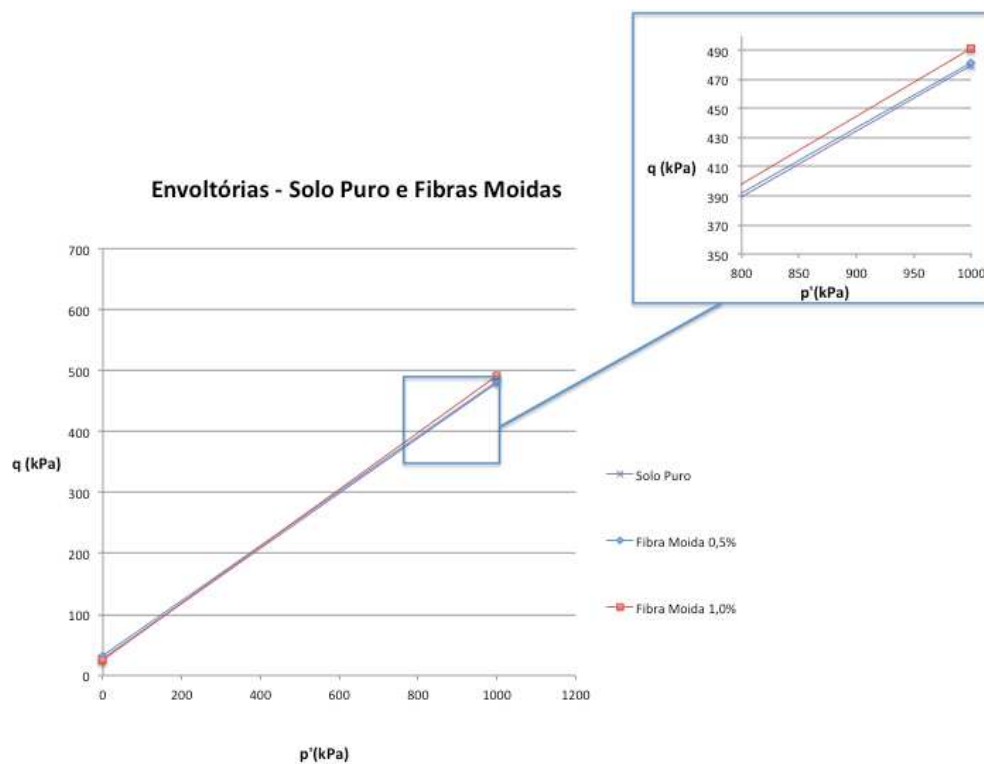


Figura 4.13 - Gráfico $p' \times q$ com envoltórias do solo do solo puro e misturas com fibra moída.

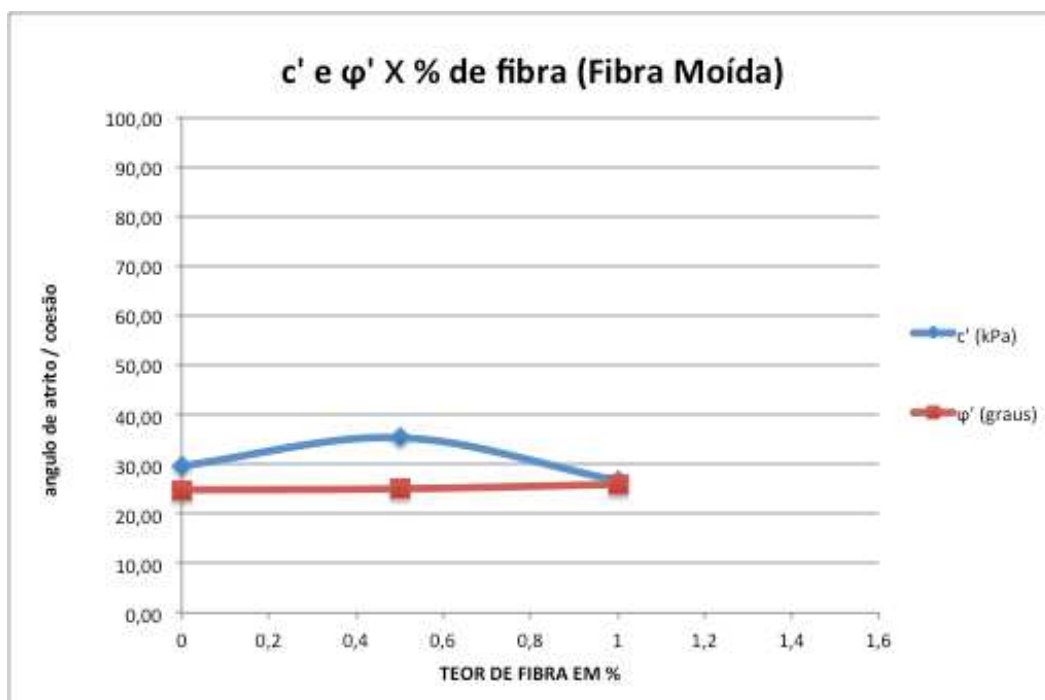


Figura 4.14 – Parâmetros de resistência das envoltórias para as misturas com fibra moída

Tabela 4.3 – Parâmetros de resistência das envoltórias para as misturas com fibra moída

Teor de Fibra (%)	c' (kPa)	ϕ' (graus)
0	27,66	25,32
0,5	35,31	25,01
1	26,68	25,91

As figuras 4.15, 4.17 e 4.19 apresentam curvas da tensão desviadora versus deformação axial, de misturas do solo com fibra cortada, confinadas nas tensões efetivas de 50kPa, 150kPa e 300kPa, respectivamente. As figuras 4.16, 4.18 e 4.20 apresentam curvas da variação volumétrica versus deformação axial, de misturas do solo com fibra cortada, confinadas nas tensões efetivas de 50kPa, 150kPa e 300kPa, respectivamente.

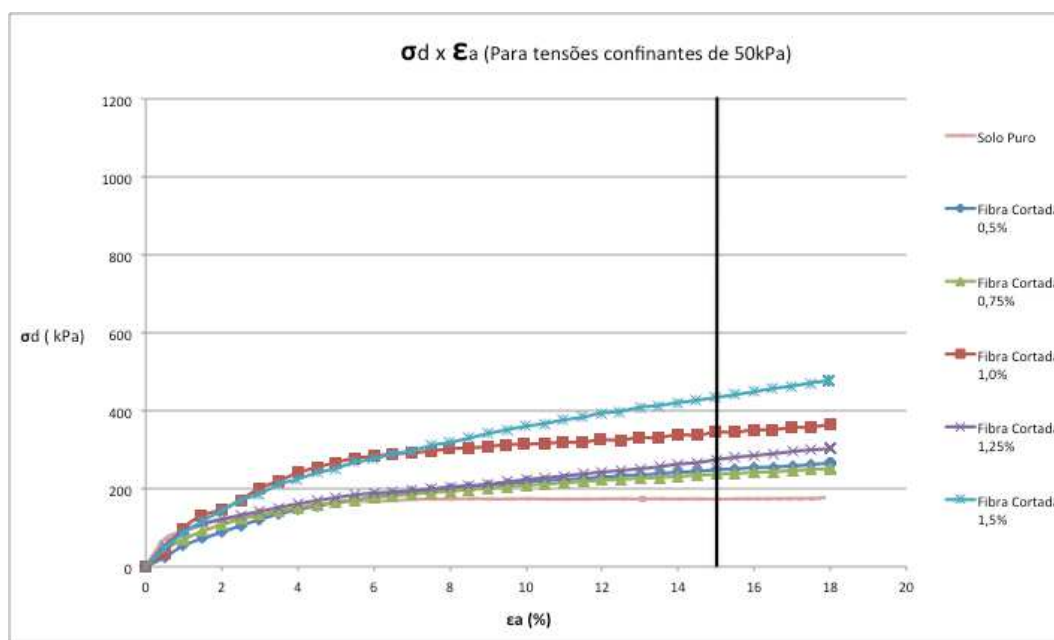


Figura 4.15 - Gráfico σ_d (kPa) x ϵ_a (%) para fibra cortada com tensão confinante de 50kPa

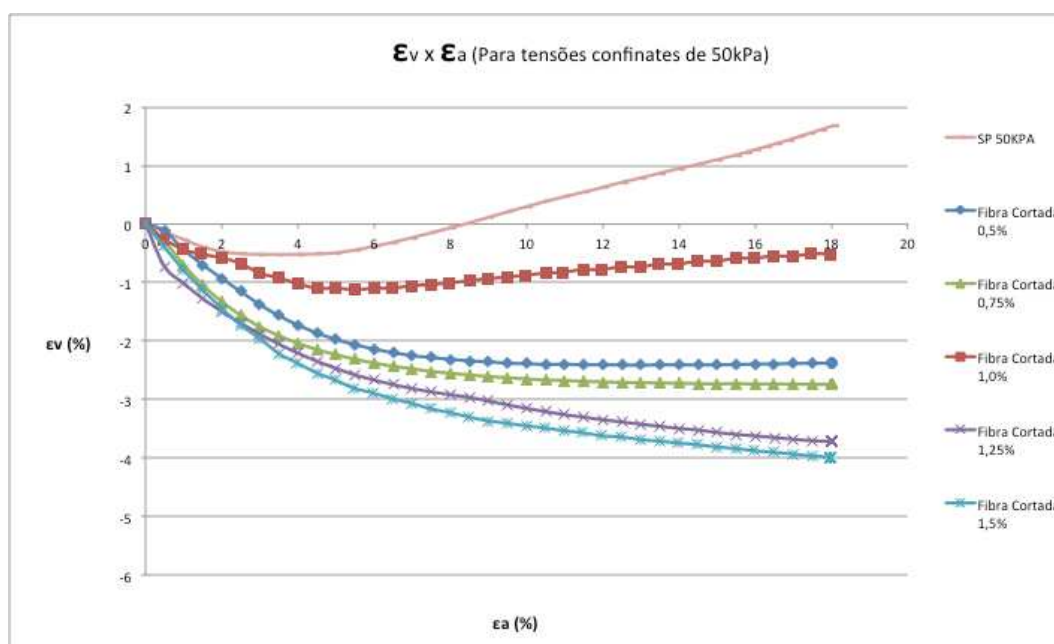


Figura 4.16 - Gráfico ϵ_v (%) x ϵ_a (%) para fibra cortada com tensão confinante de 50kPa

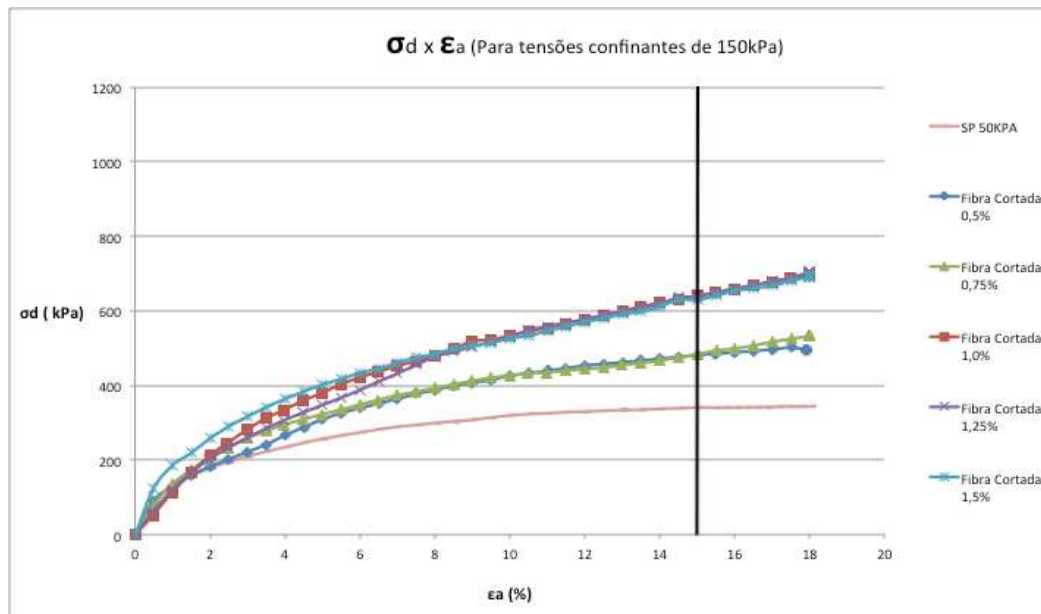


Figura 4.17 - Gráfico σ_d (kPa) x ϵ_a (%) para fibra cortada com tensão confinante de 150kPa

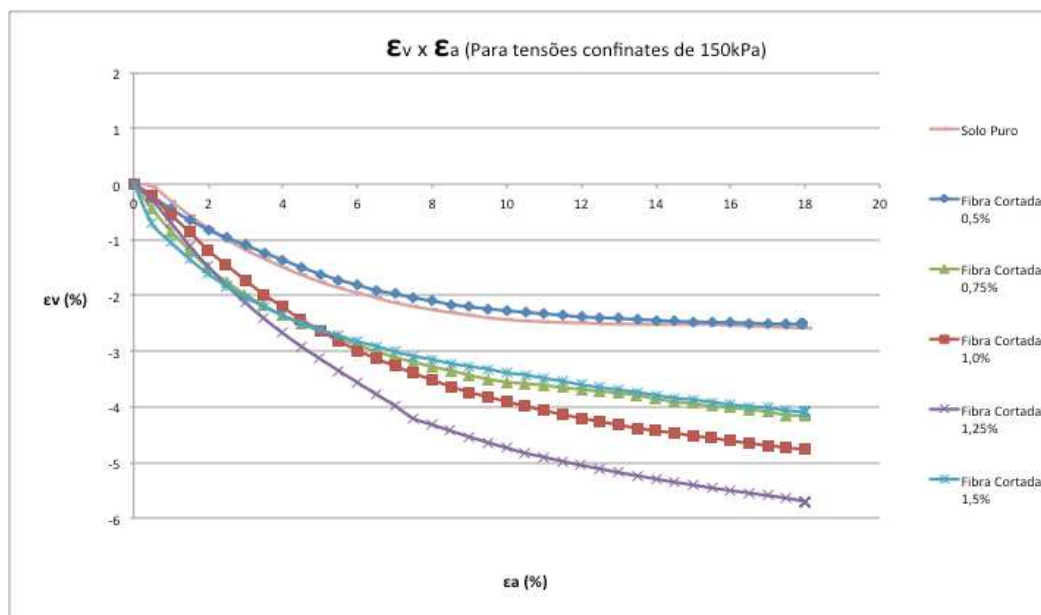


Figura 4.18 - Gráfico ϵ_v (%) x ϵ_a (%) para fibra cortada com tensão confinante de 150kPa

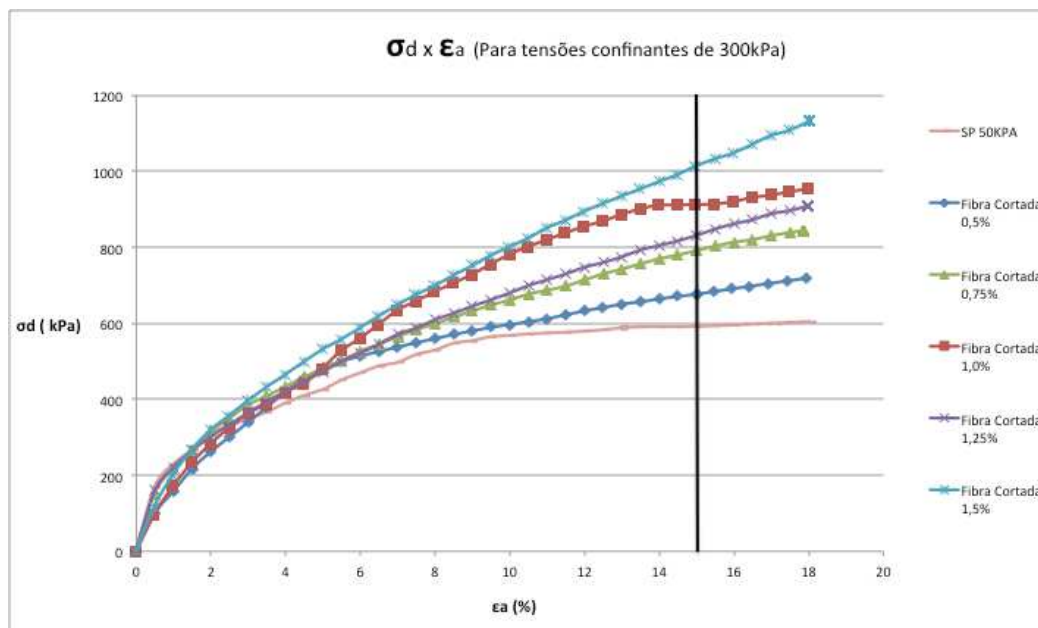


Figura 4.19 - Gráfico σ_d (kPa) x ϵ_a (%) para fibra cortada com tensão confinante de

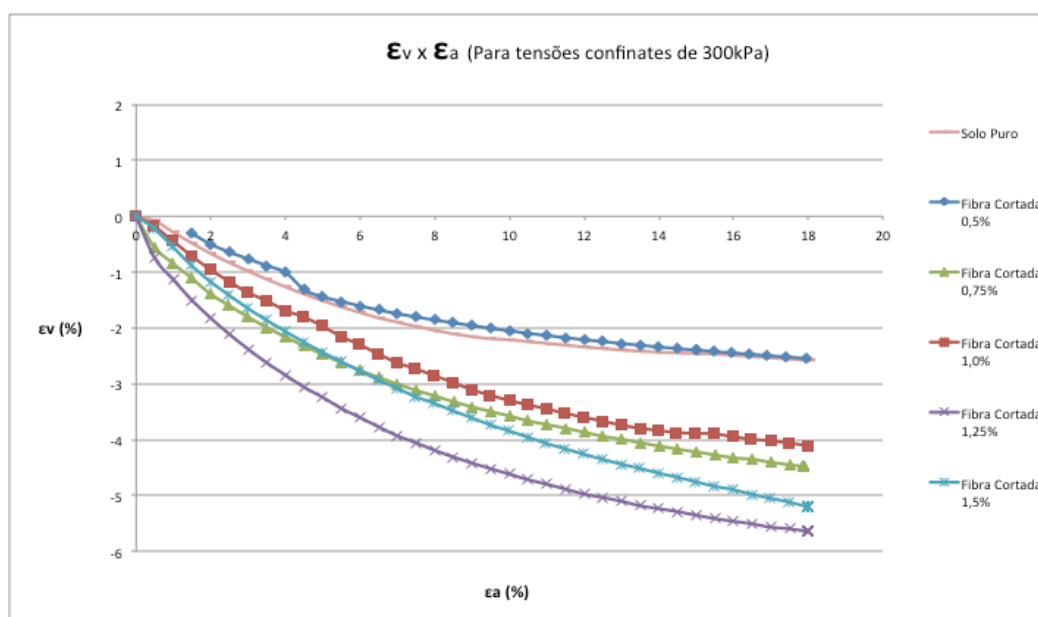


Figura 4.20 - Gráfico ϵ_v (%) x ϵ_a (%) para fibra cortada com tensão confinante de 300kPa

Pode-se observar no gráfico da figura 4.15 que até 1% de deformação, o solo puro e a mistura com 1,25% de teor de fibra apresentaram as maiores resistências, enquanto que a mistura com 0,5% de teor de fibra apresentou inicialmente a menor resistência. Aos 5% de deformação, a mistura com 0,5% de fibra superou a mistura com 0,75% de teor de fibra e o solo puro. Com 15% de deformação, que é a faixa arbitrada para se fazer a análise das curvas e estimar as

envoltórias de resistência, o solo puro apresentou a menor resistência enquanto que a mistura com 1,5% de teor de fibra (o teor máximo ensaiado) apresentou a maior resistência. A mistura com 1% de fibra apresentou um resultado superior a mistura com 1,25% e a mistura com 0,5% apresentou resistência um pouco maior que a mistura com 0,75%. Para as curvas dos ensaios com 150 kPa de tensão confinante, apresentadas no gráfico da figura 4.17, pode-se perceber que para 2% de deformação o solo puro não está entre as curva com maior resistência. Nesta fase do ensaio, é a mistura com 1,5% de teor de fibra que mais se destaca. Com 15% de deformação, as misturas com 1,5%, 1,25% e 1% de teor de fibra apresentam praticamente o mesmo valor de tensão desviadora. O Solo puro apresenta uma resistência bem inferior, enquanto que as misturas com 0,5% e 0,75% de teor de fibra apresentam valores de resistência similares e intermediários. Já para os gráficos com curvas confinadas com 300 kPa, apresentadas no gráfico da figura 4.19, para os 2% iniciais de deformação, observa-se que o solo puro e a mistura com 1,5% de teor de fibras apresentam resistência similares, contudo, após 15% de deformação o solo puro apresenta a menor resistência e a mistura com 1,5% de teor de fibra apresenta a maior resistência. Pode-se observar que com 15% de deformação, quanto maior o teor de fibras maior a resistência do solo, exceto, pelo fato da mistura com teor com 1% de fibra ter apresenta um desempenho superior a mistura com teor de 1,25%.

No gráfico da figura 4.16 é possível perceber que a curva do solo puro sofreu a menor contração volumétrica, que por volta dos 4% de deformação a amostra para de se contrair e então passa a expandir e, que por volta dos 8% de deformação o volume da amostra se iguala ao volume original (o que foi relatado mais acima na análise do gráfico da figura 4.5). As demais curvas, pertencentes às amostras reforçadas com fibra sofreram uma maior contração volumétrica. A amostra de solo reforçada com 1% de fibra, em especial, não contraiu tanto quanto as demais e inclusive, após 5% de deformação ela apresentou uma suave expansão volumétrica que persistiu até o final do cisalhamento. As amostras com 0,5% de teor de fibra e 0,75% de teor de fibra apresentaram curvas bem parecidas, a contração volumétrica foi mais pronunciada do que a da mistura com 1% de fibra e, além disso, não houve expansão. Com aproximadamente 10% de deformação, esses corpos de prova pararam de se contrair e seus volumes permaneceram constantes até o fim do ensaio. Já as amostras com 1,25% e 1,5% de teor de fibra

foram as que apresentaram a maior contração volumétrica e, sobretudo, seguiram se contraindo até o final do ensaio. No gráfico da figura 4.18 nota-se que o comportamento da mistura com 0,5% de teor de fibra foi praticamente idêntico ao do solo puro, sendo essas duas curvas as que apresentaram a menor variação volumétrica. Essas curvas apresentaram uma contração volumétrica, de forma mais abrupta no começo do ensaio e diminuindo esta tendência gradativamente até que com cerca de 12% de deformação axial, o volume de ambas as amostras parou de variar. As demais curvas também apresentaram contração volumétrica, de forma mais intensa no começo do ensaio e tendendo a estabilidade, porém, mesmo no fim do ensaio, com cerca de 18% de deformação axial, ainda apresentavam uma pequena taxa de contração. Da mesma forma, no gráfico da figura 4.20, o solo puro e a mistura com 0,5% de teor de fibra foram as curvas que apresentaram a menor contração, seguida das curvas dos ensaios com 0,75% e 1% de teor de fibra e por fim, das curvas com 1,25% e 1,5% de teor de fibra, que foram as que apresentaram a maior contração volumétrica. Para as curvas deste gráfico, confinadas com 300 kPa, até o final do ensaio todas as amostras apresentavam uma pequena taxa de contração.

Com respeito às envoltórias de resistência obtida a partir das trajetórias de tensões, e dos parâmetros de resistência do solo obtidos das envoltórias de resistência das misturas com fibras de coco cortadas, apresentados nas figuras 4.22, 4.23, 4.24, 4.25 e 4.26, com teores de fibra de 0,5%, 0,75%, 1,0%, 1,25% e 1,5% respectivamente, viu-se que o ângulo de atrito variou de forma crescente e discreta, tendo o solo puro um valor de $25,17^\circ$ enquanto que o teor com 1,5% de fibra apresentou o valor de $31,03^\circ$. A coesão não apresentou um comportamento linear, a mistura com teor de 1% de fibra foi superior à mistura com 1,25% enquanto a mistura com 0,5% de fibra foi superior à mistura com 0,75%. Contudo, o solo puro apresentou o menor valor, 29,83kPa enquanto a mistura com o teor de 1,5% de fibras apresentou o melhor resultado, com uma coesão de 87,53kPa. Os resultados e as variações do ângulo de atrito e da coesão para estes ensaios podem ser vistos na tabela 4.4 e no gráfico da figura 4.28. É importante ressaltar que compósitos fibrosos como esses geram muitas vezes envoltórias curvilíneas. Contudo, para que se possa chegar aos parâmetros de resistência do solo, aproximamos essas envoltórias para retas.

A figura 4.21 apresenta o gráfico da envoltória obtida para o solo puro, é o mesmo gráfico exibido na figura 4.10.

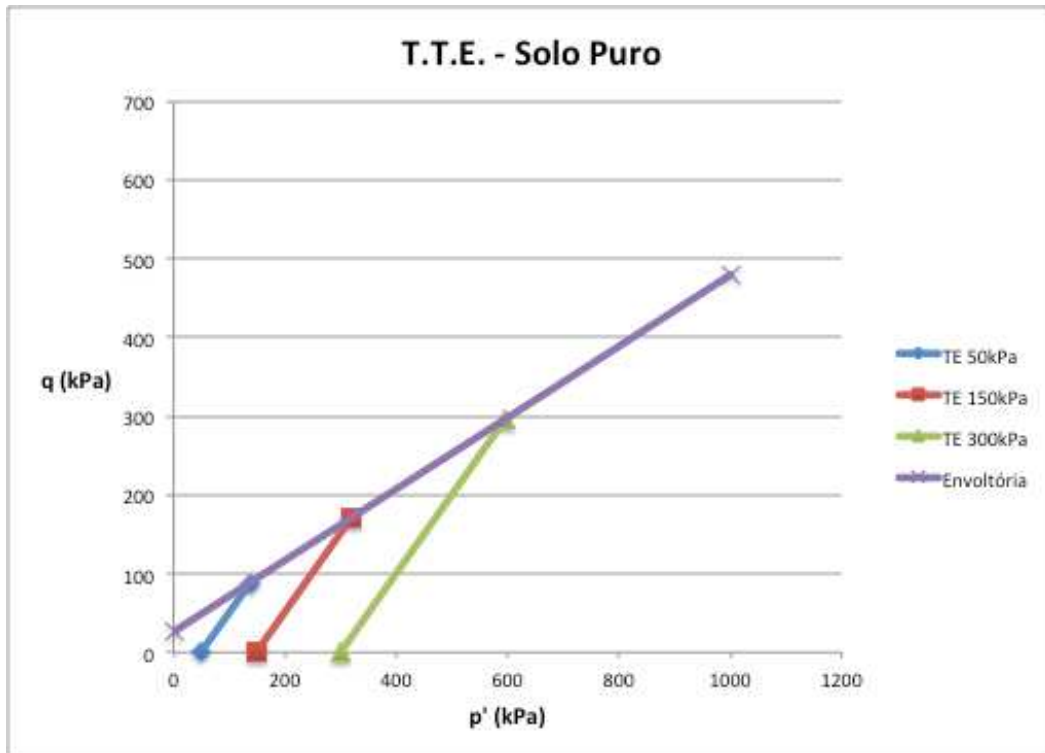


Figura 4.21 - Gráfico $p' \times q$ com envoltória do solo puro

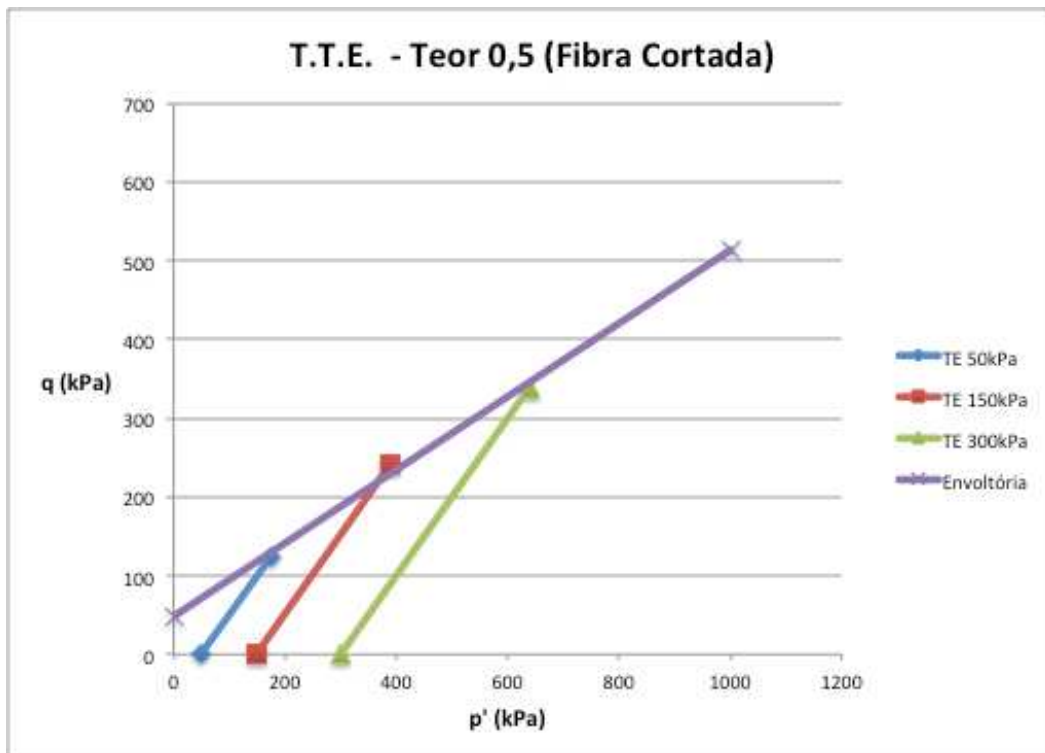


Figura 4.22 - Gráfico $p' \times q$ com envoltória do solo reforçado com 0,5% de fibra cortada

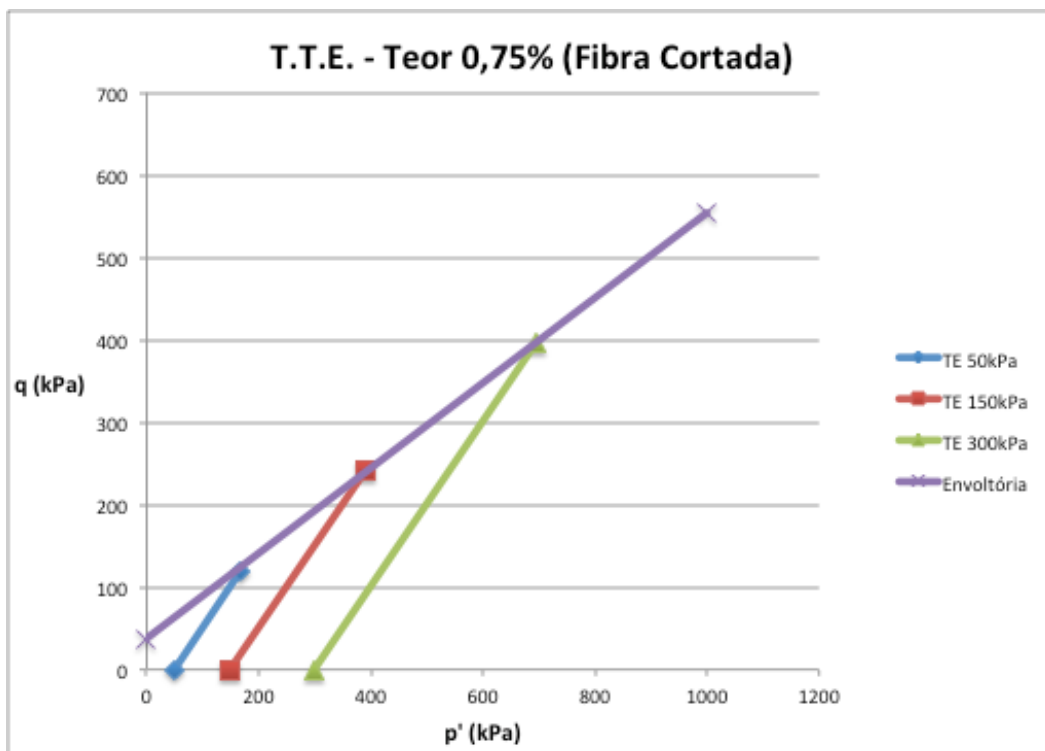


Figura 4.23 - Gráfico $p' \times q$ com envoltória do solo reforçado com 0,75% de fibra cortada

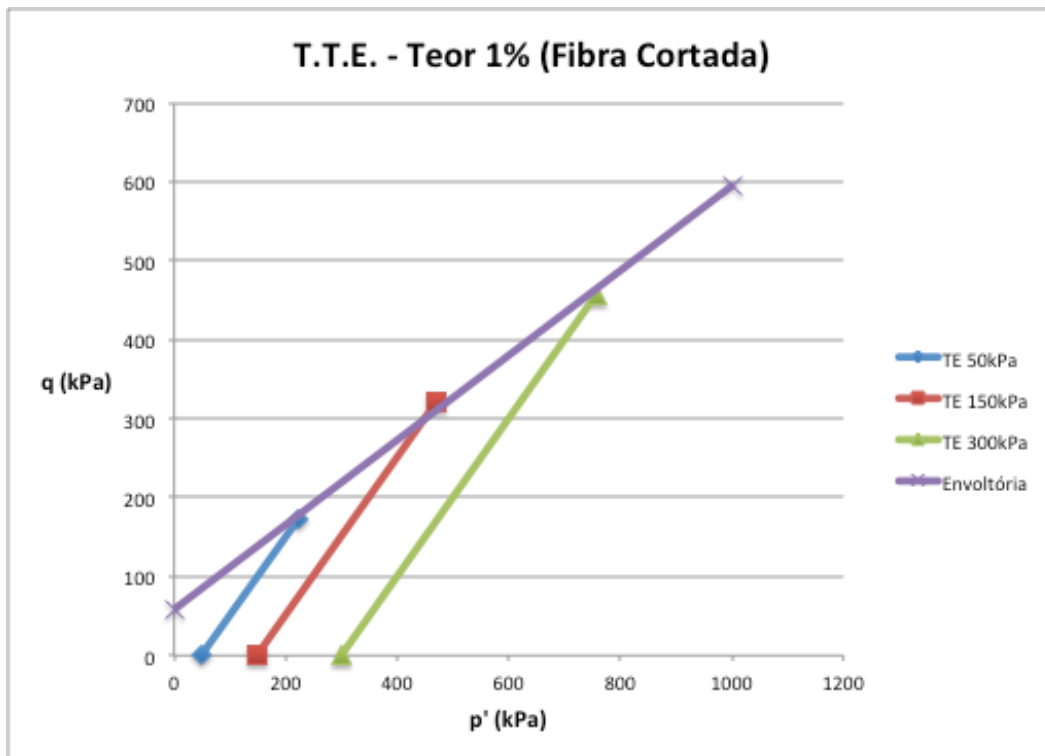


Figura 4.24 - Gráfico p' x q com envoltória do solo reforçado com 1,0% de fibra cortada

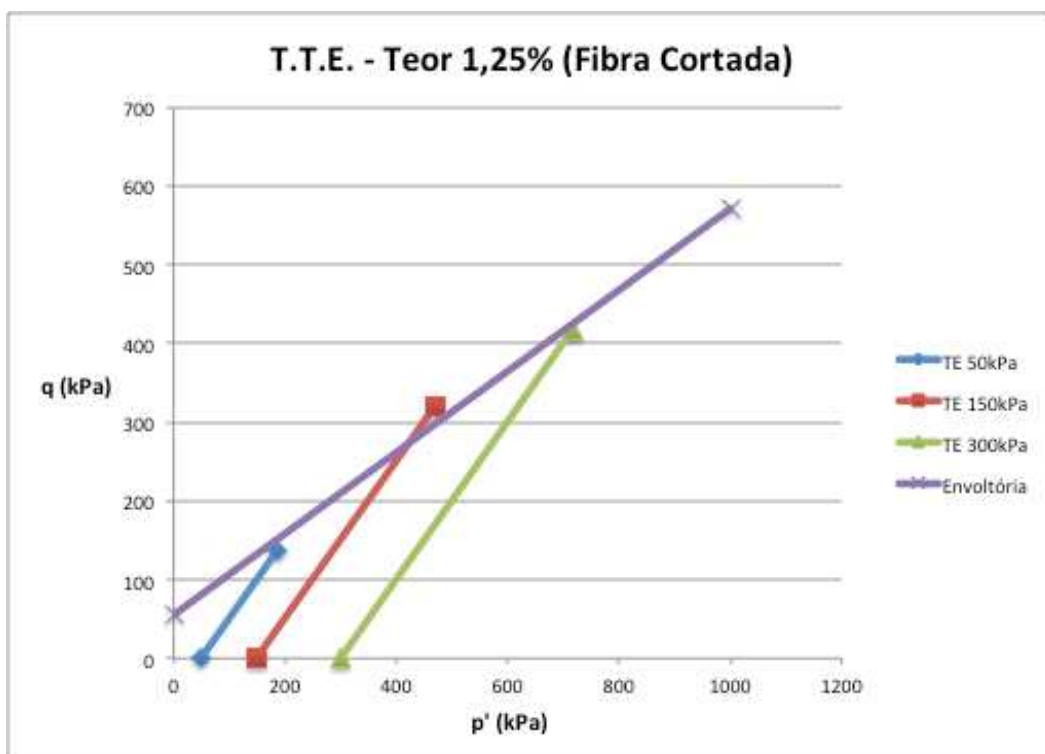


Figura 4.25 - Gráfico p' x q com envoltória do solo reforçado com 1,25% de fibra cortada

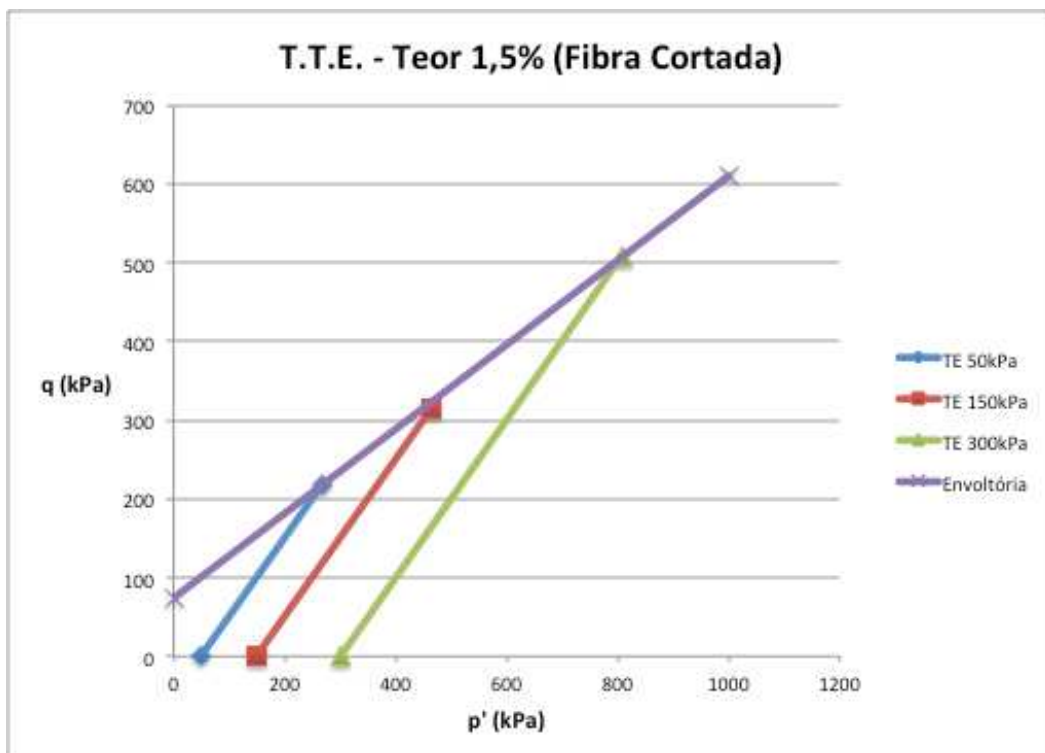


Figura 4.26 - Gráfico $p' \times q$ com envoltória do solo reforçado com 1,5% de fibra cortada

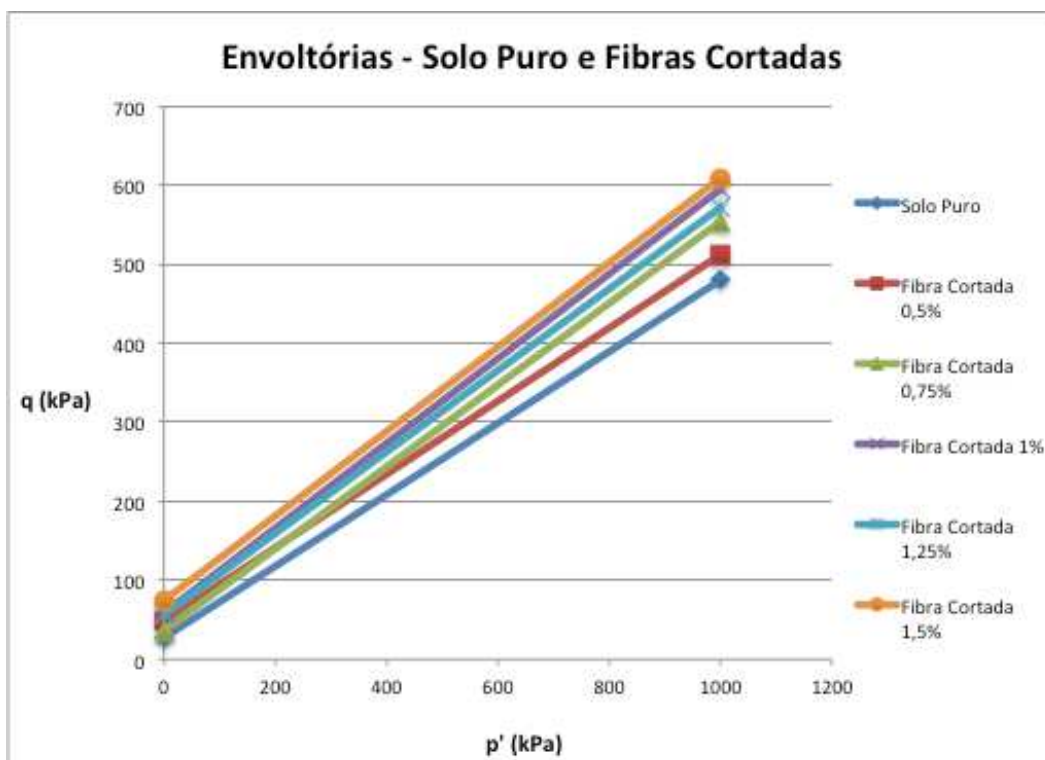


Figura 4.27 - Gráfico $p' \times q$ com envoltórias do solo do solo puro e misturas com fibra cortada

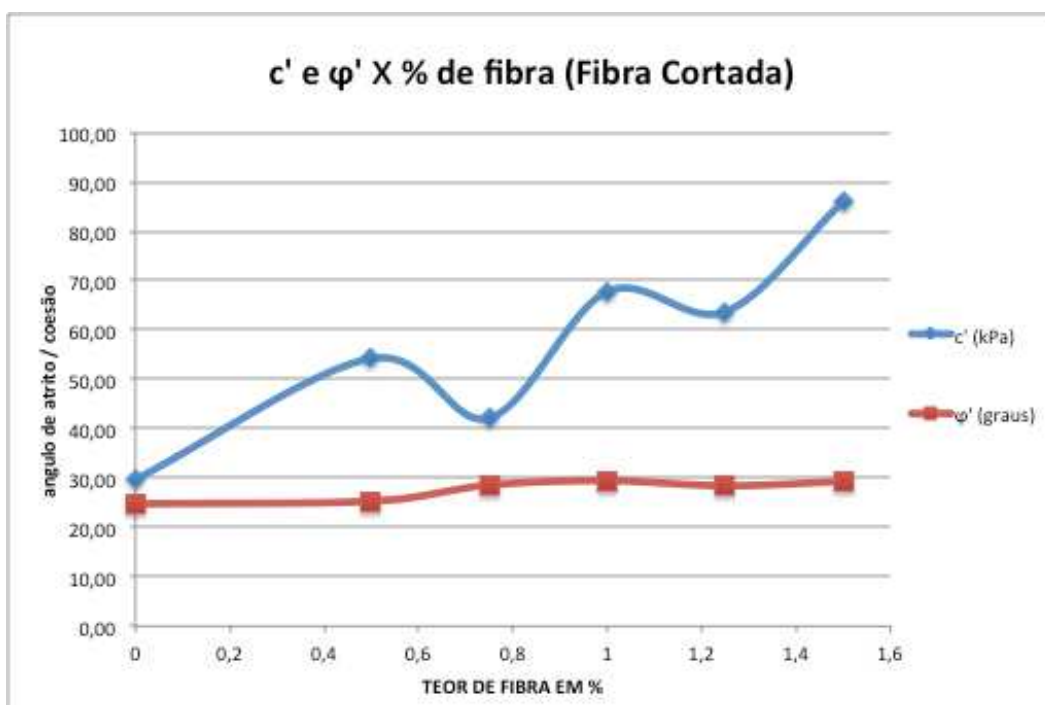


Figura 4.28 – Parâmetros de resistência das envoltórias para as misturas com fibra cortada

Tabela 4.4 – Parâmetros de resistência das envoltórias para as misturas com fibra cortada

Teor de Fibra (%)	c' (kPa)	ϕ' (graus)
0	29,83	25,17
0,5	54,37	25,69
0,75	42,1	28,48
1	67,77	29,47
1,25	63,69	28,45
1,5	86,08	29,39

A figura 4.29 exhibe as fases de cisalhamento de um ensaio triaxial com corpo-de-prova feito com fibra moída e de um ensaio com corpo-de-prova feito com fibra cortada.



Figura 4.29 - mostra corpos de prova cisalhados com a fibra moída e com cada um dos teores das fibras cortadas.

A figura 4.30 mostra um corpo de prova com fibra moída cisalhado, além de um corpo de prova com fibra cortada, para cada um dos 5 teores ensaiados.

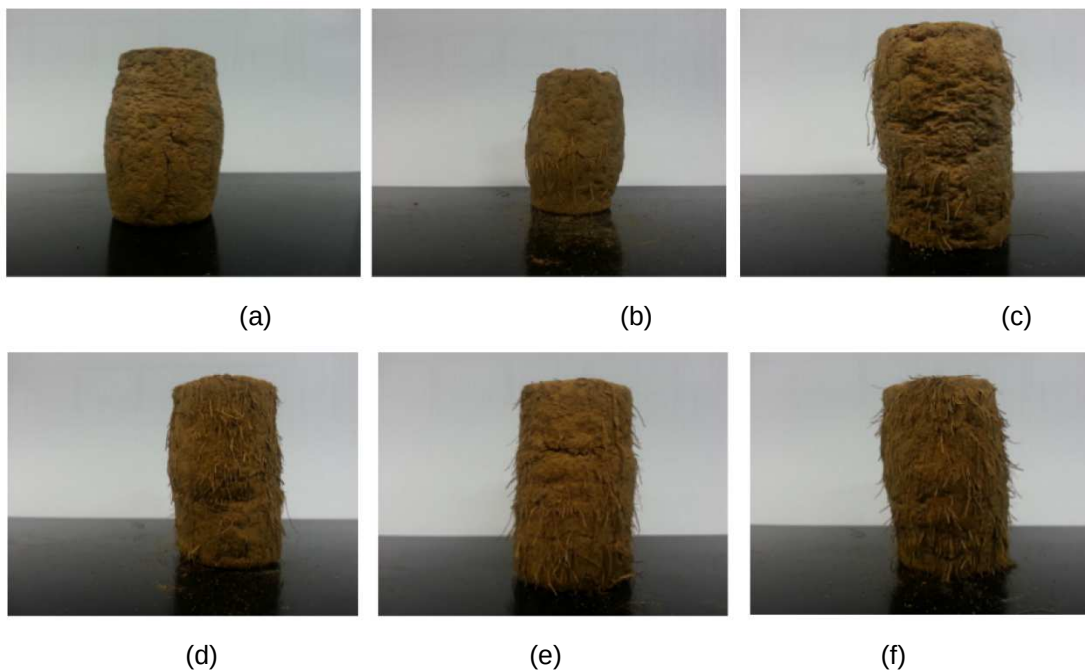


Figura 4.30 – Corpos de prova cisalhados; (a) com fibra moída; (b) com 0,5% de fibra cortada; (c) com 0,75% de fibra cortada; (d) com 1,0% de fibra cortada; (e) com 1,25% de fibra cortada; (f) com 1,5% de fibra cortada.

Com a finalidade de se entender a influência da variação da tensão efetiva no funcionamento da relação solo/fibra, fez-se uma análise averiguando em quantos por cento as tensões desviadoras (obtidas para 15% de deformação) das misturas solo/fibra são maiores do que a tensão desviadora para o solo puro, sendo esta análise feita para cada uma das 3 tensões efetivas estudadas. Por exemplo, considerando o ensaio com tensão efetiva de 50 kPa e mistura com 0,5% de teor de fibra, foi obtido um valor de 265,9 kPa na tensão desviadora. Esse valor pode ser visto na tabela 4.5, que apresenta o valor das tensões desviadoras de todos os ensaios com fibra cortada, no instante em que a deformação axial era de 15%. Para essa mesma deformação, o valor da tensão desviadora para o solo puro foi de 173,6 kPa. A tensão desviadora obtida na mistura com 0,5% de fibra é, portanto, 53,1% maior do que a tensão obtida no solo puro. Este é o valor, em porcentagem, que foi utilizado no gráfico da figura 4.31 e que também pode ser visto na tabela 4.6. Para a mistura com teor de 0,75% de fibra, por exemplo, também para 50 kPa de tensão efetiva, o valor da tensão desviadora para 15% de deformação foi de 251,3 kPa, ou seja, 44,7% maior do que o valor obtido para o solo puro, que é de 173,6 kPa.

Tabela 4.5 – Tensões desviadoras para 15% de deformação axial (em kPa)

	Teor de fibra ensaiado					
Confinamento	0%	0,50%	0,75%	1,00%	1,25%	1,50%
50kpa	173,6	265,9	251,3	365,6	302,6	475,5
150kpa	331,7	496	532,2	696,3	704,9	691,2
300kpa	605,1	676,9	843,9	955,1	909,5	1131,4

Tabela 4.6 – Porcentagem de incremento no valor da tensão desviadora dos compósitos com fibra cortada, com respeito ao solo puro (em %)

	Teor de fibra ensaiado					
Confinamento	0%	0,50%	0,75%	1,00%	1,25%	1,50%
50kpa	0	53,1	44,7	110,5	74,3	173,9
150kpa	0	49,5	60,4	109,9	112,5	108,4
300kpa	0	11,9	39,5	57,8	50,3	87

Sobre essa análise, pode-se observar uma alternância entre as curvas para tensões efetivas de 50 kPa e 150 kPa. Entretanto, pode-se perceber que a curva referente aos ensaios com 300 kPa se situa constantemente abaixo das outras duas

curvas, o que sugere que o ganho de resistência conferido pela introdução da fibra de coco é proporcionalmente menor para os ensaios tensões efetivas maiores.

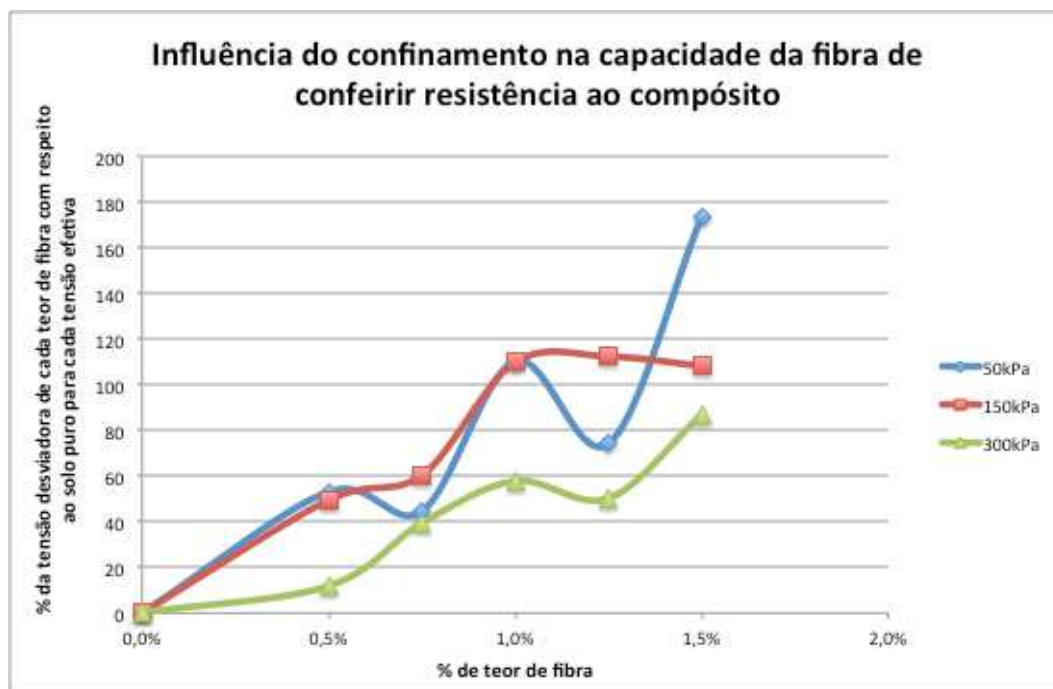


Figura 4.31 – Influência do confinamento na capacidade da fibra de conferir resistência ao compósito

Casagrande (2005) estudou o comportamento mecânico de camadas de um solo residual areno-siltoso reforçado com a adição de fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente na massa de solo, sob carregamento estático. Realizou ensaios triaxiais adensados drenados a fim de se estudar o comportamento do solo residual e de misturas solo-fibra em termos de tensão-deformação-resistência.

Assim como foi demonstrado nos resultados dessa pesquisa, concluiu que a adição de fibras de polipropileno provocou um grande aumento na coesão do material, mantendo seu ângulo de atrito praticamente inalterado. Segundo a autora, as fibras proporcionam um emaranhado que envolve e “vincula” os grãos do solo, promovendo um efeito de ancoragem que se traduz no aumento da coesão do solo residual. O gráfico da figura 4.28 é coerente com esta observação.

Também concluiu que o aumento do teor de fibra no solo aumenta a sua resistência. Verificou que cada curva apresenta uma taxa de acréscimo de tensão de desvio própria, deixando em aberto a discussão sobre a tendência dessa taxa

para mesmos teores de fibra com a variação da tensão confinante. O gráfico da figura 4.27 também mostra que existe um aumento de resistência entre as amostras reforçadas com a fibra de coco, em relação à amostra de solo puro.

Com relação à deformação volumétrica, verificou que o comportamento inicial foi de contração para todos os teores estudados, sendo esse comportamento mais acentuado para maiores teores de fibra. O mesmo pode se observar ao analisar os gráficos das figuras 4.16, 4.18 e 4.20.

Essas comparações sugerem que a fibra de coco confere ao compósito, propriedades similares às que outras fibras sintéticas, como a de polipropileno, estudada há mais tempo, também conferem.